

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DO PARANÁ
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial

TESE

apresentada ao CEFET-PR
para obtenção do título de

DOUTOR EM CIÊNCIAS

por

JEAN CARLOS CARDOZO DA SILVA

**MONITORAÇÃO DE VIBRAÇÕES DE ESTRUTURAS COM O EMPREGO DE
SENSORES EM FIBRA ÓTICA**

Banca examinadora:

Orientador:

Prof. Dr. HYPOLITO JOSÉ KALINOWSKI

CEFET/PR

Examinadores:

Prof. Dr. LUIZ CARLOS SCAVARDA DO CARMO

PUC-RIO

Prof. Dr. EDILSON SÉRGIO SILVEIRA

UFPR

Prof^a. Dr. ELISABETH PENNER

CEFET/PR

Prof. Dr. JOSÉ LUÍS FABRIS

CEFET/PR

Curitiba, 28 de Janeiro de 2005.

JEAN CARLOS CARDOZO DA SILVA

**MONITORAÇÃO DE VIBRAÇÕES DE ESTRUTURAS COM O
EMPREGO DE SENSORES EM FIBRA ÓTICA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial do Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná como requisito parcial para a obtenção do título de "Doutor em Ciências" - Área de Concentração: Informática Industrial.

Orientador: Prof. Dr. Hypolito José Kalinowski

Curitiba

2005

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do CEFET-PR – Unidade Curitiba

S586m Silva, Jean Carlos Cardozo da
Monitoração de vibrações de estruturas com o emprego de sensores em fibra
ótica / Jean Carlos Cardozo da Silva. – Curitiba : [s.n.], 2005.
xvi, 171 f. : il. ; 30 cm

Orientador : Prof. Dr. Hypolito José Kalinowski
Tese (Doutorado) – CEFET-PR. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica e Informática Industrial. Curitiba, 2005.
Bibliografia : f. 157-71

1. Fibras óticas. 2. Grades de Bragg. 3. Detectores óticos. 4. Implantações
dentárias. 5. Dinâmica estrutural. 6. Vibração. 7. Análise modal. I. Kalinowski,
Hypolito José, orient. II. Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná. Cur-
so de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. III. Título.

CDD : 621.3692
CDU : 681.7.068

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Lauri e Hildegard,
minha irmã, Jane, e em especial minha esposa, Daniella.

AGRADECIMENTOS

Neste espaço gostaria de deixar os meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para que este trabalho se tornasse possível.

À CAPES, pela concessão de bolsa e apoio financeiro a este projeto.

Ao professor Dr. Hypolito José Kalinowski pela orientação e confiança em mim depositada.

Aos colegas do Grupo de Dispositivos Fotônicos e Aplicações e em especial ao meu companheiro de muitas horas de laboratório e discussões, Cícero Martelli.

Aos Professores e funcionários do CEFET/PR pela amizade e apoio.

Aos professores Professora Dr. Elisabeth Penner e Professor Dr. Paulo José Abatti, pelas discussões técnicas e sugestões.

Aos muitos amigos que encontrei na Universidade de Aveiro em Portugal durante o ano referente ao meu estágio de doutorado, para os quais gostaria de destacar, Prof. Dr. João Lemos Pinto, Rogério Nogueira, Lídia Carvalho, Prof. Dr. Simões, Ilídio Pinto, Berta, Paulo André, Prof. Dr. Paulo Lopes, Mayra, e aos funcionários do Departamento de Física e Instituto de Telecomunicações pela amizade e apoio.

Aos meus pais, Lauri e Hildegard, minha irmã, Jane, que sempre me incentivaram e deram força nas horas difíceis.

Em especial a minha esposa, Daniella, pelo apoio, compreensão e dedicação durante estes momentos que consideramos muito importantes em nossas vidas.

E finalmente um agradecimento aos amigos e familiares que sempre me encorajaram ao longo deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	VII
LISTA DE TABELAS.....	XII
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	XIII
RESUMO	XV
ABSTRACT	XVI
CAPÍTULO 1.....	1
INTRODUÇÃO	1
1.1. PERSPECTIVA HISTÓRICA.....	3
1.2. OBJETIVO E DESCRIÇÃO DA TESE.....	7
CAPÍTULO 2.....	11
REDES DE BRAGG EM FIBRAS ÓTICAS	11
2.1. FOTOSSENSIBILIDADE.....	12
2.1.1. AUMENTO DA FOTOSSENSIBILIDADE.....	15
2.1.2. HIDROGENAÇÃO	17
2.2. TIPOS DE REDES DE BRAGG.....	20
2.3. PROPRIEDADES DAS REDES DE BRAGG.....	24
2.3.1. COMPRIMENTO DE ONDA DE BRAGG	26
2.3.2. REFLETIVIDADE EM REDES DE BRAGG.....	28

2.3.3.	SENSIBILIDADE DAS REDES DE BRAGG COM DEFORMAÇÃO E TEMPERATURA	31
2.4.	GRAVAÇÃO DE REDES DE BRAGG	33
2.4.1.	MÁSCARA DE FASE	34
2.4.2.	INTERFERÔMETRO COM MÁSCARA DE FASE	36
2.4.3.	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	42
2.4.4.	REDES GRAVADAS EM FIBRAS COM ALTA DOPAGEM DE GERMÂNIO	50
CAPÍTULO 3.....		55
SISTEMA DE MONITORAÇÃO BASEADO EM REDES DE BRAGG		55
3.2.	CASOS PARTICULARES DE DEMODULAÇÃO EM INTENSIDADE.....	56
3.2.1.	FILTRO DE REFERÊNCIA.....	56
3.2.2.	DEMODULAÇÃO POR LEITURA COM DOIS COMPRIMENTOS DE ONDA	58
3.2.3.	FONTE ÓTICA SINTONIZÁVEL	59
3.2.4.	SISTEMA DE DEMODULAÇÃO UTILIZANDO DOIS FILTROS FIXOS.....	60
3.3.	SISTEMA DE LEITURA DE REDES DE BRAGG PARA MEDIDAS ESTÁTICAS E	
DINÂMICAS		61
3.3.1.	SISTEMA DE SINTONIA PARA REDE DE REFERÊNCIA	65
3.3.2.	CIRCUITO ELETRÔNICO DE DEMODULAÇÃO	69
3.3.3.	CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA DE DEMODULAÇÃO	71
3.3.4.	ENCAPSULAMENTO TÉRMICO DO SENSOR.....	74
CAPÍTULO 4.....		77
VIBRAÇÕES EM ESTRUTURAS		77
4.1.	ENSAIOS DINÂMICOS DE ESTRUTURAS	78
4.2.	TIPOS DE ENSAIOS.....	79
4.2.1.	ENSAIOS DE VIBRAÇÃO AMBIENTE	79
4.2.2.	ENSAIOS DE VIBRAÇÃO FORÇADA.....	80

4.2.3.	ENSAIOS DE IMPACTO	80
4.2.4.	REPRESENTAÇÃO DA RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DE UM SISTEMA	81
4.3.	ANÁLISE DE VIBRAÇÕES LIVRES COM UM GRAU DE LIBERDADE.....	84
4.4.	ESTUDO DE VIBRAÇÕES EM ESTRUTURAS COM REDES DE BRAGG	90
4.4.1.	MEDIDAS DE VIBRAÇÃO EM UMA BARRA METÁLICA	90
4.4.2.	MEDIDAS DE VIBRAÇÃO EM VIGAS DE MADEIRA LAMINADA COLADA (MLC)	94
4.4.3.	MEDIDAS DE VIBRAÇÃO EM VIGA DE CONCRETO	101
4.4.4.	EFEITO DA TEMPERATURA NA DEGRADAÇÃO DO CONCRETO ARMADO	104
CAPÍTULO 5		109
APLICAÇÃO DE REDES DE BRAGG EM ESTUDOS COM IMPLANTES DENTÁRIOS		109
5.1.	CARACTERÍSTICAS DOS IMPLANTES DENTÁRIOS.....	109
5.1.1.	MODELO NUMÉRICO DO COMPORTAMENTO DO LIGAMENTO PERIODONTAL	115
5.1.2.	SIMULAÇÃO DO LIGAMENTO PERIODONTAL POR MEF.....	118
5.2.	APLICAÇÃO DE REDES DE BRAGG EM ESTUDOS DE IMPLANTES DENTÁRIOS	
	121	
5.2.1.	ENSAIOS ESTÁTICOS	121
CAPÍTULO 6		131
CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS		131
6.1.	PROJETOS FUTUROS	135
ANEXOS		139
VIBRAÇÕES EM LINHAS DE TRANSMISSÃO		142
	AMORTECIMENTO PRÓPRIO DO CONDUTOR.....	146
	PROCEDIMENTOS DE MEDIDAS	147

RECOMENDAÇÃO PARA INSTRUMENTOS DE MEDIDAS	147
SISTEMA PARA MEDIDAS DE VIBRAÇÃO UTILIZANDO REDES DE BRAGG	148
PUBLICAÇÕES RESULTANTES DESTA TESE.....	153
• PERIÓDICOS.....	153
• TRABALHOS EM CONFERÊNCIAS	154
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	157

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Experimento de K. O. Hill para produção e medidas dos filtros a fibra	4
Figura 1.2 Curva de crescimento em função do tempo para uma rede de Bragg pelo método de gravação interno	5
Figura 2.1 Defeitos presentes em fibras óticas dopadas com <i>Ge</i>	14
Figura 2.2 Concentração de hidrogênio em função do tempo	19
Figura 2.3 Representação esquemática do princípio de operação das redes de Bragg apodizadas, com supressão dos lóbulos laterais	26
Figura 2.4 Representação da rede de Bragg e espectros associados	27
Figura 2.5 Espectros de refletividade de uma rede de Bragg uniforme	30
Figura 2.6 Máscara de fase com representação do feixe UV incidente.....	35
Figura 2.7 Esquema da montagem utilizada para gravação de redes de Bragg pelo método interferométrico com máscara de fase	37
Figura 2.8 Espectro da primeira rede gravada no CEFET/PR	39
Figura 2.9 Pontos experimentais e simulação numérica da dependência do comprimento de onda de Bragg versus os ângulos dos espelhos	40
Figura 2.10 Crescimento de uma rede de Bragg gravada pelo método interferométrico do sistema de gravação da UA	43
Figura 2.11 Crescimento de uma rede de Bragg gravada pelo método interferométrico do sistema de gravação do CEFET/PR	44
Figura 2.12 Crescimento de uma rede de Bragg gravada pelo método de máscara de fase com estágio de translação	48

Figura 2.13 Espectros de reflexão de três redes de Bragg gravadas por diferentes métodos de gravação	49
Figura 2.14 Crescimento de uma rede de Bragg gravada pelo método interferométrico com alta dopagem de germânio	51
Figura 2.15 Variação do comprimento de onda de Bragg em função da deformação e temperatura para rede em fibra SMF	52
Figura 2.16 Variação do comprimento de onda de Bragg em função da deformação e temperatura para rede em fibra com alta dopagem de germânio	53
Figura 2.17 Evolução da refletividade para redes gravadas em diferentes tipos de fibra com o aumento da temperatura	53
Figura 3.1 Sistema de leitura utilizando filtro fixo ou ajustável	57
Figura 3.2 Sistema de demodulação de redes de Bragg baseado em acopladores seletivos de comprimento de onda	58
Figura 3.3 Função de transferência de um acoplador WDM	59
Figura 3.4 Circuito ótico utilizando fonte ótica ajustável	60
Figura 3.5 Sistema de demodulação baseado em dois filtros fixos	60
Figura 3.6 Circuito ótico para leitura de redes de Bragg.....	62
Figura 3.7 Representação dos espectros do sistema de leitura das redes de referência (filtro) e sensora	64
Figura 3.8 Resposta do sistema para diferentes temperaturas da rede sensora e ajuste linear da região de operação do sistema	64
Figura 3.9 Sistema de sintonia de redes de Bragg	65
Figura 3.10 Variação do comprimento de onda de Bragg em função da temperatura para redes coladas sobre diferentes substratos	67

Figura 3.11 Malha de controle e operação do sistema de monitoramento por filtro casado	68
Figura 3.12 Espectro de transmissão do filtro ajustável JDS Fitel.....	69
Figura 3.13 Esquemático do circuito eletrônico de detecção do sinal ótico de redes de Bragg.....	71
Figura 3.14 Sinais monitorados em PH1, PH2 e na saída do divisor com a inserção de atenuação no sinal ótico	72
Figura 3.15 Resultados numéricos e experimentais relativos a caracterização do sistema de demodulação empregando filtro JDS	74
Figura 3.16 Resultado experimental para região linear do sistema de demodulação com coeficiente linear e de correlação	74
Figura 3.17 Desenho esquemático do encapsulamento desenvolvido para a ponta de prova do sistema sensor	75
Figura 4.1 Resposta à vibrações livres com amortecimento	82
Figura 4.2 Resposta em frequência de uma viga em balanço ilustrando as frequências f_1, f_2 e f_n	83
Figura 4.3 Representação de um elemento de viga e suas componentes.....	84
Figura 4.4 Representação de três primeiros modos de uma viga em balanço.....	89
Figura 4.5 Processo de colagem da rede de Bragg na superfície da estrutura.....	91
Figura 4.6 Resposta no domínio do tempo referente a um impulso aplicado a uma barra metálica, medida com os dois sensores, FBG e EER	92
Figura 4.7 Resposta dos sensores à excitação ressonante da barra metálica.....	93
Figura 4.8 Resposta espectral dos sensores na situação de ressonância	93
Figura 4.9 Esquema geral de uma peça de MLC.....	94

Figura 4.10 Arranjo de ensaio e instrumentação da viga.....	95
Figura 4.11 Séries temporais das respostas a um impulso padrão analisado pela FBG, acelerômetro e EER.....	97
Figura 4.12 Frequência natural de oscilação determinada após aplicação de diferentes cargas.....	98
Figura 4.13 Espectros de frequência da FBG ajustados por curvas lorentzianas para diferentes cargas para viga 1.....	99
Figura 4.14 Análise do desempenho estrutural através da largura de banda a meia altura com três diferentes sensores: FBG, EER e Acelerômetro para viga 1.....	100
Figura 4.15 Análise do desempenho estrutural através da largura de banda a meia altura.....	100
Figura 4.16 Arranjo de ensaio e instrumentação da viga de concreto.....	102
Figura 4.17 Produto de rigidez determinado após aplicação de diferentes cargas a uma viga de concreto armado.....	103
Figura 4.18 Arranjo do ensaio para determinação da degradação de uma viga de concreto em função do aumento de temperatura.....	105
Figura 4.19 Variação de temperatura no interior da viga de concreto armado durante o processo de aquecimento.....	105
Figura 4.20 Frequência característica e resistência do concreto, f_{ck} , da viga de concreto em função da temperatura.....	107
Figura 5.1 Esquema representativo da orientação das fibras no ligamento periodontal.....	110
Figura 5.2 Sistema de implante dentário Brånemark.....	113
Figura 5.3 Conceito a desenvolver na concepção do novo sistema de implante dentário.....	115

Figura 5.4 Aspecto geral da malha de elementos finitos da mandíbula e dente.....	117
Figura 5.5 Deformações de Von Mises em compressão	119
Figura 5.6 Deformações de corte em flexão.....	120
Figure 5.7 Mandíbula instrumentada com sensores ótico, FBG, e elétrico, EER, posicionada na UTM para ensaio estático.....	122
Figura 5.8 Pico da banda de reflexão de uma rede de Bragg e respectivo ajuste polinomial.....	123
Figure 5.9 Curva de deformação obtida com o aumento da carga sobre o implante dentário	124
Figura 5.10 Curva de deformação obtida com o aumento da carga sobre o implante dentário, determinada por um EER em modo contínuo	124
Figure 5.11 Mandíbula instrumentada com sensores ótico, FBG, e elétrico, EER, para ensaios dinâmicos pela aplicação de impacto ao implante por uma massa cilíndrica.....	125
Figure 5.12 Resposta no domínio do tempo e da frequência devido ao impacto da massa cilíndrica ao implante, mostrando em detalhe (seta) o ricochete	126
Figure 5.13 Resposta no domínio do tempo e da frequência devido ao impacto da massa cilíndrica, com revestimento plástico, ao implante.....	127
Figure 5.14 Variação de deformação <i>versus</i> tempo medido pela FBG devido ao impacto aplicado pela massa cilíndrica.....	127
Figure 5.15 Variação de deformação <i>versus</i> tempo medido pelos sensores FBG e EER.....	128

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Valores calculados da concentração de hidrogênio.....	20
Tabela 2.2 Características do sistema de gravação por máscara de fase e das redes gravadas com e sem translação do feixe laser UV.....	45
Tabela 2.3 Características do sistema de gravação interferométrico e das redes gravadas com e sem translação do feixe laser UV.....	46
Tabela 4.1 Valores de frequência e produto da rigidez medida pelos sensores ótico e elétrico referente aos ciclos de carregamento	103
Tabela 5.1 Propriedades do dente, osso cortical e osso esponjoso.....	118

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AM	Amplitude Modulada
ASE	Emissão espontânea amplificada (<i>Amplification Spontaneous Emission</i>)
CC	Corrente contínua
EDFA	Amplificador ótico de fibra dopada com érbio (<i>Erbium Doped Fiber Amplifier</i>)
EER	Extensômetro Elétrico de Resistência
ELED	<i>Edge Light-emitting diode</i>
FBG	Rede de Bragg em fibra ótica (<i>Fiber Bragg Grating</i>)
FOBL	Fonte Ótica Banda Larga
FOS	Fonte Ótica Sintonizável
FWHM	Largura de banda a meia altura (<i>Full Width Half Maximum</i>)
IEEE	<i>The Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IM	Casador de índice de refração (<i>Index Matching</i>)
LED	<i>Light-emitting diode</i>
MEF	Método de Elementos Finitos
MLC	Madeira Laminada Colada
MPO	Medidor de Potência Ótica
NBR	Normas Técnicas Brasileiras
OSA	Analisador de espectro ótico (<i>Optical spectrum Analyzer</i>)
PC	Computador Pessoal (<i>Personal Computer</i>)
PDL	Ligamento Periodontal (<i>Peridontal Ligament</i>)
PM	Máscara de Fase (<i>Phase Mask</i>)

PPM	Partes por milhão
SMF	Fibra ótica monomodo (<i>Single Mode Fibre</i>)
SNR	Relação sinal ruído (<i>Signal Noise Ratio</i>)
UA	Universidade de Aveiro
UTM	Máquina de ensaios universal (Universal Testing Machine)
UV	Ultravioleta
WDM	Multiplexação por divisão de comprimento de onda (<i>Wavelength Division Multiplexing</i>)

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo analisar as perspectivas do estudo de vibrações de estruturas, empregando sistemas sensores baseados em redes de Bragg em fibras óticas. O entendimento das vibrações nas estruturas possibilita o estudo de novos materiais e de novos sistemas construtivos que possam otimizar o dimensionamento e a segurança nos projetos de engenharia.

Para as medidas de vibração é apresentado um sistema de leitura de redes de Bragg que tem como características o baixo custo e a facilidade de implementação, quando comparado a outros instrumentos. O aparelho pode ser acoplado a sistemas de aquisição comerciais, pois o sinal analógico de saída está condicionado entre 0 V e 5 V. Os resultados obtidos demonstram a capacidade do sistema em monitorar vibrações em diferentes tipos de materiais, tais como: madeira, aço, concreto e osso. Os resultados das medições feitas com modelos de laboratório mostram-se promissores na análise de vibrações em estruturas, quando comparados aos obtidos por sensores comerciais dos tipos, extensômetro elétrico de resistência e acelerômetro. Para além de estruturas civis, foram realizados estudos para o desenvolvimento de uma nova técnica de ensaio, *in vitro*, para caracterizar um novo conceito de implante dentário.

Os resultados de ensaios de vibrações livres foram realizados com uma barra metálica, com vigas de madeira laminada colada, com vigas de concreto e implantes dentários onde as redes de Bragg foram empregadas. Esses resultados demonstram a capacidade do sensor em monitorar os efeitos de degradação das estruturas através de diferentes técnicas de análise modal.

Palavras-chave: Sensores Óticos, Redes de Bragg em Fibra Ótica, Vibrações em Estruturas, Implantes Dentários, Análise Modal.

ABSTRACT

This work deals with the analysis of perspectives of dynamic study in structures using a sensor system based on fibre optic Bragg gratings. The understanding of vibrations in structures enables the development of new materials, and of new design concepts that improves the sizing and security in engineering projects.

The vibration measurements are carried out with a fibre optic Bragg grating demodulation system. The system has a low cost and easiness of implementation when compared to other available instruments. The output range signal of the instrument is between 0 V to 5 V, compatible to standard PC interfacing systems. The results show that the system is able to monitor vibrations in different types of materials, such as wood, steel, reinforced concrete and bone. The sensor is compared to commercial sensors (strain gauges and accelerometer). Beyond of civil structure, studies have been carried out to develop a technique, *in vitro*, to evaluate a new dental implant concept.

The modal analysis techniques employed in the characterization of the different structures studied show the necessity of instrumentation able to measure low amplitude signals with high signal noise ratio. These characteristics are considered essential in material degradation studies by modal analysis technique.

Keywords: Fibre Optic Sensors, Fibre Bragg Grating, Vibrations in Structures, Dental Implant, Modal Analysis.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Sensores óticos têm grande variedade de aplicações onde é necessário medir ou monitorar vibrações com precisão. Embora existam outros sensores elétricos, baseados em transdutores capacitivos e piezoelétricos, para essa mesma aplicação, seu uso em ambientes de alta-tensão ou com forte campo eletromagnético é prejudicado. Linhas de transmissão, grandes motores, indústrias petroquímicas, túneis em minas de exploração e geradores de alta potência em plantas elétricas são exemplos clássicos para aplicações de sensores óticos para medidas de vibração. Devido à imunidade a campos eletromagnéticos, potencial para transmissão de sinais a longas distâncias, flexibilidade e pequeno tamanho, dispositivos sensores à base de fibra ótica demonstram ser uma ferramenta ideal para inspeção de estruturas.

Dentre os sensores de fibra ótica mais utilizados nos últimos anos, encontram-se aqueles baseados nas propriedades das redes de Bragg em fibra ótica (FBG – *Fiber Bragg Grating*) [Hill *et al.*, 1978]. Tais redes constituem-se em uma modulação periódica no índice de refração da fibra, ao longo da direção longitudinal. A existência dessa modulação provoca, em um feixe de luz com grande largura espectral propagante nessa fibra, a reflexão seletiva de uma banda estreita dessa luz, centrada em um comprimento de onda específico, conhecido

como comprimento de onda de Bragg. Essa reflexão é baseada na difração do feixe luminoso pela estrutura de modulação do índice de refração, acoplando parte do espectro em modo contra propagante (difração de Bragg). Em termos funcionais, as redes de Bragg têm comportamento semelhante ao filtro eletrônico rejeita faixa. As técnicas de produção permitem que elas sejam utilizadas como, por exemplo, sensores, filtros espectrais, espelhos de realimentação em lasers de largura de linha estreita, dispositivos multiplexadores em comprimento de onda (WDM) e geração de pulsos curtos [Kashyap, 1999; Othonos e Kalli, 1999; Kersey *et al.*, 1997].

No caso específico da utilização da rede de Bragg como sensor para medir deformações, os sistemas de medição que atualmente são mais utilizados têm um custo elevado, o que torna estes sensores pouco competitivos em relação a extensômetros elétricos em aplicações convencionais, porém, são particularmente úteis em situações nas quais se torna muito difícil, ou mesmo impossível, a utilização da extensometria convencional. Como exemplo, pode-se citar a medição de esforços mecânicos em cabos energizados, medições em que há a necessidade, ou conveniência, de se estar distante de até alguns quilômetros da peça ou estrutura [Morey, Meltz e Glenn, 1989], medições em ambiente hostil (fluidos inflamáveis) [Kersey *et al.*, 1997] e medições em meio a campos eletromagnéticos fortes [Kersey, 1996].

Uma característica importante das redes de Bragg em fibra é o fato de que perturbações externas como compressão, tração ou variações de temperatura alteram o comprimento de onda central refletido. Essa codificação espectral diminui problemas derivados de ruídos de intensidade que afetam outros tipos de sensores e facilita a calibração.

Outro fato interessante para o sensoriamento é a característica de que várias redes com diferentes comprimentos de onda de Bragg podem ser gravadas em uma mesma fibra ótica sem que uma perturbe o desempenho da outra. Essa característica permite o desenvolvimento

de sensores óticos quase distribuídos, de grande interesse em várias áreas como, por exemplo, sensores de tração para setores da construção civil [Kersey *et al.*, 1997], naval e aeroespacial, sensores para plantas industriais e de energia elétrica [Romero, Calligaris e Silva, 1997], sensores de processos químicos e sensores para uso biomédico [Yun-Jiang *et al.*, 1997].

1.1.PERSPECTIVA HISTÓRICA

Hill e colaboradores descobriram fotossensibilidade em fibra de sílica dopada com germânio no *Communication Research Center* no Canadá [Hill *et al.*, 1978]. Durante experimento feito para estudar efeitos não lineares em fibras óticas especialmente projetadas, a luz de um laser de argônio (Ar^+) foi lançada no núcleo da fibra. Com exposição prolongada, o aumento na atenuação do sinal transmitido pela fibra foi observado. Acompanhando esta observação foi determinado que a intensidade da luz refletida pela fibra aumentou significativamente com o tempo de duração da exposição. Esse aumento na refletividade foi o resultado de uma rede de índice de refração permanente sendo fotoinduzida na fibra.

A montagem experimental usada está mostrada na figura 1.1. A luz de um laser de Ar^+ , monomodo, $I_e = 488$ nm, passa através de um divisor de feixe e é lançada em uma fibra ótica. O divisor de feixe é utilizado para monitorar a intensidade da luz refletida. Na figura 1.2 está ilustrada a refletividade em função do tempo de uma amostra com comprimento de um metro de fibra ótica.

Devido à reflexão de Fresnel, na extremidade final da fibra há a formação de um feixe contra propagante que interfere com o feixe incidente, formando uma onda luminosa estacionária no interior do núcleo. Essa onda estacionária possui regiões de máximo e mínimo

de intensidade luminosa. As regiões de máxima intensidade causam significativa modificação no valor local do índice de refração, resultando em uma modulação do índice ao longo do eixo da fibra.

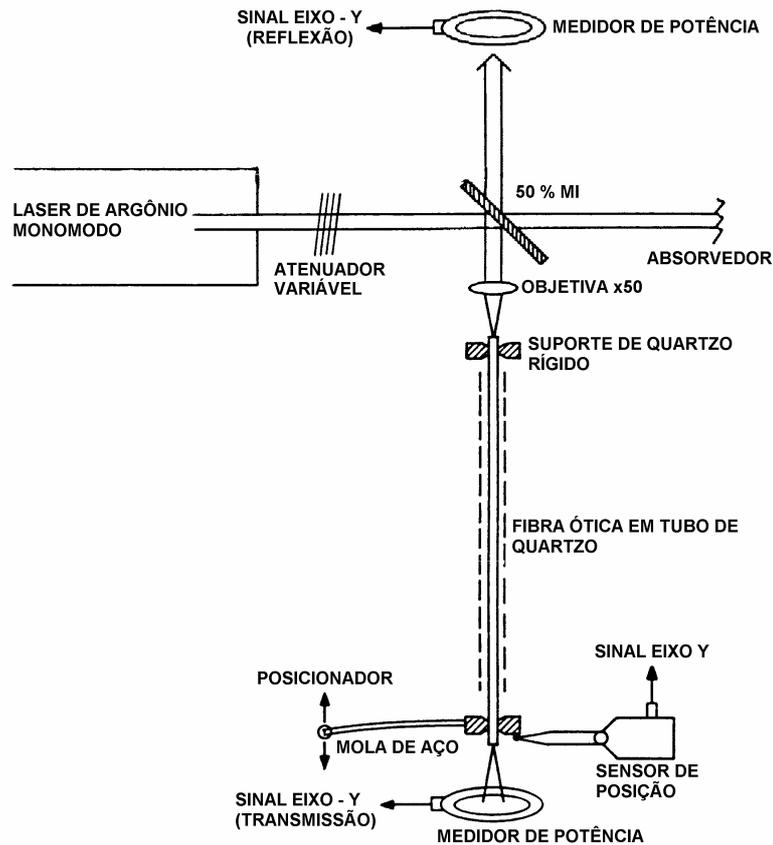


Figura 1.1 Esquema do dispositivo para produção e medidas dos filtros a fibra [Hill *et al.*, 1993a]

O resultado final do processo descrito é a formação de estrutura periódica, com período espacial L (onde $L = \lambda/2$), de variação do índice de refração no núcleo da fibra. Inicialmente, esse efeito de modulação é igual ao longo de toda a fibra. A continuidade do processo de gravação faz esse efeito se deslocar gradativamente para o início da fibra, pois à medida que a estrutura é formada, parte do feixe incidente é refletido não somente pela reflexão de Fresnel mas também continuamente reforçado pela própria reflexão na rede de Bragg, o que aumenta o contraste da onda estacionária no início da fibra. A estrutura

periódica formada é capaz de refletir somente uma faixa espectral bastante estreita em torno do comprimento de onda do laser de gravação.

A técnica de gravação interna não despertou muito interesse por ser de difícil reprodutibilidade e por apresentar o comprimento de onda refletido pela rede igual ao utilizado para sua gravação, o que limita o campo de aplicação das redes obtidas por este processo.

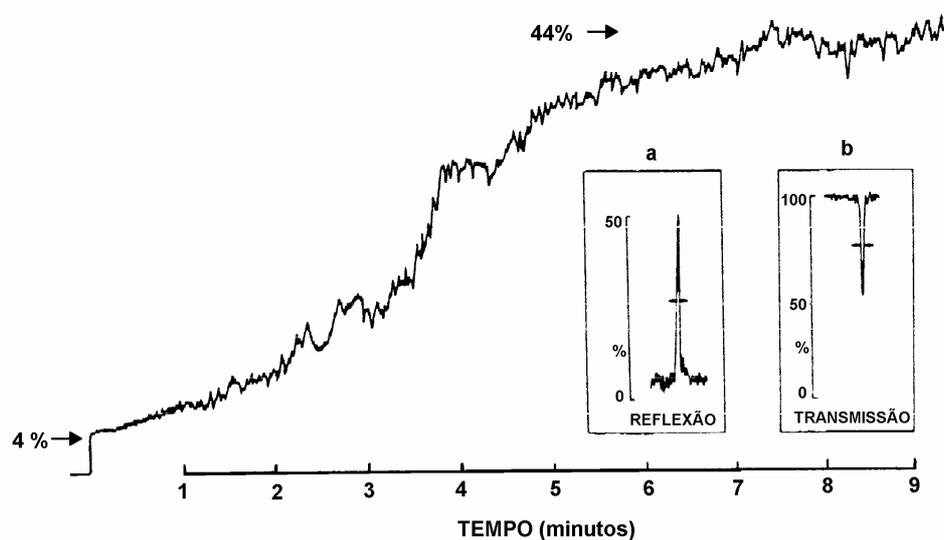


Figura 1.2 Curva de crescimento em função do tempo para uma rede de Bragg pelo método de gravação interno. No início da curva de crescimento é observado os 4 % referentes a reflexão de Fresnel e nos detalhes “a” e “b” os espectros de reflexão e transmissão da rede gravada [Hill *et al.*, 1993a]

Por quase uma década após a descoberta da fotossensibilidade, trabalhos de pesquisa referentes a esse fenômeno em fibras foram realizados esporadicamente no Canadá usando fibras especiais. Durante esse tempo, Lam e Garside [1981] demonstraram que a mudança da magnitude do índice de refração fotoinduzido depende do quadrado da potência de gravação no comprimento de onda do laser de Ar^+ ($\lambda_e = 488 \text{ nm}$), sugerindo o processo de dois fótons como o possível mecanismo de mudança do índice.

A falta de interesse internacional na fotossensibilidade em fibras óticas foi decorrente do efeito ser considerado como fenômeno presente somente em fibras especiais. Quase uma década mais tarde, foi observada a fotossensibilidade em diferentes tipos de fibras, todas com alta concentração de germânio, [Stone,1987].

Em 1988, um importante avanço na pesquisa de fotossensibilidade em fibras foi relatado, demonstrando a fabricação de redes de Bragg no núcleo de fibra ótica pela exposição lateral, externa à fibra, de um padrão de interferência na região espectral do ultravioleta (UV) [Meltz, Morey e Glenn, 1989]. Dessa forma redes de qualquer perfil ou período podem ser produzidas por meios interferométricos, permitindo acesso à região espectral de interesse em telecomunicações, situada no infravermelho próximo.

Lemaire e colaboradores desenvolveram uma técnica para aumentar a fotossensibilidade em fibras [Lemaire *et al.*, 1993]. A técnica consiste em submeter a fibra a alta pressão e temperatura por um período de tempo em atmosfera de hidrogênio. O processo mais comum de hidrogenação consiste em submeter a fibra a altas pressões em temperatura ambiente.

Hill e colaboradores apresentaram uma técnica de gravação de redes com máscara de fase [Hill *et al.*, 1993b]. A técnica de máscara de fase, atualmente a mais difundida, foi adaptada na fabricação de redes de Bragg a partir de métodos utilizados na fabricação de lasers semicondutores monomodo com cavidade distribuída. Essa técnica é, provavelmente, a mais simples e reproduzível das técnicas de fabricação de redes de Bragg.

Com o desenvolvimento das fibras e dos equipamentos utilizados para gravação de redes de Bragg sua utilização no desenvolvimento de dispositivos para aplicações em telecomunicações e sensoreamento tem se tornado mais acessível.

1.2. OBJETIVO E DESCRIÇÃO DA TESE

A proposta desta tese é a monitoração e estudos de vibrações em diferentes tipos de estruturas através de redes de Bragg em fibras óticas que servem como transdutores óticos, convertendo deformação mecânica em deslocamento espectral. Os fundamentos teóricos sobre redes de Bragg em fibras óticas serão abordados no capítulo 2. Além dos aspectos teóricos são apresentados dois sistemas de gravação de redes desenvolvidos no decorrer deste trabalho.

No capítulo 3 é apresentada uma revisão de diferentes dispositivos óticos aplicados nos estudos de estruturas. Em seguida é apresentado um sistema de demodulação de redes de Bragg para aplicações em medidas estáticas e dinâmicas e sua caracterização é comparada a um modelo teórico.

A existência de danos estruturais em sistemas de engenharia leva a modificações dos modos de vibração. Estas modificações manifestam-se como mudanças nos parâmetros modais, frequência natural e grau de amortecimento, os quais podem ser obtidos dos resultados de ensaios dinâmicos. As mudanças nos parâmetros modais são diferentes para cada modo uma vez que as mudanças dependem da natureza, localização e severidade do dano. Esses efeitos oferecem a possibilidade do uso dos dados dos ensaios dinâmicos para detectar, localizar e quantificar os danos causados à estrutura [Salawu, 1997]. Há várias razões para a realização de ensaios dinâmicos em estruturas, tais como:

- Medidas dinâmicas em estruturas servem para aumentar a base de dados referente ao comportamento dinâmico de estruturas similares. Esta base de dados pode então ser usada para prever a resposta de novas estruturas. Em

virtude de muitas vezes os ensaios dinâmicos serem caros, aquela base de dados torna-se importante no aperfeiçoamento dos métodos analíticos;

- Possibilidade de determinar a integridade de uma estrutura após a ocorrência de sobrecarga. Se a natureza do carregamento causador da sobrecarga é desconhecida, resultados de ensaios dinâmicos podem ser usados para determinar o tipo de carregamento;
- Possibilidade de avaliar a integridade de estrutura quando altos níveis de carregamento são esperados para ocorrer;
- A condição geral de estruturas pode ser monitorada por medidas regulares das respostas dinâmicas. Mudanças, como resultado de deterioração, nos parâmetros do sistema - massa, rigidez e amortecimento - conduzem a mudanças na resposta dinâmica e esses parâmetros podem ser medidos usando técnicas de ensaios dinâmicos padrão.

No capítulo 4 é apresentado um estudo referente a análise dinâmica em estruturas e contém o relato dos experimentos realizados utilizando redes de Bragg como sensor. Inicialmente, são apresentadas medidas de vibrações em alguns tipos de estruturas, comparando seus resultados a sensores elétricos comerciais, extensômetro elétrico de resistência e acelerômetro, usados como sensores de referência. Em seguida, são apresentados os experimentos com o sistema sensor e seus resultados, obtidos em medidas de vibrações, através de análise modal.

Uma estrutura, especial objeto de estudo neste trabalho, deriva dos implantes dentários. Um trabalho em cooperação com a Universidade de Aveiro, Departamentos de Física e de Engenharia Mecânica, foi realizado para o desenvolvimento de um novo tipo de

implante dentário. É importante avaliar a intensidade das tensões que são transferidas para o tecido ósseo circundante ao implante através de ensaios dinâmicos, *in vitro*, de uma mandíbula humana quando submetida a cargas resultantes de impacto. Os detalhes construtivos e os ensaios realizados em implantes dentários são discutidos no capítulo 5.

No capítulo 6 é feito um sumário dos resultados obtidos nos experimentos acima mencionados e são apresentadas as propostas para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

REDES DE BRAGG EM FIBRAS ÓTICAS

Nos últimos trinta anos o avanço da tecnologia melhorou e transformou os sistemas a fibras óticas, fazendo com que essas fibras sejam também utilizadas no desenvolvimento de dispositivos como sensores, lasers e amplificadores a fibra. Permitiu o lançamento de enlaces totalmente óticos, melhorando ainda mais o desempenho do sistema de transmissão. Apesar do progresso na fabricação de fibras óticas e avanços em dispositivos óticos, sempre foi um desafio integrar em fibras óticas outros componentes óticos básicos como, por exemplo, espelhos, filtros de comprimento de onda e refletores parciais. A partir da década de noventa a tecnologia de sistemas óticos evoluiu significativamente com o desenvolvimento de dispositivos óticos *in-line*, isto é, inseridos na própria fibra ótica, que aumentam a capacidade e a velocidade de transmissão de dados ou a multiplexação de sinais óticos, além de substituir os dispositivos eletrônicos existentes que limitam a taxa de operação dos sistemas de comunicação. Surgiram as comunicações por sólitons óticos e diversos dispositivos à fibra ótica como, por exemplo, os amplificadores a fibra dopada com Er^{3+} (Érbio), os multiplexadores em comprimento de onda (WDM) e as redes de Bragg.

Com a descoberta da fotossensibilidade em fibras óticas [Hill *et. al.*, 1978], uma nova classe de dispositivos em fibra foi desenvolvida, denominados redes de Bragg em fibras

ólicas. A fotossensibilidade das fibras óticas permite a fabricação de estruturas de fase ou redes de difração que são obtidas pela alteração permanente e periódica do índice de refração ao longo do núcleo.

De uma forma geral, as redes de difração em fibras óticas podem ser divididas em dois tipos: redes de Bragg que se distinguem por serem de período curto e por acoplarem modos na fibra que se propagam em direções opostas e redes de transmissão ou de período longo, onde o acoplamento ocorre entre modos de fase que se propagam na mesma direção. Nesta tese serão consideradas apenas as redes de Bragg com um período de modulação constante, redes uniformes.

2.1. FOTOSSENSIBILIDADE

Fotossensibilidade em fibras óticas refere-se à mudança permanente do índice de refração no núcleo da fibra quando exposta à luz com comprimento de onda e intensidade características, que dependem do material do qual o núcleo é formado.

Fibras de sílica dopadas com germânio exibem fotossensibilidade. Isso significa que são induzidas mudanças no índice de refração no núcleo das fibras quando elas são expostas tanto à luz verde-azulada, [Hill *et al.*, 1978], de um laser de Argônio (Ar^+), caso em que a alteração do índice de refração dá-se pela interferência de feixes contra propagantes dentro da fibra, quanto à radiação ultravioleta externa à elas. O padrão de interferência formado por dois feixes incidentes de radiação UV causa uma mudança periódica do índice de refração do núcleo da fibra, [Meltz, Morey e Glenn, 1989]. Tipicamente, para uma fibra padrão de

telecomunicações com aproximadamente 3% molar de GeO_2 a mudança no índice de refração do núcleo, Dn , atinge valores próximos de 3×10^{-5} , [Bennion *et al.*, 1996].

Estudos mostram que fibras óticas, alguns tipos de vidros e cristais apresentam aumento considerável de atenuação ótica (fotocromaticidade) quando exposto à radiação ionizante (e.g. raios γ , raios X ou radiação UV), [Sigel, 1977]. Esse aumento na atenuação pode ter caráter permanente ou diminuir gradativamente com o tempo. Em particular, com a criação de centros de cor, a liberação de cargas e, de forma geral, com a quebra da estrutura molecular, o espectro de absorção do material se altera. De acordo com as relações de Kramers-Kröning, isso provoca a modificação do índice de refração das fibras óticas dopadas com germânio, mesmo quando expostas à baixos níveis de intensidade de radiação do visível ao UV por longo tempo [Hand e Russel, 1990].

Apesar de existirem várias teorias que tentam explicar o fenômeno da fotossensibilidade, há consenso de que este efeito está associado com a existência de defeitos relacionados à incorporação de átomos de Ge na estrutura vítrea das fibras óticas. A fotossensibilidade ocorre através do processo de absorção de um fóton (UV) ou dois fótons (Visível) e é atribuída à interação da radiação, energias no UV, com quatro tipos diferentes de defeitos nas ligações moleculares envolvendo os átomos de Ge . O surgimento desses defeitos está relacionado com a incorporação de Ge como dopante para a formação do núcleo da preforma, o seu posterior aquecimento, atingindo cerca de 2000 °C, e puxamento para se obter a fibra ótica. Os quatro tipos de defeitos moleculares mais comuns presentes numa fibra ótica dopada com Ge podem ser representados conforme esquema da figura 2.1.

O defeito do tipo GeO , figura 2.1a, ocorre quando o átomo de Ge está ligado a apenas três átomos de oxigênio e a quarta ligação é com um átomo de Si ou Ge . Esse defeito induz o surgimento de uma banda de absorção ótica em 240 nm com largura espectral de

aproximadamente 30 nm. Acredita-se que esse tipo de defeito seja o principal responsável pela fotossensibilidade das fibras dopadas com germânio [Atkins e Mizrahi, 1992].

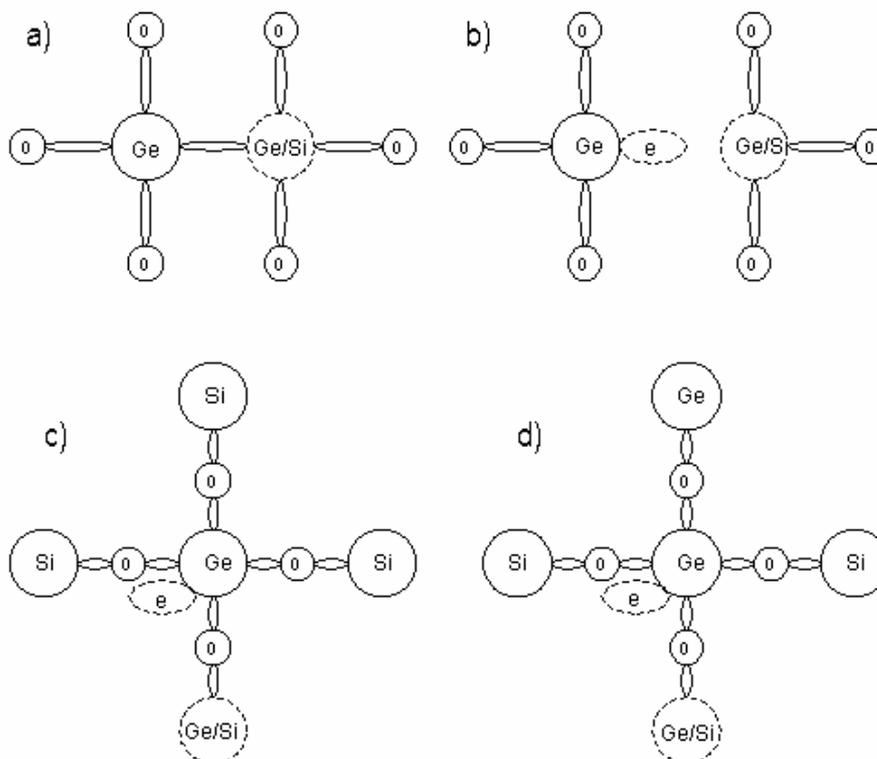


Figura 2.1 Tipos de defeitos presentes em fibras óticas dopadas com Ge : a) GeO , b) GeE' , c) $Ge(1)$ e d) $Ge(2)$ [Kashyap, 1999]

O defeito do tipo GeE' , figura 2.1b, ocorre quando uma das ligações $Ge-Ge$ ou $Ge-Si$ é quebrada e um elétron permanece livre para se mover na matriz vítrea via saltos ou tunelamento, ou, pela excitação de dois fótons, para a banda de condução. A retirada deste elétron causa reconfiguração na forma da molécula, possibilitando também mudar a densidade do material e sua absorção ótica. A concentração desse tipo de defeito aumenta após exposição prolongada à radiação UV ou visível, apresentando tempo de vida longo mesmo em temperatura ambiente.

Os defeitos do tipo $Ge(1)$ e $Ge(2)$, figura 2.1c e figura 2.1d, respectivamente, apresentam a configuração tetraédrica normal, porém possuem um elétron adicional preso ao

átomo de *Ge*. Os números (1) e (2) estão relacionados com a presença de um átomo de *Si* ou *Ge*, respectivamente, presentes no material imediatamente adjacente circunvizinho à essa estrutura.

Outro tipo de defeito que, em conjunto com o *GeO*, aparenta ser responsável pelo efeito de fotossensibilidade em fibras óticas é o *GeO₂*. Este centro surge quando um átomo de *Ge* substitui um átomo de *Si* na estrutura do vidro, induzindo o aparecimento de banda de absorção em torno de 195 nm.

O mecanismo físico responsável por aqueles efeitos não está totalmente compreendido e investigação mais detalhada necessita ser feita para esclarecer pontos ainda obscuros. Poucos pontos apresentam consenso geral, sendo que um deles é que a fotossensibilidade está relacionada com defeitos presentes na estrutura vítrea e que podem ser "branqueados" (*bleached*) por processo de absorção de um ou dois fótons, devido à relaxação não radiativa após excitação.

2.1.1. AUMENTO DA FOTOSSENSIBILIDADE

É de interesse tecnológico aumentar a fotossensibilidade das fibras para poder gravar redes de Bragg de forma mais eficiente, sem a necessidade de se utilizar altas potências óticas no feixe de gravação nem longos tempos de exposição e, conseqüentemente, fazer uso de lasers de menor custo e obter melhor eficiência de produção. Algumas técnicas permitem o aumento da fotossensibilidade como, por exemplo: aumento da concentração de *Ge* no núcleo da fibra, introdução de hidrogênio na estrutura vítrea, utilização de co-dopantes como boro em conjunto com o *Ge* e a utilização de outros dopantes.

O aumento da concentração de *Ge* não é uma técnica recomendada para vários casos, pois resulta em um aumento do índice de refração e, conseqüentemente, da abertura numérica da fibra, causando também aumento no valor da perda por inserção ao se conectar essa fibra a outras presentes no sistema.

O fenômeno da fotossensibilidade em fibras óticas não é restrito apenas às fibras dopadas com germânio: também ocorre com dopagens com cério [Broer, Cone e Simpson, 1991], európio [Hill *et al.*, 1991] e germânio-érbio [Bilodeau *et al.*, 1990] as quais apresentam sensibilidade alta, mas não tão grande quanto àquela da fibra dopada somente com germânio.

Foi também demonstrado o aumento da fotossensibilidade na produção de redes em fibras tratadas com hidrogênio aquecido [Meltz e Morey, 1991]. Uma vez que defeitos associados ao hidrogênio são mais estáveis no material, o tratamento com o hidrogênio aquecido tem a vantagem de aumentar permanentemente a fotossensibilidade da fibra.

Uma técnica alternativa de fotossensibilização é a varredura da fibra com hidrogênio em chama (*Flame Brushing*), desenvolvida por Hill *et al.* [1993a]. Essa técnica consiste em submeter a fibra à chama de oxi-hidrogênio cuja temperatura supera 1700 °C, aproximadamente. Sob temperaturas elevadas o hidrogênio difunde para dentro do núcleo mais rapidamente que sob temperatura ambiente. Ressalta-se que as propriedades da casca permanecem inalteradas. Esse tratamento resulta em fibra permanentemente fotossensível e tem a vantagem de fotossensibilizar a fibra localmente. Esta técnica permite que redes de Bragg rígidas, estáveis com a temperatura, possam ser fabricadas em fibras de telecomunicações padrão, as quais apresentam pouca sensibilidade intrínseca devido à baixa concentração de germânio, resultando em modulação de índice muito baixa, vide página 13.

2.1.2. HIDROGENAÇÃO

O aumento da fotossensibilidade da fibra pode ser alcançado se esta for submetida à inserção de hidrogênio (H_2) sob alta pressão, 20 atm – 748 atm, com a temperatura entre 20 °C e 75 °C durante alguns dias, [Lemaire *et al.*, 1993]. Isso permite a gravação de redes de Bragg com grande profundidade de modulação ($Dn \approx 10^{-3}$ a 10^{-2}) em fibras óticas, com menores potências óticas de gravação e menor tempo de exposição luminosa. A difusão de hidrogênio sob alta pressão em fibras óticas à temperatura ambiente resulta em mudanças de índices maiores que 0,01, com aproximadamente todo germânio participando da formação das vacâncias após exposição à radiação UV [Lemaire, 1991]. Fibras óticas sensibilizadas através de tratamento com hidrogênio frio a alta pressão permanecem fotossensíveis enquanto o hidrogênio está presente e, assim, devem ser guardadas a baixas temperaturas ou a altas pressões em atmosfera hydrogenada para impedir a difusão do hidrogênio para fora da fibra. Neste caso, deve salientar-se que as emendas por fusão realizadas com fibras hydrogenadas exigem um pré-tratamento térmico na proximidade da clivagem, de modo a eliminar o risco de destruição da fibra ótica durante a fusão.

O fato de o sistema de hidrogenação das fibras por alta pressão demorar alguns dias para alcançar a saturação torna evidente a necessidade de se ter um sistema capaz de hidrogenação para várias fibras. De acordo com Othonos e Kalli [1999] o melhor sistema de hidrogenação faz uso de câmaras feitas de tubos de cobre de pequenos diâmetros (p.ex., 6,35 mm).

Um tubo de cobre com 6,35 mm de diâmetro pode conter aproximadamente 20 fibras óticas, dessa forma a quantidade de hidrogênio necessária para encher a câmara é reduzida. Um sistema típico de hidrogenação, montado no CEFET/PR, consiste de uma câmara conectada a um cilindro de gás por duas válvulas, uma válvula de segurança que mantém a pressão na câmara e isola-a do resto do sistema e uma segunda que serve para pressurizar a

câmara com um regulador de pressão. Como segurança, a câmara pode ter uma bomba de vácuo acoplada à outra extremidade para, antes da hidrogenação, ser retirado o oxigênio presente no interior da câmara. Elementos de aquecimento podem ser acoplados ao longo da câmara, aquecendo o gás e acelerando a difusão das moléculas de hidrogênio para o interior do núcleo da fibra ótica [Meltz e Morey, 1991].

A concentração de moléculas de hidrogênio e a taxa em que essas moléculas se difundem para o núcleo da fibra ótica dependem da pressão e da temperatura do gás de hidrogênio. A concentração do hidrogênio saturado no núcleo da fibra (sílica), k_{sat} , é calculada através de [Lemaire, 1991]:

$$k_{sat} = 3,3481pe^{\left[\frac{8670}{RT}\right]} \quad (2.1)$$

onde p é a pressão do gás de hidrogênio em psi, T é a temperatura absoluta em graus Celsius e R é a constante do gás (8,3144 J/mol K) e k_{sat} é obtida em partes por milhão (ppm).

A concentração saturada de hidrogênio aumenta linearmente com a pressão e diminui com o aumento da temperatura e, por outro lado, induz um aumento na taxa de saturação. Assim, concentrações de trabalho são atingidas mais rapidamente. Para esse caso, 1 ppm é definido como 10^{-6} moles de SiO_2 . A difusão das moléculas de hidrogênio na sílica tem várias expressões na literatura, escolheu-se aqui a de Lemaire [1991], que foi calculada diretamente conforme expressão:

$$d_{H_2} = 2,83 \times 10^{-4} e^{\left[\frac{-40,19}{RT}\right]} \quad (2.2)$$

Por conseguinte, em altas temperaturas o nível de saturação é alcançado de forma relativamente rápida, poucas horas. Através da equação 2.2, com a solução de difusão clássica

para uma geometria cilíndrica, a concentração normalizada de hidrogênio na fibra ótica pode ser calculada pela seguinte equação [Othonos e Kalli, 1999]:

$$\frac{k}{k_{sat}} = 1 - 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{b_n J_1(b_n)} e^{\left[-b_n^2 \frac{d_{H_2} t}{r^2} \right]} \quad (2.3)$$

onde k é a concentração de hidrogênio no núcleo da fibra, b_n é o n -ésimo zero da função de Bessel de ordem zero $J_0(b)$, t é o tempo, r é o raio da fibra (62,5 μm para a maioria das fibras monomodo) e $J_1(b)$ é a função de Bessel de primeira ordem.

Na figura 2.2 são apresentadas as curvas que representam o efeito da variação de temperatura no nível de saturação da concentração e taxa de difusão de hidrogênio no núcleo da fibra.

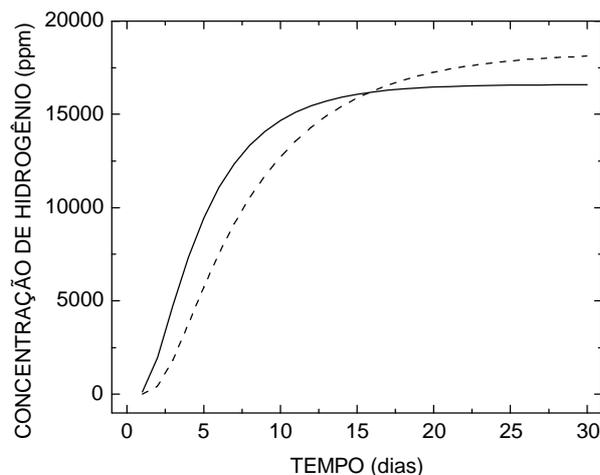


Figura 2.2 Aumento da concentração de hidrogênio no núcleo da fibra ótica em função do tempo para temperaturas médias em Curitiba no verão (linha cheia, 21°C) e no inverno (linha tracejada, 13°C)

Para os resultados apresentados na figura 2.2 foram consideradas as temperaturas médias para a cidade de Curitiba (SIMEPAR – Tecnologia e Informações Ambientais), no verão (21°C) e no inverno (13°C), e pressão na câmara de 143 atm. Uma comparação das curvas mostra que uma redução da temperatura resulta em um aumento no nível de saturação

da concentração de hidrogênio e uma significativa redução na taxa de difusão de hidrogênio no núcleo da fibra ótica. Deve-se ressaltar que a dependência com temperatura e pressão é não-linear, podendo haver baixa difusão de hidrogênio a altas temperaturas e pressões. Os valores finais calculados para a concentração de hidrogênio, a concentração de hidrogênio saturado e a difusão das moléculas de hidrogênio na sílica para uma fibra armazenada na câmara de hidrogênio durante trinta dias são apresentados na tabela 2.1.

Tabela 2.1 Valores calculados da concentração de hidrogênio, concentração de hidrogênio saturado e difusão das moléculas de hidrogênio na sílica para uma fibra armazenada na câmara de hidrogênio durante trinta dias

Temperatura (°C)	K (ppm)	K_{sat} (ppm)	d_{H_2} (cm ² /s)
13	18129	18335	$1,2931 \cdot 10^{-11}$
21	16593	16603	$2,0481 \cdot 10^{-11}$

Para variações típicas de temperatura ambiente em Curitiba e para uma pressão constante, os valores apresentados na tabela 2.1 mostram que a difusão de hidrogênio aumenta, porém sua concentração na fibra diminui com a temperatura. Para as redes gravadas no CEFET/PR verificou-se que ao fim de quatorze dias é possível hidrogenar a ponto de fotossensibilizar a fibra e obter redes com boa refletividade, aproximadamente 100 %.

2.2. TIPOS DE REDES DE BRAGG

A otimização da fabricação de redes de Bragg exige a determinação da evolução das alterações do índice efetivo e da amplitude de modulação do índice em função do tempo de exposição. Esta dependência pode ser bastante complexa, pois está sujeita a numerosos parâmetros, como: a natureza da fibra, as características da fonte laser UV, a densidade de

energia, a visibilidade e estabilidade do padrão espacial de exposição e da história térmica da fibra.

Entre os sistemas utilizados para a gravação, freqüentemente são usados lasers de onda contínua como laser de Ar^+ dobrado em frequência, gerando radiação de 244 nm. Feixes contínuos têm qualidade modal e uniformidade espacial superiores às de feixes pulsados. Assim, redes de grande reprodutibilidade podem ser gravadas com feixes contínuos e, uma vez determinados os parâmetros necessários para gravar redes de características específicas, tais redes podem ser reproduzidas em outros trechos de fibra com o mesmo arranjo. Como a gravação pode ser acompanhada em tempo real, é possível escrever redes e alterar os parâmetros durante a gravação de forma a obter as características desejadas do filtro espectral que se está gravando. A baixa potência utilizada durante a gravação não resulta necessariamente em refletividades inferiores, e redes de refletividade próxima de 100 % são geralmente gravadas com este método. As redes gravadas com essa técnica são classificadas como tipo I. Redes do tipo I podem ser apagadas em temperaturas relativamente baixas (≈ 200 °C). No entanto, essas redes são as mais utilizadas e operam de -40 °C a $+80$ °C, faixa de operação que cobre a maioria das aplicações em telecomunicações e sensoamento, [Othonos e Kalli, 1999].

Com o aumento do tempo de exposição das redes observa-se que a rede inicialmente gravada, tipo I, é apagada e outra rede começa a ser formada. Essa rede apresenta como principal característica, uma maior estabilidade térmica (≈ 500 °C), importante em aplicação das redes como sensores para aplicações específicas. Essas redes são chamadas de redes do tipo IIA, [Othonos e Kalli, 1999]. Para essas redes o comprimento de onda de Bragg da rede inicial do tipo I se desloca para comprimentos de onda mais longos durante a gravação, evidenciando uma alteração de índice positiva; o da rede do tipo IIA desloca-se para

comprimentos de onda mais curtos, sugerindo uma alteração de índice negativa. O processo de formação de redes do tipo IIA não é totalmente compreendido, tendo sido sugeridas duas etapas com dinâmicas distintas para justificar as observações experimentais: a primeira, relativamente rápida, corresponde à fotossensibilidade intrínseca das fibras óticas, sendo responsável pelas alterações positivas de índice, rede tipo I; a segunda, tipicamente mais lenta, parece estar relacionada com a relaxação da tensão acumulada no núcleo da fibra, contribuindo para a parte negativa do índice [Riant e Haller, 1997].

Outra alternativa para a gravação de redes é o emprego de sistemas pulsados, como lasers de excímero de *KrF* (Kriptônio - Flúor) operando em 248 nm ou lasers de corante pulsados e dobrados em frequência, operando entre 240 – 250 nm, sintonizáveis, [Othonos e Kalli, 1999; Dong *et al.*, 1993; Malo *et al.*, 1989]. A maior vantagem de se escrever redes de Bragg utilizando sistemas pulsados é que a intensidade do feixe geralmente é tão alta que poucos pulsos são suficientes para escrever a rede. Porém, as potências podem ser tão altas que o estrago mecânico causado no vidro pode ser considerável. Redes de grande permanência podem ser gravadas por este método e problemas de instabilidade do padrão de interferência projetado na fibra podem ser minimizados, tais redes chamam-se de tipo II. Essas redes são caracterizadas por um conjunto de propriedades bem definidas, tais como: alterações elevadas do índice de refração, elevada estabilidade térmica (redes desse tipo podem operar em temperaturas de 800 °C por um período de 24 horas sem alterar suas características [Othonos e Kalli, 1999]), acoplamentos para modos de casca e conseqüentes perdas de transmissão para os comprimentos de onda inferiores à condição de Bragg [Archambault *et al.*, 1993; Dong *et al.*, 1993]. Essas perdas elevadas resultam de um forte acoplamento para os modos radiativos, devido à forte assimetria e não-uniformidade dos defeitos induzidos pela exposição. Por outro lado, as redes do tipo II são igualmente

caracterizadas por perdas de inserção relativamente elevadas, tipicamente entre 0,2 e 2 dB. Estas perdas dependem do comprimento da rede de Bragg e da extensão dos defeitos sobre a secção eficaz do núcleo. As redes do tipo II são gravadas com densidade de energia na ordem de 1 J/cm^2 [Archambault, Reekie e Russel, 1993]. Esse valor encontra-se próximo do limiar de dano da sílica que constitui a casca da fibra; assim, existe um pequeno intervalo de densidade de energia disponível para o regime de gravação de redes do tipo II sem provocar danos físicos na superfície da fibra. De fato, se a densidade for aumentada para cerca de $1,1 \text{ J/cm}^2$ é possível induzir redes do tipo II por fusão da fronteira núcleo-casca, criando defeitos físicos [Mihailov e Gower, 1994]. Os defeitos físicos têm origem na interação dos elétrons com múltiplos fótons, os elétrons são libertados para a banda de condução devido à elevada densidade de energia. Nesta situação, toda a energia absorvida nas múltiplas interações é essencialmente libertada por via térmica, conduzindo à fusão da matriz de sílica e à indução de defeitos físicos [Othonos e Kalli, 1999].

Em 2002, Liu *et al.* apresentaram um novo tipo de rede, conhecida por tipo IA. Esse tipo de rede é gravado em fibras de sílica dopada com alta concentração de germânio e hidrogenada e apresentam como principal característica um coeficiente térmico menor ($\approx 6,4 \text{ pm/}^\circ\text{C}$) que qualquer outro tipo de rede em fibra. As redes tipo IA são gravadas com laser em 244 nm e com tempo de exposição longo, aproximadamente quatro horas a uma potência de 60 mW. Devido ao tempo de exposição longo a rede gravada passa por um processo de *annealing* (recozimento), devido ao aquecimento gerado dentro da fibra pela absorção da radiação UV. Outro fator interessante na formação dessas redes é dinâmica do crescimento durante a gravação. Em virtude do longo tempo de exposição era esperada a formação de uma rede do tipo IIA, mas foi observado um crescimento inicial similar ao da rede IIA, embora o comportamento do comprimento de onda tenha sido diferente daquele

esperado para redes IIA. Foi verificado um deslocamento contínuo para maiores comprimentos de onda mesmo após a transição para a segunda rede e com uma variação do comprimento de onda do início da gravação até o final de 18 nm, o que sugere uma rede com grande variação do índice de refração efetivo. A aplicação dessas redes foi demonstrada para medidas de deformação [Simpson *et al.*, 2003], onde a rede tipo IA foi utilizada para compensar variações de temperatura daquela sensora, do tipo I.

2.3. PROPRIEDADES DAS REDES DE BRAGG

A rede de Bragg uniforme pode ser representada por uma modulação periódica do índice de refração, n_{co} , do núcleo da fibra ótica. Com transições de índices perpendiculares ao eixo longitudinal os planos da rede têm período, Λ , constante. Essa estrutura é considerada o bloco fundamental para a maioria das estruturas de redes de Bragg. A luz guiada ao longo do núcleo da fibra ótica será refletida por cada plano da rede. Se a condição de Bragg não for satisfeita, a luz refletida em cada plano subsequente torna-se progressivamente fora de fase e eventualmente a intensidade de luz refletida é cancelada. Quando a condição de Bragg é satisfeita, a contribuição da luz refletida por cada plano da rede contribui construtivamente na direção contra propagante, formando uma banda de reflexão com comprimento de onda central definido pelos parâmetros da rede [Othonos e Kalli, 1999]. Uma rede de Bragg formada no núcleo de uma fibra ótica, na direção de propagação, z , tem perfil de índice de refração dado pela expressão [Erdogan, 1997]:

$$n(z) = n_{co} + \Delta n = \Delta n(z) + h(z) \cos\left(\frac{2\pi z}{\Lambda} + f(z)\right) \quad (2.4)$$

Na equação 2.4 $\delta n(z)$ representa o valor médio da modulação do índice de refração calculado ao longo do período espacial Λ , $h(z)$ a visibilidade do padrão de intensidades e $f(z)$ a inexistência de periodicidade espacial de modulação do índice de refração. Se a fase $f(z)$ tem dependência com z se diz que a rede apresenta gorgueio (*Chirp*), o que significa que o período da rede varia ao longo da estrutura. Quando a amplitude, $h(z)$, varia ao longo da fibra, picos laterais à banda de reflexão espectral da rede podem ser atenuados, nesse caso incluem-se estruturas com perfil de índice apodizado.

A banda central do espectro de reflexão da rede de Bragg uniforme com extensão finita é sempre acompanhada da formação de lóbulos laterais. Esses lóbulos têm origem na descontinuidade do índice de refração nas extremidades da rede de Bragg de comprimento finito. Muitas aplicações requerem, no entanto, a utilização de redes de Bragg para separação de canais multiplexados em comprimento de onda. Aqui, a presença de lóbulos laterais reduz o isolamento entre canais adjacentes, afetando o desempenho deste tipo de dispositivo. Nessa situação é necessário recorrer a técnicas de apodização, para suprimir os lóbulos laterais da resposta espectral.

Na prática, a apodização é conseguida variando a amplitude do coeficiente de acoplamento ao longo do comprimento da rede; i. e., reduzindo gradualmente a amplitude de modulação do índice das extremidades da rede, de forma a minimizar a descontinuidade, como exemplificado nos esquemas da figura 2.3.

A fabricação de redes apodizadas é intrínseca aos sistemas com exposição a partir de lasers UV com adequado perfil de intensidade transversal. Neste caso, a distribuição da amplitude de modulação do índice reproduz, em princípio, o próprio perfil transversal da distribuição de intensidade [Mizrahi e Sipe, 1993]. A técnica de varredura do feixe ao longo

da máscara de fase permite igualmente obter redes de Bragg apodizadas, variando o tempo de exposição efetivo em cada posição [Martin e Ouelle, 1994; Cole *et al.*, 1995].

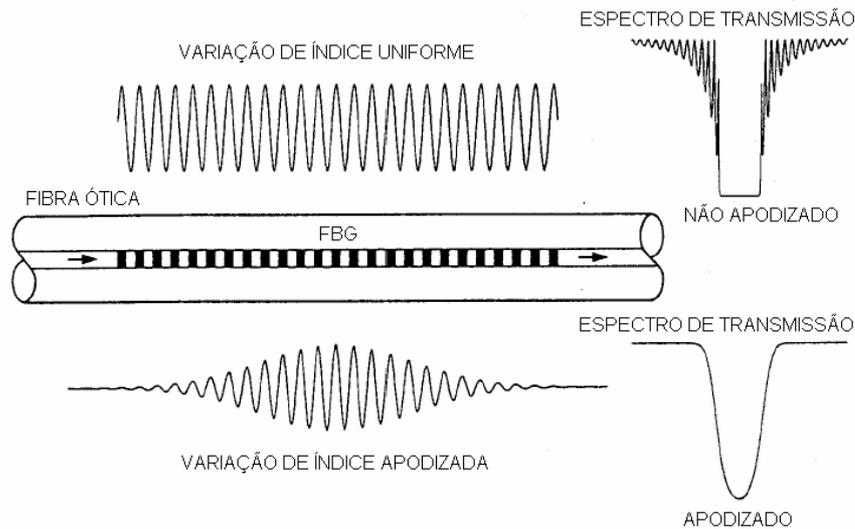


Figura 2.3 Representação esquemática do princípio de operação das redes de Bragg apodizadas, com supressão dos lóbulos laterais

2.3.1. COMPRIMENTO DE ONDA DE BRAGG

A condição de Bragg requer que sejam satisfeitas tanto a conservação de energia como a conservação de momento; assim a frequência da radiação incidente e da radiação refletida são as mesmas e o vetor de onda incidente, \vec{K}_i , somado ao vetor de onda da rede, \vec{K} , deve ser igual ao vetor da radiação espalhada, \vec{K}_d [Othonos e Kalli, 1999]

$$\vec{K}_i + \vec{K} = \vec{K}_d \quad (2.5)$$

O vetor de onda da rede tem direção normal aos planos da rede e magnitude $2p/\Lambda$, onde Λ é o período da rede esquematizado na figura 2.4.

O vetor de onda difratado é igual em magnitude, mas oposto em sentido, ao vetor de onda incidente. Logo, a condição de conservação de momento leva a:

$$\frac{2pn}{l} \text{sen}q_d = \frac{2pn}{l} \text{sen}q_i + m \frac{2p}{\Lambda} \quad (2.6)$$

onde m é a ordem da difração, sendo $m = -1$ para redes em fibra ótica. Como a constante de propagação modal, b , é simplesmente $b = (2p/l)n_{eff}$, onde n_{eff} é o índice de refração para cada modo de propagação ($n_{eff} = n_{co} \text{sen}q$), equação 2.6 pode ser reescrita:

$$b_d = b_i - \frac{2p}{\Lambda} \quad (2.7)$$

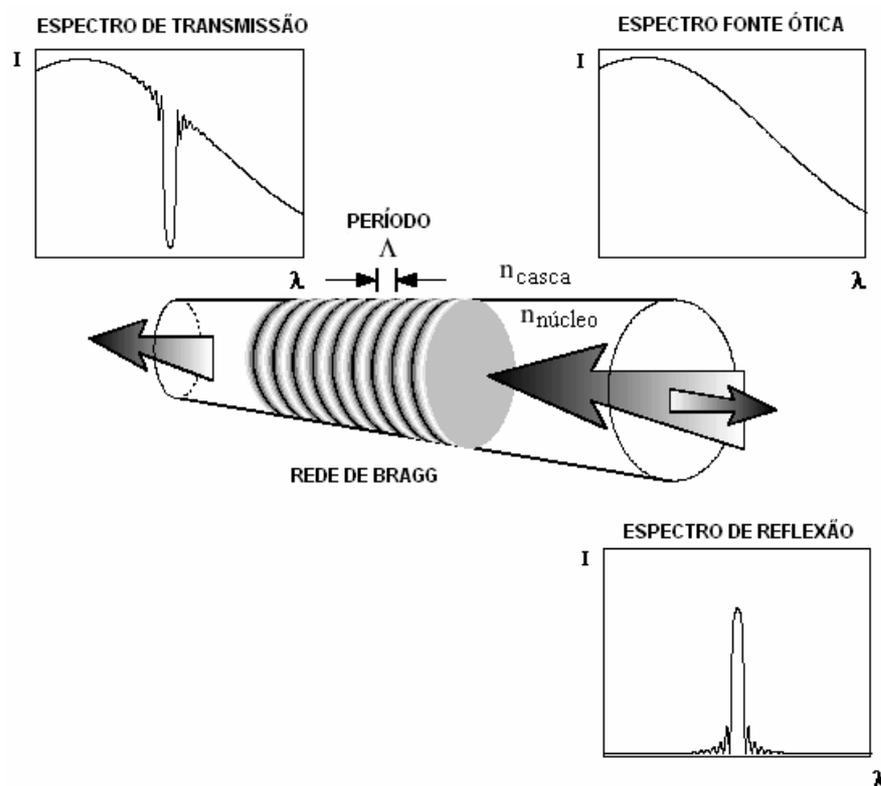


Figura 2.4 Representação da rede de Bragg e espectros associados

Para o caso esquematizado na figura 2.4, o modo final se propaga na direção oposta ao modo incidente, $b_d < 0$, o comprimento de onda para a reflexão de um modo de índice de refração efetivo $n_{eff,i}$ em um modo de índice de refração $n_{eff,d}$ é

$$l = (n_{eff,i} + n_{eff,d})\Lambda \quad (2.8)$$

Se os dois modos são, a menos do sentido de propagação, idênticos, como no caso de fibras monomodo, chega-se à condição de Bragg:

$$l_B = 2n_{eff} \Lambda \quad (2.9)$$

A equação 2.9 indica que somente comprimentos de onda iguais ou muito próximos da ressonância de Bragg serão refletidos pela rede formada no núcleo da fibra; em caso contrário serão transmitidos, conforme representado na figura 2.4.

2.3.2. REFLETIVIDADE EM REDES DE BRAGG

A partir do emprego da teoria de modos acoplados, a refletividade de rede com amplitude e período de modulação constantes foi obtida por Lam e Garside [1981]:

$$R(l, I) = \frac{\Omega^2 \sinh^2(sl)}{\left(\frac{\Gamma}{2}\right)^2 \sinh^2(sl) + s^2 \cosh^2(sl)} \quad (2.10)$$

onde $R(l, I)$ é a refletividade em função do comprimento da rede, l , e do comprimento de onda, λ ; Ω é o coeficiente de acoplamento correspondente ao acoplamento entre as ondas copropagantes e contrapropagantes, Γ representa o descasamento de fase para um dado comprimento de onda da banda espectral da fonte ótica, λ , definido como [Lam e Garside, 1981], [Shenoy *et al.*, 1999]:

$$\Gamma = \left(2 \frac{2pn_{eff}}{I}\right) - \left(\frac{2p}{\Lambda}\right) \quad (2.11)$$

Na equação 2.10 o parâmetro s é dado por:

$$s = \sqrt{\Omega^2 - \left(\frac{\Gamma}{2}\right)^2} \quad (2.12)$$

O coeficiente de acoplamento para uma variação senoidal da perturbação do índice de refração ao longo do eixo da fibra é dado por [Othonos e Kalli, 1999]:

$$\Omega = \frac{p dn_{eff}}{l} M_p \quad (2.13)$$

Na equação 2.13, M_p é a fração da potência do modo contido no núcleo da fibra. Como a rede de Bragg é gravada uniformemente no núcleo da fibra, M_p pode ser aproximado por $1-V^2$ [Lam e Garside, 1981], onde V é a frequência normalizada da fibra, $V = (2p/l)a(n_{co}^2 - n_{cl}^2)^{1/2}$, a é o raio do núcleo e n_{co} e n_{cl} os índices de núcleo e casca, respectivamente. No comprimento de onda central da rede de Bragg há casamento de fase, $\Gamma = 0$. Portanto, a expressão para refletividade torna-se:

$$R(l, l) = \tanh^2(\Omega l) \quad (2.14)$$

Uma expressão geral, aproximada, para largura de banda máxima a meia altura (FWHM) da rede é dada por [Othonos e Kalli, 1999]:

$$\Delta l = l_B s \left[\left(\frac{\Delta n}{2n_{co}} \right)^2 + \left(\frac{\Lambda}{l} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.15)$$

na equação 2.15, o parâmetro s assume valores entre 1, para redes fortes (com reflexão próxima de 100%), e 0,5, para redes fracas.

As equações 2.14 e 2.15 mostram que a refletividade cresce e a largura espectral diminui com o aumento do comprimento de uma rede uniforme e/ou com o aumento da modulação do índice de refração (Δn). Dois espectros de reflexão em função do comprimento de onda são mostrados na figura 2.5, um espectro foi calculado através da equação 2.10 com os seguintes parâmetros: $\Delta l_B = 0,18$ nm, $l_B = 1547,07$ nm, $\Lambda = 0,522$ μ m, $l = 10$ mm,

$R(l, I) = 89,5\%$ e $dn_{eff} = 0,09 \times 10^{-3}$ (linha cheia). O resultado da simulação é comparado a uma rede gravada em fibra fotossensível hidrogenada pelo método interferométrico com translação no sistema de gravação da UA (círculos abertos).

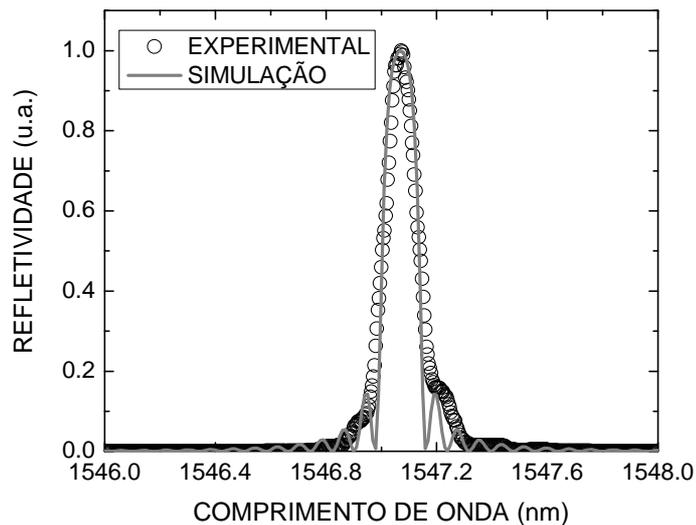


Figura 2.5 Espectros de refletividade de uma rede de Bragg uniforme, linha cheia - simulado pela equação 2.10 e círculos abertos rede de Bragg gravada por sistema interferométrico com translação

Conforme observado na figura 2.5 há uma pequena diferença entre o espectro simulado e aquele medido experimentalmente. É importante ressaltar que desvios da uniformidade são obtidos involuntariamente quando feixes de UV gaussianos (comumente obtidos na saída de lasers) são utilizados para a fabricação de redes. Isso ocorre pois nesse caso as extremidades da rede recebem uma dose inferior de UV, resultando num índice médio diferente do existente no centro e levando a periodicidades diferentes. A radiação refletida no começo e fim da rede possui mesmo comprimento de onda (diferente do da radiação refletida no centro) e interfere gerando oscilações no espectro da rede, como visto no espectro da rede gravada apresentado na figura 2.5. Outra explicação para aquela pequena diferença entre os espectros apresentados na figura 2.5 é atribuído a uma diferença no alinhamento no plano horizontal dos feixes pelo interferômetro do sistema de gravação das redes.

2.3.3. SENSIBILIDADE DAS REDES DE BRAGG COM DEFORMAÇÃO E TEMPERATURA

A presença de elementos não nulos nos tensores foto-elástico e termo-ótico, para o vidro de sílica empregado na produção das fibras fazem com que as características das redes de Bragg nessas fibras sejam afetadas, quer pela aplicação de tensão mecânica, quer pela temperatura. No caso da sílica, material amorfo, a média sobre os vários micro-domínios não é nula, resultando em valores efetivos diferentes de zero. Isso torna as redes de Bragg em elementos sensores para essas grandezas, podendo ser incorporados facilmente a enlaces em fibra ótica [Kersey *et al.*, 1997].

Mudanças na periodicidade espacial, Λ , ou no índice de refração efetivo, n_{eff} , de uma rede acarretam mudanças no comprimento de onda de Bragg, I_B . Conseqüentemente, qualquer perturbação que altere as referidas grandezas, como deformação mecânica ou temperatura, induzirá mudança na posição relativa do espectro de reflexão da rede de Bragg, o deslocamento espectral é dado por [Kersey *et al.*, 1997]:

$$\Delta I_B = 2 \left(\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial l} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial l} \right) \Delta l + 2 \left(\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \Delta T \quad (2.16)$$

onde l é o comprimento da rede de Bragg e T é a temperatura.

O primeiro termo na equação 2.16 representa o efeito da deformação sobre a rede. Isso corresponde à mudança no espaçamento da rede e à mudança foto-elástica induzida no índice de refração, podendo também – desprezando as variações de origem térmica – ser representado pela equação:

$$\Delta I_B = I_B (1 - p_e) e_z \quad (2.17)$$

onde e representa a componente de deformação relativa por unidade de comprimento e p_e representa a constante foto-elástica efetiva, definida como:

$$p_e = \frac{n_{eff}^2}{2} [p_{12} - n(p_{11} + p_{12})] \quad (2.18)$$

na equação 2.18 p_{11} e p_{12} são componentes do tensor foto-elástico e ν o coeficiente de Poisson para sílica no núcleo da fibra, que apresentam os seguintes valores: $p_{11} = 0,113$, $p_{12} = 0,252$, $n = 0,16$. Usando esses parâmetros e $n_{eff} = 1,482$ a equação 2.17 prevê a sensibilidade de 1,2 pm para 1 μ strain (1 μ m/m) de deformação relativa da rede de Bragg no comprimento de onda de 1550 nm [Othonos e Kalli, 1999].

O segundo termo da equação 2.16 representa o efeito da temperatura na fibra ótica. O deslocamento no comprimento de onda de Bragg devido à expansão térmica resulta da modificação no espaçamento da rede e mudança do índice de refração. Esse deslocamento, para uma variação de temperatura ΔT pode ser escrito como:

$$\Delta I_B = I_B (a_\Lambda + a_n) \Delta T \quad (2.19)$$

onde $a_\Lambda = (1/\Lambda)(\partial\Lambda/\partial T)$ é o coeficiente de expansão térmica para a fibra (aproximadamente $0,55 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ para sílica). O valor $a_n = (1/n_{eff})(\partial n_{eff}/\partial T)$ representa o coeficiente termo-ótico, aproximadamente igual a $8,6 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ para fibra com núcleo de sílica dopada com germânio. A equação 2.19 fornece sensibilidade de, aproximadamente, 13,7 pm/ $^\circ\text{C}$, para rede com comprimento de onda de Bragg em 1550 nm [Othonos e Kalli, 1999].

2.4. GRAVAÇÃO DE REDES DE BRAGG

O processo de gravação de redes de Bragg em fibras óticas é uma tarefa delicada. A necessidade de se ter absoluto controle de comprimentos e deslocamentos da fibra da ordem de microns faz com que a estabilidade seja uma das principais características de um sistema de gravação.

As redes de Bragg podem ser gravadas com diferentes modos, divididos em dois conjuntos principais, as técnicas interferométricas e não-interferométricas.

Nas técnicas interferométricas, das quais a mais difundida é a técnica holográfica [Meltz, Morey e Glenn, 1989], a modulação espacial da intensidade é formada por interferência de dois feixes coerentes. Assim, a sua utilização exige uma fonte laser UV com coerência temporal adequada, que torne possível, na prática, a construção do interferômetro. Além desta limitação, a maioria das montagens experimentais requer igualmente a utilização de fontes com coerência espacial.

A técnica mais difundida entre as técnicas não utilizando um interferômetro, e atualmente a mais utilizada de entre todas as técnicas de fabricação disponíveis (interferométricas e não interferométricas), é a da máscara de fase [Hill *et. al.*, 1993b], devido à sua simplicidade, capacidade de reprodutibilidade e a reduzida coerência da emissão laser necessária para formar interferência.

Nesta seção descreve-se o processo de fabricação com base nas técnicas de máscara de fase e interferométrica com máscara de fase, comum a todas as redes utilizadas no desenvolvimento desta tese. Um sistema experimental utilizando essa técnica foi montado no decorrer deste trabalho no Núcleo de Dispositivos Fotorefrativos do CEFET/PR.

2.4.1. MÁSCARA DE FASE

A máscara de fase, elemento difrator utilizado em transmissão, consiste em uma série de depressões longitudinais na superfície de substrato de sílica produzidas por fotolitografia. Inicialmente, o substrato de sílica, polido com qualidade ótica nas duas superfícies, é coberto por camada metálica, normalmente de tungstênio ou de cromo, com algumas centenas de Angstroms de espessura, sobre a qual é depositado verniz fotossensível. A matriz da rede de difração pode ser impressa no verniz por dois métodos, conhecidos por inscrição holográfica ou inscrição por varredura de feixe de elétrons.

Após a impressão, o verniz fotossensível é revelado de forma a remover as zonas sensibilizadas, obtendo-se assim réplica da matriz sobre a camada metálica. Por fim, esta matriz é transferida para a camada metálica por *dry etching*, deixando exposto o substrato de sílica nas zonas desbastadas. A sílica é então gravada por ataque químico, sendo posteriormente removida a camada metálica residual. Assim, é gravada uma rede de difração no substrato de sílica com capacidade de difratar o feixe em transmissão [Kashyap, 1999].

O princípio de operação é baseado na difração de feixe incidente em várias ordens, $m = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$. O feixe incidente e as ordens difratadas seguem a equação de difração, como o período da máscara de fase é igual a Λ_{pm} , obtém-se a seguinte relação, [Kashyap, 1999]:

$$\Lambda_{pm} = \frac{m\lambda_e}{\sin \frac{q_m}{2} - \sin q_i} \quad (2.20)$$

onde q_m é o ângulo da m -ésima ordem difratada, λ_e o comprimento de onda e q_i o ângulo do feixe UV incidente. Por exemplo, quando o período da rede está entre λ_e e $\lambda_e/2$, a onda

incidente é difratada em somente uma única ordem ($m = \pm 1$) com o restante da potência permanecendo na onda transmitida ($m = 0$), conforme esquematizado na figura 2.6.

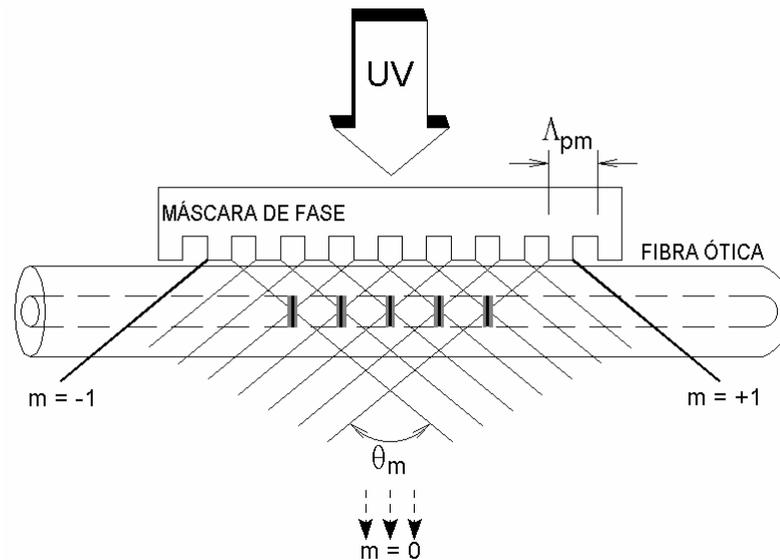


Figura 2.6 Máscara de fase com representação do feixe UV incidente e as ordens 0 e ± 1 , [Kashyap, 1999]

Com a radiação UV em incidência normal, $q_i = 0$, a radiação difratada é dividida nas ordens $m = 0$ e ± 1 . Um padrão de interferência pode ser criado na fibra pela superposição dos feixes de ordens ± 1 . O período da rede Λ está relacionado ao ângulo de difração, $q_m/2$ [Kashyap, 1999]

$$\Lambda = \frac{l_e}{2 \sin \frac{q_m}{2}} = \frac{\Lambda_{pm}}{2} \quad (2.21)$$

A maneira mais simples de se utilizar a máscara de fase na gravação de redes é manter a fibra ótica junto a superfície da máscara alinhada transversalmente com as depressões, vide figura 2.6. O período gravado na rede será a metade do período da máscara (equação 2.21). A extrema simplicidade do alinhamento e a estabilidade inerente do padrão de interferência permitem, porém fabricar redes de Bragg com elevada reprodutibilidade. O método descrito

não permite que redes de diferentes comprimentos de onda sejam gravadas com o uso da mesma máscara de fase [Kashyap, 1999], [Othonos e Kalli, 1999].

Um ponto importante que deve ser considerado está na densidade de potência máxima admissível pela máscara de fase, limitada – segundo especificações do fabricante – a um valor inferior a 1 J/cm^2 , suficiente para a maior parte das aplicações. Em aplicações específicas, como a fabricação de redes de Bragg por exposição de um único pulso [Malo *et al.*, 1993] ou de número reduzido de pulsos [Dyer *et al.*, 1994], a densidade de potência máxima sobre a fibra pode, no entanto, ultrapassar este limite de deterioração. O uso continuado com exposição a níveis elevados de potência condiciona o desempenho das máscaras de fase por deterioração da superfície induzida por absorção residual, formação de centros absorvedores e auto focagem [Nguyen *et al.*, 1997].

2.4.2. INTERFERÔMETRO COM MÁSCARA DE FASE

A técnica de gravação interferométrica, a primeira técnica de gravação externa de redes de Bragg em fibra ótica, foi demonstrada por Meltz, Morey e Glenn [1989], desde então diversas variações do método foram propostas [Dyer, 1996], [Wang *et al.* 2001] e [Floreani *et al.*, 2002].

A montagem utilizada para gravação das redes no Núcleo de Dispositivos Fotorefrativos do CEFET/PR e no Laboratório de Sistemas Ópticos Coerentes da Universidade de Aveiro (UA) está apresentada na figura 2.7. Nela, a fonte de radiação consiste de laser no ultravioleta (CEFET/PR: *Nd:YAG* 266 nm *NEW WAVE RESEARCH*, modelo *TEMPEST 20 Hz*, UA: Ar^+ dobrado por um cristal *BBO*, Beta Borato de Bário, 244 nm). O feixe de luz UV, difratado nas ordens ± 1 pela máscara de fase é recombinado na fibra através de dois espelhos, E3 e E4. O feixe de ordem zero da máscara é bloqueado por

um anteparo opaco. Na montagem os espelhos são movimentados por dois motores de corrente contínua (CC) (*NEWPORT – M-495CC*), possibilitando o ajuste para que os feixes interfiram no mesmo ponto da fibra e assim produzam o padrão de interferência.

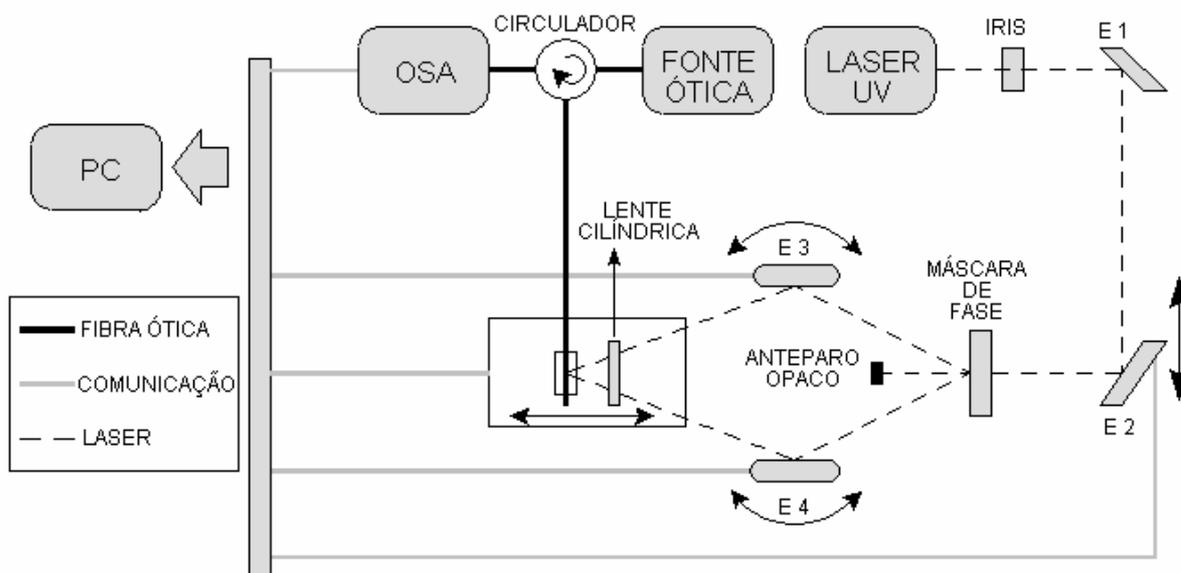


Figura 2.7 Esquema da montagem utilizada para gravação de redes de Bragg pelo método interferométrico com máscara de fase no CEFET/PR e na Universidade de Aveiro. Legenda: E1 – Espelho fixo; E2 – Espelho com translação no plano horizontal; E3 e E4 – Espelhos com rotação no plano horizontal; OSA – Analisador de espectro óptico; PC – Computador pessoal

O suporte da fibra encontra-se sobre anteparo com deslocamento horizontal, que é ajustado por um motor CC (*NEWPORT – M-UTM100CC.1DD*). O diâmetro do feixe pode ser alterado pela íris, posicionada logo após a saída do laser, de forma a definir o comprimento da rede gravada e selecionar a região do feixe laser com melhor padrão espacial. Para melhor focalizar os feixes na fibra, uma lente cilíndrica com distância focal de 50,2 mm foi colocada entre os espelhos e a fibra.

Nessa montagem, o comprimento de onda refletido pela rede gravada, I_B , é determinado pela metade do ângulo de cruzamento entre os feixes, q_m , e pelo comprimento de onda do laser de gravação, I_e , [Meltz, Morey e Glenn, 1989]:

$$l_B = \frac{l_e n_{eff}}{\text{sen} \frac{q_m}{2}} \quad (2.22)$$

onde n_{eff} é o índice de refração efetivo da fibra.

Devido à elevada sensibilidade de l_B com pequenas variações de q_m , os espelhos rotacionais utilizados permitem uma resolução de 10^{-3} graus e são controlados externamente por um computador pessoal (PC). Com esta resolução, é possível gravar redes de Bragg com incrementos de $\approx 0,11$ nm no comprimento de onda. O posicionador linear, onde encontra-se a fibra, tem uma resolução de $0,1 \mu\text{m}$ e também é controlado pelo computador. Dessa forma, sempre que há uma alteração no ângulo dos espelhos, o programa de controle desenvolvido, corrige a posição da fibra para o ponto de focagem.

Em 23 de Setembro de 2002 foi gravada a primeira rede de Bragg no Núcleo de Dispositivos Fotorefrativos do CEFET/PR. Antes dessa data foram projetadas as peças mecânicas para acoplamento da máscara de fase, motores, espelhos e suportes para a montagem do interferômetro do sistema de gravação. Com o sistema montado a primeira dificuldade foi em saber qual comprimento de onda seria gravada a rede. Essa dificuldade é devida à imprecisão das medidas referentes as distâncias que compõem o interferômetro. Assim, com os espelhos alinhados perpendicularmente a máscara de fase e paralelos entre si esperava-se gravar uma rede em comprimento de onda na ordem de 1533 nm. Porém, para aquela situação o comprimento de onda da rede gravada foi de 1478 nm, vide espectro apresentado na figura 2.8 onde é possível observar o espectro referente aos quatro por cento da reflexão Fresnel e o espectro da rede de Bragg (em detalhe).

Essa diferença entre o comprimento de onda esperado e o medido é atribuído ao não paralelismo entre os espelhos. A primeira rede gravada apresentou baixa refletividade (\approx

12 dB). Essa baixa refletividade relaciona-se a falta de conhecimento de parâmetros de gravação como, por exemplo, potência do laser, frequência e tempo de exposição.

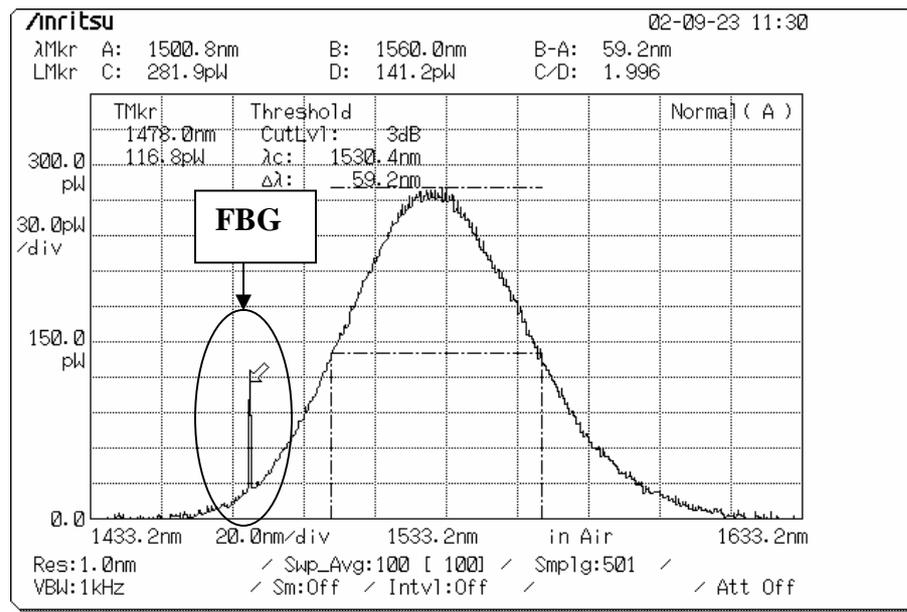


Figura 2.8 Espectro da primeira rede gravada no CEFET/PR (detalhe) mais o espectro referente a reflexão de Fresnel

Na figura 2.9 são apresentados os pontos experimentais e as curvas simuladas para representar a dependência do comprimento de onda de Bragg com os ângulos entre os espelhos e o ponto de cruzamento entre os feixes do laser de gravação, ajustado pelo motor linear do sistema de gravação do CEFET/PR. Os pontos de cruzamento entre os feixes foi adquirido experimentalmente e em seguida foi feita uma extrapolação, representado pelos símbolos na figura 2.9. Na figura 2.9 as linhas representam a simulação numérica através das equações do interferômetro com máscara de fase, previamente descritas.

Para que o sistema de gravação interferométrico montado no CEFET/PR ficasse com dimensões reduzidas e assim torná-lo mais compacto, optou-se pela menor distância entre os espelhos E3 e E4. Dessa forma os espelhos foram posicionados fora do eixo de rotação dos motores. Para essa situação a equação que descreve o ponto de focagem na fibra é:

$$z = \left(\frac{y - d(1 - \cos(q))}{\tan(q)} \right) + d(\sin(q)) \quad (2.23)$$

onde z é a distância da mediatriz dos espelhos à fibra, y é a distância da face dos espelhos ao centro do interferômetro e d é a distância do centro de rotação do posicionador à face do espelho. Na equação 2.23 os termos $d(1 - \cos(q))$ e $d(\sin(q))$ foram adicionados para corrigir o desvio ocasionado pelo deslocamento dos espelhos.

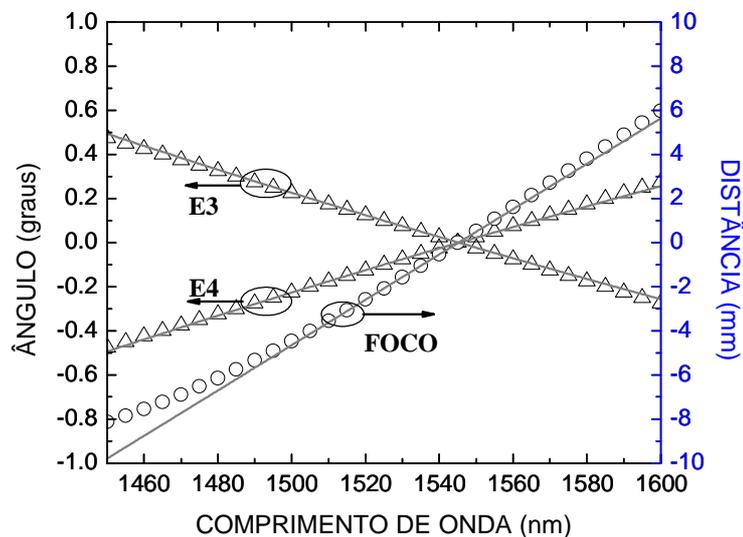


Figura 2.9 pontos experimentais (símbolos) e simulação numérica (linhas) da dependência do comprimento de onda de Bragg versus os ângulos dos espelhos (E3 e E4) e a correção do ponto de focagem do padrão de interferência (FOCO)

Para gravação de redes com largura de linha estreita e alta refletividade, uma otimização no sistema de gravação da Universidade de Aveiro foi implementado. Um quarto motor de precisão foi adicionado à montagem de forma a deslocar o espelho posicionado na entrada do interferômetro, E2 na figura 2.7. Com a translação do espelho em velocidade constante, o feixe UV faz uma varredura na máscara de fase, fazendo com que a visibilidade do padrão de interferência, de dimensão finita em virtude da coerência espacial e dimensão do feixe, tenha um deslocamento relativo na direção oposta. Isso faz com que as franjas do

padrão de interferência sejam intensificadas na direção do deslocamento da figura de visibilidade, a forma dessa função de recobrimento adiciona um perfil de apodização na variação de índice. Esse método de gravação faz com que o contraste das franjas de interferência varie gradualmente, deixando dessa forma o espectro da rede mais uniforme [Wang *et al.* 2001].

A monitoração da gravação de redes de Bragg em fibra é feita em tempo real e, conseqüentemente, sua caracterização é imediata, podendo ser observada por um analisador de espectro ótico (OSA). A montagem experimental para caracterização de redes de Bragg está apresentada no esquema da figura 2.7. Nessa montagem, é necessária a utilização de uma fonte ótica de banda larga, podendo ser uma lâmpada, um LED ou a emissão espontânea amplificada (ASE) de um amplificador ótico de fibra dopada com érbio (EDFA), sempre na faixa espectral de interesse.

A maneira direta para a determinação da posição espectral de uma rede é lançar o sinal de banda larga até a rede e registrar seu espectro ótico de transmissão com o OSA. Dependendo da refletividade da rede, a amplitude do sinal transmitido é pequena em relação à amplitude do sinal da fonte, dificultando a determinação de sua posição espectral. Para contornar esta dificuldade, pode ser utilizado um circulador ótico ou um acoplador bidirecional, onde o sinal da fonte ótica é lançado em um de seus braços, guiado até a rede e a luz por ela refletida é guiada até o OSA, passando outra vez pelo circulador. Nessa situação, determina-se o espectro de reflexão da rede.

O sistema de caracterização apresentado permite que a medida seja feita no tempo de aquisição e amostragem do sinal pelo equipamento. A saída do OSA é monitorada pelo computador, permitindo analisar a evolução do processo assim como o armazenamento posterior de todos os dados referentes a gravação como, por exemplo, comprimento de onda

de Bragg, refletividade e largura de banda. É importante que as extremidades das fibras que, eventualmente, não estejam sendo usadas, sejam imersas em líquido casador de índice de refração (IM), de forma a minimizar as reflexões de Fresnel, o que induziria sinais espúrios na medida realizada.

2.4.3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os dois sistemas de gravação descritos na seção 2.4.2 foram empregados para gravar redes de Bragg utilizadas nesta tese pelos métodos interferômetro de máscara de fase e direto sob a máscara. A seguir são discutidas algumas características do processo de gravação e de algumas redes obtidas.

Os sistemas de gravação do CEFET/PR e da UA são semelhantes, sendo a principal diferença o laser UV. Com base nessa diferença é apresentada uma comparação entre duas redes gravadas nos dois sistemas. A fibra utilizada foi a Fibercore – PS1250/1500 e o tempo de gravação foi de 10 minutos.

Nas figuras 2.10 e 2.11 são apresentados os gráficos resultantes do crescimento de redes de Bragg gravadas na Universidade de Aveiro e no CEFET/PR, pelo método interferométrico sem translação, mostrando o crescimento em função do tempo de gravação e o comprimento de onda em função do tempo. Nas figuras ainda são mostrados os espectros das redes gravadas em fibra fotossensível.

Os sistemas de gravação são os mesmos apresentados na figura 2.7, sem translação do espelho E2. As redes gravadas apresentam as seguintes características:

- Rede gravada na UA: comprimento de onda de 1541,7 nm, largura de banda a meia altura de 0,33 nm, refletividade de -26dB (espectro na figura 2.10c).

- Rede gravada no CEFET/PR: comprimento de onda de 1486,3 nm, largura de banda a meia altura de 0,25 nm, refletividade de -18dB (espectro na figura 2.11c).

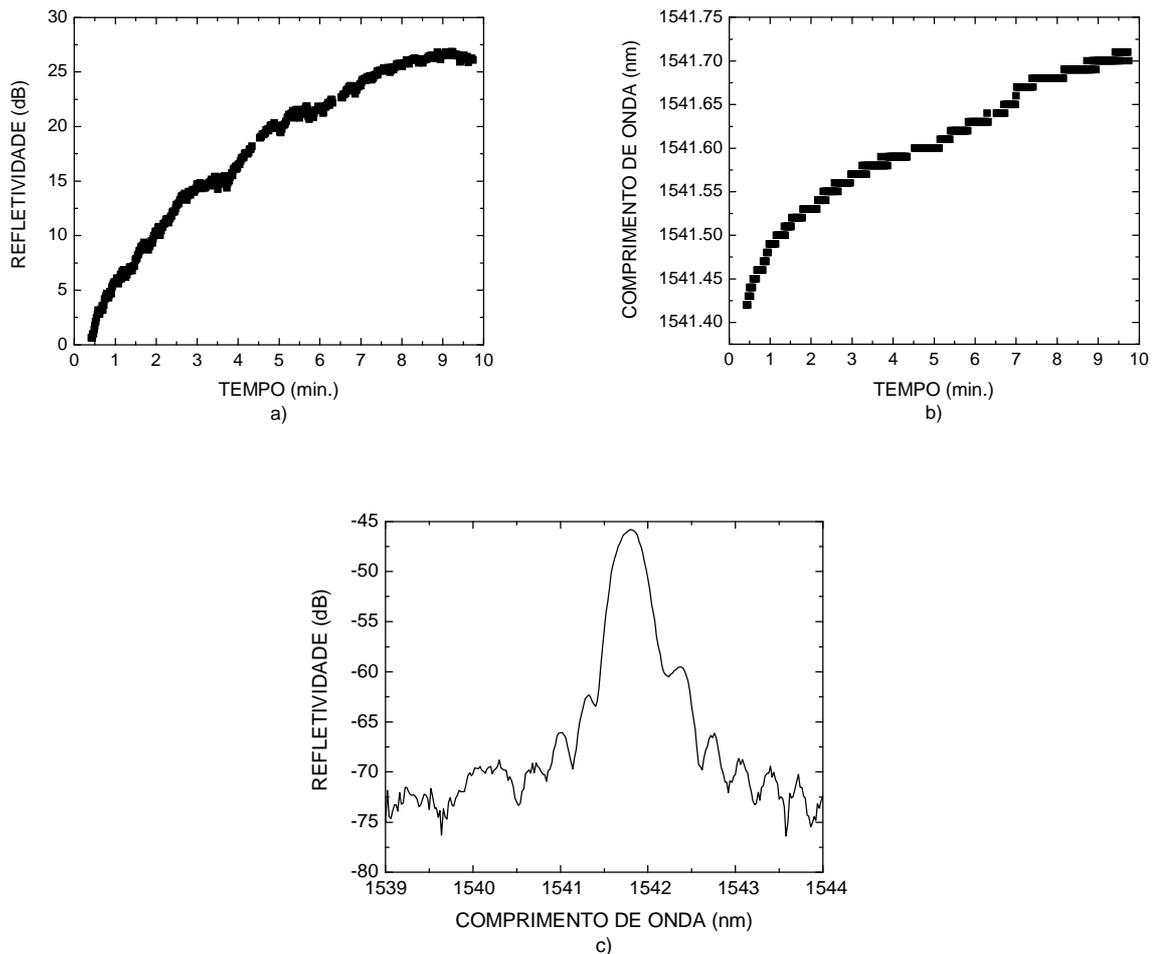


Figura 2.10 Gráficos resultantes do crescimento de uma rede de Bragg gravada pelo interferométrico do sistema de gravação da UA: a) refletividade em função do tempo de gravação, b) comprimento de onda em função do tempo e c) espectro da rede gravada em fibra fotossensível

A evolução típica da resposta espectral em reflexão da rede de Bragg em função do tempo de exposição é ilustrada na figura 2.10a e 2.11a. Como é possível observar, além do aumento na refletividade verifica-se também um desvio gradual do comprimento de onda de Bragg, vide figura 2.10b e 2.11b, para comprimentos de onda superiores. Este desvio, $\Delta\lambda_B$, resulta do aumento de índice efetivo, δn_{eff} , de acordo com a relação [Othonos e Kalli, 1999]:

$$\Delta I_B = 2dn_{eff}\Lambda \quad (2.8)$$

enquanto o aumento da refletividade resulta do aumento da amplitude de modulação de índice Δn :

$$R = \tanh^2\left(\frac{pdn_{eff}M_p l}{I_B}\right) \quad (2.9)$$

onde M_p é a fração da potência do modo contido no núcleo da fibra e l é o comprimento da rede, conforme descrito na seção 2.3.

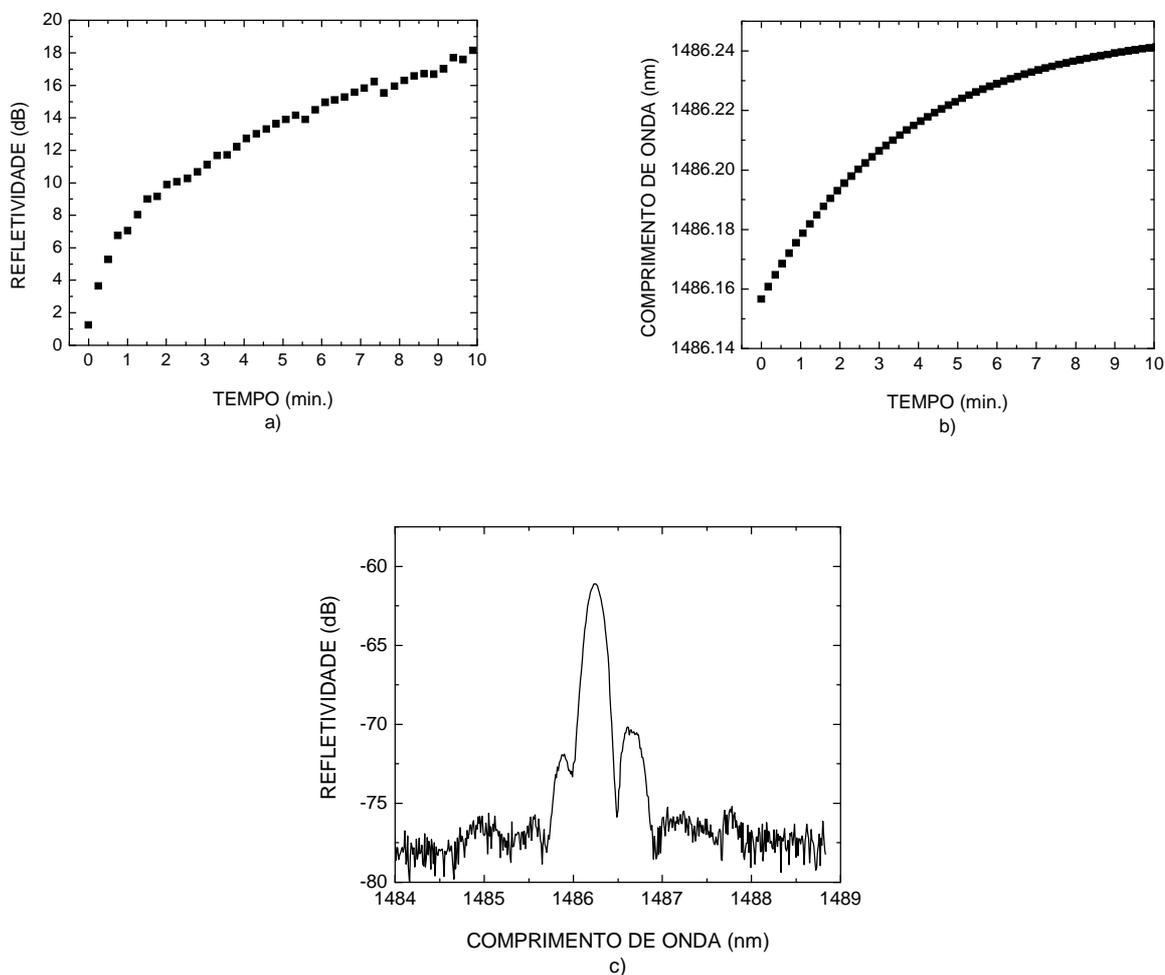


Figura 2.11 Gráficos resultantes do crescimento de uma rede de Bragg gravada pelo interferométrico do sistema de gravação do CEFET/PR: a) refletividade em função do tempo de gravação, b) comprimento de onda em função do tempo e c) espectro da rede gravada em fibra fotossensível

Apesar das curvas de crescimentos serem semelhantes para as duas redes gravadas, algumas diferenças podem ser destacadas. Para o tempo de gravação, 10 minutos, a rede da UA apresenta uma tendência de saturação na curva de crescimento, refletividade *versus* tempo, enquanto que a rede do CEFET/PR apresenta uma tendência de crescimento para o mesmo período. Nas curvas de comprimento de onda *versus* tempo, a rede gravada na UA apresentou uma maior variação do comprimento de onda, 0,3 nm, quando comparada com a rede gravada no CEFET/PR, 0,09 nm. Essa diferença está associada a uma menor variação do índice de refração da rede gravada no CEFET/PR o que resulta em uma rede com refletividade menor, conforme evidência a curva de refletividade *versus* tempo na figura 2.11a.

Na tabela 2.2 são apresentadas às características das redes gravadas diretamente com a máscara de fase, com e sem translação do feixe laser UV.

Tabela 2.2 Características do sistema de gravação por máscara de fase e das redes gravadas com e sem translação do feixe laser UV

TIPO DE GRAVAÇÃO		MÁSCARA DE FASE SEM TRANSLAÇÃO	MÁSCARA DE FASE COM TRANSLAÇÃO
λ_B		1524,6 nm	1524,6 nm
$\Delta\lambda_B$		0,42 nm	0,15 nm
PROFUNDIDADE		-22 dB	-26 dB
IRIS		1,5 mm	1,5 mm
POTÊNCIA		100mW	100 mW
MÁSCARA DE FASE	MARCA	ADC PHOTONICS	ADC PHOTONICS
	PERÍODO	1053,90 nm	1053,90 nm
	DIMENSÃO	10 mm	10 mm
COMPRIMENTO DA REDE		≈ 3 mm	10 mm
VELOCIDADE DE GRAVAÇÃO			0,02 mm/s

O sistema de gravação e caracterização é semelhante ao apresentado na figura 2.7, diferenciando no posicionamento da fibra. Nesta montagem a fibra foi posicionada junto a superfície da máscara alinhada transversalmente com uma máscara de 10 mm de comprimento (ABC PHOTONICS – Período: 1053,90 nm). Para a gravação a íris foi mantida com uma abertura de 1,5 mm. Para a rede gravada pela translação do feixe o espelho E2 foi transladado paralelamente a fibra com uma velocidade de 0,02 mm/s. Para a rede gravada com translação do feixe de entrada são observadas duas vantagens; a primeira, uma rede com largura de banda a meia altura menor e a segunda, uma maior refletividade. Essas vantagens estão associadas ao maior comprimento, l , da rede gravada pela translação do feixe.

Para os resultados apresentados na tabela 2.3 o sistema utilizado foi o interferométrico com máscara de fase com e sem translação do feixe laser.

Tabela 2.3 Características do sistema de gravação interferométrico e das redes gravadas com e sem translação do feixe laser UV

TIPO DE GRAVAÇÃO		INTERFEROMÉTRICO SEM TRANSLAÇÃO	INTERFEROMÉTRICO COM TRANSLAÇÃO
λ_B		1544,34 nm	1544 nm
$\Delta\lambda_B$		0,30 nm	0,11 nm
PROFUNDIDADE		-28 dB	-30 dB
IRIS		1,5 mm	1,5 mm
POTÊNCIA		100 mW	100 mW
MÁSCARA DE FASE	MARCA	IBSEN PHOTONICS	IBSEN PHOTONICS
	PERÍODO	1068,00 nm	1068,00 nm
	DIMENSÃO	25 mm	25 mm
COMPRIMENTO DA REDE		≈ 3 mm	25 mm
VELOCIDADE DE GRAVAÇÃO			0,02 mm/s

O sistema de gravação e caracterização é o mesmo apresentado figura 2.7. Nesta montagem foi utilizada uma máscara de 25 mm de comprimento (IBSEN PHOTONICS – Período: 1068 nm). Para a gravação a íris foi mantida com uma abertura de 1,5 mm. Para a rede gravada pela translação do feixe o espelho E2 foi transladado paralelamente a fibra com uma velocidade de 0,02 mm/s. Assim como pelo método de gravação direto por máscara de fase, para o sistema interferométrico o maior comprimento, l , da rede gravada possibilita redes com menores larguras de banda e maiores refletividades.

Em ambos os métodos a translação do feixe laser mostrou a possibilidade de se conseguir redes com maior refletividade e menor largura de banda a meia altura. Porém, é importante lembrar que em algumas aplicações das redes como sensores é interessante ter dispositivos sensores com tamanho reduzido e nesta situação as redes gravadas por exposição direta apresentam-se como melhor solução.

Na figura 2.12 encontram-se os gráficos resultantes do crescimento de uma rede de Bragg gravada na Universidade de Aveiro pelo método de máscara de fase com estágio de translação, mostrando o crescimento em função do tempo de gravação, a largura de banda em função do tempo e o comprimento de onda em função do tempo. Na figura ainda é mostrado o espectro da rede gravada em fibra fotossensível (Fibercore – PS1250/1500).

O sistema de gravação e caracterização é semelhante ao apresentado na figura 2.7, diferenciando no posicionamento da fibra. Nesta montagem a fibra foi posicionada junto a superfície da máscara alinhada transversalmente com uma máscara de 25 mm de comprimento (IBSEN PHOTONICS – Período: 1068 nm). Para a gravação a íris foi mantida com uma abertura de 1 mm e o espelho E2 foi transladado paralelamente a fibra com uma velocidade de 0,015 mm/s. A potência do laser foi de 100 mW, medido após a íris. A rede

gravada apresenta as seguintes características: comprimento de onda de 1545,11 nm, largura de banda a meia altura de 0,1 nm e refletividade de -25dB, vide espectro na figura 2.12d.

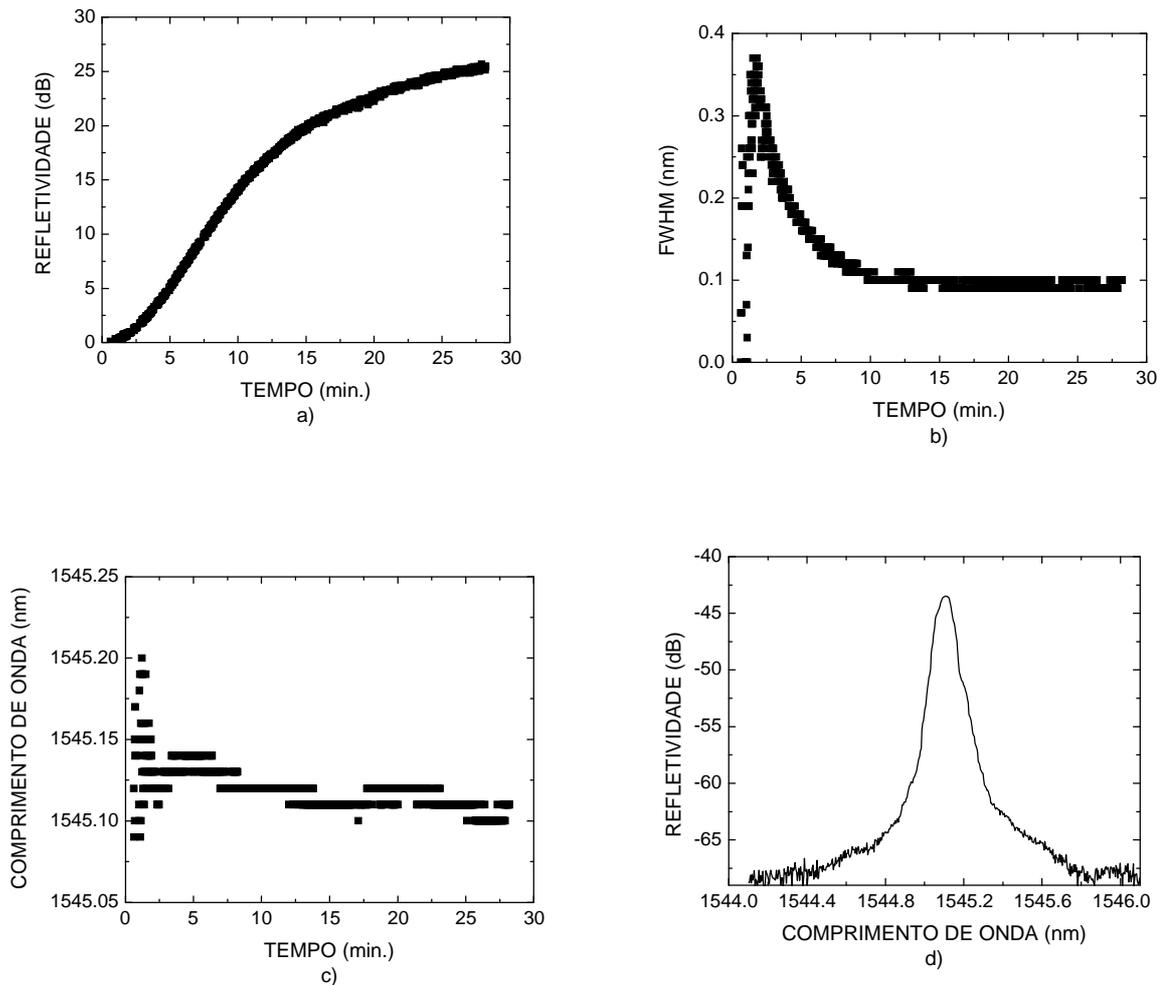


Figura 2.12 Gráficos resultantes do crescimento de uma rede de Bragg gravada pelo método de máscara de fase com estágio de translação: a) refletividade em função do tempo de gravação, b) largura de banda em função do tempo, c) comprimento de onda em função do tempo e d) espectro da rede gravada em fibra fotossensível

Nas curvas de crescimento para a rede gravada com estágio de translação observa-se que praticamente não há variação do comprimento de onda em função do tempo de gravação, vide figura 2.12c. Esta característica de crescimento é associada a pequena variação de índice devido ao curto tempo de exposição pontual.

Para a curva de crescimento ilustrada na figura 2.12b, para a situação de translação do feixe, observa-se uma redução do valor FWHM, diferente da curva para o sistema sem translação onde o tempo de exposição pontual aumenta o valor médio do índice de refração e, conseqüentemente, um aumento do valor FWHM.

Na figura 2.13 são ilustrados os espectros de três redes de Bragg gravadas por diferentes métodos.

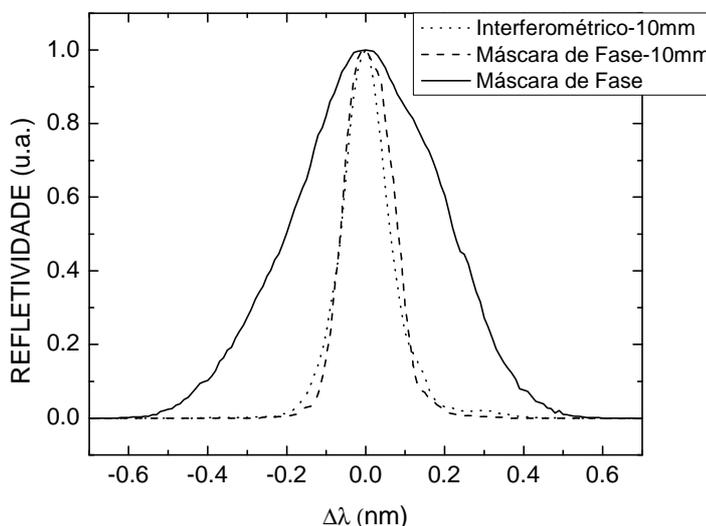


Figura 2.13 Espectros de reflexão de três redes de Bragg gravadas por diferentes métodos de gravação; máscara de fase com translação de 10 mm (linha tracejada) e sem translação (linha cheia) e interferométrico com translação de 10 mm (linha pontilhada)

- Linha cheia: método de gravação por máscara de fase sem translação do feixe laser. Característica da rede: $I_B = 1524,6$ nm, $I_B = 0,42$ nm e $R = -22$ dB.
- Linha tracejada: método de gravação por máscara de fase com translação do feixe laser. O espelho E2 foi transladado paralelamente à máscara de fase com uma velocidade de 0,02 mm/s e 10 mm. Característica da rede: $I_B = 1524,6$ nm, $I_B = 0,15$ nm e $R = -26$ dB.

- Linha pontilhada: método de gravação interferométrico com translação do feixe laser. O espelho E2 foi transladado paralelamente à máscara de fase com uma velocidade de 0,02 mm/s e 10 mm. Característica da rede: $I_B = 1544$ nm, $I_B = 0,11$ nm e $R = -30$ dB.

Os espectros apresentados na figura 2.13 foram adquiridos com um analisador de espectro com resolução de 0,1 nm (Anritsu MS 9601A). Apesar da pouca resolução do analisador de espectro ótico, para redes estreitas, é possível observar a boa qualidade dos espectros dessas redes. Isso se deve ao fato da qualidade do laser empregado na gravação, Ar^+ , o qual apresenta uma boa homogeneidade do perfil transversal do feixe, aproximadamente gaussiano, devido ao cristal dobrador intra-cavidade.

2.4.4. REDES GRAVADAS EM FIBRAS COM ALTA DOPAGEM DE GERMÂNIO

Durante ensaios na tentativa de obter redes do tipo IIA, gravadas em fibras com alta dopagem de germânio (Fibercore - SM1500 4.2/125), foi realizada a gravação de redes naquela fibra sem hidrogená-la. O sistema de gravação utilizado foi o interferométrico montado no CEFET/PR. O resultado é uma rede com características de crescimento semelhantes ao da rede tipo IA (conforme mencionado na seção 2.2 as redes tipo IA são caracterizadas pela elevada variação do comprimento de onda durante a gravação), porém aquela variação de comprimento de onda típica da rede IA não foi observada. Para essa rede, que será denominada de rede com crescimento “anormal”, a variação do comprimento de onda foi de 0,24 nm, sugerindo uma pequena variação do índice efetivo. As curvas de crescimento dessa rede são apresentadas na figura 2.14. Com relação à evolução do comprimento de onda e da potência refletida (ver gráficos 2.14a e 2.14b) o crescimento dessa rede não pode ser associado a qualquer outro regime de crescimento de redes conhecidas. A

variação da refletividade sugere o crescimento de uma rede tipo IIA entretanto não é observado aquele deslocamento para comprimentos de onda mais curtos observados na rede tipo IIA.

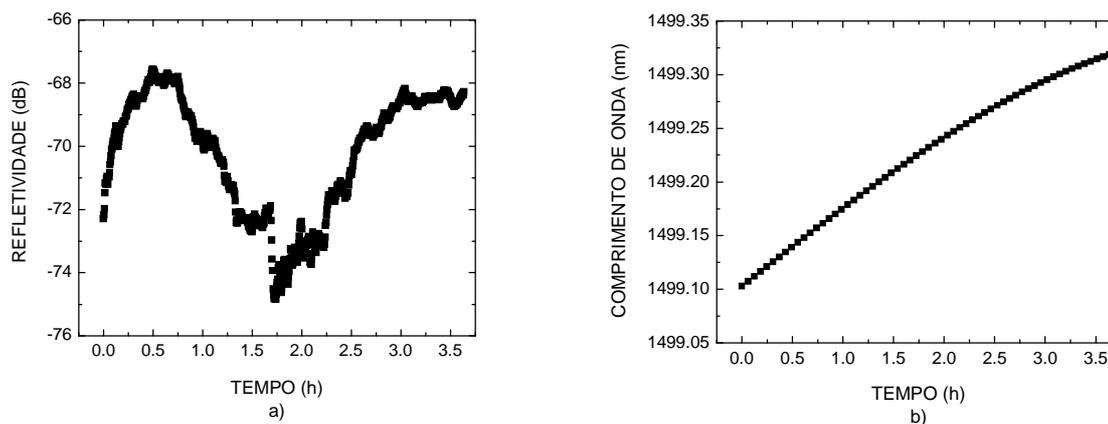


Figura 2.14 Gráficos resultantes do crescimento de uma rede de Bragg gravada pelo método interferométrico: a) refletividade em função do tempo de gravação, b) largura de banda em função do tempo, c) comprimento de onda em função do tempo e d) espectro da rede gravada em fibra com alta dopagem de germânio

A rede gravada apresenta as seguintes características: comprimento de onda de 1499,32 nm, largura de banda a meia altura de 0,26 nm, refletividade de -12dB e comprimento de aproximadamente 4 mm.

Essa nova rede foi comparada com uma rede tipo I gravada em fibra SMF (single mode fiber – fibra padrão telecomunicações) hidrogenada. A rede em fibra SMF, após exposição UV, foi submetida a um tratamento térmico para liberar hidrogênio, colocando-a a 90 °C durante 4 horas. Foram realizadas caracterizações de tração e de temperatura para avaliar possíveis variações entre elas. No ensaio de temperatura as redes foram caracterizadas com auxílio de um termo elemento Peltier operando numa faixa de 0 a 60 °C. Para a realização desse ensaio as redes são posicionadas sobre um termo elemento e para melhorar o acoplamento térmico é colocado óleo mineral pois outro material como, por exemplo, pasta térmica pode ocasionar erros na medida em virtude da expansão térmica da pasta.

O sistema para a deformação longitudinal consiste em um micro estágio de translação acionado por um motor (Micro-Controlle MF 04 CC) acoplado a um suporte onde está fixado um relógio comparador digital (MITUTOYO ID-S1012M) que mede o deslocamento, ΔL . A fibra é fixada de forma tal que a rede de Bragg fique posicionada entre os pontos de colagem, no suporte e no carro do motor. A distância entre esses dois pontos será o comprimento inicial, L_0 .

A rede gravada em fibra SMF hidrogenada apresenta coeficientes de deformação e temperatura de $0,76 \text{ pm}/\mu\text{strain}$ e $11,5 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, respectivamente, conforme ajuste linear para os pontos experimentais da figura 2.15. Para a rede gravada na fibra com alta dopagem de germânio os coeficientes de deformação e temperatura são $0,81 \text{ pm}/\mu\text{strain}$ e $12,2 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, respectivamente, conforme ajuste linear para os pontos experimentais da figura 2.16.

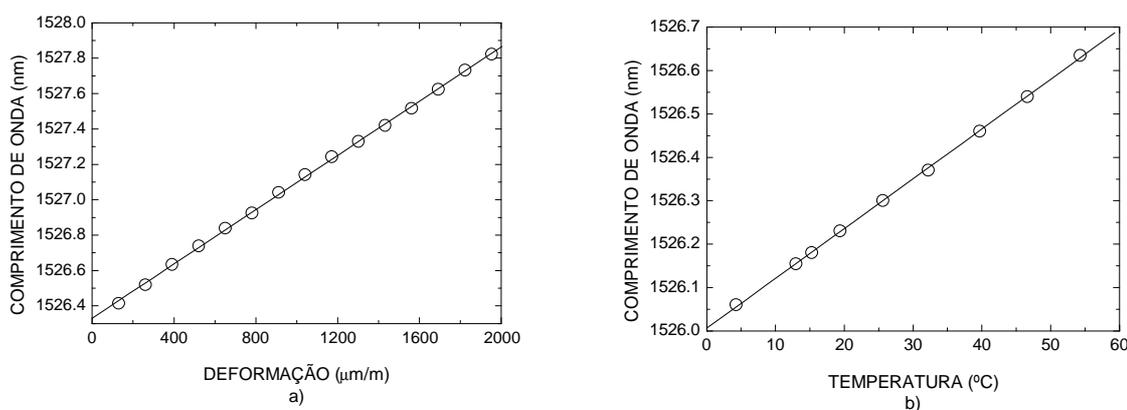


Figura 2.15 Variação do comprimento de onda de Bragg em função da: a) deformação longitudinal, resultado da aplicação de extensão e b) temperatura para uma rede de Bragg gravada em fibra SMF

Aquela variação nos coeficientes de temperatura e deformação entre as duas fibras pode ser atribuída a diferença dos materiais que compõem cada uma das fibras.

Para estudar a estabilidade térmica as redes foram colocadas em um forno tubular e a temperatura foi aumentada progressivamente até 800°C medindo, com um passo de 100°C , a

refletividade máxima em cada ponto. Os resultados obtidos são apresentados na figura 2.17 onde verifica-se que a maior estabilidade é conseguida pela rede com alta dopagem de germânio, que suporta temperaturas de até 300 °C praticamente sem decaimento, 5%, e para a rede tipo I observa-se uma pior estabilidade térmica para as temperaturas de interesse com decaimento de 20% para a mesma faixa.

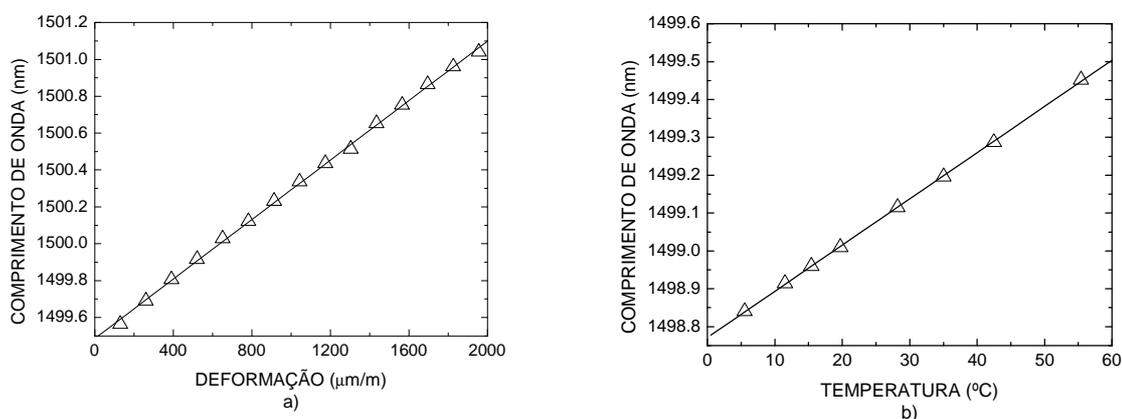


Figura 2.16 Variação do comprimento de onda de Bragg em função da: a) deformação longitudinal, resultado da aplicação de extensão e b) temperatura para uma rede de Bragg gravada em fibra com alta dopagem de germânio

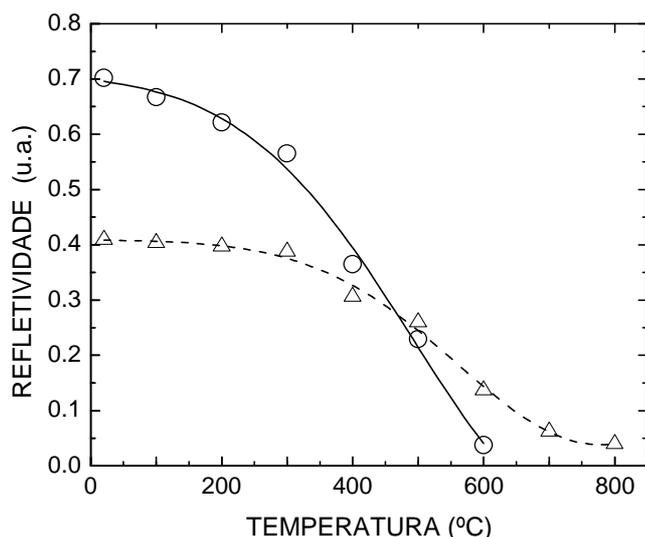


Figura 2.17 Evolução da refletividade para redes gravadas em diferentes tipos de fibra com o aumento da temperatura. Os triângulos representam a rede gravada em fibra com alta dopagem de germânio e a linha pontilhada uma linha de tendência para guiar o olho. Os círculos representam a rede gravada em fibra SMF e a linha cheia uma linha de tendência para guiar o olho

A maior estabilidade da refletividade é conseguida pela rede gravada em fibra com alta dopagem de germânio, juntamente com a maior variação em comprimento de onda, tornando-a a melhor opção para aplicações onde é necessário sensores para aquelas faixas de temperatura.

CAPÍTULO 3

SISTEMA DE MONITORAÇÃO BASEADO EM REDES DE BRAGG

A monitoração de redes de Bragg em fibra ótica pode ser feita mediante diferentes técnicas. A leitura da frequência ótica (comprimento de onda) da FBG oferece uma série de vantagens, como: alta precisão; independência de calibração em intensidade ótica, visto medir frequência luminosa; e a capacidade de multiplexação de vários sensores. No entanto, um analisador de espectro ótico (OSA), equipamento utilizado para tais medidas, tem custo elevado.

A detecção homódina ou heteródina é outra técnica de monitoração empregada, onde a variação da fase do sinal medido em relação à fase do sinal modulado de entrada fornece a posição espectral da FBG sensora. Esta é também uma técnica precisa, no entanto, tanto o sistema ótico, quanto o sistema de detecção necessitam ser muito estáveis. Como exemplo têm-se os sistemas de demodulação com interferômetros Fabry-Perot [Rao *et. al.*, 2002] e com interferômetros Mach-Zehnder [Bellil, Mustafa e Abushagur, 2000].

Sistemas com redes de Bragg como referência ótica [Kersey *et. al.*, 1997] têm sido largamente empregados na monitoração de redes de Bragg. Entre as suas características relevantes estão a baixa complexidade do projeto e a relativa simplicidade dos componentes

optoeletrônicos. Entretanto, por serem baseados em medição de intensidade ótica, a calibração deve ser feita cada vez em que o equipamento for utilizado.

3.2. CASOS PARTICULARES DE DEMODULAÇÃO EM INTENSIDADE

Um ponto importante no desenvolvimento de sistemas sensores baseados em redes de Bragg é aquisição do sinal proveniente dos transdutores óticos. Na literatura e. g., [Othonos, 1997], [Rao, 1997] e [Zhao e Liao, 2004] são apresentados vários sistemas de demodulação utilizando fonte de luz sintonizável e filtros óticos para aplicações de sensoriamento de deformação e temperatura. Para esta tese optou-se por estudar aqueles baseados em intensidade por serem de custo mais baixo quando comparados aos sistemas de demodulação de fase e frequência. Outra vantagem dos sistemas de demodulação em intensidade é seu melhor comportamento na aquisição de sinais dinâmicos.

3.2.1. FILTRO DE REFERÊNCIA

Os sistemas utilizando filtros são constituídos de circuitos óticos onde o sensor é iluminado por um sinal de banda larga, e sua luz refletida passa por um filtro sintonizável (*tunable filter*) [Ho *et. al.*, 2002] ou filtro de borda (*edge filter*) [Melle *et. al.*, 1992], antes de chegar ao medidor de potência ótica. A leitura acusada pelo medidor será proporcional ao grau de superposição das bandas espectrais do sensor e do filtro.

No caso do uso de filtro de borda, a potência ótica obtida no medidor é relacionada com a deformação sofrida pelo sensor: com deformações diferentes, a luz refletida no sensor assume posições espectrais diferentes, conseqüentemente sofrerá diferentes atenuações ao

passar pelo filtro, proporcionando leituras de potência ótica relativa à sobreposição espectral entre a rede e o filtro.

O filtro pode ter diferentes características óticas de acordo com as características desejadas para o sistema. Quando se deseja uma maior faixa de operação (deformação ou temperatura) é utilizado um filtro com largura espectral maior, perdendo sensibilidade. Quando se deseja uma alta resolução utiliza-se um filtro com largura espectral menor.

Na utilização de um filtro sintonizável, a largura espectral do mesmo é, em geral, semelhante àquela do sensor. Nesse caso a idéia é controlar a posição espectral do filtro para que seja sempre a mesma do sensor, obtendo sempre o sinal da maior superposição possível. Dessa forma é possível controlar o nível de sinal através do medidor de potência ótica, como mostra o esquema da figura 3.1. Normalmente o controle do filtro é feito por um circuito de controle automático de ganho, através do respectivo sinal de erro pode-se determinar a deformação sofrida pelo sensor.

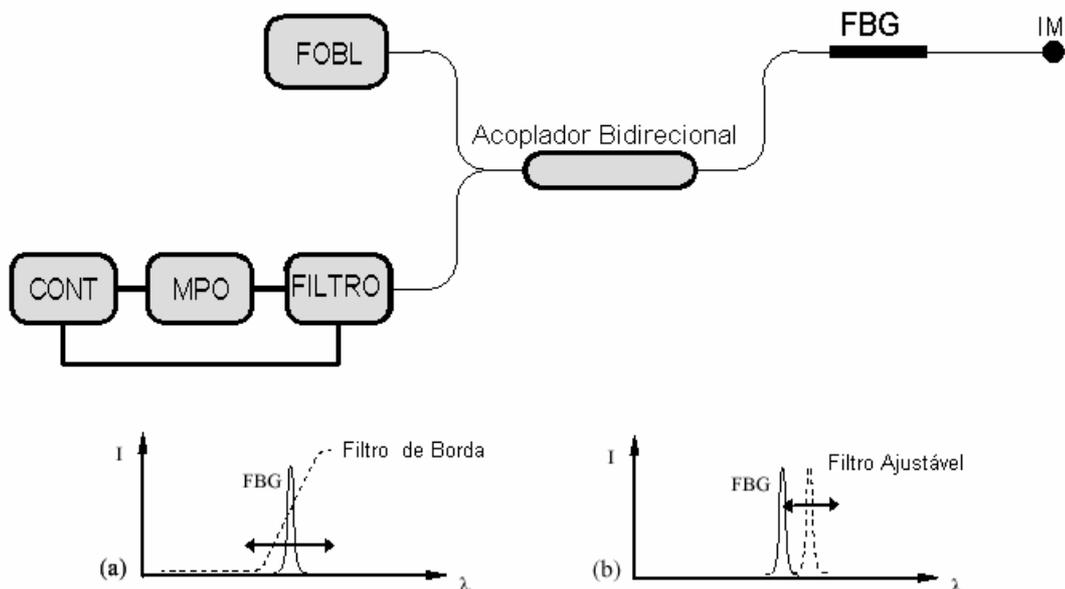


Figura 3.1 Esquema de um sistema de leitura utilizando filtro fixo ou ajustável, constituído de fonte ótica banda larga, FOBL, filtro ótico, medidor de potência ótica, MPO e controle do filtro, CONT

3.2.2. DEMODULAÇÃO POR LEITURA COM DOIS COMPRIMENTOS DE ONDA

Davis e Kersey [1994] propuseram um sistema de demodulação baseado na utilização de acopladores seletivos de comprimentos de onda, conforme esquema apresentado na figura 3.2. O funcionamento do sistema é similar à técnica apresentada na seção 3.1.1, diferenciando no filtro utilizado. Nesse sistema um acoplador seletivo em comprimentos de onda substitui o filtro de referência. Os acopladores têm seu coeficiente de acoplamento dependente do comprimento de onda, conforme mostra a função de transferência apresentada na figura 3.3.

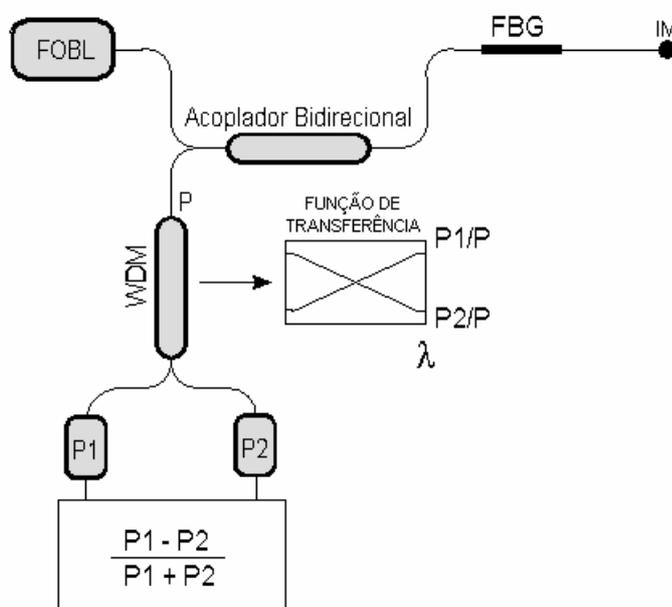


Figura 3.2 Esquema de um sistema de demodulação de redes de Bragg baseado em acopladores seletivos de comprimento de onda

A curva de resposta do acoplador (GOULD Fiber Optic – 1515-1570 nm) é bastante linear na faixa compreendida entre 1520 e 1560 nm, representando uma faixa de operação de aproximadamente 40 nm, o que é bastante interessante em aplicações que exijam uma grande faixa de medida. A demodulação do sensor de Bragg é feita através razão entre a diferença e a soma das duas saídas do acoplador WDM, P1 e P2, o que normaliza a resposta a variação na potência ótica da fonte utilizada.

Apesar do potencial intervalo de medição linear demonstrado ser elevado, a sensibilidade é limitada pelo pequeno declive da função de transferência espectral do acoplador. Para contornar este problema, Zhang *et al.* (1995) recorreram a acopladores com elevada seletividade, especialmente desenhados para esta aplicação. De fato, o elevado declive evidenciado pela resposta espectral desses dispositivos permite melhorar a sensibilidade, mas o intervalo de medição linear fica por outro lado comprometido.

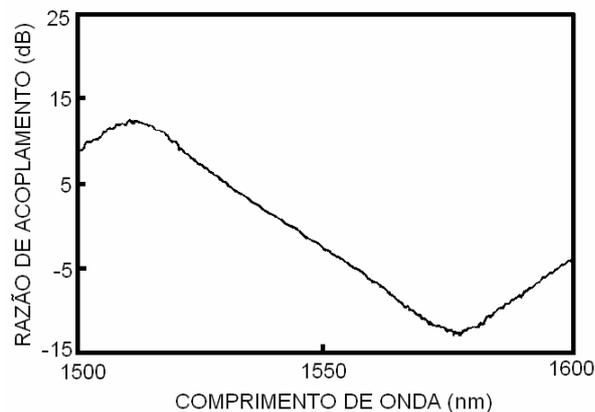


Figura 3.3 Função de transferência de um acoplador WDM (GOULD Fiber Optic – 1515/1570nm)

3.2.3. FONTE ÓTICA SINTONIZÁVEL

Outro sistema de demodulação de redes de Bragg é constituído por um sinal de banda estreita ajustável que ilumina o sensor e um medidor de potência ótica (MPO) serve para a recepção do sinal refletido pelo sensor [Othonos e Kalli, 1999], vide esquema na figura 3.4. Neste tipo de sistema a reflexão tem seu máximo quando o sinal lançado estiver na mesma posição espectral do sensor. Uma vez que se tenha controle aferido da posição espectral do laser é possível determinar a posição espectral do sensor. Este sistema apresenta como principal desvantagem o alto custo da fonte ótica.

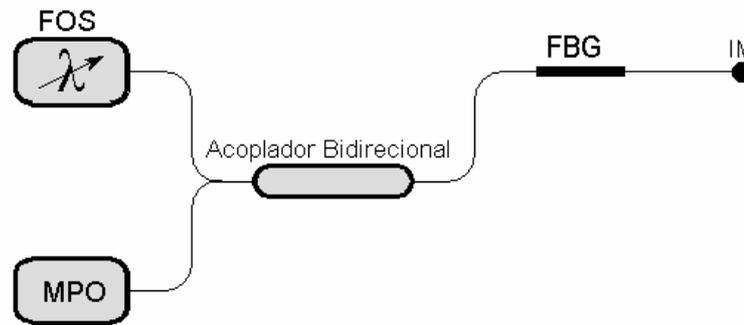


Figura 3.4 Circuito óptico utilizando fonte ótica sintonizável, FOS, como fonte de luz e medidor de potência ótica MPO

3.2.4. SISTEMA DE DEMODULAÇÃO UTILIZANDO DOIS FILTROS FIXOS

O objetivo do sistema proposto é aproveitar a idéia do sistema baseado em demodulação usando um filtro fixo, acrescentando mais um filtro, de tal forma a obter um sistema com maior faixa dinâmica [Nunes, Valente e Braga, 2004]. O circuito óptico é apresentado na figura 3.5, onde o sensor é iluminado por uma luz de banda-larga (LED), e sua reflexão passa por dois filtros fixos de transmissão antes de ser lido nos fotodetectores, DET1 e DET2. As leituras mostradas nos fotodetectores serão proporcionais ao grau de superposição das posições espectrais, ou convolução, entre o sensor e os filtros.

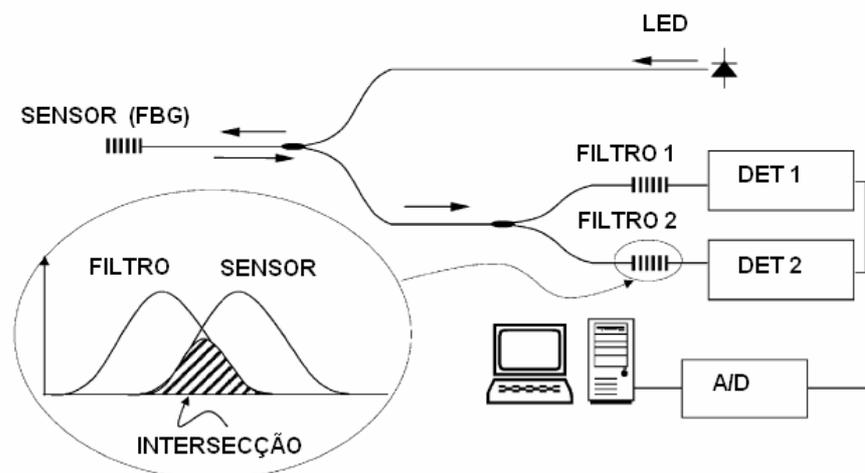


Figura 3.5 Sistema de demodulação para redes de Bragg baseado em dois filtros fixos [Nunes, Valente e Braga, 2004]

O resultado final de interesse é a razão entre as potências medidas nos fotodetectores, DET 1/DET 2, que é imune a qualquer variação de intensidade no sistema, sendo sensível apenas a variações espectrais do sensor. No sistema usando somente um filtro era necessário acrescentar um detector referência para tornar o sistema imune a variações de intensidade. Já nesse caso, que têm dois canais de saídas para a leitura, independentes entre si, porém dependente do sistema como um todo, a razão entre eles é suficiente para tornar o sistema auto referenciado.

3.3. SISTEMA DE LEITURA DE REDES DE BRAGG PARA MEDIDAS ESTÁTICAS E DINÂMICAS

O sistema desenvolvido para esta tese é baseado na detecção por intensidade ótica e contém compensações contra flutuações de potência ótica provenientes de oscilações da fonte ótica, da conectorização e de curvaturas das fibras óticas. São elas: estabilização térmica em 15 °C do LED com termo-elemento Peltier e sistema de divisão do sinal do sensor por sinal de referência do circuito ótico. O sistema proposto apresenta custo relativamente baixo de fabricação (US\$ 1.000) e facilidade de implementação.

O sistema de leitura das redes de Bragg é composto por três módulos: circuito emissor, circuito ótico e circuito de demodulação [Martelli *et al.*, 2004]. O circuito emissor é constituído por uma fonte de corrente modulada por onda senoidal em 2 kHz. O sinal resultante é aplicado a um ELED (edge-emitting LED) (*LUMINENT - MREDS PF5003-1*) com comprimento de onda central em 1540 nm e FWHM de 60 nm. A temperatura do ELED é controlada por um termo elemento Peltier, aumentando a estabilidade da fonte ótica.

A configuração do circuito óptico apresentado na figura 3.6 [Melle *et al.*, 1992] foi escolhida por causa das seguintes vantagens, quando comparada a outros sistemas de interrogação de redes de Bragg existentes [Othonos e Kalli, 1999], [Rao, 1997] e [Zhao e Liao, 2004]: baixo custo, relativa facilidade de implementação, portabilidade e robustez.

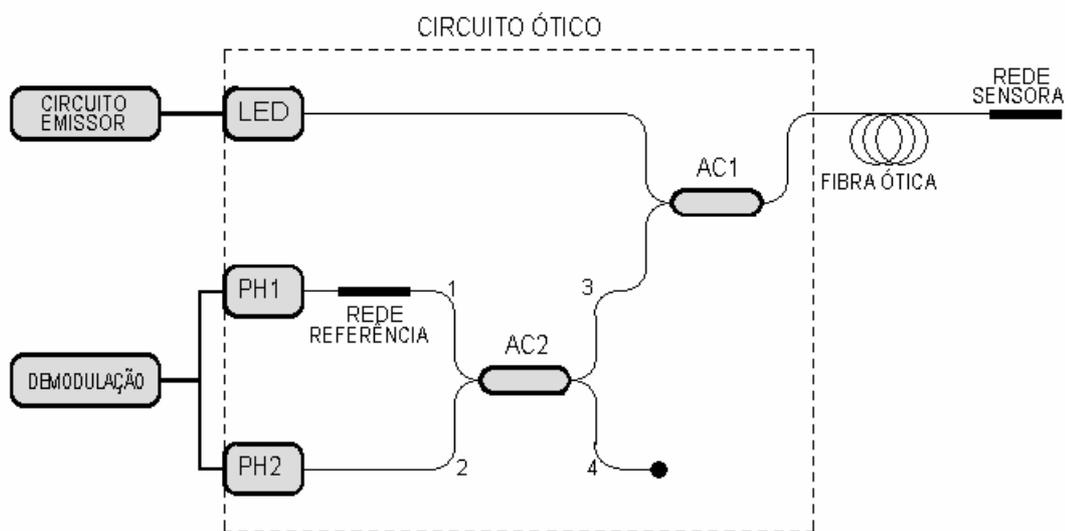


Figura 3.6 Circuito óptico para leitura de redes de Bragg

No circuito implementado, a luz proveniente da fonte óptica de banda larga é direcionada através do acoplador óptico AC1 para a rede sensora, que reflete a fatia espectral contida na sua banda de reflexão no sentido da rede de referência. A rede de referência tem comprimento de onda de Bragg próximo daquele da rede sensora. Quando a rede sensora é submetida a deformação ou a variação de temperatura o comprimento de onda de Bragg é alterado, dessa forma a luz refletida pela rede sensora deixa de estar em sintonia com a rede de referência e a potência óptica incidente no fotodetector PH1 (*THORLABS* – FGA04 InGaAs) muda proporcionalmente à variação no recobrimento das duas bandas espectrais.

Uma parcela do sinal proveniente da rede sensora é guiada ao fotodetector PH2 (mesmo modelo), através do segundo acoplador, AC2, e é utilizada como referência para corrigir eventuais flutuações de potência óptica, assim a razão PH1/PH2 permanece

proporcional à grandeza sendo medida. A resolução da medida é determinada pela relação sinal-ruído do sinal de retorno do sensor e pelas larguras de banda das redes de referência (filtro) e sensora.

A rede de referência pode ter diferentes características óticas, de acordo com aquelas desejadas para o sistema. Quando se deseja maior faixa dinâmica de medição, que corresponderá ao maior deslocamento espectral da rede sensora, utiliza-se uma rede com largura espectral maior, porém perde-se sensibilidade. Por outro lado, para maior resolução utiliza-se rede com largura espectral menor, o que limita a faixa dinâmica.

A região de operação do sistema é compreendida na faixa espectral onde ocorre máxima e mínima convolução entre os espectros de reflexão da rede sensora e o de transmissão da rede de referência, esquematizada na figura 3.7. Dessa forma, um valor de potência ótica corresponde a apenas um valor de variação do espectro da rede sensora associada.

O controle do comprimento de onda de Bragg da rede de referência pode ser feito por variação térmica, fixando-a a um termo-elemento Peltier ou a um sistema eletromecânico, controlados eletronicamente. Em algumas aplicações deste trabalho, foi utilizado um Peltier devido à sua melhor disponibilidade comercial, embora apresente maior tempo de resposta por causa das características térmicas. A medida é realizada fazendo com que as duas redes de Bragg mantenham seus espectros sintonizados. Para a aplicação de interesse, ou seja, para medidas de vibração, preferiu-se que os espectros estivessem parcialmente superpostos, conforme indicado na figura 3.7. Essa situação produz valor constante de tensão na saída do sistema e, quando a rede de Bragg sensora sofre deformação, o sinal de tensão na saída do aparelho sofre alteração proporcional.

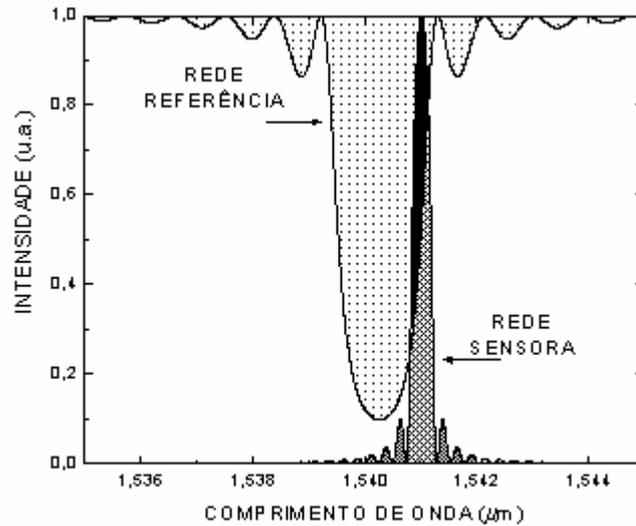


Figura 3.7 Representação dos espectros do sistema de leitura implementado das redes de referência (filtro) e sensora. A área em preto representa a região rejeitada pelo filtro

Na figura 3.8 observa-se a variação do sinal de saída do circuito ótico quando a rede de referência está sujeita a diferentes temperaturas, mantendo a rede sensora em temperatura constante. O uso de uma rede de referência com controle por temperatura implica um tratamento térmico da mesma. Isso porque a rede pode variar suas características espectrais como, largura de banda e refletividade.

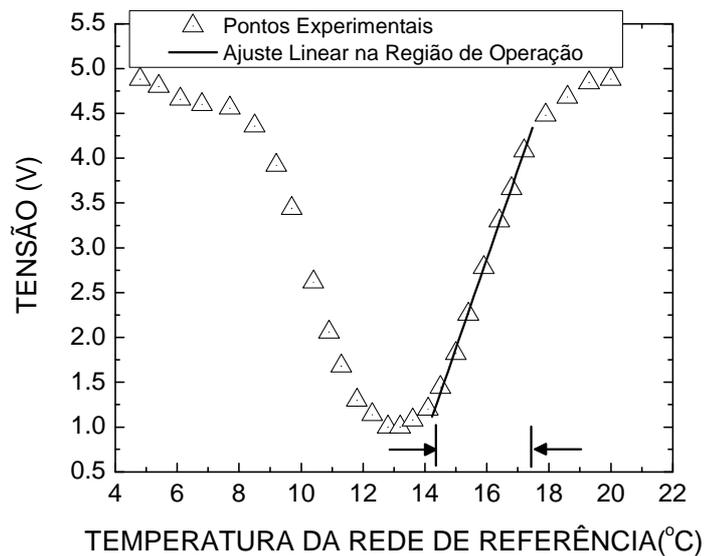


Figura 3.8 Resposta do sistema para diferentes temperaturas da rede sensora e ajuste linear da região de operação do sistema com coeficiente de correlação igual a 0,9993

A intenção desse ensaio é mostrar a viabilidade do sistema para monitorar a convolução entre os dois espectros, induzida pela alteração da posição espectral devida à variação da temperatura em uma das redes. Na figura 3.8, indica-se também a região de operação linear do sistema usada nas medições de vibração, com a respectiva reta de ajuste por mínimos quadrados, com coeficiente de correlação igual a 0,9993. Essa região é a mais adequada para a implementação da malha de controle para a posição da rede de referência.

3.3.1. SISTEMA DE SINTONIA PARA REDE DE REFERÊNCIA

Através de modificações no circuito óptico mostrado na figura 3.6 é possível ler mais de uma rede sensora. A alteração consiste em trocar o fotodetector PH1, vide detalhes na figura 3.6, para o braço 4 do acoplador AC2. Dessa forma, deslocando o comprimento de onda da rede de referência, é possível ajustar sua posição espectral à rede sensora de interesse.

Em [Goh *et al.*, 2003] é proposto um sistema de sintonia de redes de Bragg com variação em comprimento de onda de até 90 nm. O sistema consiste de uma chapa elástica reta de comprimento L e espessura d , onde uma rede de Bragg é colada, figura 3.9.

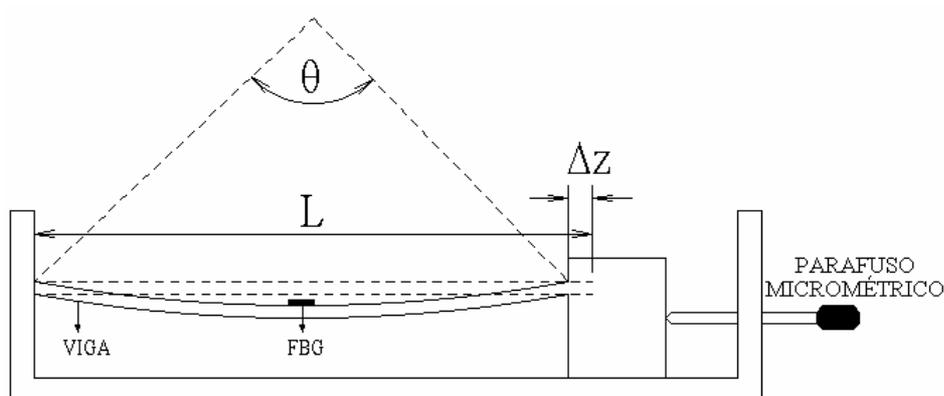


Figura 3.9 Sistema de sintonia de redes de Bragg, [Goh *et al.*, 2003]

Um parafuso micrométrico é utilizado de forma a aplicar força horizontal e assim comprimir a chapa e, conseqüentemente, a rede de Bragg. A chapa pode ser curvada tanto

para cima, comprimindo a rede, quanto para baixo, tracionando a rede, por meio do deslocamento Δz , aplicado pelo parafuso. Para a situação de compressão, a fibra de sílica é 23 vezes mais resistente que na tração, [Ball *et al.*, 1994] e [Locco *et al.*, 1999], o que resulta para o sistema descrito em variação de 70 nm na compressão e 20 nm na tração. A variação em comprimento de onda pode ser calculada através da equação, [Goh *et al.*, 2003]:

$$\Delta l = \pm 0,78 \frac{dq}{L} l_B \quad (3.1)$$

Uma das formas de sintonia de redes de Bragg utilizada nesta tese se faz pelo uso de um termo elemento Peltier. Nessa situação, a rede pode ser aquecida, fazendo com que o comprimento de onda de Bragg se desloque para maiores comprimentos de onda, ou resfriada, fazendo com que comprimento de onda de Bragg se desloque para menores comprimentos de onda. Na figura 3.10 está mostrado o resultado do processo de calibração de redes de Bragg, sendo uma delas livre e as demais coladas sobre diferentes substratos, a saber: vidro (lamínula de microscópio), alumínio e zinco [Chaves *et al.*, 2000]. Observa-se, claramente, a modificação na taxa de variação da posição espectral da banda de reflexão da rede em função da temperatura, dependente nesse caso do material onde a rede encontra-se colada. Essa variação deriva da expansão térmica do material do substrato, cujo coeficiente é superior àquele da sílica constituinte da fibra. Dessa forma a rede é, com o aumento da temperatura, submetida a um esforço mecânico que provoca o deslocamento espectral do comprimento de onda de Bragg com taxas superiores àquela da dependência com a temperatura, vide seção 2.3.3.

Os coeficientes das retas ajustadas aos pontos experimentais na figura 3.10 são: 8,24 pm/°C, 10,59 pm/°C, 36,56 pm/°C e 43,63 pm/°C, respectivamente para a fibra livre, colada sobre o vidro, alumínio ou zinco. Como a taxa de variação da posição espectral quando

a fibra está colada sobre aqueles dois metais é de 4 a 5 vezes superior àquela intrínseca da rede na própria fibra, um filtro de referência com a rede assim montada pode, para um sistema de sintonia com uma faixa ΔK , obter variação em comprimento de onda de $4 - 5 \times \Delta K$, fato que amplia a faixa dinâmica do filtro como um todo.

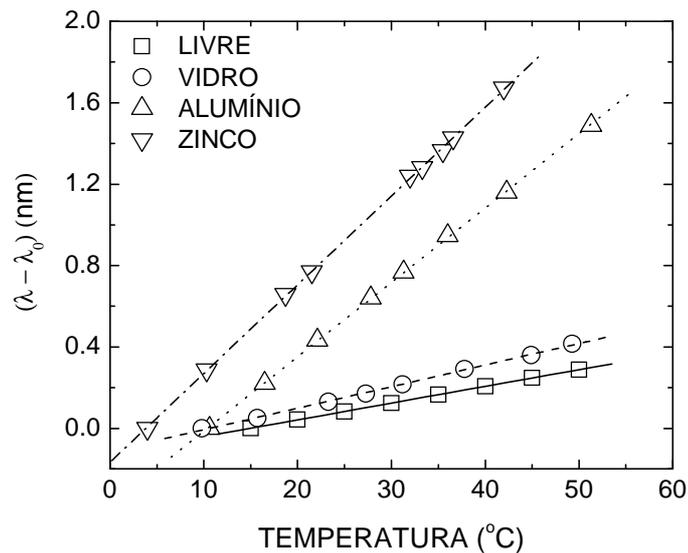


Figura 3.10 Variação do comprimento de onda de Bragg em função da temperatura para redes coladas sobre diferentes substratos. Marcas - experimental; linhas - melhor ajuste

Para o sensor de temperatura o controle do termo elemento Peltier é feito digitalmente por um sistema de malha fechada conforme diagrama esquemático da figura 3.11. Esse sistema foi implementado durante o trabalho de dissertação de Martelli [2003].

A medida é realizada fazendo com que as duas redes de Bragg mantenham seus espectros sintonizados. Para medidas de temperatura preferiu-se que os espectros estivessem parcialmente superpostos porque diminuem a necessidade de pós-processamento do sinal. Essa situação produz um valor constante de tensão na saída do sistema.

Quando a rede de Bragg sensora experimentalmente variação de temperatura, o sinal de tensão na saída do sistema sofre alteração proporcional. Esse sinal serve como sinal de

realimentação para a malha de controle eletrônico do Peltier, que recebe o comando do computador para esquentar ou esfriar se a variação de temperatura no sensor for positiva ou negativa, vide detalhes da malha de controle apresentado na figura 3.11. No momento em que a posição espectral relativa inicial entre as duas redes de Bragg é atingida novamente, mede-se a temperatura do Peltier e, mediante a equação 3.2 obtém-se o valor da temperatura real no sensor, a FBG.

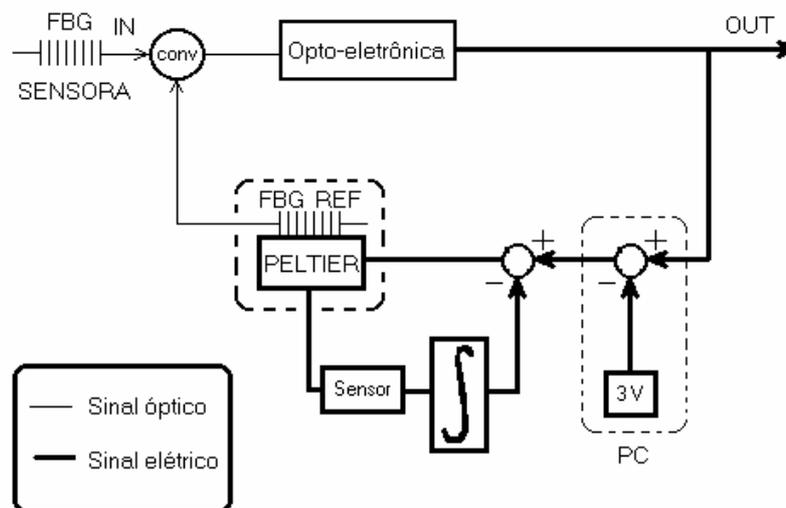


Figura 3.11 Malha de controle e operação do sistema de monitoramento por filtro casado

O valor real da grandeza medida, a temperatura, é conseguido pela relação entre a posição espectral da rede de referência e a da rede sensora, ou seja, o valor real da temperatura a que a FBG sensora está exposta é adquirido indiretamente pela temperatura da FBG de referência.

$$\Delta T_{sensor} = k \times \Delta T_{Peltier} \quad (3.2)$$

onde k é o coeficiente de relação entre a temperatura do Peltier e a temperatura do sensor para que a posição espectral relativa das FBG seja constante.

Além das redes de Bragg foi empregado neste trabalho um filtro ajustável, passa banda, (JDS Fitel – DTB4500). O filtro de interferência é composto de revestimento de filme fino localizado entre duas fibras colimadas e apresenta como características: faixa de operação de 1530 nm – 1560 nm, FWHM de 1,2 nm e transmissividade próximo a 100 %. A sintonia do filtro é feita por dois parafusos, um de ajuste rápido e um segundo para ajustes de precisão. Na figura 3.12 é apresentado um espectro referente ao filtro descrito. A vantagem na utilização desse filtro é a facilidade em ajustar a melhor região de operação do sensor de Bragg à região linear do filtro. Outra vantagem está na possibilidade de multiplexar outras FBG ao enlace sensor em virtude da alta rejeição do filtro.

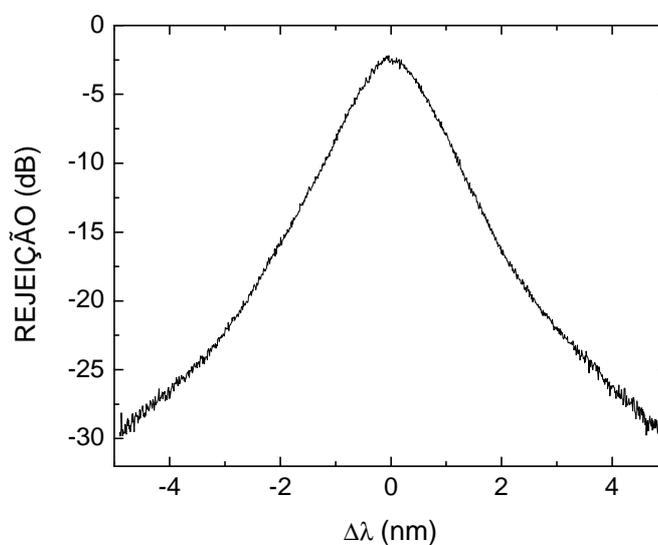


Figura 3.12 Espectro de transmissão do filtro ajustável JDS Fitel

3.3.2. CIRCUITO ELETRÔNICO DE DEMODULAÇÃO

O circuito eletrônico de demodulação, esquematizado na figura 3.13, é similar a um demodulador AM. A portadora ótica (LED) transporta um sinal senoidal para o circuito ótico, nele o sinal é modulado devido à variação da posição espectral da rede sensora em relação ao

espectro do filtro de referência. Os sinais óticos incidentes em PH1 e PH2 são convertidos em sinais elétricos pelos amplificadores de transimpedância (blocos *a* e *o* na figura 3.13). Devido à baixa intensidade dos sinais óticos, o amplificador operacional empregado nesse estágio deve apresentar baixo ruído e alto ganho. Foram utilizados amplificadores OPA602 da BURR-BROWN, que são específicos para conversão optoeletrônica e apresentam baixo ruído e baixo tempo de resposta. Os sinais elétricos passam pelos estágios de amplificação (blocos *b* e *n*), que consistem de dois amplificadores em cascata na configuração não-inversora. O ganho em cada um dos estágios de amplificação pode ser ajustado, permitindo adequar o sistema a maiores ou menores perdas no enlace ótico entre o ponto de sensoriamento e a unidade eletrônica. Em seguida, os sinais de cada estágio são filtrados nos filtros passa faixa ativos centrados em 2 kHz (blocos *c* e *m*), que é a frequência de modulação da portadora ótica. O próximo estágio consiste da retificação do sinal em onda completa (blocos *d* e *l*), com o que a frequência dos sinais passa a ser 4 kHz. Os sinais são ainda filtrados por um filtro passa baixas ativo com frequência de corte de 300 Hz (blocos *e* e *k*) para obter o sinal que contém a informação da rede sensora. Essa frequência (300 Hz) foi escolhida por especificação das normas de vibrações em cabos condutores, [IEEE Committee Report, 1966], uma das aplicações proposta para o sistema. Para medidas estáticas pode-se trabalhar com frequência de corte menor, o que reduz ruídos provenientes dos fotodetectores e ruídos do próprio circuito de demodulação.

Os sinais elétricos, provenientes do sensor e da referência, são divididos por um divisor analógico do tipo AD 538 - Analog Device, (bloco *f*). O sinal resultante passa por um ajuste de *offset* (bloco *g*), um filtro passa baixas ativo com frequência de corte de 300 Hz (*h*) e é, finalmente, amplificado e condicionado na escala de 0 - 5 V (bloco *i*). Após a demodulação do sinal pelo circuito analógico, é possível acoplar o aparelho a outros sistemas de aquisição,

como, por exemplo, o sistema de aquisição *Lynx ADS2000*, empregado nessas investigações, que possui entradas, compatíveis com sinais variando de 0 a 5 V, para diversos tipos de sensores tais como: extensômetros elétricos de resistência, acelerômetros e sensores de deslocamento indutivo.

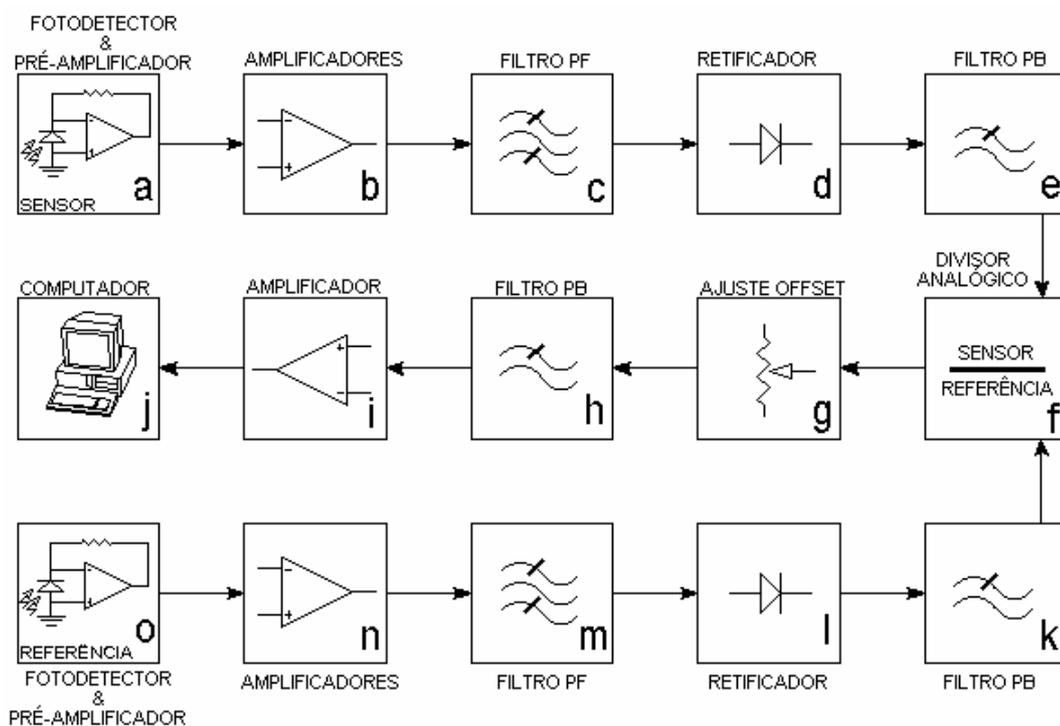


Figura 3.13 Esquemático do circuito eletrônico de detecção do sinal óptico de redes de Bragg

Os diagramas esquemáticos dos circuitos desenvolvidos são apresentados nos anexos 1 e 2. O circuito do anexo 1 corresponde aos ramos $a - e$ e $o - k$ do diagrama em blocos na figura 3.13. O circuito do anexo 2 corresponde ao ramo $f - j$ do mesmo diagrama em blocos.

3.3.3. CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA DE DEMODULAÇÃO

A compensação de flutuação de potência óptica do sistema feita pelo divisor analógico foi avaliada com a inserção de um atenuador óptico regulável entre o acoplador óptico AC1 e a

rede sensora. A medida foi realizada com o ajuste discreto do atenuador a valores pré-estabelecidos de atenuação e os sinais de tensão correspondentes eram medidos.

Os sinais produzidos por PH1, PH2 e o sinal resultante de sua divisão são mostrados na figura 3.14. A curva de ajuste linear do sinal de saída do sistema é dada por:

$$V_{out} = 3,223 - 0,023A \quad (3.3)$$

onde A é a atenuação. O desvio padrão do ajuste, 27,9 mV, implica em imprecisão de deformação e temperatura de aproximadamente 18 $\mu\text{m}/\text{m}$ e 2 $^{\circ}\text{C}$, respectivamente.

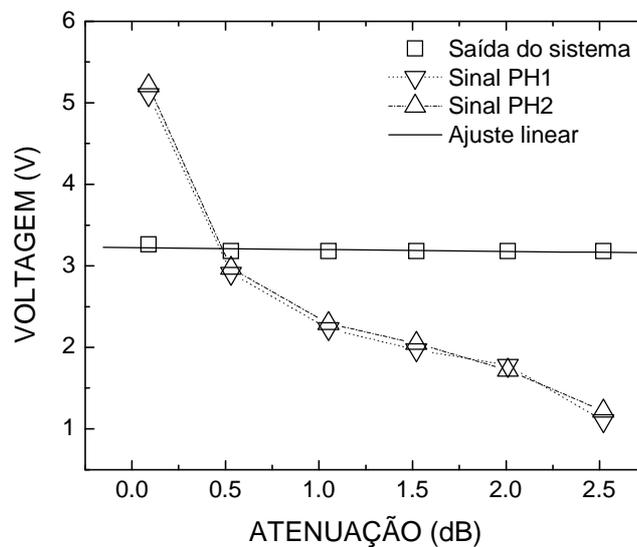


Figura 3.14 Sinais monitorados em PH1, PH2 e na saída do divisor com a inserção de atenuação no sinal ótico. Os pontos medidos na saída do sistema para cada valor de atenuação têm um desvio padrão igual a 0,0279 V

Os resultados obtidos demonstram que o equipamento desenvolvido é capaz de operar com o sinal atenuado em até 2,5 dB. Como o coeficiente de atenuação da fibra ótica monomodo é de aproximadamente 0,25 dB/km, desprezando perdas de emendas e conectores, comprovou-se a possibilidade de utilização do sistema para medidas a distâncias de aproximadamente 10 km sem a necessidade de ajuste nos ganhos dos amplificadores.

Na figura 3.15a é apresentado o resultado da caracterização do sistema sensor, empregando o filtro JDS, pela aplicação de deformação à rede sensora. Nesse ensaio uma FBG com $I_B = 1547,07$ nm e $FWHM = 0,18$ nm foi colada a uma lâmina de aço-mola engastada. Na mesma posição da FBG, porém em lado oposto, foi colado um extensômetro elétrico de resistência. Para verificação de repetibilidade do sistema foram feitos três ciclos de carregamento à lâmina, para cada ciclo foi aplicado uma variação máxima de $1424,24$ $\mu\text{m}/\text{m}$. Aos pontos experimentais foi feito um ajuste polinomial de terceira ordem com coeficiente de correlação de $0,99793$ e o desvio padrão máximo calculado para os três ciclos foi de $0,04$.

Além dos pontos experimentais os resultados foram validados através de simulação numérica. Para a simulação, os espectros dos dispositivos óticos, LED e filtro, foram ajustados por gaussianas e para FBG foram utilizadas as equações descritas na seção 2.3. Conforme se pode observar os valores medidos e simulados apresentam uma boa concordância, apresentando um desvio padrão máximo de $0,045$.

Na figura 3.15b é apresentado a diferença entre os pontos experimentais e ajuste polinomial e entre os pontos simulados e ajuste polinomial. O objetivo dessa análise é verificar a simulação numérica utilizada. A maior diferença para os pontos referentes a simulação numérica é de $0,01$ e para aqueles referentes aos pontos experimentais é de $0,04$, ou seja, um variação de 4% .

Na figura 3.16 é apresentado a variação de voltagem de saída do sistema de demodulação em função da deformação aplicada para a região linear da convolução entre os espectros do filtro e da rede sensora, onde se observa uma dependência linear com coeficiente $6,63$ $\text{mV}/\mu\text{m}/\text{m}$ e coeficiente de correlação $0,99472$. A faixa de operação para o circuito ótico desenvolvido é de, aproximadamente, 700 $\mu\text{m}/\text{m}$, de 500 $\mu\text{m}/\text{m}$ a 1200 $\mu\text{m}/\text{m}$.

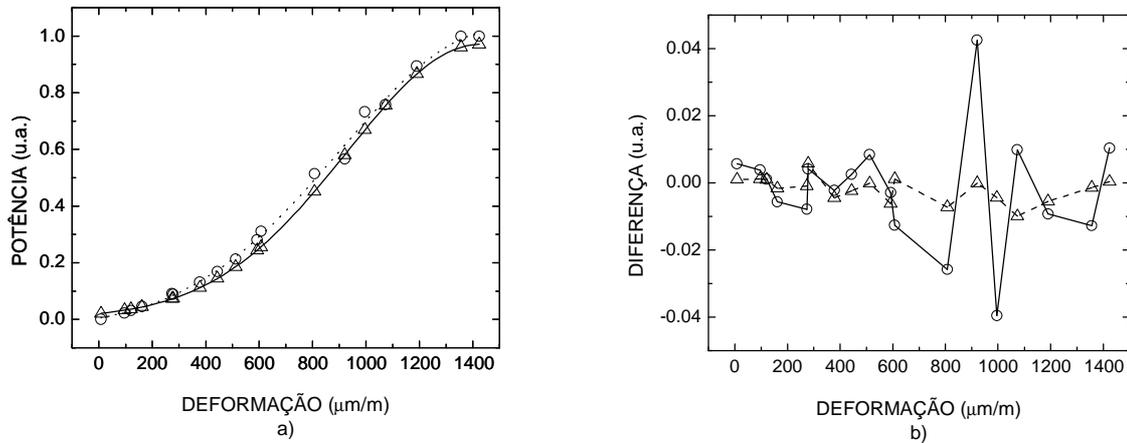


Figura 3.15 a) Resultados numéricos (triângulos) e experimentais (círculos) relativos a caracterização do sistema de demodulação empregando filtro JDS pela aplicação de deformação e ajuste polinomial de terceira ordem aos pontos experimentais e simulados e b) diferenças entre os pontos experimentais e ajuste polinomial (círculos) e entre os pontos simulados e ajuste polinomial (triângulos)

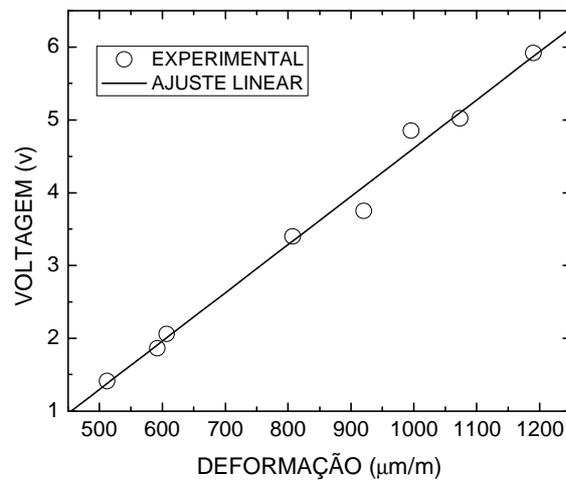


Figura 3.16 Resultado experimental para região linear do sistema de demodulação com coeficiente linear e de correlação de $6,63 \text{ mV}/\mu\text{m/m}$ e $0,99472$, respectivamente

3.3.4. ENCAPSULAMENTO TÉRMICO DO SENSOR

Um encapsulamento da FBG para medidas de temperatura foi desenvolvido com a finalidade de tornar o dispositivo mais robusto e livre de deformações mecânicas que

poderiam provocar erros na medida. O dispositivo consiste de um tubo, diâmetro interno de 2 mm, com revestimento interno de amianto. Na ponta deste tubo há outros dois tubos menores de aço, com diâmetros diferentes onde o de menor diâmetro, 0,3 mm, serve de guia para posicionar o sensor dentro daquele com maior diâmetro, 1 mm, que protege a rede de Bragg, conforme esquematizado na figura 3.17. Esse procedimento faz com que a rede sensora não se encoste às paredes do tubo, evitando erros de leitura que poderiam ser provocados pela deformação mecânica do aço. Devido ao pequeno volume de ar existente entre a fibra ótica e a parede do tubo, o diferencial de temperatura pode ser desconsiderado.

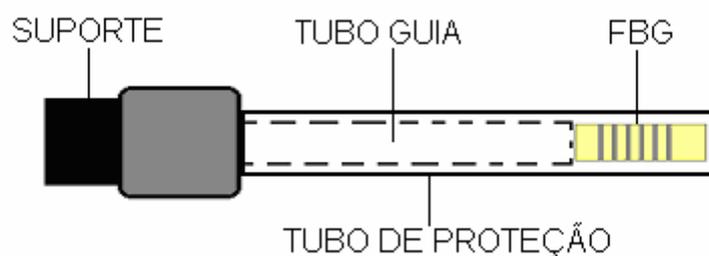


Figura 3.17 Desenho esquemático do encapsulamento desenvolvido para a ponta de prova do sistema sensor

Nesta seção foram demonstradas algumas técnicas de demodulação de redes de Bragg encontradas na literatura. Com base no levantamento dos diferentes esquemas de demodulação foi proposto um sistema demodulado em intensidade. O sistema proposto tem como características o baixo custo e a facilidade de implementação quando comparado a outros instrumentos, permitindo o emprego de diferentes filtros, como os do filtro de borda (*edge filter*) ou do filtro sintonizável (*tunable filter*). Com objetivo de avaliar o sistema de demodulação proposto foram realizados ensaios de caracterização comparando resultados experimentais com simulação numérica.

CAPÍTULO 4

VIBRAÇÕES EM ESTRUTURAS

As vibrações que podem ocorrer em máquinas e em estruturas são normalmente indesejáveis, não somente devido aos movimentos desagradáveis, ao ruído ou às tensões dinâmicas, que podem causar fadiga e, conseqüentemente, falha na estrutura, mas também pelas perdas de energia e a redução no desempenho que acompanham as vibrações. Devido aos efeitos danosos das vibrações, uma análise mais cuidadosa do comportamento dinâmico das estruturas deve ser feita na fase de projeto, quando modificações podem ser realizadas no sentido de eliminar as vibrações ou reduzi-las ao máximo possível.

Sempre que a frequência natural de vibração de máquinas ou estruturas coincide com a frequência de excitação externa, ocorre o fenômeno conhecido como *ressonância*, o qual conduz a excessivas amplitudes e eventual colapso do sistema. Devido aos danos que a vibração pode causar em máquinas e estruturas, testes de vibração têm se tornado mais comuns em novas concepções e desenvolvimento de muitos projetos de engenharia.

Em alguns sistemas de engenharia o ser humano atua como parte do sistema e a transmissão de vibração para o ser humano resulta em desconforto e perda de eficiência. Vibrações na instrumentação de painéis de leitura podem causar seu mau funcionamento ou dificultar a leitura. Assim, um dos objetivos do estudo de vibração é sua redução na fase de

projeto e de construção das estruturas ou como variável e controle no diagnóstico de estruturas existentes.

4.1. ENSAIOS DINÂMICOS DE ESTRUTURAS

Os ensaios dinâmicos têm como objetivo avaliar o desempenho de estruturas, possibilitando assim a avaliação da segurança e a elaboração ou confirmação de modelos matemáticos existentes.

A resposta dinâmica de máquinas, estruturas ou sistemas pode ser determinada pela sobreposição dos modos naturais de vibração quando as amplitudes de oscilação são pequenas. Assim uma descrição dinâmica completa da estrutura requer a determinação das frequências modais e os parâmetros do sistema; massa, rigidez e grau de amortecimento. A resposta de um sistema pode ser medida em termos de suas amplitudes, velocidades ou acelerações e, assim, a análise modal pode ser usada para os seguintes propósitos:

- A sensibilidade de sistemas à vibração pode ser reduzida ou eliminada através de modificações nos projetos;
- Os desequilíbrios inerentes no sistema que causam vibrações podem ser reduzidos ou compensados.

A resposta em frequência é primeiramente determinada experimentalmente e então é analisada para encontrar a frequência natural e os parâmetros do sistema - massa, rigidez e grau de amortecimento. Os parâmetros do sistema podem então ser usados para prever a resposta do sistema para várias excitações ou para melhorar seu comportamento dinâmico

através de modificações no projeto. Na análise modal, assume-se a estrutura como sendo linear e os parâmetros invariantes no tempo e. g., [Rao, 1999].

4.2. TIPOS DE ENSAIOS

A presença de danos ou deterioração em estruturas causam mudanças nas frequências naturais. Os métodos mais úteis de localização de danos, baseados em ensaios dinâmicos, são aqueles que avaliam as mudanças nas frequências de ressonância, pois as medidas de frequência são mais rápidas de adquirir e são também mais confiáveis. Perdas de rigidez são deduzidas quando frequências naturais medidas são menores que as calculadas. Frequências maiores que aquelas calculadas são indicativos de rigidez nos suportes maior que esperado. Cada modo de vibração é associado a um valor de amortecimento, o qual é a medida de dissipação de energia do sistema [Salawu, 1997].

Os tipos de ensaios são classificados pelo grau de controle sobre a excitação de entrada. Métodos de ensaios dinâmicos sem qualquer tipo de controle na entrada são classificados como ensaios de vibração ambiente. Ensaios de vibração forçada são aqueles onde a vibração é artificialmente induzida [Salawu, 1995]. Métodos onde a excitação é artificialmente induzida mas não é ou não pode ser medida são também definidos como ensaios de vibração forçada.

4.2.1. ENSAIOS DE VIBRAÇÃO AMBIENTE

Em ensaios de vibração ambiente a excitação de entrada não é controlada, possibilitando a realização dos testes com o sistema em operação. O carregamento de entrada

pode ser o vento, o tráfego de pedestres, a passagem de veículos ou qualquer outro tipo de carregamento. Uma vez que a entrada é desconhecida, certas suposições devem ser assumidas sobre sua natureza. A suposição básica do método é que a força de excitação é um processo aleatório, possibilitando um amplo espectro de frequências. Em muitos casos a natureza da excitação de entrada pode somente ser aproximada por descrições estatísticas, carregamento por vento, por exemplo, ou assumindo o espectro de excitação concentrado dentro de uma faixa de frequência como, por exemplo, frequências na faixa de 2 Hz a 4 Hz para excitação causada por veículos em pontes [Salawu, 1995]. Se o espectro de carregamento é limitado a uma faixa estreita de frequências, somente uma figura limitada de componentes dinâmicas da estrutura pode ser monitorada.

4.2.2. ENSAIOS DE VIBRAÇÃO FORÇADA

Este ensaio envolve aplicação de excitação de entrada com níveis de força e frequência conhecidas. Testes de vibração forçada têm a vantagem de eliminar efeitos de ruídos externos a medida na estrutura. O meio físico através do qual a excitação é realizada é chamado de excitador ou *shaker*, este dispositivo é usado para transmitir vibração para a estrutura [Salawu, 1995]. Ensaio de vibração forçada são baseados no fato de que, conhecendo as cargas na estrutura, o movimento resultante pode ser medido, tornando possível, estimar as propriedades da estrutura.

4.2.3. ENSAIOS DE IMPACTO

O meio mais simples de aplicar um impacto a uma estrutura é o uso de um martelo instrumentado ou uma massa suspensa para dar golpes na estrutura. O impulso dado à estrutura pode ser variado mudando a massa do dispositivo de impacto. A variação da

frequência de impacto pode ser alterada mudando o tipo da cabeça do martelo, [Salawu, 1995]. Ensaios de impacto são susceptíveis a ruídos de entrada visto que a força de entrada é aplicada sobre um curto período de tempo quando comparado à resposta medida.

4.2.4. REPRESENTAÇÃO DA RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DE UM SISTEMA

A técnica de ensaio por meio de excitação por impulso é um método dinâmico de medida baseado na análise da vibração livre de uma estrutura resultante de um impacto mecânico. O resultado é a indicação precisa da frequência natural dessa vibração. Esta informação pode ser usada para o cálculo do módulo de deformação do material que constitui a estrutura que está sendo analisada. Este método de ensaio é classificado como um ensaio não destrutivo e é caracterizado pela rapidez e facilidade de ser executado além de fornecer informações correspondentes ao meio material contínuo que constitui a estrutura, [Williams, 1992].

A energia adquirida pela estrutura, quando provocado o impulso, é dissipada na forma de movimento vibratório cuja natureza depende da geometria, da densidade e das propriedades elásticas do material. A informação do valor da frequência natural em conjunto com o conhecimento da massa da peça permite o cálculo do módulo de deformação [Wolfenden, 1990].

Em geral, a vibração livre resultante de um impulso mecânico é de natureza complexa, combinação da oscilação na frequência natural e de outros harmônicos de ordem superior. As peças sob estudo podem ser induzidas a vibrar em diferentes modos, dependendo da escolha do ponto de aplicação do impulso excitador. É importante que o impulso seja resiliente para que a peça vibre livremente após o contato com o corpo excitador e para que o amortecimento dos movimentos ocorra naturalmente. Dessa forma garante-se que o sistema material que está

sendo investigado não sofra influência da rigidez de outros sistemas com os quais, eventualmente, possa estar em contato. As vibrações livres são sempre amortecidas, isto é, sempre haverá dissipação de energia no sistema, conforme representação na figura 4.1.

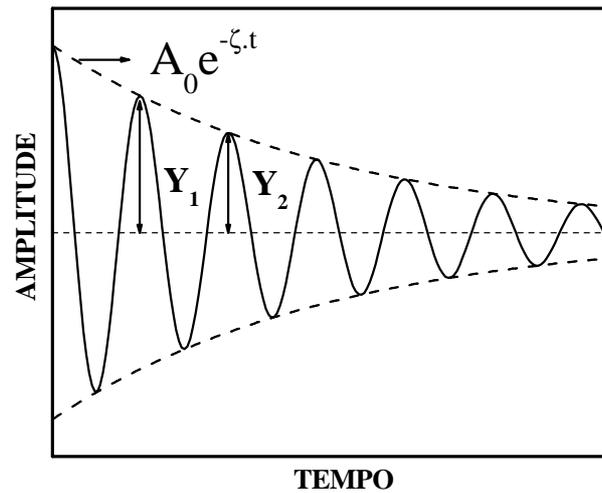


Figura 4.1 Resposta à vibrações livres com amortecimento

A equação das vibrações livres do sistema com um grau de liberdade, levando em conta que a força de amortecimento é proporcional à velocidade da massa em vibração, é obtida a partir do equilíbrio dinâmico do sistema. A equação que representa a amplitude de um sistema sob vibração livre amortecido é [Almeida, 1990]:

$$Y = A_0 e^{-\zeta t} \cos(w_n t) \quad (4.1)$$

com A_0 amplitude inicial da oscilação, ζ o coeficiente de amortecimento do sistema, w_n a frequência natural do sistema, t é o tempo.

Outra maneira de avaliar o amortecimento de estruturas é através do fator de qualidade, Q , que é a razão entre a energia máxima armazenada na condição de ressonância, pela energia dissipada por período. Para uma viga de massa m sujeita a um impulso, sofrendo

um deslocamento inicial Y_1 e retornando para posição Y_2 a energia armazenada inicialmente é mY_1 e a perda de energia em um período é $m(Y_1 - Y_2)$. O fator Q é, portanto,

$$Q = 2p \frac{Y_1 m}{(Y_1 - Y_2) m} = \frac{2p Y_1}{Y_1 - Y_2} \quad (4.2)$$

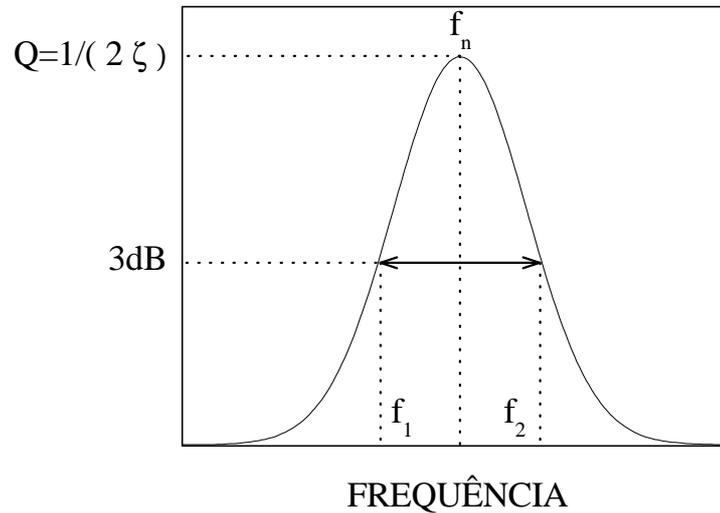


Figura 4.2 Resposta em frequência de uma viga em balanço ilustrando as frequências f_1 , f_2 e f_n

O fator de qualidade também pode descrever a razão de amortecimento de um sistema estrutural através de [Rao, 1999]:

$$Q \cong \frac{1}{2z} \cong \frac{f_n}{f_2 - f_1} \quad (4.3)$$

com f_1 e f_2 sendo as frequências laterais, em Hz, nos pontos onde a frequência natural do sistema cai a -3 dB, como indicado na figura 4.2 [Rao, 1999].

4.3. ANÁLISE DE VIBRAÇÕES LIVRES COM UM GRAU DE LIBERDADE

As vibrações livres surgem em um sistema em virtude de uma perturbação que provoque deslocamentos iniciais do sistema em relação à posição de equilíbrio. Estas vibrações continuam graças às forças internas que restabelecem o equilíbrio.

Neste trabalho é dada ênfase às vibrações transversais de barras. Para tanto, é apresentado a obtenção da equação diferencial das vibrações livres transversais de barras prismáticas¹ com rigidez, massa e seção transversal constantes ao longo de todo o seu comprimento. Isso é feito a partir do estabelecimento das condições de equilíbrio dinâmico do elemento infinitesimal dx da figura 4.3, pertencente à uma viga em balanço.

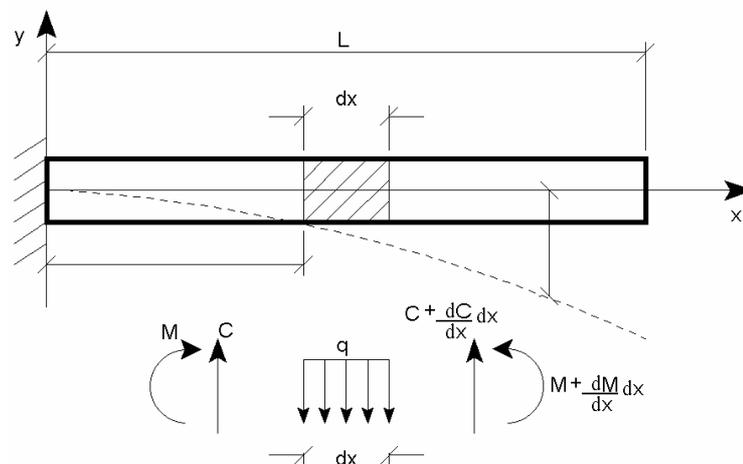


Figura 4.3 Representação de um elemento de viga e suas componentes

Estabelecendo o equilíbrio de forças verticais, resulta em:

$$C - qdx - C - \frac{\partial C}{\partial x} dx = 0 \quad (4.4)$$

¹ Barras prismáticas são elementos como, por exemplo, uma viga onde uma das dimensões é muito maior que as outras duas.

Onde:

C : esforço cortante;

q : força externa aplicada por unidade de comprimento;

$qdx = rA \frac{d^2 y}{dt^2}$: força inercial dada pela segunda lei de Newton, com:

r = densidade do material;

A = área da seção transversal da viga;

$\frac{d^2 y}{dt^2}$ = aceleração do sistema.

Portanto, estabelecendo-se o equilíbrio dinâmico do sistema, sem considerar a energia cinética de rotação, com $C = A dx$ obtém-se a condição:

$$rA \frac{d^2 y}{dt^2} = - \frac{\partial C}{\partial x} dx \quad (4.5)$$

Considerando-se o ângulo de giro α da seção transversal originado pela flexão

$$\frac{dy}{dx} = \alpha \quad (4.6)$$

e admitindo a relação aproximada para a curvatura da peça

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{M}{EI} \quad (4.7)$$

onde M é o momento de curvatura, e, estabelecendo-se as condições de equilíbrio de momentos fletores

$$Cdx - qdx \frac{dx}{2} + M - M - \frac{\partial M}{\partial x} dx = 0 \quad (4.8)$$

Para a condição de equilíbrio a força q é nula, logo:

$$Cdx - \frac{\partial M}{\partial x} dx = 0 \quad (4.9)$$

e derivando da equação 4.9 em relação a x , chega-se a:

$$\frac{\partial C}{\partial x} dx - \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} dx = 0 \quad (4.10)$$

usando as equações 4.5 e 4.7 obtém-se:

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + rA \frac{d^2 y}{dt^2} = 0 \quad (4.11)$$

A equação 4.11 representa a equação diferencial das vibrações livres transversais do eixo da viga da figura 4.3 no plano xy .

A frequência fundamental é obtida a partir da solução da equação 4.11, na qual o deslocamento é representado em função do tempo [McConnell, 1995].

$$y = Y(x) \cos(w_n t + f) \quad (4.12)$$

Onde:

$Y(x)$ = função que estabelece a lei de distribuição dos deslocamentos máximos dos pontos do eixo da viga, denominada *modo da vibração fundamental*;

w_n = frequência angular do sistema (rad/s);

t = tempo em segundos

f = ângulo de fase do movimento do sistema (rad).

Para obter as equações dos modos naturais de vibração do sistema substitui-se 4.12 em 4.11, resultando em:

$$EI \frac{d^4}{dx^4} [y(x) \cos(w_n t + f)] + rA \frac{d^2}{dt^2} [y(x) \cos(w_n t + f)] = 0 \quad (4.13)$$

expandindo e simplificando, chega-se a

$$\frac{d^4 y(x)}{dx^4} - \frac{rA w_n^2}{EI} y(x) = 0 \quad (4.14)$$

A equação característica representativa de 4.14 é dada por:

$$g^4 - \frac{rA w_n^2}{EI} y(x) = 0 \quad (4.15)$$

$$g^4 = \frac{rA w_n^2}{EI} y(x) \quad (4.16)$$

Sendo assim,

$$w_n = g^2 \sqrt{\frac{EI}{rA}} \quad (4.17)$$

portanto:

$$g^2 = \pm \sqrt{\frac{rA w_n^2}{EI}} \quad (4.18)$$

onde as raízes características da equação 4.18 são

$$g_1 = \sqrt[4]{\frac{rA w_n^2}{EI}}; g_2 = -\sqrt[4]{\frac{rA w_n^2}{EI}}; g_3 = i \sqrt[4]{\frac{rA w_n^2}{EI}} \text{ e } g_4 = -i \sqrt[4]{\frac{rA w_n^2}{EI}}$$

sendo possível a obtenção da solução para as amplitudes $y(x)$ com a equação

$$y(x) = B_1 \sinh(g_1 x) + B_2 \cosh(g_2 x) + B_3 \sin(g_3 x) + B_4 \cos(g_4 x) \quad (4.19)$$

As constantes de integração B_1 , B_2 , B_3 e B_4 são determinadas por meio da imposição das condições de contorno. Como se trata de uma viga em balanço, as condições de contorno a serem satisfeitas são as seguintes:

- Para o engaste onde $x = 0$, temos:

1) Deslocamento nulo, ou seja, $y(0,t) = 0 \Rightarrow y(x) = 0$

2) Rotação nula: $y'(0,t) = 0 \Rightarrow \frac{dy(x)}{dx} = 0$

- Para ponta do balanço onde $x = L$, vem:

3) Momento fletor nulo: $M(L) = EI y''(L) = 0 \Rightarrow \frac{d^2 y(x)}{dx^2} = 0$

4) Esforço cortante nulo: $V(L) = EI y'''(L) = 0 \Rightarrow \frac{d^3 y(x)}{dx^3} = 0$

Derivando a equação do movimento vertical e introduzindo as condições de contorno, vem:

$$y(0) = B_1 \sinh 0 + B_2 \cosh 0 + B_3 \sin 0 + B_4 \cos 0 = 0 \quad (4.20)$$

$$\frac{dy(0)}{dx} = g[B_1 \cosh 0 + B_2 \sinh 0 + B_3 \cos 0 - B_4 \sin 0] = 0 \quad (4.21)$$

$$\frac{dy^2(L)}{dx^2} = g^2[B_1 \sinh(gL) + B_2 \cosh(gL) - B_3 \sin(gL) - B_4 \cos(gL)] = 0 \quad (4.22)$$

$$\frac{dy^3(L)}{dx^3} = g^3[B_1 \cosh(gL) + B_2 \sinh(gL) - B_3 \cos(gL) + B_4 \sin(gL)] = 0 \quad (4.23)$$

Por meio de 4.20 e 4.21 conclui-se que $B_3 = -B_1$ e $B_4 = -B_2$ e substituindo esses valores em 4.22 e 4.23 obtém-se a equação da frequência:

$$\sinh^2(gL) - \sin^2(gL) - \cos^2(gL) - 2 \cos^2(gL) \cos^2(gL) - \cosh^2(gL) = 0 \quad (4.24)$$

que na forma simplificada é dada por:

$$\cos(\gamma L) = -\frac{1}{\cosh(\gamma L)} \quad (4.25)$$

Introduzindo valores de γL na equação 4.19 as correspondentes frequências angulares podem ser obtidas por:

$$w_n = (\gamma L)_n^2 \sqrt{\frac{EI}{mL^4}} \quad (4.26)$$

onde n são modos de vibração.

A figura 4.4 ilustra os três primeiros modos de vibração de uma viga em balanço, cujos respectivos valores são: $(\gamma L)_1^2 = 1,875^2$, $(\gamma L)_2^2 = 4,694^2$, $(\gamma L)_3^2 = 7,855^2$ [Mcconnell, 1995].

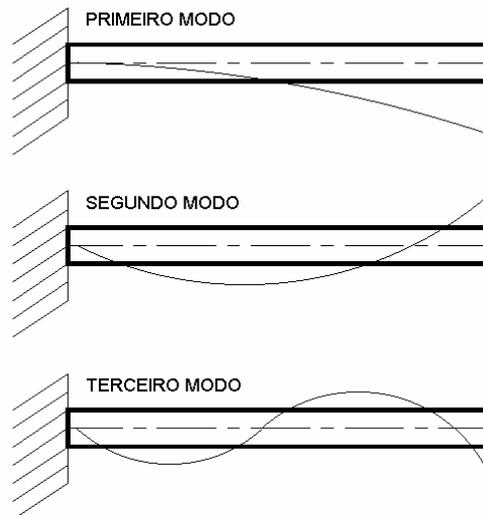


Figura 4.4 Representação de três primeiros modos de uma viga em balanço

Ao invés de expressar a frequência natural correspondente aos modos de vibração como dado por 4.26 é conveniente expressá-la em (Hz):

$$f_n = \frac{1}{2p} \left(\frac{(gL)_n^2}{L} \right)^2 \sqrt{\frac{EI}{m}} \quad (4.27)$$

onde, f_n é frequência natural da viga em balanço correspondente aos n modos de vibração, em Hz, EI é o produto de rigidez da viga, L é o comprimento da viga em balanço e m é a massa por unidade de comprimento.

4.4. ESTUDO DE VIBRAÇÕES EM ESTRUTURAS COM REDES DE BRAGG

As técnicas de ensaios discutidas na seção 4.1 foram empregadas em estudos de vibrações com o uso de redes de Bragg em diferentes tipos de materiais, a saber: aço, madeira e concreto armado. A instrumentação usada é aquela descrita na seção 3.2 e seus resultados são comparados a sensores elétricos comerciais, extensômetro elétrico de resistência e acelerômetros.

4.4.1. MEDIDAS DE VIBRAÇÃO EM UMA BARRA METÁLICA

Nesse primeiro ensaio o objetivo é comparar a resposta do sensor desenvolvido com redes de Bragg em relação ao extensômetro elétrico de resistência (EER) de 120 Ω .

A rede de Bragg foi colada a barra metálica seguindo os mesmos procedimentos utilizados na colagem dos extensômetros elétricos de resistência. A colagem da FBG foi efetuada ao lado do EER, permitindo o estudo das tensões atuando diretamente sobre eles. O posicionamento adotado no processo de colagem é mostrado de forma esquemática na figura 4.5.

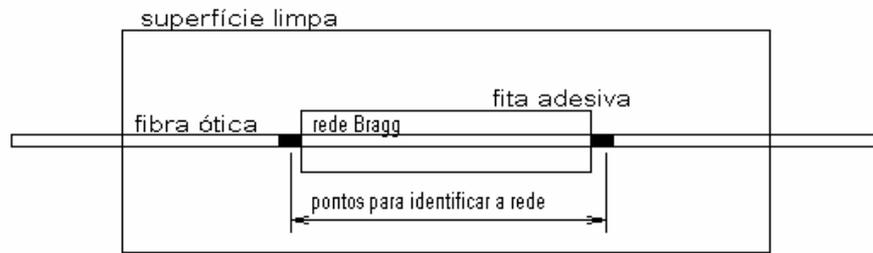


Figura 4.5 Processo de colagem da rede de Bragg na superfície da estrutura

O processo de colagem do sensor a barra é feito seguindo os seguintes passos: primeiro lixa-se a superfície na qual será colado o sensor; no segundo passo passa-se algodão com acetona para completar a limpeza e desgorduramento. Uma vez a superfície limpa e desgordurada inicia-se o processo de colagem. Primeiro é colada uma fita adesiva sobre o sensor, entre os dois pontos que marcam a posição onde a rede de Bragg está gravada, então a fita juntamente com a fibra é posicionada sobre a barra e colada com cianoacrilato, *Super Bonder*, entre aqueles pontos marcados na fibra ótica. Após aproximadamente dois minutos a fita é retirada deixando apenas a fibra ótica com a rede de Bragg colada à barra.

Para um possível reaproveitamento das redes utilizadas nos ensaios pode-se usar um removedor de cola, *Descola Tudo*, da LOCTITE. Esse removedor tem apresentado uma grande vantagem em termos de custo, uma vez que na maioria dos ensaios aqui apresentados as medidas são do tipo não destrutivas, tornando o sistema sensor mais atrativo quando comparado ao EER que não oferece essa possibilidade de reaproveitamento.

Como primeira análise foi aplicado um impulso em uma barra metálica engastada, com secção transversal de 1,00 mm x 13 mm e 312 mm de comprimento, sendo 190 mm de comprimento efetivamente livre e com massa de 30,46 g, submetendo-a a vibrações.

Na figura 4.6 é apresentado a resposta temporal, para os sensores ótico e elétrico, relativo a um impulso aplicado à barra metálica. A resposta da FBG mostrou-se satisfatória

em comparação àquela do sensor resistivo, apresentando uma relação sinal-ruído (SNR) superior ao sensor resistivo, aproximadamente 3,5 dB. A relação sinal-ruído foi calculada através da razão entre a média quadrática da região de máximo do sinal e a média quadrática da região sem sinal.

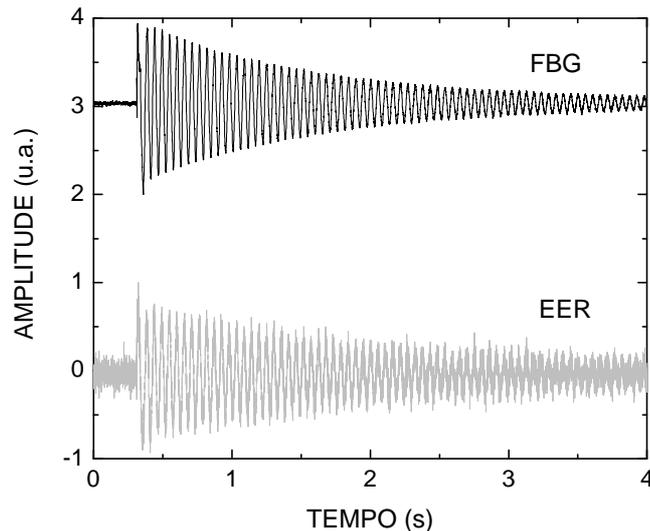


Figura 4.6 Resposta no domínio do tempo referente a um impulso aplicado a uma barra metálica, medida com os dois sensores, FBG e EER

Em outro ensaio a barra é submetida à oscilação pela ação de um excêntrico acoplado a um motor elétrico, sendo possível observar a resposta na condição de ressonância do sistema, figura 4.7.

Os resultados apresentados na figura 4.7 apresentam, novamente, uma satisfatória resposta da FBG comparado ao sensor resistivo. Outro importante ponto a ser observado é simetria do sinal obtido com a FBG. Essa boa simetria está relacionada a convolução entre os espectros do filtro e da rede sensora do sistema de demodulação.

Com o objetivo de melhor visualizar o comportamento do instrumental com a FBG é apresentada a análise espectral de uma medição realizada, com os dois sensores indicando a

frequência de ressonância, 18,83 Hz, conforme espectros de frequência apresentados na figura 4.8. Esse valor de frequência concorda com o valor calculado a partir da equação da frequência natural correspondente ao primeiro modo de vibração para uma viga engastada, apresentada na seção 4.3. O valor calculado foi de 18,84 Hz, considerando como módulo de elasticidade do aço de 210 GPa. Observa-se também que o comportamento relativo das respectivas fases é bastante semelhante.

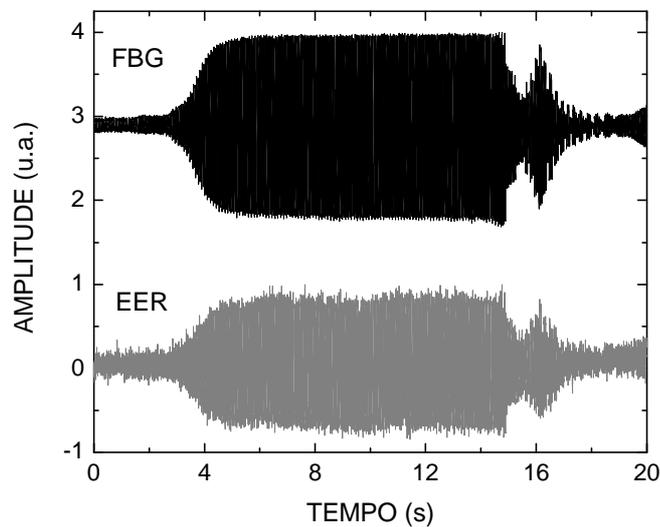


Figura 4.7 Resposta dos sensores à excitação ressonante da barra metálica

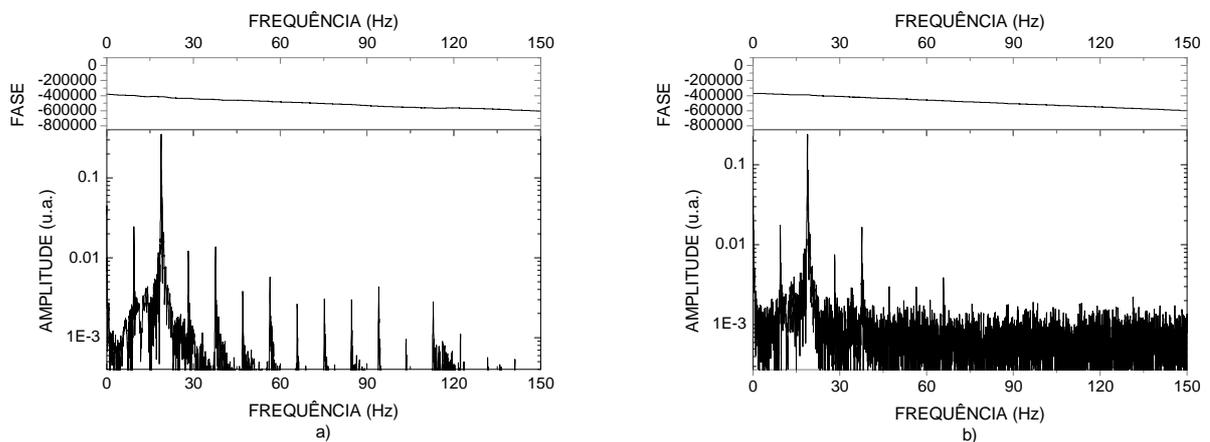


Figura 4.8 Resposta espectral dos sensores na situação de ressonância, a) FBG e b) EER

4.4.2. MEDIDAS DE VIBRAÇÃO EM VIGAS DE MADEIRA LAMINADA COLADA (MLC)

A crescente necessidade de utilizar elementos estruturais de qualidade, juntamente com o marcante avanço na tecnologia dos adesivos e o excelente potencial madeireiro gerado pelas espécies de reflorestamento, contribuíram para o surgimento de um novo material de construção, a Madeira Laminada Colada (MLC). Esse material tornou-se um dos mais importantes elementos para a aplicação estrutural, sendo utilizado com muito sucesso em várias partes do mundo, nas mais variadas formas e dimensões.

A grande vantagem da técnica da MLC é que esta pode empregar, de forma racional, madeira de reflorestamento ou mesmo espécies nativas que não são ou são pouco utilizadas estruturalmente, tornando as estruturas de madeira cada vez mais competitivas, divulgadas e aceitas pelos projetistas. Entretanto, para a produção dos elementos estruturais de MLC é necessário o uso de lâminas de comprimento suficientemente grande, as quais são obtidas por meio de emenda longitudinal de tábuas, ver detalhes construtivos na figura 4.9 [Macedo, 1999]. O objetivo dos ensaios apresentados nesta seção é avaliar a degradação de vigas MLC, por meio de ensaios dinâmicos, empregando redes de Bragg em fibras óticas em comparação a sensores elétricos comerciais.

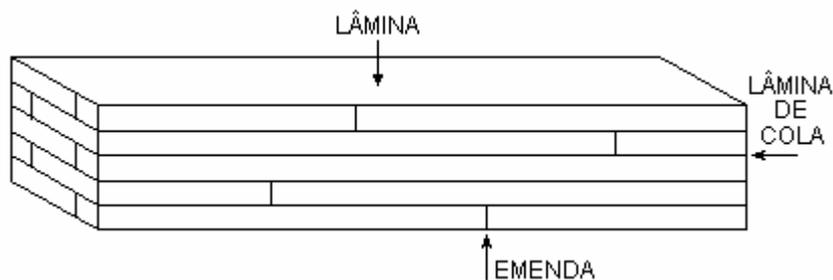


Figura 4.9 Esquema geral de uma peça de MLC

Neste experimento os corpos-de-prova utilizados nos ensaios quase estáticos e dinâmicos constituem-se de três vigas de MLC com secção transversal de 10 cm x 15,5 cm e 210 cm de comprimento, sendo 176 cm de comprimento efetivamente livre. Nessas vigas foram instalados um acelerômetro com capacidade de $2 \frac{1}{g}$, um extensômetro elétrico de resistência de 120Ω e um sensor ótico (FBG). A viga de MLC foi engastada em uma das extremidades, através de braçadeiras de aço. Os sensores foram posicionados de forma a se obter a melhor resposta; o acelerômetro foi posicionado na região da ocorrência de maiores deslocamentos, ou seja, próximos à extremidade livre da viga. O EER e a FBG ficaram posicionados na região de maior deformação específica, ou seja, próximo ao engaste. Uma vista geral do sistema experimental é mostrada na figura 4.10.

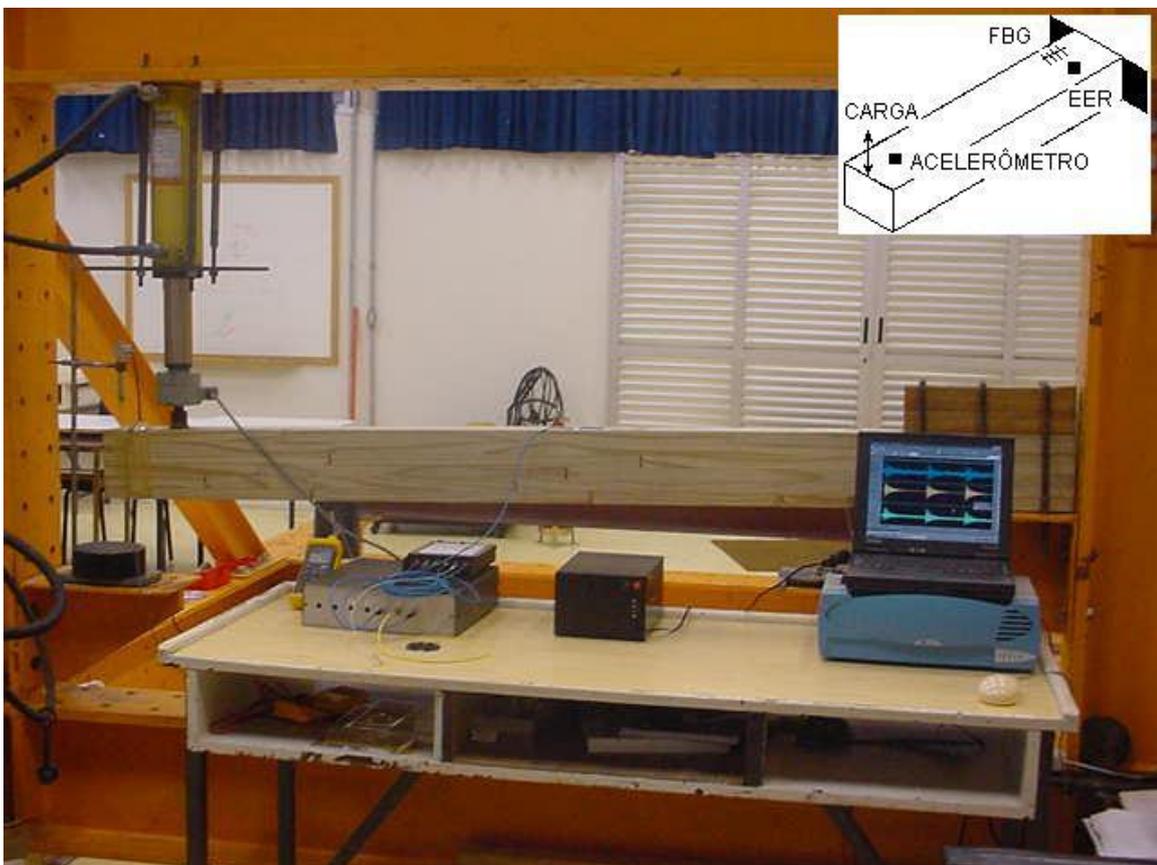


Figura 4.10 Arranjo de ensaio e instrumentação da viga

Os procedimentos de ensaio consistiram na execução das seguintes etapas: inicialmente foram realizados ensaios de vibrações livres para determinação da frequência natural de vibração, correspondendo à condição de integridade da peça. As vibrações livres foram induzidas por meio da utilização de um martelo com cabeça emborrachada de modo a não danificar a viga. Nesse caso o procedimento é análogo ao de remoção súbita de carga com a diferença de não se conhecer o valor de carga aplicada. Posteriormente foi feito o primeiro ensaio estático de flexão simples para caracterizar o primeiro nível de solicitação. A carga foi aplicada junto à extremidade livre, cujo valor foi registrado por meio de uma célula de carga com capacidade de até 50 kN. A carga estimada de ruptura é de 5 kN e foi determinada por meio do emprego das equações de equilíbrio de flexão simples, considerando o arranjo viga em balanço e, como valor de resistência da MLC foi adotado o valor de resistência à compressão paralela às fibras de 30 MPa, considerando a viga de MLC de classe C30, conífera, e $E = 14,5$ GPa, conforme NBR7190/97 (Normas Técnicas Brasileiras – Projetos de Estruturas de Madeira). Nesse primeiro ciclo, atingiu-se aproximadamente 5% da carga estimada de ruptura da viga, aumentando em passos de 5 % para os carregamentos posteriores. Entre cada intervalo dos ciclos de ensaio quase estáticos foram executados os ensaios dinâmicos de vibrações livres. Esses ensaios foram realizados sempre após o completo descarregamento da peça, com acréscimos de carga em relação ao ciclo anterior. A frequência natural correspondente ao primeiro modo de vibração foi determinada para cada nível de solicitação, utilizando como meio de medida o acelerômetro, a rede de Bragg e o extensômetro elétrico de resistência. Os espectros de frequência são obtidos pela transformada rápida de Fourier dos sinais temporais medidos pelos sensores.

Na figura 4.11 estão apresentadas as séries temporais devido às vibrações livres, correspondentes a cada um dos sensores, correspondendo ao nível zero, condição de

integridade da viga. Os demais níveis de carregamento apresentam um andamento análogo aos da figura 4.11, a não ser as amplitudes que se alteram em função da degradação sofrida. Para essas medidas, a relação sinal ruído para a FBG, o EER e o acelerômetro são: 25,76 dB, 24 dB, 27,54 dB, respectivamente. As frequências naturais, em Hz, determinadas experimentalmente a partir dos ensaios de vibrações livres, correspondentes aos diversos níveis de carregamento estáticos ao qual as vigas foram submetidas, podem ser vistas na figura 4.12.

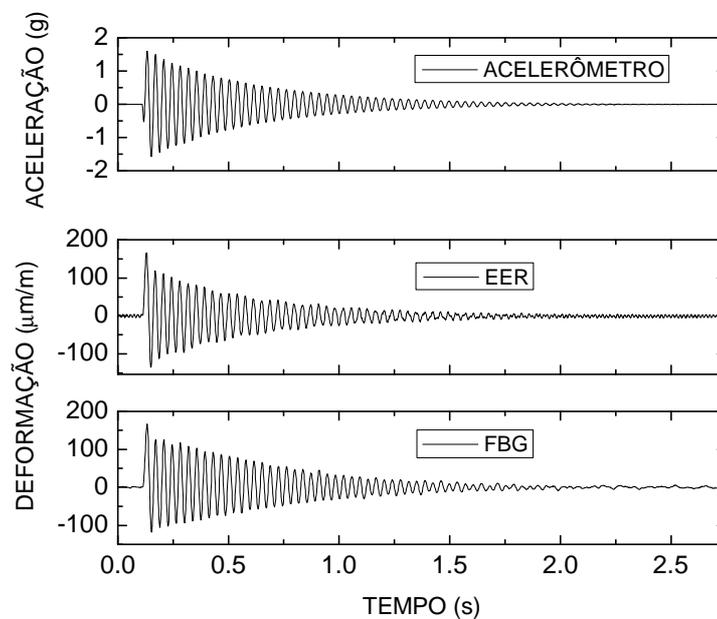


Figura 4.11 Séries temporais das respostas a um impulso padrão analisado pela FBG, acelerômetro e EER

Conforme se pode observar na figura 4.12, as vigas de MLC apresentam um comportamento elástico até a eminência da ruptura, ou seja, o colapso é frágil. Dessa forma, é possível avaliar o grau de degradação de uma estrutura a partir do valor de frequência natural de vibração. Basta conhecer as suas propriedades quando íntegra para que, em campo, se possa avaliar a frequência natural por meio de um ensaio de vibrações livres que caracteriza um ensaio não destrutivo. Os valores de carga de ruptura experimentais para as três vigas

estão próximos daquele estimado, 5 kN. A carga de ruptura para as vigas 1, 2 e 3 são 4,38 kN, 6,1 kN e 6,14 kN, respectivamente. Esses valores foram obtidos quando as vigas sofreram ruptura em algumas das placas que compõem as vigas, próximo ao engaste. A ruptura foi observada através de inspeção visual durante o aumento de carga. A diferença entre os valores teóricos e experimentais podem ser atribuídas à não homogeneidade das chapas de madeira que compõem as vigas, as quais têm diferentes dimensões, espessura, comprimento e emendas com diferentes espaçamentos.

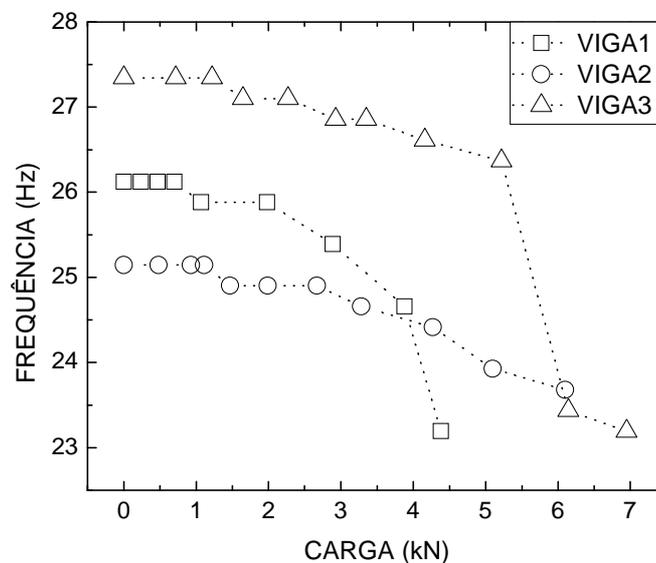


Figura 4.12 Frequência natural de oscilação determinada após aplicação de diferentes cargas. As linhas servem apenas para melhor visualização

Outra maneira de se avaliar o desempenho de sistemas estruturais é o uso da análise da largura de banda a meia altura dos espectros das frequências naturais, que caracteriza o amortecimento dos sistemas estruturais adquiridos no ensaio [Inman, 1996]. Nesse tipo de avaliação procura-se determinar a perda de energia da peça em cada ciclo de carregamento da viga. Os espectros em frequência para cada uma das determinações foram ajustados através de curvas Lorentzianas empíricas, as quais apresentaram uma boa concordância com os valores

determinados experimentalmente, como mostrado na figura 4.13, lembrando que as amplitudes de pico foram normalizadas naquele gráfico, o que não interfere na interpretação dos resultados enfatizados neste estudo.

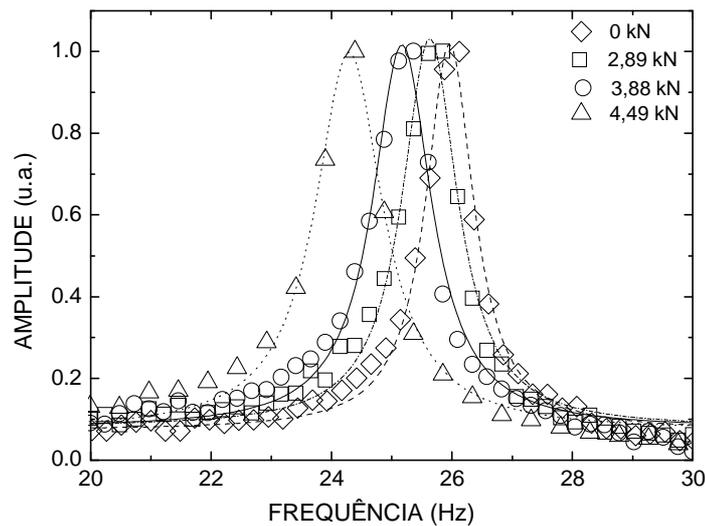


Figura 4.13 Espectros de frequência da FBG ajustados por curvas lorentzianas para diferentes cargas para viga 1

Para análise da largura de banda a meia altura dos diferentes sensores é traçada a curva de tendência de degradação da viga (ajuste polinomial de terceira ordem), onde é possível observar, figura 4.14, a boa concordância entre o acelerômetro e a FBG. Nessa análise, o EER apresentou maior variação nos resultados, que pode ser explicada em virtude da baixa relação sinal-ruído do sensor, mostrando a maior sensibilidade da FBG quando comparado ao sensor resistivo. Para os ajustes polinomiais feitos aos pontos experimentais, os desvios padrão foram 0,040, 0,070 e 0,038 para a FBG, o EER e o acelerômetro, respectivamente.

O coeficiente de amortecimento das vigas de MLC, calculado a partir da equação 4.3, é mostrado na figura 4.15. A vantagem deste método de análise é evidente quando comparado com a análise da variação de frequência com a carga aplicada, conforme visto nos quatro primeiros pontos da figuras 4.12, que faz aparentar não ter havido variação no valor da

frequência natural. Já para esses mesmos quatro primeiros pontos, como percebe-se na figura 4.15, pode-se notar sensivelmente o quanto o amortecimento sofreu alteração.

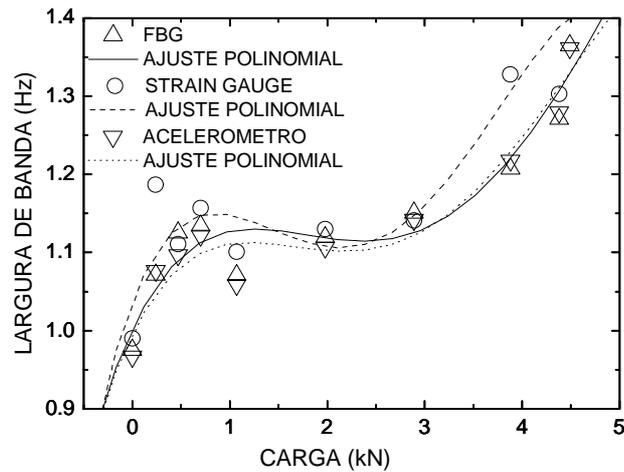


Figura 4.14 Análise do desempenho estrutural através da largura de banda a meia altura com três diferentes sensores: FBG, EER e Acelerômetro para viga 1. As linhas representam o ajuste polinomial (grau 3) aos dados experimentais (marcas)

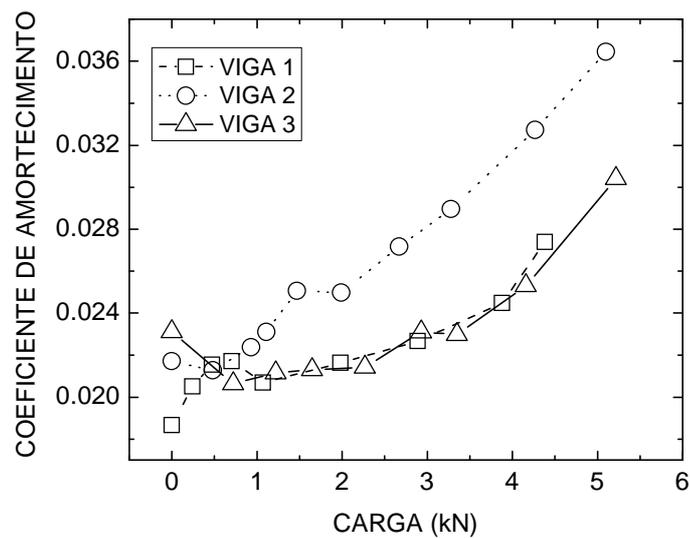


Figura 4.15 Análise do desempenho estrutural através da largura de banda a meia altura. As linhas servem apenas para melhor visualização da tendência do andamento das curvas

As pequenas variações iniciais nos resultados dos ensaios das vigas de MLC, observadas nas figuras 4.14 e 4.15, para carregamentos próximos de 1,2 kN, podem ser

explicadas em virtude da acomodação das fibras da madeira pela presença da resina desse material de origem orgânica. Em ensaios uniaxiais recomendados pela NBR7190/97 (Projeto para estruturas de Madeira) os diagramas tensão *versus* deformação têm seus valores iniciais, correspondentes a 10 % da carga de ruptura, desprezados justamente em decorrência desse comportamento. Neste caso, comprova-se a importância que um sensor mais sensível pode trazer em relação à riqueza mais detalhada de resposta, associada a uma análise de sinais diferenciada.

Os resultados apresentados na figura 4.15 mostram um maior grau de amortecimento com o aumento de degradação das vigas, devido a perda de rigidez com consequente diminuição da frequência natural, dada pela equação 4.3. A viga 2 apresentou uma ligeira diferença na forma de amortecimento quando comparada as vigas 1 e 3. Essa diferença pode ser atribuída a três fatores: à armazenagem das vigas, fazendo com que a viga 2 tenha esta ligeira diferença relacionada a um maior grau de umidade, às diferenças nas dimensões das placas de madeira que formam a viga e por fim, ao sistema de fixação da viga ao suporte. Porém é importante ressaltar a boa concordância entre o valor da carga de ruptura calculado e os valores medidos experimentalmente, o que torna o processo de análise bastante promissor para a utilização em diferentes estruturas.

4.4.3. MEDIDAS DE VIBRAÇÃO EM VIGA DE CONCRETO

Outro ensaio foi realizado com o sistema sensor em uma viga de concreto armado com seção transversal de 10 cm x 10 cm e 110 cm de comprimento, sendo 90,7 cm de comprimento efetivamente livre. A peça foi instrumentada com um acelerômetro com capacidade de $2 \frac{1}{g}$ e sensor ótico (FBG). A viga de concreto foi engastada em uma das extremidades, através de braçadeiras de aço. A FBG foi colada a uma barra metálica

engastada e então o conjunto composto pela barra mais FBG foi acoplado de frente à viga, na extremidade livre da viga, conforme apresentado na figura 4.16. Dessa forma os dois sensores ficaram posicionados na região de maior deslocamento, embora não lado a lado como nos ensaios de MLC. A validade desse ensaio se dá pela compatibilidade de deslocamentos medidos nas extremidades livres das vigas de concreto e metal.



Figura 4.16 Arranjo de ensaio e instrumentação da viga de concreto

Os procedimentos de ensaio foram os mesmos daqueles da viga de MLC. Conforme observado na figura 4.17, a partir de uma pequena solicitação já ocorre perda de rigidez, representada pelo produto de rigidez EI , que pode ser justificada por micro fissurações na estrutura interna da viga de concreto, caracterizando uma degradação gradual, ou seja, o colapso é avisado.

A partir das frequências naturais medidas após cada carregamento é possível determinar os valores de rigidez para os diversos estágios de fissuração da viga. Os valores de rigidez são obtidos isolando o produto EI na equação 4.27. Nessa análise foi considerada a massa por metro linear igual a 25 kg/m. Na tabela 4.1 são apresentados os valores de frequências medidas pelos sensores ótico e elétrico em função dos ciclos de carregamentos aplicado a viga, ressaltando a boa concordância entre os mesmos, e o produto de rigidez EI calculado, ressaltando que o momento de inércia I e a massa foram mantidos com valores constantes.

Tabela 4.1 Valores de frequência e produto da rigidez medida pelos sensores ótico e elétrico referente aos ciclos de carregamento

Ciclo	Carregamento (kN)	Frequência (Hz) FBG	Frequência (Hz) Acelerômetro	Produto de Rigidez Experimental (Nm^2)
0	0	44,92	44,92	$10,9 \times 10^4$
1	1,09	37,11	37,11	$7,4 \times 10^4$
2	1,47	35,16	35,16	$6,6 \times 10^4$

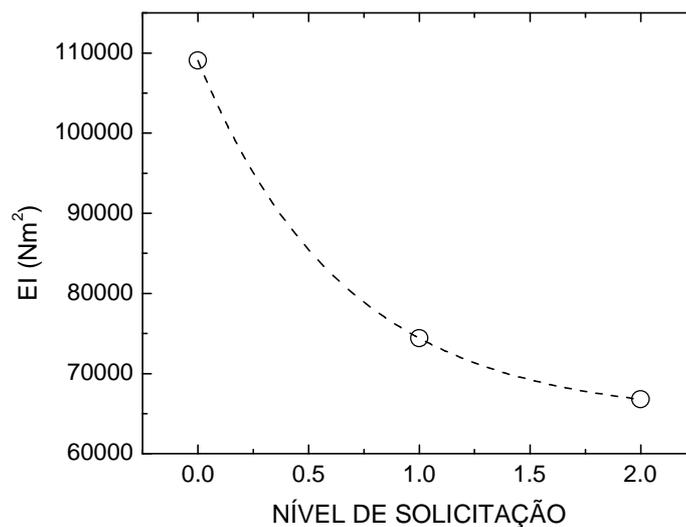


Figura 4.17 Produto de rigidez determinado após aplicação de diferentes cargas a uma viga de concreto armado. A linha serve apenas para melhor visualização da tendência do andamento da curva

Os dados obtidos mostram uma boa concordância entre os valores apresentados pela FBG e pelo acelerômetro. Os pontos medidos pelos transdutores, ótico e elétrico, em função

do nível de solicitação aplicado são os seguintes: viga íntegra 44,92 Hz; com carregamento de 1,09 kN (fissuração visível), 37,11 Hz e para carregamento de 1,47 kN (próximo à ruptura), 35,16 Hz.

4.4.4. EFEITO DA TEMPERATURA NA DEGRADAÇÃO DO CONCRETO ARMADO

A ação do fogo em estruturas de concreto tem sido considerada em diferentes estudos de análise estrutural em virtude das reduções na resistência do material causada por altas temperaturas [Kodur, Wang e Cheng, 2004]. Com base nos ensaios dinâmicos realizados em vigas de madeira e concreto, descritos nas seções anteriores, é proposto um ensaio para determinar os parâmetros de degradação de uma viga de concreto armado em função do aquecimento por chamas, simulando uma situação de incêndio.

A viga de concreto armado, com seção transversal de 0,85 cm x 10 cm 100 cm, 27 kg e idade de 30 dias, foi instrumentada da seguinte forma: uma FBG encapsulada, para medidas de temperatura, foi posicionada antes da concretagem no centro de massa da viga e uma segunda rede, para medida de vibração, foi posicionada próxima a região de engaste, colada na face superior da viga, ver fotografia do arranjo experimental na figura 4.18.

A técnica empregada para avaliação da degradação da viga de concreto foi similar àquelas utilizadas nas seções 4.3 e 4.4.2. Inicialmente, foram realizados ensaios de vibrações livres para determinação da frequência natural de vibração, correspondendo à condição de integridade da peça. Esse estágio foi realizado na temperatura ambiente do laboratório. Posteriormente a viga de concreto armado foi continuamente aquecida por aquecedores e a cada intervalo de cinco minutos foi medida a vibração livre da viga pelo impacto de um martelo de cabeça emborrachada. Os aquecedores possibilitaram uma variação de temperatura

no interior da viga de 128 °C num intervalo de tempo de 80 minutos, variando entre 22 °C a 150 °C, conforme mostra o gráfico na figura 4.19.

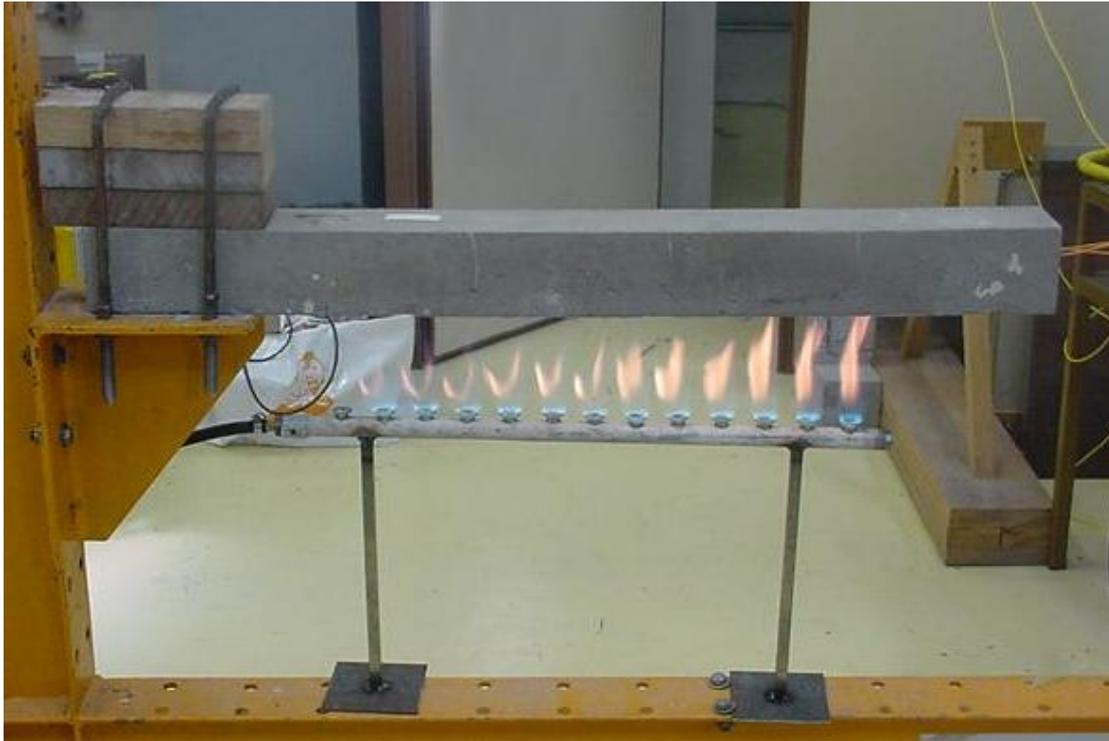


Figura 4.18 Arranjo do ensaio para determinação da degradação de uma viga de concreto em função do aumento de temperatura

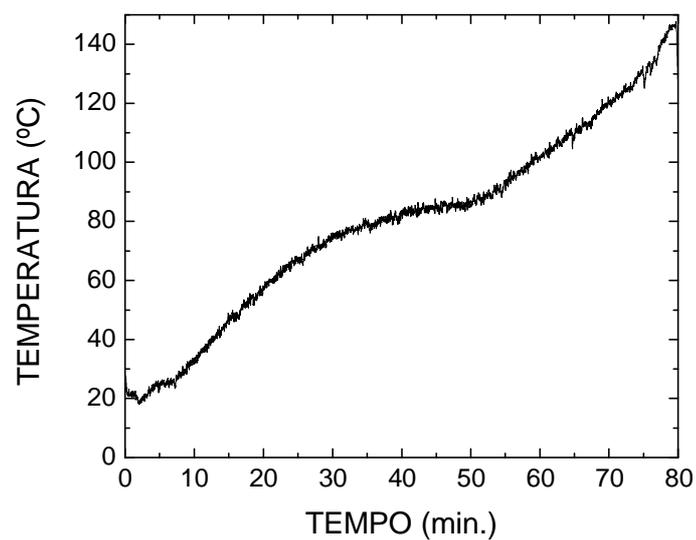


Figura 4.19 Variação de temperatura no interior da viga de concreto armado durante o processo de aquecimento

A tendência de equilíbrio de temperatura observada na região entre, aproximadamente, 40 °C e 50 °C corresponde à situação onde o equilíbrio térmico é alcançado pelo sistema, viga mais aquecedor, e um aumento da temperatura é possível com um aumento no fluxo de gás da chama.

A análise de degradação da viga torna-se possível através do uso da equação da frequência de vibração para o primeiro modo de uma viga em balanço, equação 4.27, apresentada na seção 4.3. Conhecido os valores da seção transversal e massa da viga é possível determinar o módulo de elasticidade para cada novo valor de frequência através de:

$$E = \frac{m}{\left(\frac{bh^3}{12}\right)} \left(\frac{f}{\left(\frac{1}{2p}\right) \left(\frac{1,875}{l}\right)^2} \right)^2 \quad (4.28)$$

onde m é a massa por unidade de comprimento, b e h são as dimensões das seções transversais, l é o comprimento viga de concreto e f é a frequência natural.

O valor característico de deformação do concreto, f_{ck} , pode ser estimado do módulo de elasticidade através da equação 4.29 [CEB, 1990]:

$$f_{ck} = \left(\frac{E}{4700} \right)^2 \quad (4.29)$$

O concreto utilizado no ensaio tem o valor característico de $f_{ck} = 25$ MPa [CEB, 1990]. O resultado do ensaio pode ser observado na figura 4.20, onde a frequência natural medida pela FBG foi usada para calcular o valor de f_{ck} em função da temperatura.

Os resultados apresentados na figura 4.20 apresentam uma redução na resistência do concreto de 41 % para uma variação de temperatura de 130 °C. Para obter esses resultados, a massa e o momento de inércia, I , da viga de concreto foram considerados inalterados durante

o ensaio. A curva de degradação da viga, apresentada na figura 4.20, pode ser dividida em duas partes. Na primeira parte, de 25 °C a 90 °C, a redução na resistência do concreto está associada à redução de água no concreto. A função da água é aglutinar os diferentes materiais que formam o concreto, portanto, a perda de água torna a peça mais porosa e, conseqüentemente, menos resistente. Numa segunda parte, para temperaturas superiores a 90 °C, a redução na resistência do concreto é relacionada a deterioração do material.

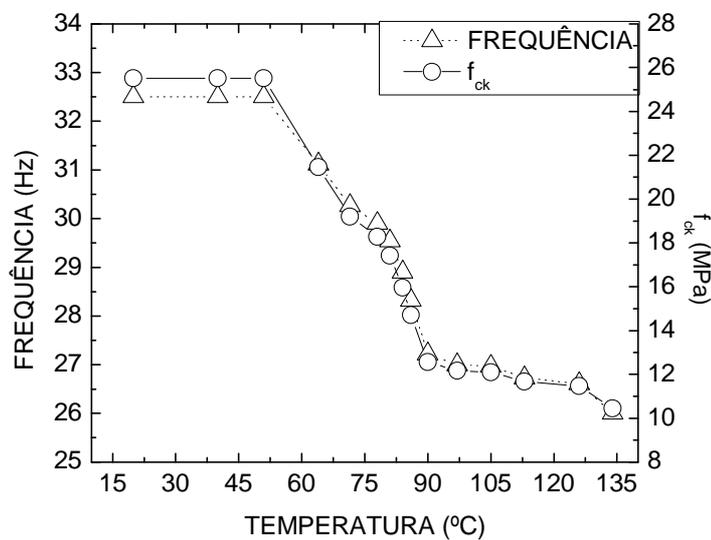


Figura 4.20 Frequência característica e resistência do concreto, f_{ck} , da viga de concreto em função da temperatura

Os resultados obtidos mostraram-se coerentes e de acordo com Xiao e König [2004], a redução da resistência do concreto em temperaturas superiores a 100 °C é devido a fissuras dentro do concreto durante o aquecimento. A redução da resistência observada para a segunda parte da curva é, provavelmente, causada pelo aumento de micro fissuras e não mais pela perda de água.

Em termos de segurança de estruturas os resultados apresentados são relevantes devido à redução na resistência do concreto para temperaturas relativamente baixas, onde, em muitas situações, os danos podem ser subestimados em casos de pequenos incêndios.

CAPÍTULO 5

APLICAÇÃO DE REDES DE BRAGG EM ESTUDOS COM IMPLANTES DENTÁRIOS

Com base nos resultados obtidos nesta tese no uso de redes de Bragg na análise de vibrações em estruturas foram realizados estudos com implantes dentários. O trabalho consiste no desenvolvimento de uma técnica de ensaio, *in vitro*, para caracterizar um novo conceito de implante dentário, que visa atenuar a transferência das cargas de oclusão para o tecido ósseo circundante, sendo capaz de reproduzir, tanto quanto possível, o padrão de deformações fisiológico. O projeto é dividido em duas etapas. Uma primeira que consiste no desenvolvimento da técnica de medida e caracterização dos implantes e que é tema desta tese e uma segunda que consiste no desenvolvimento do novo modelo de implante, sendo tema de tese de doutorado no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

5.1. CARACTERÍSTICAS DOS IMPLANTES DENTÁRIOS

Os dentes têm uma função biomecânica bem definida. Esta função consiste em transferir as tensões desde a superfície de oclusão até ao interior do dente, primeiro através de

uma camada exterior superficial dura e frágil, designada de esmalte, depois através da junção dentina-esmalte e finalmente através do interior do dente, constituído por um material flexível e tenaz, designado de dentina [Waters, 1980]. No interior do dente existe a polpa viva, que contém vasos sanguíneos e nervos, que mantêm a vitalidade do mesmo. As raízes do dente, que se adaptam aos alvéolos existentes nos maxilares, estão cobertas por cimento, que é um material de natureza semelhante à do osso. O ligamento periodontal (PDL), que une o cimento às gengivas e ao osso, atua como amortecedor da força exercida entre os dentes e o crânio por ocasião de ações de forças de mastigação, vide na figura 5.1 a representação de um dente e em detalhe a representação da orientação das fibras no ligamento periodontal.

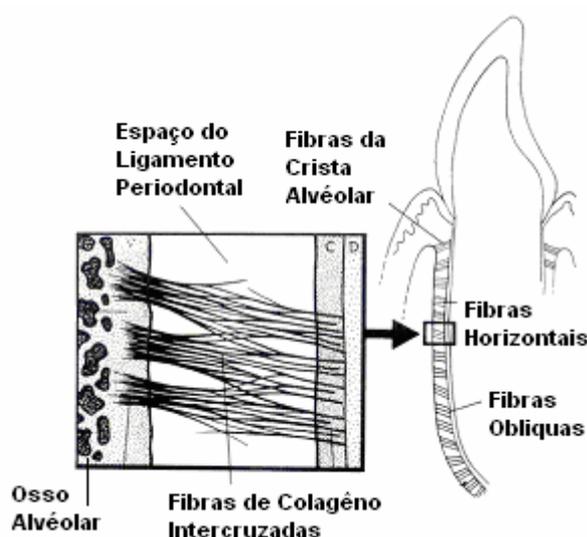


Figura 5.1 Esquema representativo da orientação das fibras no ligamento periodontal

O modo de funcionamento dos dentes é uma exigência que se deve levar em consideração na concepção de novos implantes e no melhoramento dos biomateriais utilizados na fabricação dos mesmos. De fato, é necessário saber, com a exatidão e profundidade possível, o mecanismo de transferência de forças como, por exemplo, as trajetórias de tensão, e a distribuição das deformações resultantes e a sua relação com a estrutura do dente [Wang e Weiner, 1998], da qual depende o estado de deformação do dente. Aqueles autores, usando a

técnica de Moiré, determinaram que as deformações são menores na dentina do que no esmalte, e que existe uma zona, com uma espessura da ordem de 200 μm na dentina, logo após a sua interface com o esmalte, que é sujeita a grandes deformações, maiores que as no interior da dentina. A zona da dentina adjacente ao esmalte é menos mineralizada e menos rígida. Os autores mostraram que esta zona é sujeita a maiores deformações, quer na parte lingual, quer na parte labial. No essencial, os autores afirmam que dentro da dentina há adaptações estruturais que visam a minimizar e transferir as tensões para o tecido ósseo circundante ao dente.

Alguma investigação tem sido realizada na caracterização do estado de tensão-deformação da estrutura do dente e dos tecidos envolventes. A deformação do dente tem sido estudada com diversas técnicas experimentais e numéricas, sendo de referir a técnica de fotoelasticidade, bastante aplicada neste tipo de análises. É um método de análise experimental de tensões extremamente interessante. Apresenta como principal limitação o fato da análise se realizar numa estrutura de material isotrópico (resina de epóxi), mas permite acessar, por exemplo, o campo de tensões no interior do modelo de um dente e sua alteração, por modificação de geometria da estrutura [Mahler e Peyton, 1955; Lehman e Meyer, 1966]. O método dos elementos finitos tem sido aplicado ao estudo do dente [Goel *et al.*, 1991; Thresher, 1973; Yettram *et al.*, 1976]. Por exemplo, Yettram *et al.* [1976] mostraram que o esmalte absorve a maior parte da carga devido à sua rigidez, que é muito superior à da dentina. Por esse fato, as forças de mastigação tendem a “fluir” em torno da camada superficial do esmalte para a dentina da raiz.

Um implante tem como objetivo substituir o dente natural, não só do ponto de vista estético, mas acima de tudo do ponto de vista funcional. As alterações induzidas, por ocasião da substituição de um dente natural por um implante com dente artificial, podem levar ao

aparecimento de fenômenos mecânicos e biológicos, que são responsáveis pelo sucesso, ou não, do implante. O sucesso clínico a médio e longo prazo depende fundamentalmente da interação entre o implante dentário e o osso. O mecanismo de transferência de carga deve ser tal que por um lado intervenha construtivamente no processo de remodelação óssea e por outro seja capaz de evitar a formação de uma membrana fibrosa envolvente, que pode levar à laxação do implante. De fato, a preservação e um nível adequado de remodelação do tecido ósseo é imprescindível para a estabilidade do implante.

O estudo aqui apresentado, faz parte de um projeto mais abrangente que visa ao desenvolvimento de um novo sistema de implante dentário. Atualmente, existem vários sistemas de implantes dentários que são constituídos por diversos componentes e para o sistema Brånemark (figura 5.2) ele é composto por: implante de superfície roscada, pilar e coroa de material cerâmico. Este sistema tem sido aplicado com taxas de sucessos que chegam a 90 % [Albrektsson *et al.*, 1986]. Contudo, alguns casos clínicos têm evidenciado perda prematura de tecido ósseo, reabsorção óssea na crista do implante, infecção, laxação e desprendimento do implante e fratura [Linguist *et al.*, 1988; Gregory *et al.*, 1990]. Diversos autores têm sugerido que as tensões em torno do implante [Soltesz *et al.*, 1982; Pilliar e Desporter, 1991], bem como fatores biológicos, tais com a higiene oral [Linguist *et al.*, 1988], podem ser parâmetros importantes no processo de falha do mesmo. Para melhorar a fixação do implante ao tecido ósseo, diversos tipos de revestimentos bio-ativos têm sido testados de forma a alterar, de forma mais benéfica, a distribuição de tensões e melhorar o processo de osteointegração [Reiger *et al.*, 1989; Borchers *et al.*, 1983].

É sabido que o tecido ósseo, mediante alterações mecânicas do seu estado fisiológico, adapta-se através de um mecanismo próprio de remodelação. Contudo, não se sabe com exatidão qual é a natureza do estímulo do mecanismo de remodelação óssea. Há, no entanto,

algumas publicações que sugerem as deformações dinâmicas ou a energia de deformação como parâmetros que controlam esta atividade do tecido ósseo [Frost, 1987; Cowin, 1990]. Esse é um assunto de alguma controvérsia e objeto de alguma investigação. A gama de deformações que permite o equilíbrio da densidade óssea depende do tipo de osso, qualidade do mesmo, sua localização no corpo e natureza das cargas.

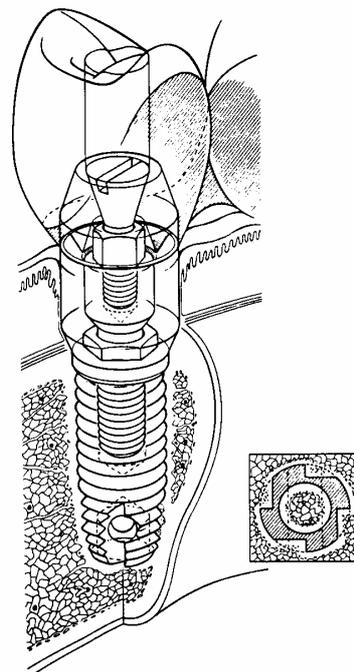


Figura 5.2 – Sistema de implante dentário Brånemark. (P. I. Brånemark, Laboratory of Experimental Biology, University of Goteborg, Sweden))

O projeto de um implante dentário implica necessariamente a seleção de materiais, a definição da sua geometria e o método de fixação. Atualmente, o material mais utilizado na fabricação de implantes dentários convencionais é o titânio dito comercialmente puro, devido às suas excelentes propriedades mecânicas e de biocompatibilidade. Em termos de fiabilidade, o sistema Brånemark é dos mais utilizados. Este tipo de implante promove a sua fixação através do elemento rosado que é introduzido no tecido ósseo do maxilar ou mandíbula. A interface entre o implante e o tecido ósseo determina fortemente o sucesso clínico da aplicação dentária. Como foi referido, um implante deve transmitir ao osso as tensões que lhe

são aplicadas durante a mastigação, criando um estado de tensão no osso que minimize a sua reabsorção e que permita a estabilização do implante a longo prazo.

Na maioria dos casos, os processos mecânico-biológicos são acompanhados pela formação e interposição de um tecido conectivo mole que funciona como uma barreira à fixação do implante ao tecido ósseo circundante. Para além de fatores como a biocompatibilidade e biofuncionalidade do material, o procedimento cirúrgico, o tratamento durante e pós cirurgia e a fixação bioquímica, desempenham um papel importante no sucesso do implante. As forças de oclusão devem ser transmitidas através do implante para o meio ósseo circundante sem danificar o mesmo, a interface. Como tal, espera-se que um implante bem projetado possa estimular positivamente o tecido ósseo pelo mecanismo de transferência de carga. Paralelamente, um implante que tenha o potencial para absorver (amortecer) forças de impacto e que possa transferir as cargas de forma mais homogênea através da interface, permitirá um estado de tensão-deformação mais fisiológico. Um implante com tais características poderá apresentar melhores resultados clínicos relativamente aos implantes convencionais metálicos, que têm uma rigidez muito superior à do osso tanto cortical como esponjoso.

Atualmente está em desenvolvimento um projeto na Universidade de Aveiro, que visa ao desenvolvimento de um novo sistema de implante dentário. O principal objetivo desse projeto consiste em conceber, estudar e desenvolver um implante dentário que possa materializar as funções naturais de um dente. Desta forma, pretende-se reproduzir, tanto quanto possível, o estado de deformação fisiológico provocado pelo dente natural, permitindo garantir a sua estabilidade a longo prazo. Um implante com tais características, relativamente ao mecanismo de transferência de carga, tem um desempenho semelhante ao do dente.

Alguns estudos preliminares foram realizados no âmbito do projeto e que consistiram na determinação experimental do efeito que um material de elevada flexibilidade provoca no nível das deformações transferidas do implante para o meio ósseo circundante [Carvalho *et al.*, 2001; Carvalho *et al.*, 2004b]. Na figura 5.3 está representado esquematicamente o conceito a desenvolver. O ponto de partida é a determinação do mecanismo de transferência de carga entre um dente natural e o osso, com particular ênfase no papel desempenhado pelo ligamento periodontal. Tendo em conta as dificuldades em realizar estudos *in vivo* para a caracterização do ligamento, esta foi feita numericamente.

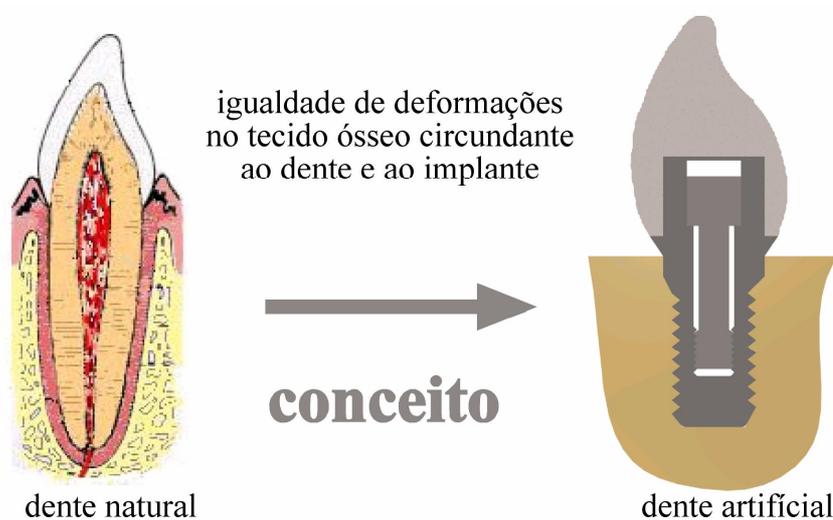


Figura 5.3 – Conceito a desenvolver na concepção do novo sistema de implante dentário

5.1.1. MODELO NUMÉRICO DO COMPORTAMENTO DO LIGAMENTO PERIODONTAL

São vários os modelos constitutivos, encontrados na literatura, que tentam descrever, do ponto de vista numérico, o comportamento e as propriedades mecânicas do ligamento. Os diferentes modelos aplicam-se para diferentes condições de carregamento, por exemplo no caso de forças mastigatórias podem-se ter forças de algumas centenas de Newton num curto

intervalo de tempo, inferior a um segundo, enquanto que em aplicações ortodônticas, as forças são de alguns Newton ($<5\text{ N}$) mas atuam continuamente num grande intervalo de tempo.

Um dos modelos utilizados para avaliar um comportamento altamente não linear de tensão-deformação é o modelo de Ogden [Natali *et al.*, 2000]. Este modelo foi aplicado no domínio de pequenas deformações, considerando a resposta de um dente para a função mastigatória normal. Por outro lado e tendo em conta este caso em particular de carregamento, o modelo de Ogden mostrou ser mais apropriado do que o modelo de Mooney-Rivlin [Natali *et al.*, 2000]. O modelo de Ogden faz parte de um conjunto de modelos constitutivos hiperelásticos que se baseiam na energia de deformação U , dada por:

$$U = \frac{2r}{j} (\mathbf{y}_1^j + \mathbf{y}_2^j + \mathbf{y}_3^j - 3) \quad (5.1)$$

onde $\mathbf{y}_{1,3}$ representam os desvios das tensões principais e j e r são parâmetros do material. O parâmetro r corresponde a uma medida do aumento da rigidez devido ao carregamento e, portanto linearmente relacionado ao módulo de elasticidade inicial.

Existem trabalhos em que se aplicou a teoria de viscoelasticidade quasi-linear (QLV) para descrever o comportamento não-linear do ligamento periodontal [Thoms, *et al.*, 2002]. Neste modelo foi considerado um carregamento cíclico para descrever o ciclo mastigatório. Segundo esta teoria, quando se faz um carregamento por deslocamentos em degrau, a tensão está relacionada com a deformação, por:

$$t[\mathbf{y}(t); t] = G(t) * t^e(\mathbf{g}) \quad (5.2)$$

onde $G(t)$ é a função de relaxação, $t^e(\mathbf{g})$ corresponde à tensão não-linear elástica para uma deformação \mathbf{g} aplicada. A relaxação pode ser descrita por meio de uma função de decaimento exponencial [Thoms, *et al.*, 2002] dada por:

$$G(t) = ae^{-bt} + ce^{-dt} + ge^{-ht} \quad (5.3)$$

onde a , b , c , d , g e h são parâmetros obtidos por ajuste a partir de curvas de dados experimentais. A relação entre a tensão e a deformação, da equação 5.2, pode ser descrita por:

$$t^e(g) = A(e^{Bg} - 1) \quad (5.4)$$

em que os parâmetros A e B também são obtidos experimentalmente, a partir do ajustamento das curvas de tensão-deformação.

Foi criado um modelo 3D de elementos finitos (MEF) de uma porção da mandíbula com o dente canino inferior direito. Para a simulação foram considerados dois casos, o dente com e sem ligamento periodontal. Um modelo CAD foi feito utilizando o programa SolidWorks® e a análise numérica foi feita utilizando Femap8.0 e MSC/Nastran. A malha gerada para os dois modelos foi construída com elementos lineares tetraédricos simples e eram compostos por 12273 elementos e 6043 nós (figura 5.4).

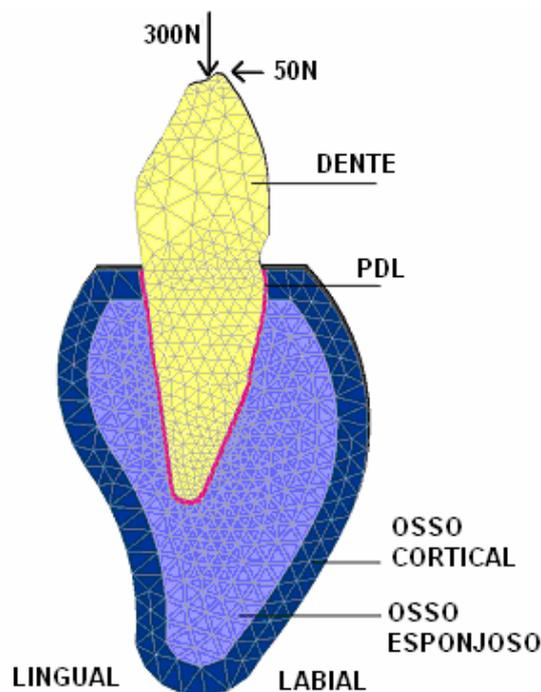


Figura 5.4 - Aspecto geral da malha de elementos finitos da mandíbula e dente

Tanto o dente como os ossos cortical e esponjoso foram considerados isotrópicos, ou seja, as propriedades são constantes em qualquer direção, com comportamento linear elástico, cujas propriedades estão representadas na tabela 5.1.

O ligamento periodontal foi simulado como um material de comportamento viscoelástico quasi-linear, de acordo com a relação 5.4, tendo-se considerado $A = 0,00233$ e $B = 11,21$, parâmetros obtidos a partir do ajuste das curvas de tensão-deformação, apresentadas na referência [Marks, 2002].

Tabela 5.1 Propriedades do dente, osso cortical e osso esponjoso [Marks, 2002]

	Módulo de Young (GPa)	Coefficiente de Poisson (ν)
Dente	20	0,25
Osso cortical	13,7	0,33
Osso esponjoso	1,37	0,33

5.1.2. SIMULAÇÃO DO LIGAMENTO PERIODONTAL POR MEF

Foi feita a simulação numérica e obtidas as deformações de Von Mises² e as deformações de corte. Neste estudo foram considerados dois tipos de carregamentos, um em compressão de 300 N e outro com uma componente horizontal de 50 N, na direção labial-lingual, que corresponde a uma situação de oclusão normal. Considerou-se ainda que os nós nas diferentes interfaces eram coincidentes, não permitindo deslocamentos e que a mandíbula estava fixa na região anterior-posterior.

² O critério de Von Mises é usado para verificar a rigidez de um material isotrópico. Ele é baseado na observação experimental de que a pressão hidrostática, responsável pela variação de volume de um sólido, não provoca falha.

Na figura 5.5 estão representados as deformações de Von Mises para o carregamento em compressão. No caso de não haver ligamento periodontal verificou-se que o nível de deformações (em $\mu\text{m}/\text{m}$) no osso que circunda o dente era mais elevado do que quando existe a ligação periodontal, chegando mesmo a haver uma concentração de deformações na região apical do dente. No caso do dente com ligação periodontal, as maiores deformações apareceram no ligamento, havendo assim um campo de deformações mais uniforme no osso circundante. É ainda de salientar que em ambos os casos as deformações são mais elevadas na região de contato com o osso cortical.

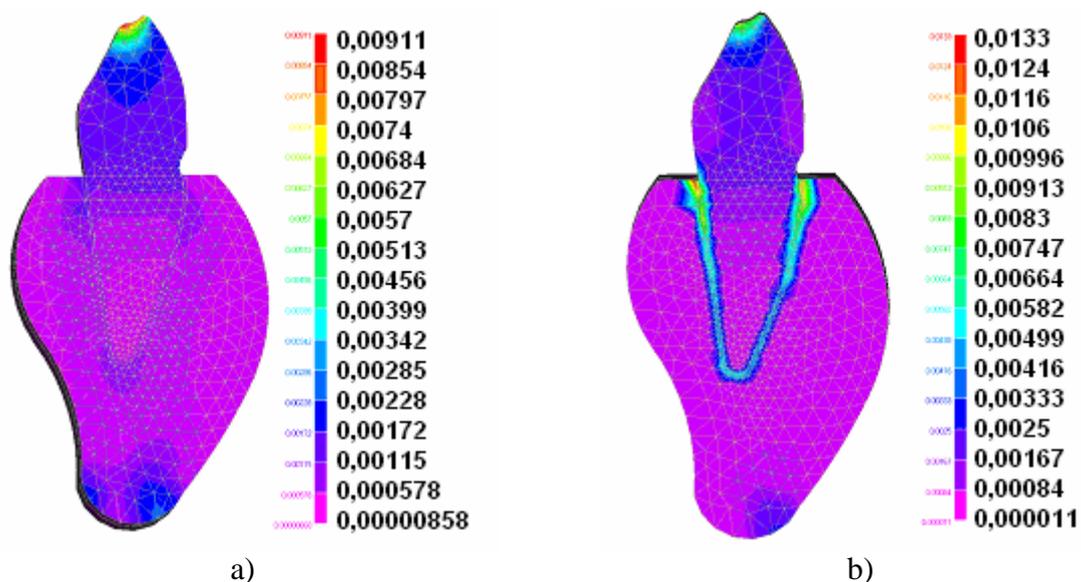


Figura 5.5 - Deformações de Von Mises em compressão: a) sem PDL; b) com PDL

Na figura 5.6 estão representadas as deformações de corte para o carregamento com componente horizontal de 50 N, na direção labial-lingual.

Mesmo para esse carregamento, é no ligamento que aparecem as deformações mais elevadas enquanto que no dente sem ligamento verifica-se haver a transmissão de deformações mais elevadas para o osso circundante.

A partir dos resultados obtidos para a modelação do ligamento periodontal, como sendo um material quasi-linear viscoelástico, ficou demonstrado que essa estrutura é parte fundamental no mecanismo de transferência de carga entre o dente e o osso alveolar, atuando como uma barreira de amortecimento. É o ligamento periodontal que absorve grande parte da energia de deformação, evitando que haja fratura das trabéculas³ e mesmo uma excessiva reabsorção óssea. A compreensão do funcionamento desta estrutura é importante na concepção de novos implantes dentários, para que possam reproduzir de uma forma mais fidedigna o estado fisiológico de tensão-deformação.

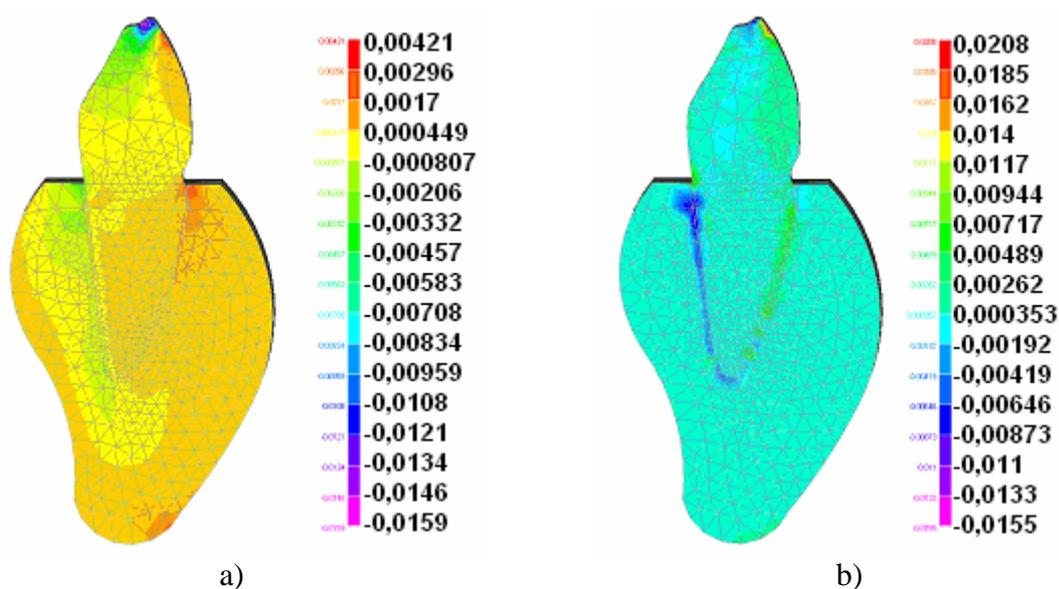


Figura 5.6 - Deformações de corte em flexão: a) sem PDL; b) com PDL

O estudo, ainda em fase preliminar, tem como objetivo validar o conceito atrás referido não apenas utilizando métodos numéricos mas também ensaios experimentais com sensores em fibra ótica.

³ Estrutura porosa que compõe o tecido ósseo alveolar.

5.2. APLICAÇÃO DE REDES DE BRAGG EM ESTUDOS DE IMPLANTES DENTÁRIOS

Devido as vantagens intrínsecas sobre os demais sensores óticos, as redes de Bragg tornaram-se os elementos sensores mais promissores para aplicações em biomecânica como, por exemplo, a monitoração de movimentos respiratórios [Wehrle *et al*, 2001] e aplicações dentárias [Tjin *et al*, 2001, Ottevaere *et al*, 2003, Carvalho *et al*, 2004b].

Este trabalho apresenta um método alternativo para medir deformação em uma aplicação dental biomecânica, embora ela possa ser empregada em outros tipos de estudos biomecânicos.

5.2.1. ENSAIOS ESTÁTICOS

Para realização deste trabalho foi selecionada uma mandíbula (osso maxilar inferior) humana de um indivíduo do sexo masculino com idade aproximada de 50 anos. Na região correspondente aos caninos foram colocados dois implantes (Nobel Biocare, Brånemark System, 3,75 mm de diâmetro e 15 mm de comprimento) com torque de 35 Ncm. A mandíbula foi instrumentada com sensores elétricos, EER, e sensores óticos, FBG. Os sensores foram posicionados lado a lado na superfície anterior do osso e no eixo longitudinal do implante, vide fotografia na figura 5.7.

A mandíbula foi parcialmente embebida em uma estrutura de resina para evitar um contato rígido com os suportes de apoio. Esse arranjo não replica o sistema natural de articulação, mas, considerando o objetivo do estudo, não é uma limitação para as medidas. O objetivo não é realizar medidas *in vivo* mas comparar duas técnicas alternativas de medição.

No ensaio estático o implante sofreu um carregamento gradual de 20 N em 20 N, usando uma máquina de ensaio universal, UTM (Shimadzu), até uma carga máxima de 160 N e a deformação foi adquirida pelo EER e por uma FBG. A carga foi aplicada ao eixo longitudinal do implante. Para leitura do EER foi utilizado um sistema de aquisição Spider 8-30 da Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH. Para a leitura da FBG foi utilizado um analisador de espectro ótico (Anritsu – MS9601A), adquirindo a posição espectral de pico para cada carregamento. As variações nos comprimentos de onda de Bragg foram convertidas em deformações longitudinal, considerando o coeficiente de deformação para rede de Bragg de 1,2 pm/ μ strain.

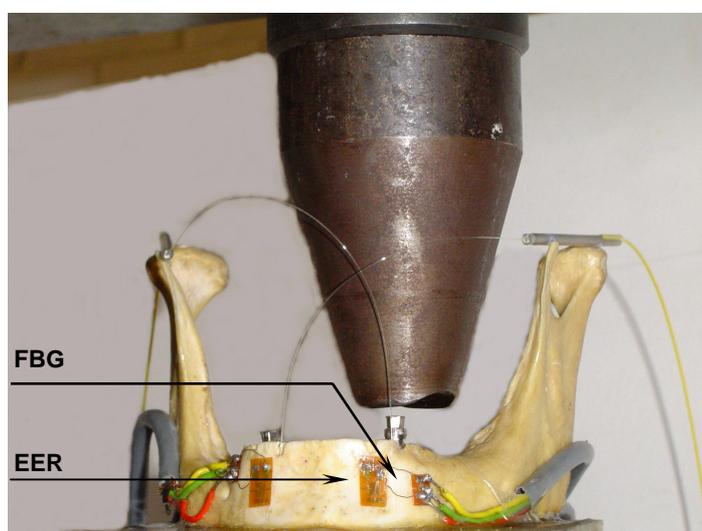


Figure 5.7 – Mandíbula instrumentada com sensores ótico, FBG, e elétrico, EER, posicionada na UTM para ensaio estático

Um ajuste polinomial de grau dois foi aplicado à região correspondendo ao máximo do espectro (vide figura 5.8), de forma a melhorar a determinação do comprimento de onda central [Leiderman *et al.*, 1999]. Nota-se, naquela figura, que o uso do ajuste polinomial reduz os erros na leitura do comprimento de onda de máxima reflexão, já que os valores experimentais no topo da banda apresentam baixa discriminação. O ajuste pondera a banda numa maior extensão de comprimento de onda, obtendo maior fidelidade.

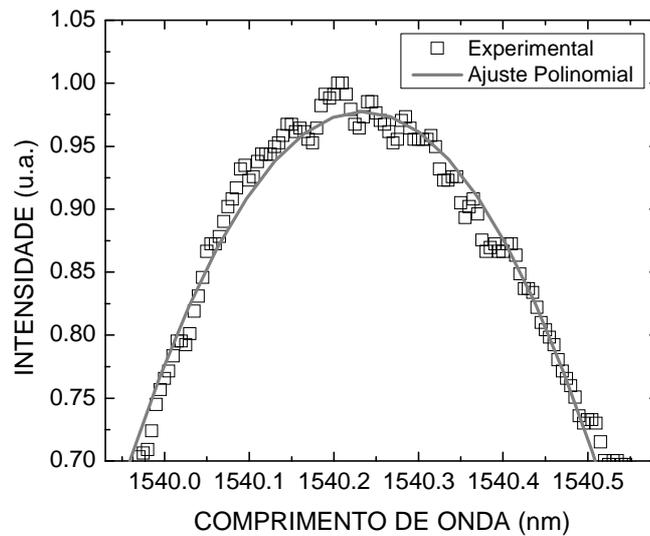


Figura 5.8 Pico da banda de reflexão de uma rede de Bragg e respectivo ajuste polinomial.

Algumas dificuldades surgiram no decorrer dos ensaios principalmente devido ao arranjo experimental. As diferenças entre os valores medidos pelos sensores elétrico e ótico podem ser explicadas pelo fato do sistema de aquisição para os dois sensores serem diferentes. Para o sensor ótico foi empregada a aquisição discretizada, ou seja, os espectros da FBG foram adquiridos pelo OSA após cada carregamento aplicado ao implante, enquanto que para o sensor elétrico foi utilizado um sistema de aquisição contínuo, o qual pôde acompanhar toda a evolução no processo de carga. Outra dificuldade está relacionada com a instabilidade de ajuste da UTM para cada patamar da carga aplicada, vide detalhe na figura 5.9.

As deformações medidas pelos sensores, ótico e elétrico, foram registradas em função da carga aplicada pela UTM e os resultados são apresentados na figura 5.10. Na figura 5.10 o coeficiente de correlação do ajuste feito aos pontos medidos pela FBG foi de 0,990 e um desvio padrão de 14,75 $\mu\text{m}/\text{m}$, os resultados evidenciam uma boa correlação entre os sensores. Para pequenos carregamentos a deformação medida entre os sensores apresentou uma melhor correlação, o que pode ser atribuído a maior estabilidade da UTM, verificado nas

medidas feitas pelo EER apresentado na figura 5.10. Para carregamentos maiores é observado uma maior desvio entre os sensores porém pouco significante.

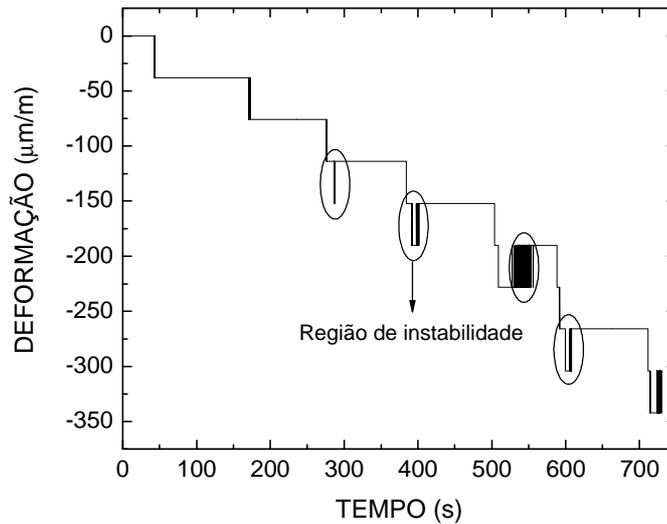


Figura 5.9 Curva de deformação obtida com o aumento da carga sobre o implante dentário, determinada por um EER em modo contínuo, apresentando as regiões de instabilidade de ajuste da UTM para cada ponto de carga aplicada

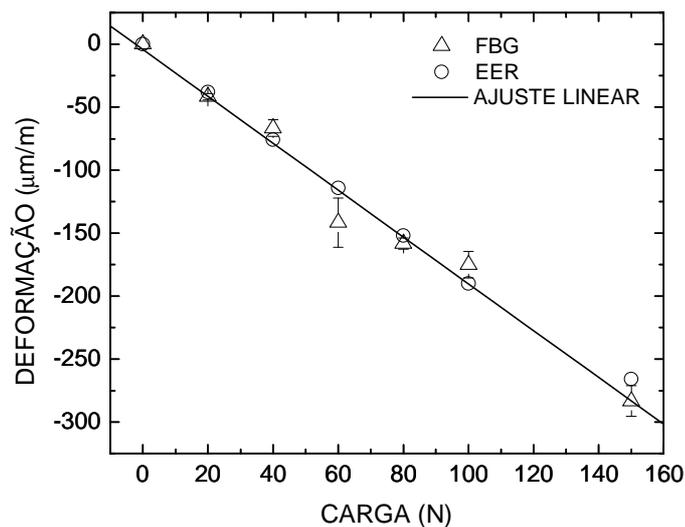


Figure 5.10 Curva de deformação obtida com o aumento da carga sobre o implante dentário, determinada através do comprimento de onda de pico de uma rede de Bragg em comparação com um EER. O ajuste linear feito aos pontos medidos pelo sensor óptico apresenta coeficiente de correlação de 0,990 e desvio padrão de $14,75 \mu\text{m/m}$

Os carregamentos dinâmicos foram gerados pela queda livre de uma massa cilíndrica, 60 mm de comprimento, 12 mm de diâmetro e 52 gramas de massa, ao longo de um tubo metálico. A massa cai diretamente sobre o implante de uma altura de 550 mm, como mostrado na figura 5.11. Para medir a resposta dinâmica após o impulso, foi utilizado o sistema de interrogação descrito no capítulo 3, utilizando o filtro ajustável descrito na seção 3.3.2. Para os ensaios dinâmicos o sinal foi medido logo após o estágio de amplificação, bloco dos amplificadores mostrado na figura 3.14. Essa modificação foi necessária devido ao elevado valor de frequência da medida, superior aquela para a qual os filtros do circuito foram projetados. Para o extensômetro elétrico foi utilizado um amplificador com baixo nível de ruído e distorção e alto ganho da PICO Technologies (ADC212). A aquisição dos sinais dos dois sensores foi feita por um osciloscópio digital da Tektronics (TDS3014B, 100 MHz - 1.25 GS/s).

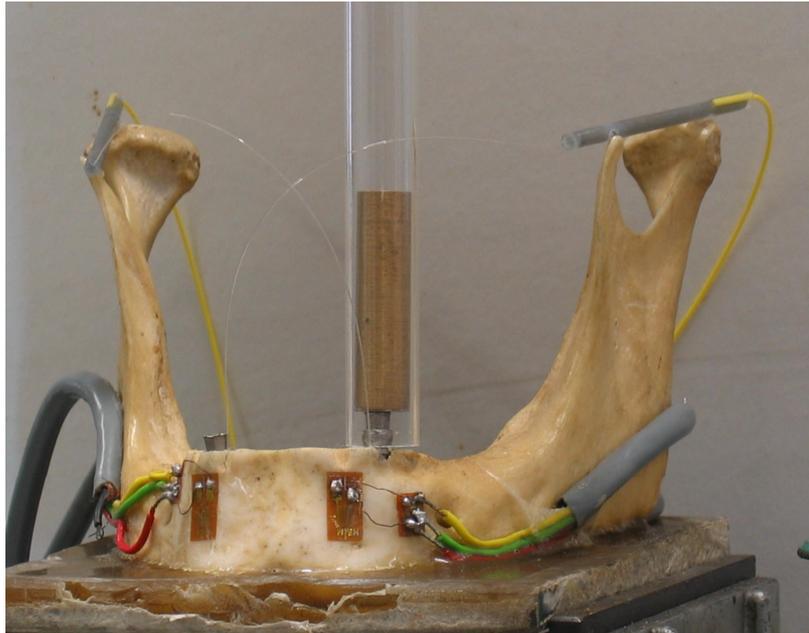


Figure 5.11 - Mandíbula instrumentada com sensores ótico, FBG, e elétrico, EER, para ensaios dinâmicos pela aplicação de impacto ao implante por uma massa cilíndrica

Nos ensaios dinâmicos as respostas dos sensores foram adquiridas após o impacto aplicado pela massa cilíndrica e a análise dos dados foi realizada no domínio do tempo e da

frequência, essa última usando a transformada rápida de Fourier do sinal temporal. No domínio da frequência, após o impacto entre a massa e o implante, o espectro obtido não evidencia nenhuma componente em particular, conforme gráfico apresentado na figura 5.12. Essa limitação é atribuída ao ricochete ocasionado pelo contato metal-metal que ocorre em um curto espaço de tempo, sobrepondo uma segunda componente ao evento a qual coincide com aquela de interesse, conforme detalhe (seta) na figura 5.12. Para superar essa limitação, a área de impacto da massa metálica foi recoberta com um plástico rígido com 0,3 mm de espessura. Dessa forma, quando a estrutura é excitada pelo impacto da massa metálica o ricochete ocorre fora da janela temporal de interesse, permitindo determinar somente a componente de deformação transferida pelo implante para o osso, a qual apresenta frequência natural igual a 3367,5 Hz, conforme espectro de frequências apresentado na figura 5.13.

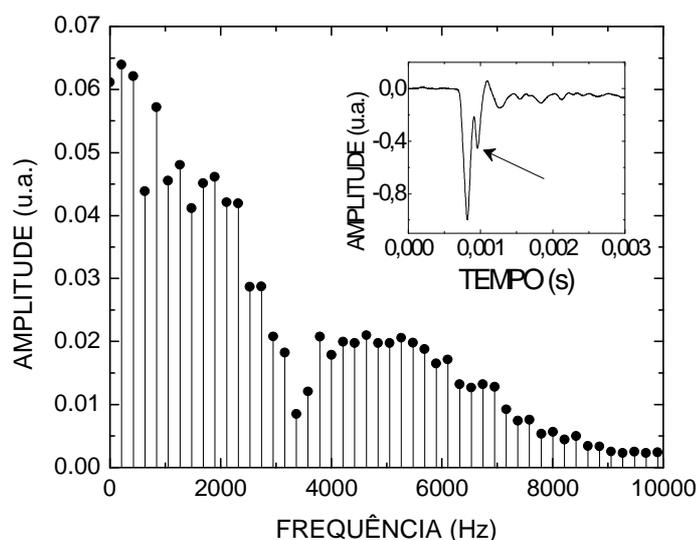


Figure 5.12 – Resposta no domínio do tempo e da frequência devido ao impacto da massa cilíndrica ao implante, mostrando em detalhe (seta) o ricochete ocasionado pelo contato metal-metal que ocorre em um curto espaço de tempo, sobrepondo uma segunda componente ao evento

A figura 5.14 ilustra a deformação versus tempo após impacto aplicado ao implante pela massa cilíndrica recoberta pelo plástico. Esse resultado apresenta um pico de alta

intensidade relacionado a compressão do osso da mandíbula correspondendo a $200 \mu\text{m/m}$ em magnitude. Para esse ensaio o sensor ótico foi calibrado conforme descrito na seção 3.2.3. Porém, aquele valor de deformação não pode ser considerado para validação de modelos reais em virtude do osso seco não replicar as condições de um osso fresco.

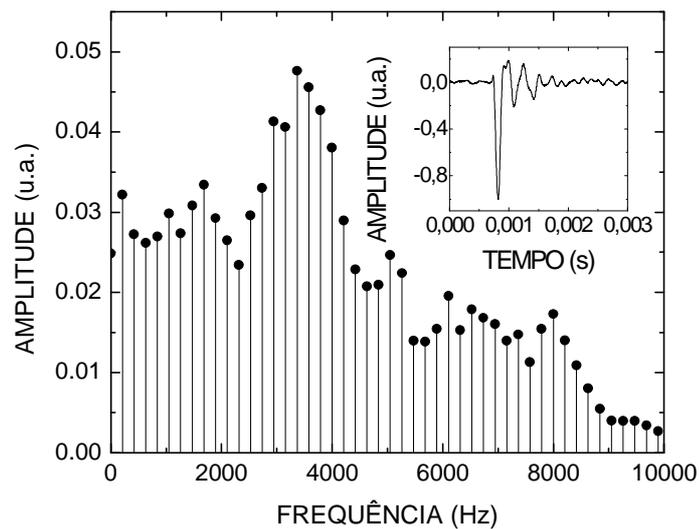


Figure 5.13 – Resposta no domínio do tempo e da frequência devido ao impacto da massa cilíndrica, com revestimento plástico, ao implante

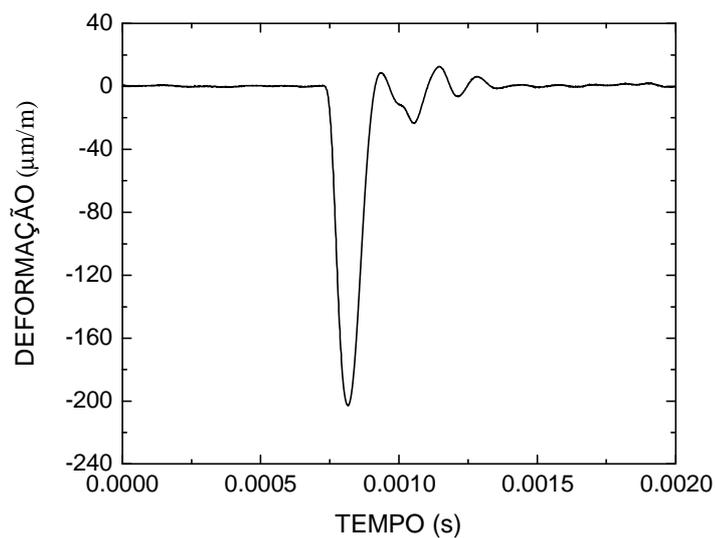


Figure 5.14 – Variação de deformação *versus* tempo medido pela FBG devido ao impacto aplicado pela massa cilíndrica

Na figura 5.15 são apresentadas as curvas de deformação medidas pelos sensores ótico e elétrico após aplicação de impacto. Nesse procedimento a deformação determinada pela rede de Bragg foi comparada com aquela resultante do extensômetro elétrico após impacto da massa ao implante. Como pode ser visto no gráfico da figura 5.15, foi obtida boa concordância entre as duas leituras. Nessa medida as relações sinal ruído para a FBG e para o EER foram 25,8 dB e 22,3 dB, respectivamente. A diferença entre a SNR dos dois sensores, 3,5 dB, evidencia a melhor sensibilidade da FBG para pequenas deformações quando comparada ao extensômetro elétrico.

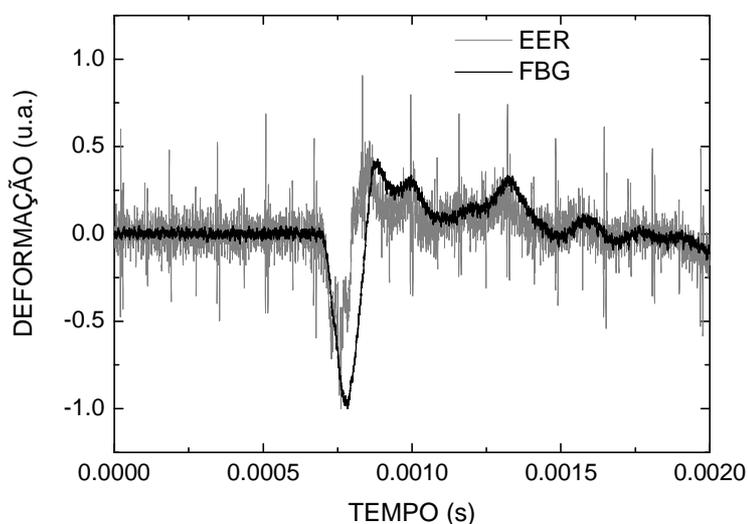


Figure 5.15 – Variação de deformação *versus* tempo medido pelos sensores FBG e EER

Os valores de deformação e frequência previamente descritos concordam com aqueles apresentados por Carvalho, Vaz e Simões [2004b] onde foram utilizados apenas extensômetros elétricos de resistência, mostrando a capacidade das redes de Bragg para medidas dinâmicas em sistemas biomédicos complexos. Conforme previamente mencionado, o objetivo deste trabalho não foi apresentar medidas *in vivo*, mas somente aprimorar os conhecimentos dos níveis de deformação e frequência em uma mandíbula com implante

dentário. O conhecimento gerado possibilitará a caracterização de novos implantes dentários a serem desenvolvidos na Universidade de Aveiro e, também, a aplicação do instrumental desenvolvido em outros ensaios para aplicações biomédicas onde seja necessário o estudo estático e dinâmico.

Este trabalho mostra que esta técnica de sensoreamento ótico é bem adaptada ao estudo de tensões geradas por impacto. Com a utilização de colas especiais será possível efetuar medições em tecidos ósseos frescos podendo, dessa forma, o estudo *in vivo*. Uma análise deste tipo poderia avaliar o efeito amortecedor da água retida nos tecidos frescos obtendo assim uma verificação da validade dos resultados obtidos *in vitro*.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

Nesta tese foi apresentado o estudo de vibrações em diferentes tipos de estruturas com o uso de redes de Bragg em fibras óticas. Os resultados apresentados demonstram a viabilidade do sistema sensor desenvolvido em medidas onde os níveis de deformação são considerados pequenos, sendo que nessas situações os extensômetros elétricos convencionais apresentam uma relação sinal ruído inferior ao das redes de Bragg, aproximadamente -3 dB para a maior parte dos ensaios apresentados.

Foram apresentadas diferentes técnicas de gravação, interferométrico e máscara de fase, para as redes de Bragg. Durante a realização desta tese foi possível o desenvolvimento de um sistema de gravação no CEFET/PR e o acompanhamento da montagem de um segundo sistema na Universidade de Aveiro. O sistema de gravação interferométrico montado no CEFET/PR foi ajustado de forma a ser compacto e, assim, mais estável. Isso foi possível reduzindo a distância entre os espelhos do interferômetro para a menor distância possível entre eles o que fez com que os espelhos ficassem fora do eixo de rotação dos motores responsáveis pelo controle do ângulo de rotação dos mesmos. Essa modificação causou uma pequena alteração nos cálculos de posicionamento do sistema o que pôde ser ajustado por meio de cálculos geométricos cujos resultados são apresentados na figura 2.4 e comparados

com valores experimentais. Para os sistemas montados na Universidade de Aveiro, interferométrico e máscara de fase, foi adicionado um estágio de translação para o feixe de entrada, possibilitando a gravação de redes de comprimento maior, na ordem de 25 mm. As redes gravadas por este método apresentaram alta refletividade $\approx 100\%$, e largura de banda estreita, $\approx 0,1$ nm, além de apresentarem uma boa qualidade espectral. Essa última característica é relacionada a boa qualidade do feixe laser empregado no sistema de gravação.

Os sistemas de gravação do CEFET/PR e da UA apresentam como principal diferença o laser de gravação. Com base nessa diferença foram gravadas redes nos dois sistemas e suas curvas de crescimento foram comparadas. Apesar das curvas de crescimentos serem semelhantes para as duas redes gravadas, algumas diferenças puderam ser destacadas. Para o tempo de gravação, 10 minutos, a rede da UA apresentou uma tendência clara de estabilidade na curva de crescimento, refletividade *versus* tempo, enquanto que a rede do CEFET/PR apresenta uma tendência de crescimento para o mesmo período. Nas curvas de comprimento de onda *versus* tempo, a rede gravada na UA apresentou uma maior variação do comprimento de onda, 0,3 nm, quando comparada com a rede gravada no CEFET/PR, 0,09 nm. Essa diferença está associada a uma menor variação do índice de refração da rede gravada no CEFET/PR o que resulta em uma rede com refletividade menor.

Nas aplicações propostas nesta tese as redes de Bragg apresentaram-se como uma boa alternativa no desenvolvimento de sensores para análises dinâmicas de estruturas. Foi desenvolvido um sistema para leitura de redes de Bragg de custo relativamente baixo, baseado na correlação espectral entre a rede sensora e uma de referência. Nos ensaios de caracterização foi demonstrada a capacidade do sistema de leitura para operar com um sinal atenuado em até 2,5 dB, comprovando a possibilidade de utilização do sistema para medidas a distâncias de aproximadamente 10 km sem a necessidade de ajuste nos ganhos dos

amplificadores do circuito eletrônico do sistema de interrogação. Uma segunda configuração do sistema de leitura de redes foi mostrada, onde a rede de referência foi trocada por um filtro interferométrico ajustável. Nos resultados da caracterização do sistema de leitura pela aplicação de deformação a rede sensora, aplicada para a região linear referente a curva de convolução entre a rede sensora e o filtro ótico, foi observado uma dependência linear com coeficiente $6,63 \text{ mV}/\mu\text{m}/\text{m}$ e coeficiente de correlação $0,99472$. A faixa de operação para o circuito ótico proposto para um conjunto composto por rede sensora e filtro com FWHM de $0,18 \text{ nm}$ e $1,12 \text{ nm}$, respectivamente, é de $\approx 700 \mu\text{m}/\text{m}$. A flexibilidade do instrumento foi verificada através de resultados obtidos tanto na medida de vibração como na de temperatura.

Foram realizados estudos de degradação em estruturas de madeira e concreto através de análises dinâmicas com os dados obtidos dos sensores óticos baseados em redes de Bragg e sensores elétricos comerciais. Nos ensaios para avaliação da degradação em vigas de MLC baseado em redes de Bragg em fibra ótica o sensor com FBG mostrou maior sensibilidade quando comparado ao EER, em virtude da baixa relação sinal ruído do sensor resistivo para pequenos valores de deformação. Os resultados apresentados nas figuras 4.12 e 4.15 estão de acordo com o valor de carga estimada de ruptura, 5 kN , determinado por meio do emprego das equações de equilíbrio de flexão simples. Para os resultados apresentados foi possível determinar a degradação da viga por diferentes métodos de avaliação, largura de banda a meia altura e frequência natural, onde os resultados obtidos pela rede de Bragg apresentaram uma boa concordância quando comparado aos outros sensores aplicados à medida. Os resultados apresentados mostram-se promissores para o uso do instrumental desenvolvido na análise de vibrações em estruturas, principalmente onde é necessária a medida de deformação a longas distâncias como, por exemplo, pontes com longos vãos.

O estudo de estruturas de concreto com o uso de redes de Bragg tem sido alvo de grande interesse, devido ao número de trabalhos sendo publicados nessa área como, por exemplo, [Lin *et al.*, 2004a; Lin *et al.*, 2004b; Quintela *et al.*, 2002]. Na maioria dos estudos apresentados são empregadas análise estática as quais apresentaram resultados semelhantes àqueles apresentados nesta tese.

Nos ensaios para avaliar a degradação do concreto exposto a altas temperaturas foram empregados dois sistemas de demodulação, um para medidas de vibração e outro para medidas de temperatura. Foi verificada uma significativa redução na resistência do concreto, em torno de 41 %, para aquecimento no interior da viga de 150 °C, com regiões intermediárias determinadas pela perda de água da estrutura (25 – 90 °C) e da propagação de micro fissuras dentro do concreto durante o subsequente aquecimento (> 100 °C). Os resultados são relevantes uma vez que a primeira região de redução da resistência ocorre em valores de temperatura relativamente baixas onde os danos podem ser ignorados em situações de pequenos incêndios. Os resultados apresentados mostram-se promissores no uso do sistema de medida baseado em redes de Bragg na análise e monitoramento de estruturas de concreto pela ação de altas temperaturas.

Para além das estruturas civis outro objeto de estudo desta tese foram os implantes dentários. Os resultados apresentados mostram a viabilidade do uso de sensores baseados em redes de Bragg em aplicações biomecânicas devido a sua capacidade para medir, com precisão, deformações dinâmicas. Essas vantagens são evidenciadas ao comparar seus resultados a extensômetros elétricos de resistência, incluindo o fato de não ser um sensor elétrico, ser mais preciso e menos intrusivo. Este trabalho mostra que as redes de Bragg são bem adaptadas ao estudo de tensões geradas por impacto. Conforme apresentado por Carvalho, Vaz e Simões [2004b] a necessidade de colar os extensômetros elétricos nos tecidos

ósseos onde se pretende efetuar a medida torna a aplicação daquela técnica um pouco complicada, porém, com a utilização de colas especiais será possível efetuar medições em tecidos ósseos frescos podendo, dessa forma, o estudo *in vivo*. Outro ponto importante na aplicação da técnica apresentada nesta tese é o tamanho reduzido do sensor ótico.

Em se tratando de um trabalho preliminar para avaliar a possibilidade de, com técnicas de análises dinâmicas comuns em engenharia, medir deformações devidas a forças de impacto em uma mandíbula, os resultados apresentados mostram que tal aplicação é perfeitamente possível. O futuro ajuste das montagens no sentido de dar resposta a possíveis problemas clínicos é desejável e deverá ser levada a cabo em trabalhos futuros. A mandíbula, sendo um tecido vivo, reage aos níveis de tensão. Desta forma, é necessário recorrer a um estudo prévio, por via numérica e utilizando programas de elementos finitos, que permita obter uma aproximação às distribuições de tensão na mandíbula para as situações de carregamento mais usuais. Esse estudo deverá ser acompanhado da montagem de redes de Bragg em pontos onde se verifiquem elevados níveis de deformação que permitam verificar os valores obtidos numericamente bem como as direções em que essas deformações atuam. Dado que existe um nível de deformação que funciona como limiar para a absorção óssea, será de grande interesse verificar a distribuição de tensões obtida pós colocação do implante no sentido de determinar a possibilidade de este conduzir a alterações dos tecidos rígidos da mandíbula.

6.1. PROJETOS FUTUROS

Algumas aplicações mostram-se promissoras para a utilização do sistema sensor desenvolvido. Na área de estruturas destaca-se a monitoração de vibrações em grandes

estruturas como, por exemplo, pontes ou longas passarelas que, em virtude de tráfego de veículos ou ação do vento podem ocasionar um grande desconforto para os usuários. A utilização de um sistema sensor multiplexado, com vários sensores, possibilitaria uma avaliação em diferentes pontos da estrutura tornando possível a identificação de possíveis falhas nos projetos. Outra possível aplicação para esses sensores é, por exemplo, a monitoração de deformação ao longo de vias-férreas e pontes metálicas. Essa aplicação parece necessária em situações onde se procura aumentar a capacidade de transporte com vagões mais pesados, sendo necessário mapear a situação das linhas.

Outro tema de grande importância é o estudo de vibrações e aquecimento em cabos de linhas de transmissão. O uso dos cabos de alumínio, especialmente aqueles com alma de aço, e o emprego de maiores seções para condução de maiores correntes, resultou em estruturas mais pesadas, mais complexas, mais altas, mais distantes e sujeitas a tensões mecânicas maiores. A vibração tornou-se um fator importante, pois a ruptura dos cabos, fio a fio, passou a ocorrer precocemente, a ponto de se tornar a condição limite em projetos. Por motivos de interesse do grupo nessa área é apresentado um anexo (3) com maiores detalhes para aplicação do instrumental desenvolvido.

O desenvolvimento de sensores para plantas industriais é outro campo de aplicação para a instrumentação desenvolvida. Na área petrolífera destacam-se os sensores de temperatura em colunas de destilação de petróleo. Nessa situação o sensor deve estar distante do ponto de medida por centenas de metros. Medidas de deformação e pressão em dutos podem ser indicativas de defeitos em linhas de abastecimento.

No campo de biomecânica, além da aplicação com implantes dentários, é proposto o desenvolvimento de um sensor para estudo dos mecanismos celulares de absorção e deposição de tecido ósseo. O mecanismo fisiológico sobre a forma como o tecido ósseo sente cargas

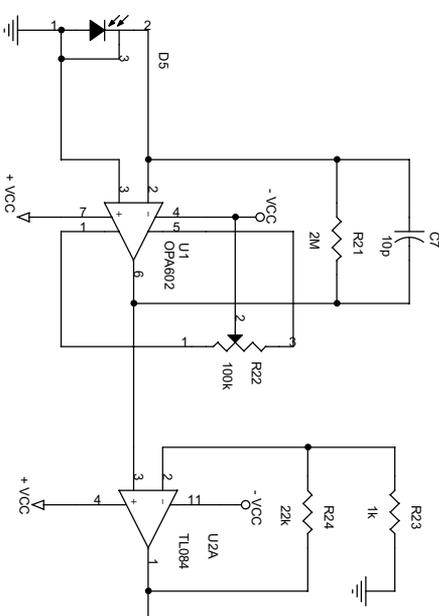
mecânicas e como o sinal é transmitido às células para se depositarem, manterem-se ou removerem-se, ainda não estão totalmente identificados. A teoria de alguns autores ainda não foi validada experimentalmente, por ser uma tarefa complexa e devido as limitações das técnicas experimentais convencionais. Um projeto nessa área permitiria obter um conhecimento científico sobre os mecanismos de diferenciação dos tecidos através do uso de modelos numéricos e experimentais *in vivo* e *in vitro*.

ANEXOS

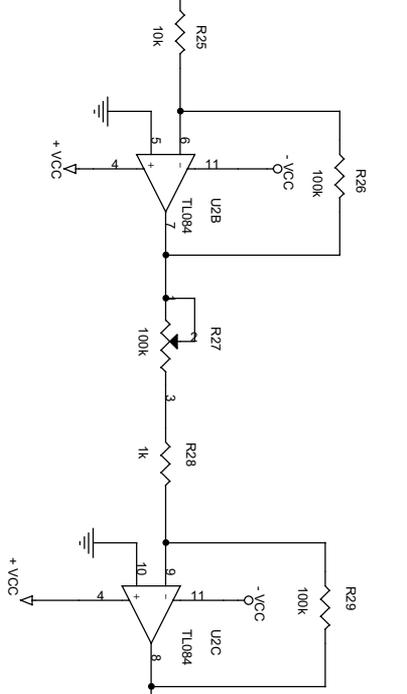
Os diagramas esquemáticos dos circuitos desenvolvidos são apresentados nos anexos 1 e 2. O circuito do anexo 1 corresponde aos ramos $a - e$ e $o - k$ do diagrama em blocos da Figura 3.12. O circuito do anexo 2 corresponde ao ramo $f - j$ do mesmo diagrama em blocos.

No anexo 3 é apresentado uma proposta de um dispositivo para monitorar vibrações em linhas de transmissão de energia elétrica.

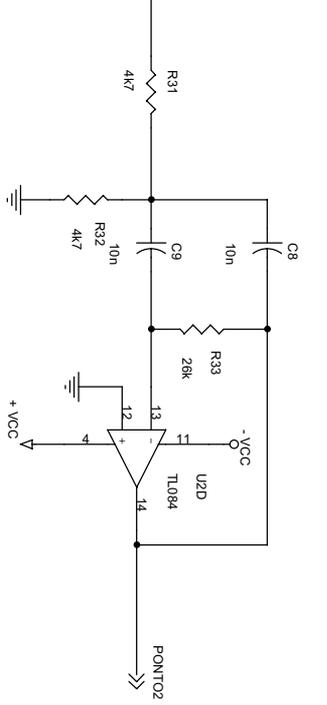
TRANSIMPEDÂNCIA



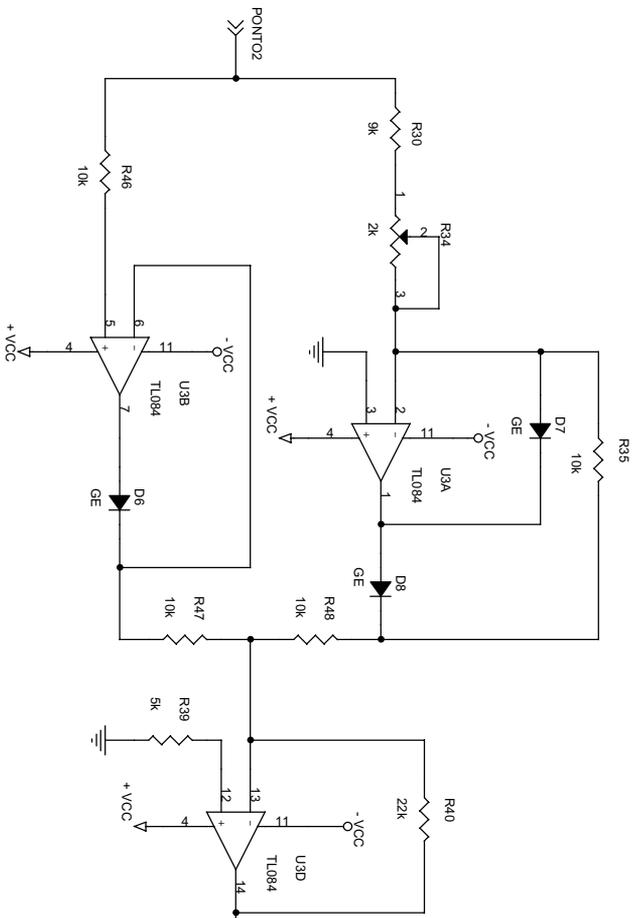
AMPLIFICAÇÃO



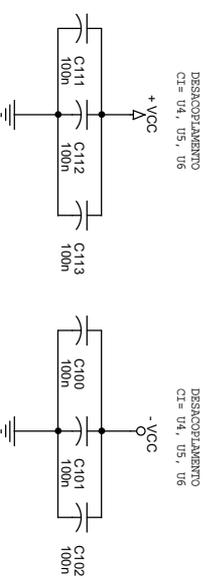
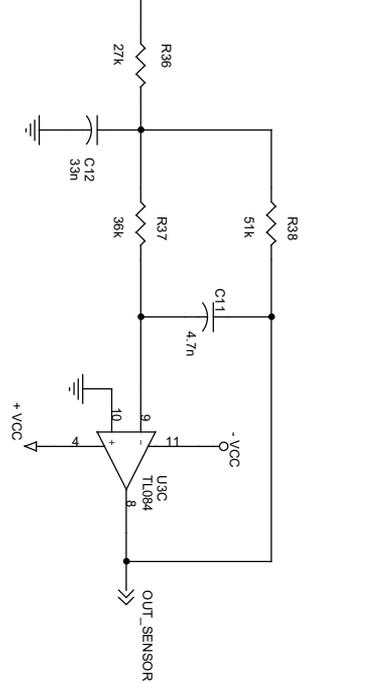
FILTRO PF 2 KHZ



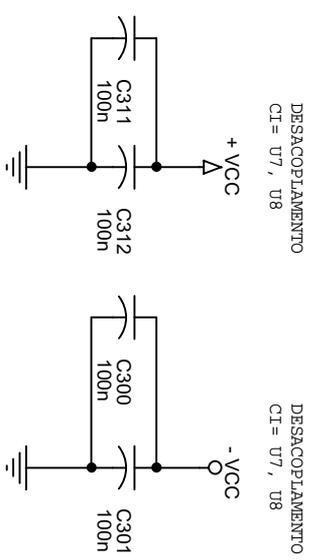
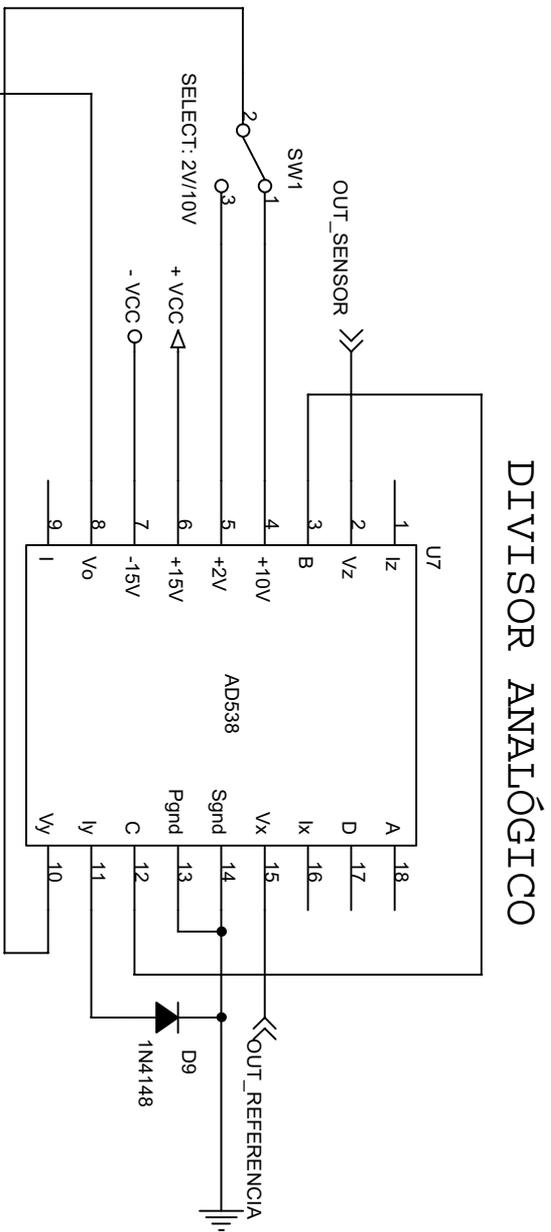
RETIFICADOR DE ONDA COMPLETA



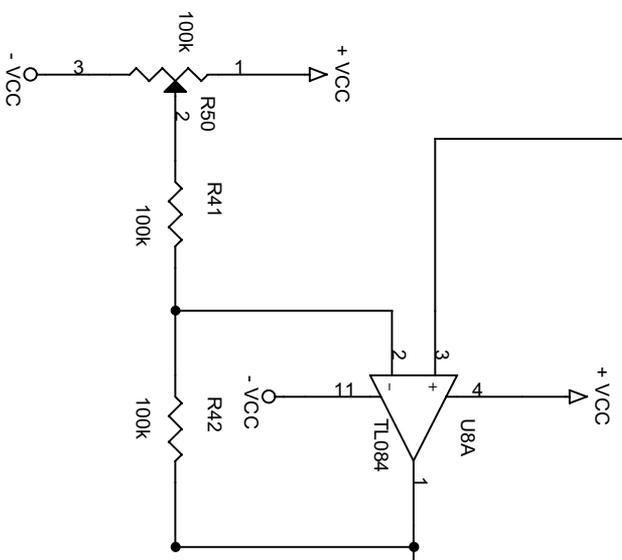
FILTRO PB 300HZ



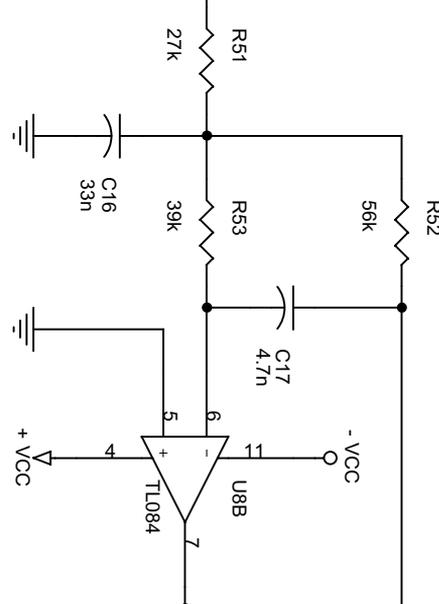
Title		SENSOR / REFERENCIA	
Size	Document Number	Rev	
B	<Doc>		
Date:	Thursday, May 29, 2003	Sheet	3 of 3



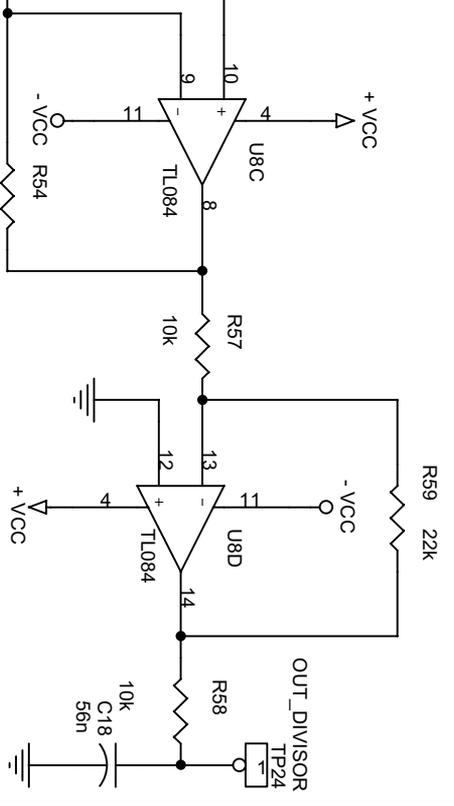
AJUSTE OFFSET



FILTRO PB-300HZ



AMPLIFICAÇÃO



Title	
DIVISOR	
Size	Document Number
A	<Doc>
Date:	Thursday, May 29, 2003
Sheet	1 of 3
Rev	1

VIBRAÇÕES EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

O sistema sensor desenvolvido nesta tese apresentou características que o tornam bastante promissores para aplicações onde é necessário monitorar vibrações com baixos níveis de deformações e a longas distâncias. Por esse motivo é apresentado como uma proposta de um dispositivo para monitorar vibrações em linhas de transmissão de energia elétrica. Nesta seção é apresentado um pequeno resumo do problema decorrente da ação de vibração nestas estruturas e alguns ensaios de caracterização de um dispositivo sensor para tal aplicação.

Vibração em cabos condutores, devido à ação do vento, é talvez o maior problema mecânico das linhas aéreas de transmissão de energia elétrica. A vida útil dos cabos está diretamente relacionada com a ocorrência da vibração e com os níveis de sua amplitude. As dificuldades existentes para, na fase de projeto da linha, prever o comportamento vibratório dos cabos com precisão conduzem a limitação de alguns parâmetros do projeto da linha, tais como carga de tração dos cabos e comprimento dos vãos entre torres. Na figura A.1 é apresentado um esquema de linha de transmissão com seus principais componentes, torre, cabo condutor, isoladores e amortecedores.

Os efeitos mecânicos sofridos pelos cabos quando instalados em vãos longos (superiores a 200 m) são diversos. Em regiões com possibilidade de formação de gelo, ocorre o fenômeno conhecido como galope. Esse fenômeno corresponde a uma oscilação de baixa frequência e de grande amplitude. Conforme o comprimento do vão, a amplitude de oscilação vertical alcança vários metros, introduzindo perigosos esforços destrutivos nos cabos e principalmente nos acessórios de fixação, podendo dar origem a curto-circuito entre fases. O

galope ocorre somente nos trechos onde o cabo é fixado com grampos de suspensão. A ocorrência desse efeito depende das condições ambientais onde o cabo será instalado, tais como baixas temperaturas e incidência de vento. O vento atuando sobre o gelo no cabo forma uma gota, possibilitando o efeito asa que inicia o galope, ocasionado por uma instabilidade aerodinâmica [Hardy e Dyke, 1995].

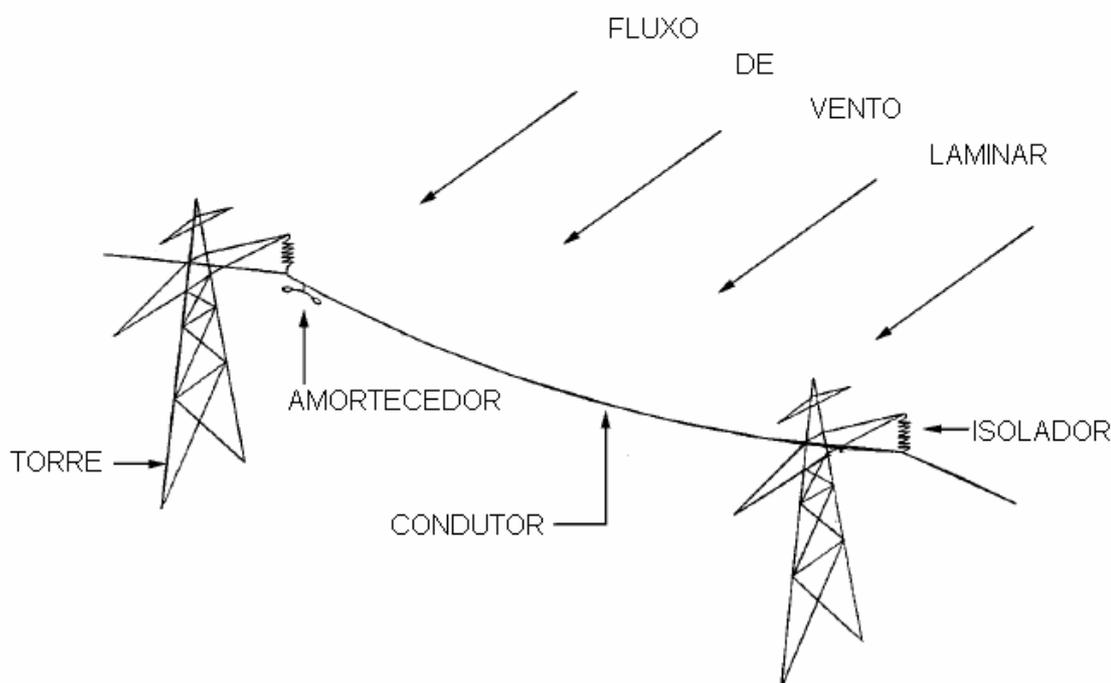


Figura A.1 Esquema de uma linha de transmissão e seus componentes

Outro efeito é a vibração eólica, que ocorre constantemente em cabos aéreos de seção circular. Dependendo das características do cabo e condições ambientais, a vibração pode atingir níveis extremamente severos. A vibração é causada por um fluxo de vento laminar em torno do cabo, com velocidade entre 0,5 e 10 m/s [Hardy e Dyke, 1995], que geralmente ocorrem em terrenos planos ou levemente ondulados. Essas vibrações possuem valores de amplitude da ordem do diâmetro do cabo, ocorrendo flexões alternadas de pequenas

amplitudes nos pontos de suspensão do cabo, causando esforços que podem levar à ruptura do cabo e seus acessórios por fadiga [Vecchiarelli *et al.*, 2000].

A vibração eólica tem como causa básica o desprendimento alternado de vórtices induzidos pelo vento nas superfícies superior e inferior do condutor, conhecidos por vórtices de Karman. Essa ação realizada por ventos perpendiculares à linha, cria um desbalanceamento das pressões, forçando o condutor a um movimento transversal alternado [Hardy e Dyke, 1995]. A frequência de desprendimento dos vórtices, f_s , a velocidade do vento, v , e o diâmetro do condutor, d , para condição estacionária (ausência de vibração), estão relacionados pela fórmula de Stronhal

$$S = f_s \frac{d}{v} \quad (\text{A.1})$$

sendo S o número de Stronhal, que para os condutores das linhas de transmissão está na faixa de 0,15 a 0,25, sendo usualmente adotado o valor de 0,18. Um condutor de 25 mm de diâmetro, sujeito a vento transversal na faixa de 0,8 a 8 m/s, apresenta frequência de Stronhal na faixa de 6 a 60 Hz.

A separação entre as frequências naturais de cabo condutor num vão típico de linha de transmissão é sempre muito pequena, da ordem de 0,2 Hz. Assim, para qualquer velocidade do vento na faixa acima mencionada facilmente existirá coincidência entre frequência de desprendimento dos vórtices, f_s , e uma das frequências naturais do cabo. A vibração ressonante tende a manter-se na frequência natural excitada inicialmente e o movimento transversal do condutor passa a governar o desprendimento dos vórtices, mesmo que haja uma pequena variação na velocidade do vento.

A vibração eólica é uma vibração do tipo auto-excitada, na qual a ação contínua do vento, após iniciada a vibração, estará introduzindo energia no sistema atingindo uma

amplitude de saturação na qual a taxa de energia introduzida se equilibra com a taxa de energia dissipada pelo amortecimento próprio, tendendo a manter o movimento. Na prática, a existência de amortecimento próprio no condutor resulta no acoplamento de modos próximos em frequência e a vibração apresenta variações na amplitude devido a batimentos.

A frequência de vibração varia diretamente com a velocidade do vento e, para frequências elevadas, o amortecimento próprio do condutor cresce, reduzindo a amplitude de vibração.

O parâmetro preponderante para controle de vibração eólica, de forma a suprimir sua ocorrência, é a tração mecânica do condutor na linha. O amortecimento próprio do condutor varia inversamente com a carga de tração, por esse motivo a tração mecânica deve ser tão baixa quanto economicamente viável. Com cargas de tração reduzidas, a dissipação de energia devido ao amortecimento próprio do condutor é suficientemente elevada para que as vibrações não atinjam níveis perigosos. Entretanto, cargas de tração reduzidas oneram os custos de construção da linha com a necessidade da utilização de torres mais elevadas, ou um maior número de torres reduzindo os vãos, além da utilização de um maior comprimento de condutores.

Os problemas causados pelas vibrações nas linhas de transmissão devem ser antecipados ou previstos durante o projeto ou nos estágios subsequentes de construção da linha, sob pena de só serem resolvidos com alto custo após a linha em operação.

AMORTECIMENTO PRÓPRIO DO CONDUTOR

Quando um condutor flexiona, os fios torcidos que o compõem deslizam um contra o outro; esse movimento relativo gera forças de atrito que fornece amortecimento através de perdas internas causadas em níveis microscópios conhecido como amortecimento do material.

O amortecimento próprio do condutor pode ser a maior fonte de dissipação de energia durante vibrações eólicas. Com o aumento na tensão mecânica no condutor os fios tendem a se fechar e o escorregamento é reduzido. Como resultado o amortecimento próprio do condutor diminui, aumentando o dano por fadiga causado pela vibração eólica. É por essa razão que as tensões nos condutores sem amortecimento próprio são mantidas relativamente baixas.

O amortecimento próprio do condutor pode ser obtido a partir de ensaios em vãos internos de laboratórios, cujos resultados são apresentados na forma de potência dissipada pelo condutor por unidade de comprimento (DP/L), em função da amplitude e da frequência de vibração, para uma determinada força de tração do condutor. Normalmente, é possível representar os resultados experimentais pela seguinte relação [Vecchiarelli *et al.*, 2000]:

$$\frac{\Delta P}{L} = k \frac{Y^p f^m}{T^u} \quad (\text{A.2})$$

onde k é a constante de proporcionalidade, Y é a amplitude de deslocamento antinodal, f é a frequência natural do condutor, T é a tensão no condutor e p , m e u são expoentes. Testes realizados em laboratórios [Cigre, 1989] [Vecchiarelli *et al.*, 2000] apresentam como valores para os expoentes na equação A.2 os seguintes resultados: 2,0 - 3,0 para p , 5,0 - 6,0 para m e 2,0 - 3,0 para u . É importante observar que a determinação da energia dissipada devido ao amortecimento próprio do condutor não é direta. Discrepâncias significativas nos resultados

experimentais podem ocorrer como consequência de fontes externas de amortecimento como, por exemplo, resistência aerodinâmica e suportes de sustentação.

PROCEDIMENTOS DE MEDIDAS

Para relacionar o movimento de condutor em grampos de suspensão convencionais com a probabilidade de fadiga, o IEEE [1966] propõem uma padronização das medidas de vibração em condutores.

As medidas são baseadas no deslocamento diferencial vertical (pico-a-pico) do condutor, Y_b , em relação ao grampo de suspensão, medido a uma distância de 89 mm do último ponto de contato entre o condutor e o grampo (figura A.2). Este deslocamento diferencial é conhecido como amplitude de curvatura. Esta padronização é um meio útil de comparar resultados obtidos em diferentes condições de operação.

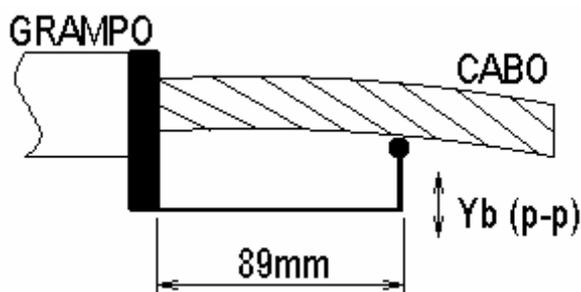


Figura A.2 Esquema para medição de vibração em cabos condutores [Strub *et al.*, 1995]

RECOMENDAÇÃO PARA INSTRUMENTOS DE MEDIDAS

Para medidas de vibração em linhas de transmissão, vários tipos de instrumentos de medição foram desenvolvidos, digitais e analógicos, os quais serão utilizados dependendo do objetivo da medida a ser realizada. Para investigação de longo período ou avaliação de

deformação máxima, dispositivos digitais possibilitam uma compactação dos dados obtidos e assim um tempo de armazenamento dos dados superior. Para instrumentos de medidas de vibração em cabos as seguintes características são desejáveis:

- O instrumento deve ser tão leve e compacto quanto possível;
- O suporte onde o sensor é preso deve ser rígido e leve;
- O sensor deve manter contato com o cabo, independente da variação de amplitude de oscilação;
- Capacidade de medir variação de amplitude de 2 mm pico-a-pico;
- Capacidade de medir frequências entre 3 e 300 Hz;
- Instrumentos usando técnica de amostragem digital devem ser capazes de armazenar 10 amostras por ciclo de vibração;
- Uma completa seqüência de medida consiste de um período de medida e um período de pausa. O período de medida deve ser de no mínimo 1 segundo, preferivelmente 10 segundos, para um mínimo de 4 vezes por hora, 24 horas por dia, por no mínimo 3 meses;

SISTEMA PARA MEDIDAS DE VIBRAÇÃO UTILIZANDO REDES DE BRAGG

Nesta seção é apresentado um sistema sensor baseado em redes de Bragg para medidas de vibrações em linhas de transmissão. A proposta deste trabalho é a monitoração e estudos de vibrações em cabos de alta tensão através de redes de Bragg em fibras óticas. Os resultados apresentados no decorrer desta tese mostraram promissores para utilização do sistema sensor para aplicações em linhas de transmissão em virtude das vantagens já apresentadas dos

sensores óticos, nomeadamente; possibilidade de transmissão de sinais a longas distâncias, imunidade eletromagnética e baixo peso, características que tornam as FBG em elementos sensores bastante atraentes para tal aplicação.

Na figura A.3 é apresentado o arranjo experimental baseado no esquema de medida normatizado pelo IEEE. O dispositivo consiste de uma lâmina de aço-mola com dimensões 0,5 mm de espessura, 12,6 mm de largura e 181,5 mm de comprimento, sendo 89 mm de comprimento efetivamente livre e 9,20 g de peso. A lâmina é presa a um suporte metálico a uma altura de 11,3 mm e na outra extremidade ela é presa a um excitador mecânica que serve para caracterizar o dispositivo. O excitador é controlado por um gerador de funções e opera em uma faixa de frequência de 0,1 Hz a 10 kHz. Os sensores, EER e FBG, foram colados a lâmina lado-a-lado próximos ao engaste a 1,2 cm.

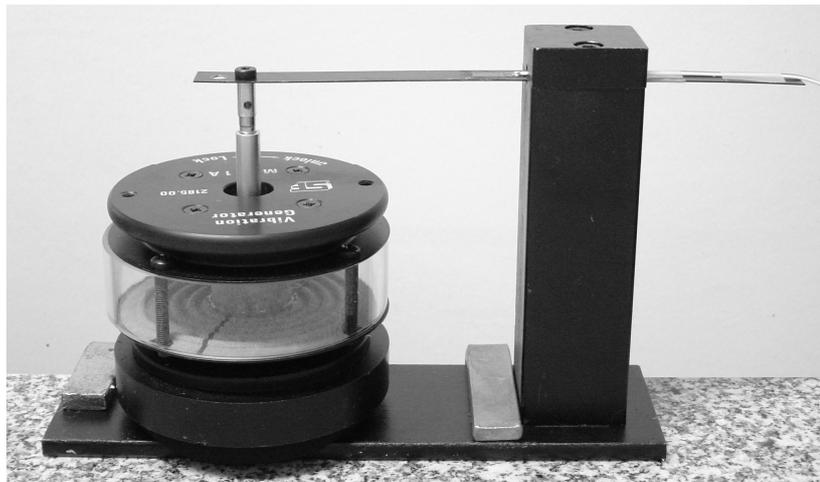


Figura A.3 Esquema para medida de vibração em cabos condutores montado em bancada para ensaios com excitador

Em uma primeira etapa foi determinada a frequência de ressonância da lâmina de aço-mola. A medida foi feita variando a frequência do gerador até alcançar a frequência de ressonância do dispositivo, 357 Hz. Esse valor de frequência está acima daquela faixa espectral para a qual o dispositivo sensor deve operar. Nas figuras A.4a e A.4b são

apresentados as respostas temporal e frequência do dispositivo em relação a variação da frequência aplicada pelo excitador até alcançar a frequência de ressonância.

Na figura A.5 é apresentado o resultado de variação de deformação *versus* tempo para uma frequência de excitação de 10,6 Hz e uma amplitude de oscilação medida na extremidade de, aproximadamente, 5 mm pico-a-pico. Conforme observa-se na figura A.5 os sensores, ótico e elétrico, apresentam uma boa concordância, diferenciando na relação sinal ruído que para o EER foi de 22,3 dB e para FBG foi de 25,8 dB.

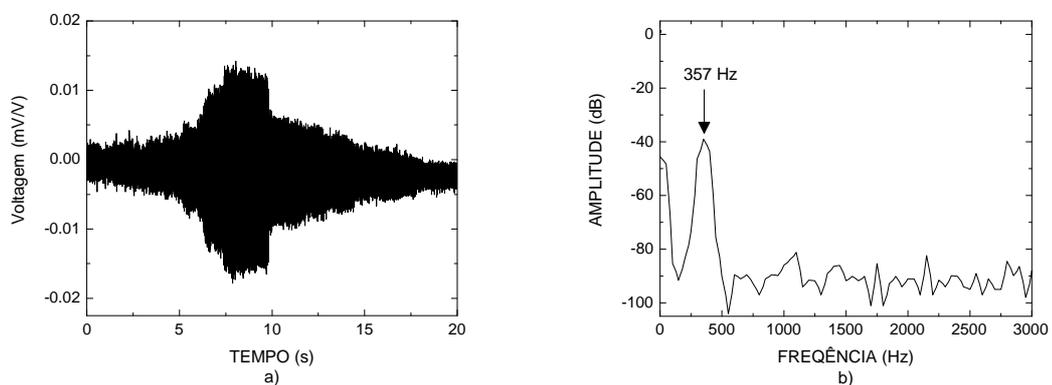


Figura A.4 a) Resposta temporal e b) espectro de frequência da caracterização da frequência de ressonância da lâmina de aço-mola

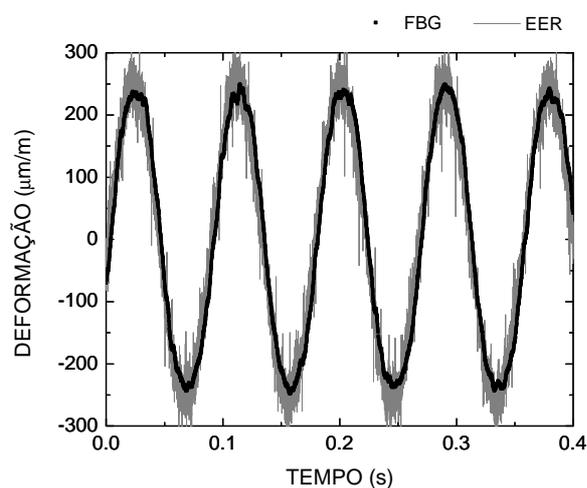


Figura A.5 Variação de deformação *versus* tempo para uma frequência de excitação de 10,6 Hz, medido pelos sensores EER e FBG. A linha representa a resposta do EER e os pontos representam a resposta da FBG

A fim de obter a linearidade do sistema sensor é traçado a curva de frequência medida pela rede de Bragg *versus* frequência medida pelo extensômetro (vide figura A.6). A equação da reta apresenta um coeficiente de correlação unitário demonstrando uma boa linearidade do transdutor ótico.

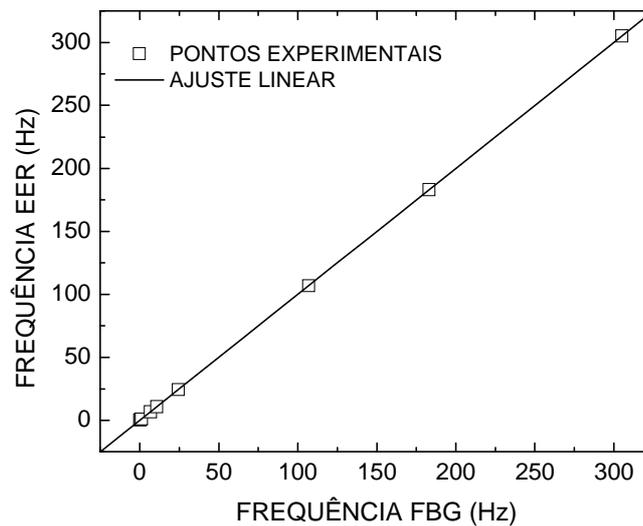


Figura A.6 Frequência medida pela rede de Bragg *versus* frequência medida pelo extensômetro, variando a frequência de excitação

O próximo passo para a implementação do dispositivo seria o desenvolvimento de um programa de controle e a realização de medidas em linhas de transmissão.

PUBLICAÇÕES RESULTANTES DESTA TESE

- PERIÓDICOS

LIMA, M. J. N., NOGUEIRA, R. N., SILVA, J. C. C., TEIXEIRA, A., ANDRÉ, P. S. B., ROCHA, J. R. F., KALINOWSKI, H. J., PINTO, J. L., “*Comparison of the Temperature Dependence of Different Types of Bragg Gratings*”, Microwave and Optical Technology Letters, 2005.

LIMA, M. J. N., NOGUEIRA, R. N., SILVA, J. C. C., TEIXEIRA, A., ANDRÉ, P. S. B., ROCHA, J. R. F., KALINOWSKI, H. J., PINTO, J. L., “*Bragg gratings with enhanced temperature sustainability written in a high-germanium-doped fiber*”. Revista do Detua, Aveiro, vol. 4, p. 305-307, 2004.

MARTELLI, C., SILVA, J. C. C., NOVAES, P. J. D., KALINOWSKI, H. J., “*Sistema de leitura de redes de Bragg para medidas estáticas e dinâmicas*”, Revista de Física Aplicada e Instrumentação, vol. 17, p. 22-29, 2004.

SILVA, J. C. C., ABE, I., CHAVES, R. C., FABRIS, J. L., PINTO, J. L., KALINOWSKI, H. J., “*Development of Bragg grating sensors at CEFET-PR*”, Optics and Lasers in Engineering, vol. 39, p. 511-523, 2003.

- TRABALHOS EM CONFERÊNCIAS

SILVA, J. C. C., RAMOS, A. M., CARVALHO, L., NOGUEIRA, R. N., BALLU, A., MESNARD, M., PINTO, J. L., KALINOWSKI, H. J., SIMÕES, J. A. O., “*Fibre Bragg grating sensing and finite element analysis of the biomechanics of the mandible*”. OFS 17 - OPTICAL FIBRE SENSORS CONFERENCE, Proceedings OFS 17, Bruges, Belgium, 2005.

MILCZEWSKI, M. S., SILVA, J. C. C., ABE, I., CARVALHO, L., FERNANDES, C. G. P. B., KALINOWSKI, H. J., NOGUEIRA, R. N., “*FBG application in the determination of setting expansion of dental materials*”, OFS 17 - OPTICAL FIBRE SENSORS CONFERENCE, Proceedings OFS 17, Bruges, Belgium, 2005.

LIMA, M. J. N., NOGUEIRA, R. N., SILVA, J. C. C., TEIXEIRA, A., ANDRÉ, P. S. B., ROCHA, J. R. F., KALINOWSKI, H. J., PINTO, J. L., “*A. Abnormal growth mechanism of fiber Bragg gratings in high-Germanium-doped fibers*” OPTO-Ireland 2005 - Conference on Optoelectronics and Photonic Devices, Proceedings of SPIE, Dublin, Ireland, 2005.

KALINOWSKI, H. J., SIMÕES, J. A., PINTO, J. L., CARVALHO, L., NOGUEIRA, R. N., SILVA, J. C. C., MILCZEWSKI, M. S., “*Probing dental Biomechanics with Fibre Bragg Grating Sensors*”. Seventh International Conference on Optoelectronics, Fiber Optics and Photonics, Proceedings Photonics 2004. Sessão Biophotonics 2, paper Bio2.2 (4 páginas), vol. CD-ROM, Cochin, Indian, 2004.

NOGUEIRA, R. N., PINTO, I., SILVA, J. C. C., TEIXEIRA, A., ANDRÉ, P. S. B., PINTO, J. L., ROCHA, J. F., “*Tunable Dispersion Compensation based on Induced Thermal Chirping in Fiber Bragg Gratings*” SEON 2004 - Celebrating Ten Years of Fibre Bragg Gratings in Portugal - II Symposium on Enabling Optical Networks, INESC Porto - Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores do Porto, Portugal, p. 27-28, 2004.

SILVA, J. C. C., MARTELLI, C., PENNER, E., KALINOWSKI, H. J., “*Temperature effects in concrete structures measured with fibre Bragg grating*”, Proceedings SPIE – EWOFS’2004 – Second European Workshop on Optical Fibre Sensors, vol. 5502, p. 68-71, 2004.

SILVA, J. C. C., CARVALHO, L., NOGUEIRA, R., N., SIMÕES, J. A., PINTO, J., L., KALINOWSKI, H. J., “*FBG applied in dynamic analysis of an implanted cadaveric mandible*”, Proceedings SPIE – EWOFS’2004 – Second European Workshop on Optical Fibre Sensors, vol. 5502, p. 226-228, 2004.

CARVALHO, L., SILVA, J., C., C., NOGUEIRA, R., N., SIMÕES, J., A., PINTO, J., L., KALINOWSKI, H., J., “*FBG and strain gauge measurements on an implanted cadaveric mandible*”, Proceedings of ESB 2004 - European Society of Biomechanics Congress, p. 565, 2004.

SILVA, J. C. C., C. C., MARTELLI, C., PENNER, E., J., L., KALINOWSKI, H. J., “*Ensaio dinâmicos para avaliação de degradação em vigas de madeira laminada colada com o emprego de sensores em fibra óptica*”, IX EBRAMEM – Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, p. 1-8, 2004.

- SILVA, J. C. C., MARTELLI, C., KALINOWSKI, H. J., PENNER, E., “*Ensaio Dinâmico para Avaliação de Degradação em Vigas de Madeira Laminada Colada com o Emprego de Sensores em Fibra Óptica*”, Proceedings CIMAD’2004 – I Congresso Ibérico a Madeira na Construção, Aveiro, Portugal, p. 699-706, 2004.
- SILVA, J. C. C., MARTELLI, C., DIESEL, B., W., FABRIS, J., L., KALINOWSKI, H. J., GOOTHOOFF, N., CANNING, J., “*Termômetro de Alta Temperatura (0-400 °C) Baseado em Redes de Bragg em Fibra Óptica para Aplicação no Setor de Petróleo*”, Anais do III SNCA - Seminário Nacional de Controle e Automação, Salvador, Brasil, p. 187-192, 2003.
- SILVA, J. C. C., FALATE, R., NOGUEIRA, R., KALINOWSKI, H. J., FABRIS, J., L., PINTO, J. L., “*Production of fiber Bragg gratings in phase mask interferometers*”, Proceedings of 4th Conference on Telecommunications - ConfTele, Aveiro, Portugal, p. 449-451, 2003.
- SILVA, J. C. C., MARTELLI, C., PENNER, E., J., L., KALINOWSKI, H. J., PINTO, J. L., “*Medição de Vibrações com Redes de Bragg: Caracterização Instrumental Primária*”, Proceedings Física 2002-13^a Conferência Nacional de Física - 12^o Encontro Ibérico para o Ensino da Física, p. 589-590, 2002.
- SILVA, J. C. C., ABE, I., FABRIS, J. L., PINTO, J. L., KALINOWSKI, H. J., BARBOSA, C. L., “*A review on the development of Bragg grating sensors at CEFET-PR and University of Aveiro*”, Proceedings SPIE – 4th Iberoamerican Meeting on Optics and 7th Latin American Meeting on Optics, Lasers, and Their Applications, vol. 4419, p. 334-337, 2001.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBREKTSSON, T., ZARB, G., WORTHINGTON, P. ERIKSSON, A. R., “*The long term efficiency of currently used dental implants: a review and proposed criteria for success*”, International Journal Oral Maxillofacial Implants, vol. 1, p. 11-25, 1986.
- ALMEIDA, M. T., “*Vibrações Mecânicas para Engenheiros*”, Editora Edgard Blücher LTDA, São Paulo, 1990.
- ATKINS, R.M. & MIZRAHI, V., “*Observations of changes in UV Absorption Bands of Singlemode Germanosilicate Core Optical Fibres on Writing and Thermally Erasing Refractive Index Gratings*”, Electronics Letters, vol. 28, p. 1743-1752, 1992.
- ARCHAMBAULT, J. L., REEKIE, L., RUSSEL, P. St. J., “*100 % reflectivity Bragg reflectors produced in optical fibres by single excimer laser pulses*” Electronics Letters, vol. 29, p. 453-455, 1993.
- BALL, G. A., MOREY, W. W., “*Compression-Tuned Single-Frequency Bragg Grating Fiber Laser*”, Optics Letters, vol. 19, p. 1979-1981, 1994.
- BELLIL, H., ABUSHAGUR, M. A. G., “*Heterodyne detection for fiber bragg grating sensors*”, Optics and Laser Technology, vol. 32, p. 297 – 300, 2000.

- BENNION, I., WILLIAMS, J. A. R., ZHANG, L., SUGDEN, K., DORAN, N. J., “*UV-written in fibre Bragg gratings*”, Optics and Quantum Electronics, vol. 28, p. 93-135, 1996.
- BILODEAU, F., JOHNSON, D. C., MALO, B., VINEBERG, K. A., HILL, K. O., “*Ultraviolet light photosensitivity in Er³⁺-Ge doped optical fiber*”, Optics Letters, vol. 15, p. 1138-1147, 1990, citado por [Kashyap, 1994].
- BORCHERS, L., REICHART, P., “*Three dimensional stress distribution around a dental implant at different stages of interface development*”, Journal of Dental Research, vol. 62, p. 155-159, 1983.
- BROER, M. M., CONE, R. L., SIMPSON, J. R., “*Ultraviolet-induced distributed-feedback gratings in Ce³⁺ doped silica optical fibres*”, Optics Letters, vol. 16, p. 1381-1392, 1991, citado por [Kashyap, 1994].
- CARVALHO, L., VAZ, M. A., SIMÕES, J. A., “*Determinação de extensões dinâmicos sobre uma mandíbula cadavérica*”, Anais do 4º Encontro de Análise Experimental de Tensões e Mecânica Experimental, Bragança, p. 127-128, 2001.
- CARVALHO, L., SILVA, J., C., C., NOGUEIRA, R., N., SIMÕES, J., A., PINTO, J., L., KALINOWSKI, H., J., “*FBG and strain gauge measurements on an implanted cadaveric mandible*”, Proceedings of ESB 2004 - European Society of Biomechanics Congress, 'S-Hertogenbosch, Holanda, p. 565, 2004.

CARVALHO, L., VAZ, M. A. AND SIMÕES, J. A., "Mandible strains induced by conventional and novel dental implants", Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 2004, (in press).

CEB, Comité Euro-International du Béton, CEB-FIB Model Code, 1990

CHAVES, R. C., ABE, I., SANTOS, M. J. D., PONTES, M. J., KALINOWSKI, H. J., FRANCISCO, C. A., ROMERO, M. A., "Strain and temperature measurements in power systems with multiplexed fiber optics Bragg grating sensors" Journal of Microwaves and Optoelectronics, vol. 2, p. 54-63, 2000.

CIGRE, "Report on Eolian Vibration", ELECTRA, SC22 WG01, nº 124, p. 41-77, 1989.

COLE, M.J., LOH, W.H., LAMING, R.I., ZERVAS, M.N., "Moving Fibre/Phase Mask-Scanning Beam Technique for Writing Arbitrary Profile Fibre Grating With a Uniform Phase Mask", Proceedings of Photosensitivity and Quadratic Nonlinearity in Glass Waveguides, p. 74-82, 1995.

COWIN, S. C., "Bone mechanics", CRC Press, Boca Raton, Florida, 1990.

DAVIS, M. A., KERSEY, A D., "All-fibre Bragg grating strain-sensor demonstration technique using a wavelength division coupler", Electronics Letters, vol. 30, p. 75-76, 1994.

- DYER, P. E., FARLEY, R. J., GIELD, R., Byron, K. C., RIED, D., “*High reflectivity fibre gratings produced by incubated damage using a 193 nm ArF laser*”, Electronics Letters, vol. 30, p. 860-862, 1994.
- DYER, P. E., FARLEY, R. J., GIELD, R., “*Analysis and application of a 0/1 order Talbot interferometer for 193 nm laser grating formation*”, Optics Communications, vol. 129, p. 98-108, 1996.
- DONG, L., ARCHAMBAULT, J.L., REEKIE, L., RUSSEL, P. ST.J., PAYNE, D.N., “*Single Pulse Bragg Gratings Written During Fibre Drawing*”, Electronics Letters, vol. 29, p. 1577-1585, 1993.
- ERDOGAN, T., “*Fiber grating spectra*”, Journal of Lightwave Technology, vol. 15, p. 1277-1294, 1997.
- FLOREANI, F., GILLOOLY, A., ZHAO, D., ZHANG, L., BENNION, I., “*Investigation of intrinsically apodised Chirped fibre Bragg gratings fabricated using scanning holographic set-up*”, Proceedings of 2002 IEEE/LEOS Workshop, p. 80-85, 2002.
- FROST, H. M., “*Mechanical determinants of skeletal architecture: bone modeling*”, In The scientific basis of orthopaedics, 2nd edition (Eds J. A. Albright and R. A. Brand, 1987.
- GOEL, V. K., . KHERA, S. C, RALSTON, J. L., K. H. CHANG, “*Stresses at the dentinoenamel junction of human teeth – a finite element investigation*”, Journal of Prosthetic Dentistry, vol. 66, p. 451-459, 1991.

- GOH, C. S., MOKHTAR, M. R., BUTLER, S. A., SET, S. Y., KIKUCHI, K., IBSEN, M.,
“*Wavelength Tuning of Fiber Bragg Grating Over 90nm Using a Simple Tuning Package*”,
IEEE Photonics Technology Letters, p. 557-559, 2003.
- GREGORY, M., MURPHY, W. M., SCOTT, J., WATSON C. J., REEVE, P. E., “*A clinical
study of the Brånemark dental implant system*”, British Dental Journal, vol. 168, p. 18-23,
1990.
- HAND, D.P., RUSSEL, P.J., “*Photoinduced Refractive-Index Changes in Germanosilicate
Fibers*” Optics Letters, vol. 15, p. 102-113, 1990.
- HARDY, C., DYKE, P., “*Field Observations on Wind-Induced Conductor Motions*”, Journal
of Fluids and Structures, vol. 9, p. 43-60, 1995.
- HILL, K. O., FUJII, Y., JOHNSON, D. C., KAWASAKI, B. S., “*Photosensitivity in optical
fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication*”, Applied Physics Letters, vol.
32, p. 647-649, 1978.
- HILL, K. O., MALO, B., BILODEAU, F., JOHNSON, D. C., MORSE, T. F., KILIAN, A.,
REINHART, L., KYUNGHWAN, O., “*Photosensitivity in Eu^{2+} : Al_2O_3 - doped-core
fibre: Preliminary results and application to mode converters*”, Proceedings Conference
on Optical Fiber Communications, OFC’91, p. 14-17, paper PD3-1, 1991, citado por
[Kashyap, 1994].
- HILL, K.O., MALO, B., BILODEAU, F., JOHNSON, D.C., “*Photosensitivity in Optical
Fibers*”, Annul Review of Materials Science, vol. 23, p. 125-157, 1993.

- HILL, K.O., MALO, B., BILODEAU, F., JOHNSON, D.C., “*Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask*”, Applied Physics Letters, vol. 62, p. 1035-1037, 1993.
- HO, H. L., JIN, W., CHAN, C., C., ZHOU, Y., WANG, X., W., “*A fiber Bragg grating sensor for dynamic measurands*”, Sensors and Actuators A: Physical, vol. 96 p. 21-24, 2002.
- IEEE COMMITTEE REPORT, “*Standardization of Conductor Vibration Measurements*”, IEEE Transactions, PAS-85, 1966.
- INMAN, D. J., “*Engeneering Vibration*”, Prentice Hall, New Jersey, 1996.
- KASHYAP, R., “*Fiber Bragg Grating*”, San Diego, Academic Press, 1999.
- KERSEY, A. D., “*A Review of Recent Developments in Fiber Optic Sensor Technology*”, Optical Fiber Technology, vol. 2, p. 291-317, 1996.
- KERSEY, A. D., Davis, M. A., Patrick, H. J., LeBlanc, M., Koo, K. P., Askins, C. G., Putnan, M. A., E. J. Friebele, “*Fiber Grating Sensor*”, Journal of Lightwave Technology, vol. 15, p. 1442-1462, 1997.
- KODUR, V. K. R., WANG, T. C., CHENG, F. P., “*Predicting the fire resistance behaviour of high strength concrete columns*”, Cement & Concrete Composites, vol. 26, p. 141-153.
- LAM, D. K. W. & GARSIDE, B. K., Applied Optics, vol. 20, p. 440-456, 1981, citado por [Bennion et al., 1996].

- LEHMAN, M. L., MEYER, M. L. “*Relationship of dental caries and stress: concentrations in teeth as revealed by photoelastic tests*”, Journal of Dental Research, vol. 45, p. 1706-1714, 1966.
- LEIDERMAN, R., MATOS, C., J., S., BRAGA, A., M., B., MARGULIS, W., VALENTE, L., C., G., “*Interrogation Methods for Fiber Bragg Grating Sensors*”, Proceedings SPIE, vol. 3666, p. 554-560, 1999.
- LEMAIRE, P. J., “*Reliability of optical fibers exposed to hydrogen: Prediction of long-term loss increases*”, Optical Engineering, vol. 30, p. 780-781, 1991.
- LEMAIRE, P. J., ATKINS, R. M., MIZRAHI, V., REED, W. A., Electronics Letters, vol. 29, p. 1191-1198, 1993, citado por [Othonos, 1997].
- LIN, Y. B., CHERN, J. C., CHANG, K., CHAN, Y., WANG, L., “*The utilization of fiber Bragg grating sensors to monitor high performance concrete at elevated temperature*”, Institute of Physics Publishing, Smart Materials and Structures, vol. 13, p. 784-790, 2004.
- LIN, Y. B., CHANG, K., CHERN, J. C., WANG, L., “*The health monitoring of a prestressed beam by using fiber Bragg grating sensors*”, Institute of Physics Publishing, Smart Materials and Structures, vol. 13, p. 712-718, 2004.
- LINQUIST, L. W., ROCKLER, B., CARLSON, G. E., “*Bone resorption around fixtures in edentulous patients with mandibular fixed tissue integrated prostheses*”, Journal of Prosthetic Dentistry, vol. 59, p. 59-63, 1988.

- LIU, Y, WILLIAMS, L., ZHANG, L., BENNION, I., “*Abnormal spectral evolution of fiber Bragg gratings in hydrogenated fibers*”, Optics Letters, vol. 27, p. 586-568, 2002.
- LOCCO, A., LIMBERGER, H. G., SALATHE, R. P., L. A., EVERALL, K. E., CHOSHOLM, WILLIAMS, J. A. R., BENNION, I., “*Bragg Grating Fast Tunable Filter for Wavelength Division Multiplexing*”, Journal Lightwave Technology, vol. 17, p. 1217-1221, 1999.
- MACEDO, A. N., JUNIOR, C. C., “*Estudo de emendas dentadas em Madeira laminada colada (MLC): avaliação de método de ensaio – NBR 7190/1997*”, Cadernos de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos - USP, 1997.
- MALO, B., HILL, K.O., BILODEAU, F., JOHNSON, D.C., ALBERT, J., “*Point-by-Point Fabrication of Micro-Bragg Gratings in Photo Sensitive Fibre Using Single Excimer Pulse Refraction Index Modification Techniques*”, Electronics Letters, vol. 29, p. 1668-1672, 1989.
- MAHLER, D. B., PEYTON, F. A., “*Photoelasticity as a research technique for analyzing stresses in dental structures*”, Journal of Dental Research, vol. 34, p. 831-838, 1955.
- MALO, B., JOHNSON, D. C., BILODEAU, F., ALBERT, J., HILL, K. O., “*Single-excimer-pulse writing of fiber gratings by use of a zero-order nulled phase mask: grating spectral response and visualization of index perturbations*”, Optics Letters. Vol. 18, p. 1277-1279, 1993.

- MARKS, I., “*The Biological Basis of Tooth Movement in Response to an Applied Mechanical Force*”, Journal of Orthodontics, 2002.
- MARTELLI, C., “*Termômetro para altas temperaturas (0 – 400 °C) com redes de Bragg em fibra óptica*”, Dissertação de Mestrado, Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná – CEFET-PR, 2003.
- MARTELLI, C., SILVA, J. C. C., NOVAES, P. J. D., KALINOWSKI, H. J., “*Sistema de leitura de redes de Bragg para medidas estáticas e dinâmicas*”, Revista de Física Aplicada e Instrumentação, 2004d, vol. 17, p. 22-29, 2004.
- MARTIN, J., OUELLETE, F., “*Novel writing technique of long and highly reflective in-fibre gratings*”, Electronics Letters, vol. 30, p. 811-812, 1994.
- MCCONNELL, K. G., “*Vibration Testing - Theory and Practice*”, Wiley-Interscience Publication, Nova York, 1995.
- MELLE, S., M., LIU, K., MEASURES, R., “*A Passive Wavelength Demodulation System for Guided-Wave Bragg Gratings Sensors*”, IEEE Photonics Letters, vol. 4, p. 516-518, 1992.
- MELTZ, G., MOREY, W. W., GLENN, W. H., “*Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method*”, Optics Letters, vol. 14, p. 823-825, 1989.
- MELTZ, G., & MOREY, W.W., “*Bragg Grating Formation and Germanosilicate Fiber Photosensitivity*”, Proceedings SPIE, vol. 1516, p. 185-192, 1991.

- MIHAILOV, S. J., GOWER, M. C., “*Periodic cladding surface structures induced when recording fiber Bragg reflectors with a single pulse from a KrF excimer laser*”, Applied Physics Letters, vol. 65, p.2639-2641, 1994.
- MIZRAHI, V., SIPE, J. E., “*Optical properties of photosensitive fiber phase mask*”, Journal Lightwave Technology, vol. 11, p. 1513-1517, 1993.
- MOREY, W. W., MELTZ, G., GLENN, W. H., “*Fiber Bragg grating sensors*”, Proceedings SPIE, vol. 1169, p. 98-100, 1990.
- NATALI, A., PAVAN, P., PINI, M., RONCHI, R., “*Numerical analysis of short time response of periodontal ligament*”, Proceedings of the 12th Conference of the European Society of Biomechanical, Dublin, p. 29, 2000.
- NUNES, L. C. S., VALENTE, L. C. G., BRAGA, A. M. B., “*Analysis of a demodulation system for fiber Bragg grating sensors using two fixed filters*”, Optics and Lasers in Engineering, vol. 42, p. 529-542, 2004.
- NGUYEN, H. T., SHORE, B. W., BRITTEN, S. J., BOYD, R. D., PERRY, M. D., “*High-efficiency fused-silica transmission gratings*” Optical Letters, vol. 22, p. 142-144, 1997.
- OTTEVAERE, H., TABAK, M., AZNAR, D., FERNANDEZ, A., VAN IERSCHOT, S., BERGHMANS, F. AND THIENPONT, H., “*Optical fiber sensors for monitoring stress build-up in dental cements*”, OFS-16, 16th International Conference on Optical Fiber Sensor, Japan, p. 574-577, 2003.

- OTHONOS, A., “*Fiber Bragg gratings*”, Review of Scientific Instruments, vol. 68, p. 4309-4341, 1997.
- OTHONOS, A., Kalli, K., “*Fiber Bragg Grating: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing*”, London, Artech House, 1999.
- PILLIAR, R. M., DESPORTER, D. A., WATSON, P. A., VALIQUETTE, N., “*Dental implant design-effect on the bone remodeling*”, Journal of Biomedical Material Research, vol. 25, p. 467-483, 1991.
- QUINTELA, A., JÁUREGUI, C., ECHEVARRÍA, J., LÓPEZ-HIGUERA, J. M., “*Embedded temperature-strain fibre Bragg grating sensor system validation for concrete structures*”, Institute of Physics Publishing, Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, vol. 4, p. 387-390, 2004.
- RAO, S. S., “*Mechanical Vibration - Third Edition*”, Addison-Wesley Publishing Company, New York, 1999.
- RAO, Y. J., “*In-fibre Bragg grating sensors*”, Institute of Physics Publishing; Measurement Science and Technology, vol. 8, p. 355-375, 1997.
- RAO, Y. J., YUAN, S. F., ZENG, X. K., LIAN, D. K., ZHU, Y., WANG Y. P., HUANG S. L., LIU T. Y., FERNANDO G. F., ZHANG L., BENNION I., “*Simultaneous strain and temperature measurement of advanced 3-D braided composite materials using an improved EFPI/FBG system*”, Optics and Laser in Engineering, vol. 38, p. 557 – 566, 2002.

- REIGER, M. R., FAREED, K., ADAMS, W. K., TANQUIST, R. A., “*Bone stress distribution for three endosseous implants*”, *Journal of Prosthetic Dentistry*, vol. 61, p. 223-228, 1989.
- RIANT, I., HALLER, F., “*Study of the photosensitivity at 193 nm and comparison with photosensitivity at 240 nm influence of fiber tension: type IIa aging*” *Journal Lightwave Technology*, vol. 15, p. 1464-1469, 1997.
- ROMERO, M.A., CALLIGARIS, A., JR., SILVA, M.T.C., “*A fiber-optic Bragg-grating temperature sensor for high-voltage transmission lines*”, *Proceedings SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference*, vol. 1, p. 34-38, 1997.
- SALAWU, O., S., WILLIAMS, C., “*Review of Full-Scale Dynamic Testing Of Bridge Structures*”, *Engineering Structures*, vol. 17, p. 113-121, 1995.
- SALAWU, O., S., “*Detection of structural damage through changes in frequency: A review*”, *Engineering Structures*, vol. 19, p. 718-723, 1997.
- SHENOY, M. R., THYAGARAJAN, K., PRIYE, V., MADHAVAN, N. S., “*Estimation of the characteristic parameters of fiber Bragg gratings from spectral measurements*” *Proceedings SPIE*, vol. 3666, p. 94-99, 1999.
- SIGEL, G. H., “*Optical Absorption of Glasses*”, *Academic Press*, vol. 12, p. 5-12, 1977.

- SIMPSON, A. G., KALLI, K., ZHOU, K., ZHANG, L., BENNION, I., “*An idealized method for the fabrication of temperature invariant IA-I strain sensors*”, 16th International Conference on Optical Fibre Sensors – OFS’2003, Nara, Japão, p. 14-17, 2003.
- SOLTESZ, U., SIEGELE, D., RIEDMULLER, J., SCHULZ, P., “*Stress concentration and bone resorption in the jaw of dental implants with shoulders*”, In *Clinical applications of biomaterials* (Eds A. J. C. Lee, T. Albrektsson and P. I. Brånemark), p. 115-122, 1982.
- STONE, J., “*Photorefractivity in GeO₂-doped silica fibers*”, *Journal Applied Physics*, vol. 62, p. 4371-4376, 1987.
- STRUB, H., BÜCKNER, W., CLOUTIER, L., HARTMANN, D., KRISPIN, H. J., MACKNESS, C., PAPAILIOU, K. O., POFFENBERGER, J. C., RAWLINS, C. B., RHEBERGEN, B., ROOS, A., HAVARD, D. G., RURITZ R., “*Guide To Vibration Measurements on Overhead Lines*”, Task Force 2 of Working Group 11 of Study Committee 22, *Électra*, October, 1995.
- THOMS, S. R., DAKIN, G. J., LEMONS, J. E., EBERHARDT, A. W., “*Quasi-linear viscoelastic behavior of the human periodontal ligament*”, *Journal Biomechanics*, vol. 35, p. 1411-1415, 2002.
- THRESHER, R. W. “*The stress analysis of human teeth*”, *Journal of Biomechanics*, vol. 6, p. 443-449, 1973.

- TJIN, S. C., TAN, Y. K., YOW, M., LAM, Y. Z., HAO, J., “*Recording compliance of dental splint use in obstructive sleep apnoea patients by force and temperature modelling*”, *Medical & Biological Engineering & Computing*, vol. 39, p. 182-184, 2001.
- VECCHIARELLI, J., CURRIE, I. G., HAVARD, D. C., “*Computational Analysis of Aeolian Conductor Vibration With a Stockbridge-Type Damper*”, *Journal of Fluids and Structures*, vol. 14, p. 489-509, 2000.
- WANG, R. Z., WEINER, S., “*Strain-structure relations in human teeth using Moiré fringes*”, *Journal of Biomechanics*, vol. 31, p. 135-141, 1998.
- WANG, Y., GRANT, J., SHARMA, A., MYERS, G., “*Modified Talbot interferometer for fabrication of fiber-optic grating filter over a wide range of Bragg wavelength and bandwidth using a single phase mask*”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 19, p. 1569-1573, 2001.
- WATERS, N. E., “*Some mechanical and physical properties of teeth*”, In *Symposia of the Society for Experimental Biology, The Mechanical Properties of Biological Materials*, Cambridge University Press, London, vol.34, p. 99-135, 1980.
- WEHRLE, G., NOHAMA, P., KALINOWSKI, H., J., TORRES., P., I., VALENTE, L., C., G., “*A fibre optic Bragg grating strain sensor for monitoring ventilatory movements*”, *Measurement Science and Technology*, vol. 12, p. 805-809, 2001.
- WILLIAMS, C., “*Testing of large structures using vibration techniques*”, *Structural Integrity Assessment; Elsevier Applied Science*, p. 229-290, 1992.

- WILLIAMS, D.L., DAVEY, S.T., KASHYAP, R., ARMITAGE, J.R., AINSLIE, B.J., “*UV Spectroscopy of Optical Fibres and Preforms*”, Proceedings SPIE, vol. 1516, p. 29-37, 1991.
- WOLFENDEN, A., “*Dynamic Elastic Modulus - Measurements in Materials*”, American Society for Testing and Materials, California, 1990.
- XIAO, J., KÖNIG, G., “*Study on concrete at high temperature in China – an overview*”, Fire Safety Journal, vol 39, p. 89-103, 2004.
- YETTRAM, A. L., WRIGHT, K. W. J., PICKARD, H. M., “*Finite element stress analysis of the crowns of normal and restored teeth*”, Journal of Dentistry Research, vol. 55, p. 1004-1011, 1976.
- YUN-JIANG RAO, WEBB, D.J., JACKSON, D.A., LIN ZHANG, BENNION, I., “*In-fiber Bragg-grating temperature sensor system for medical applications*”, Journal of Lightwave Technology, vol. 15, p. 779-785, 1997.
- ZHAO, Y., LIAO, Y., “*Discrimination methods and demodulation techniques for fiber Bragg grating sensors*”, Optic and Lasers in Engineering, vol. 41, p. 1-18, 2004.
- ZHANG, Q., BROWN, D. A., KUNG, H., TOWNSEND, J. E., CHEN, M., REINHART, L. J., MORSE, T. F., “*Use of highly overcoupled couplers to detect shifts in Bragg wavelength*”, Electronics Letters, vol. 31, p. 480-482, 1995.



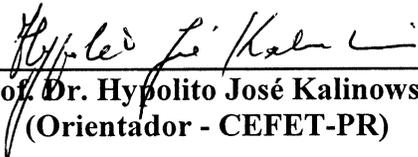
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENG^a ELÉTRICA E INFORMÁTICA INDUSTRIAL

“Monitoração de Vibrações de Estruturas com o Emprego de Sensores em Fibra Ótica”

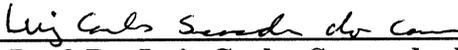
por

Jean Carlos Cardozo da Silva

Esta Tese de Doutorado foi apresentada no dia 28 de Janeiro de 2005, como requisito parcial para a obtenção do título de DOUTOR EM CIÊNCIAS – Área de Concentração: Informática Industrial. Aprovada pela Banca Examinadora composta pelos professores:



Prof. Dr. Hypolito José Kalinowski
(Orientador - CEFET-PR)



Prof. Dr. Luiz Carlos Scavarda do Carmo
(PUC-RIO)



Prof. Dr. Edilson Sérgio Silveira
(UFPR)



Prof. Dr. Elisabeth Penner
(CEFET-PR)



Prof. Dr. José Luis Fabris
(Coordenador do CPGEI)

Visto e aprovado para impressão:



Prof. Dr. José Luis Fabris
(Coordenador do CPGEI)

RESUMO:

Este trabalho tem por objetivo analisar as perspectivas do estudo de vibrações de estruturas, empregando sistemas sensores baseados em redes de Bragg em fibras óticas. O entendimento das vibrações nas estruturas possibilita o estudo de novos materiais e de novos sistemas construtivos que possam otimizar o dimensionamento e a segurança nos projetos de engenharia.

Para as medidas de vibração é apresentado um sistema de leitura de redes de Bragg que tem como características o baixo custo e a facilidade de implementação, quando comparado a outros instrumentos. O aparelho pode ser acoplado a sistemas de aquisição comerciais, pois o sinal analógico de saída está condicionado entre 0 V e 5 V. Os resultados obtidos demonstram a capacidade do sistema em monitorar vibrações em diferentes tipos de materiais, tais como: madeira, aço, concreto e osso. Os resultados das medições feitas com modelos de laboratório mostram-se promissores na análise de vibrações em estruturas, quando comparados aos obtidos por sensores comerciais dos tipos, extensômetro elétrico de resistência e acelerômetro. Para além de estruturas civis, foram realizados estudos para o desenvolvimento de uma nova técnica de ensaio, *in vitro*, para caracterizar um novo conceito de implante dentário.

Os resultados de ensaios de vibrações livres foram realizados com uma barra metálica, com vigas de madeira laminada colada, com vigas de concreto e implantes dentários onde as redes de Bragg foram empregadas. Esses resultados demonstram a capacidade do sensor em monitorar os efeitos de degradação das estruturas através de diferentes técnicas de análise modal.

PALAVRAS-CHAVE

Sensores Óticos, Redes de Bragg em Fibra Ótica, Vibrações em Estruturas, Implantes Dentários, Análise Modal.

ÁREA/SUB-ÁREA DE CONHECIMENTO

3.04.06.01-3: Teoria Eletromagnética, Microondas, Propagação de Ondas, Antenas

3.04.06.00-5: Telecomunicações

3.04.02.00-0: Medidas Elétricas, Magnéticas e Eletrônicas; Instrumentação

2005

N°: 009