

MONITORIZAÇÃO DE ESTRUTURAS DE
ENGENHARIA BASEADA EM REDES DE BRAGG EM
FIBRA ÓPTICA

CONTRIBUIÇÃO PARA A OPTIMIZAÇÃO DE DOIS
SISTEMAS DE INTERROGAÇÃO

JOAQUIM FERNANDO ALMEIDA ALVES

Tese submetida à Faculdade de Engenharia da Universidade do
Porto para a obtenção do grau de Doutor em Ciências de
Engenharia

Departamento de Engenharia Electrotécnica e Computadores
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Porto, 2007

Tese realizada sob a supervisão do

Doutor Armindo Luís Vilar Soares Lage

Professor Auxiliar

e do

Doutor Adriano da Silva Carvalho

Professor Associado

Departamento de Engenharia Electrotécnica e Computadores

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

à memória do meu *pai*,

à minha *mãe*,

à *Mónica* e aos *filhotes*

AGRADECIMENTOS

No final deste percurso gostaria de agradecer às muitas pessoas que me ajudaram a manter focado e que de uma forma ou doutra contribuíram para a conclusão deste trabalho.

Aos meus orientadores Professor *Armindo Lage* e Professor *Adriano Carvalho* pelo apoio, interesse e motivação constante, demonstrados ao longo de todo este percurso, o meu maior agradecimento.

Ao grupo de optoelectrónica do *INESC* e da *FCUP*, pelo suporte logístico no início dos trabalhos, e em particular ao Professor *José Luís Santos* por todo o seu apoio e competência.

Ao *Carlos Félix*, colega do *ISEP* e investigador do *LABEST*, pelo trabalho em conjunto e pelas frutuosas trocas de ideias.

Ao *Sr. Saldanha*, do departamento de Mecânica da *FEUP* que, pelo seu saber acumulado, contribuiu decisivamente para o desenvolvimento da estrutura mecânica do sistema de filtragem activa.

Aos meus *colegas do ISEP* que, mesmo à distância, foram mantendo aquela palavra de grande incentivo.

A todos os colegas da *FEUP*, e em particular a todo o grupo que circulou pelo *I104*, pela sã convivência mantida ao longo deste período. Por ordem de proximidade física ao meu posto de trabalho, *Rui Chibante*, *Paulo Costa*, *Eusébio Nunes*, *Nuno Silva*, *César Meireles*, *Manuel*, *Henrique*, *Rui Moreira*, *José Paulo* e, distinguido pela relação em termos de trabalho, o *Vítor Oliveira*.

À *Mónica* por acreditar sempre. Pelo seu constante apoio e muitas vezes sacrifício em me dispensar de muitas outras pequenas e grandes tarefas. Aos seus *pais* e *irmãos*. Ao *Gonçalo* e ao *Guilherme* pelo consolo que me proporcionaram nas suas *nangues* brincadeiras de criança.

À minha Mãe, à *Zinha* e ao *Daniel*, ao *Pedro* e à *Inês* e à *vóvó velhinha*: a minha família lá de casa, por me manterem sempre referenciado.

Ao *ISEP* por ter criado as condições para que este trabalho se realizasse.

Ao *ISR-Porto* e ao *LOME* – Laboratório de Óptica e Mecânica Experimental, pela disponibilidade de meios logísticos, equipamentos e instrumentos de medição.

Finalmente, em relação aos apoios financeiros, gostaria de agradecer ao *PRODEP* pela bolsa concedida, permitindo-me dedicação exclusiva à investigação neste período de 3 anos, ao *ISR-Porto*, e à *Fundação para a Ciência e Tecnologia*.

RESUMO

As redes de Bragg em fibra óptica têm-se afirmado nos campos da instrumentação e das telecomunicações graças às suas características intrínsecas. São propriedades como a insensibilidade à radiação electromagnética, peso e dimensões reduzidas e facilidade de multiplexagem que tornam atractivos os sensores baseados neste tipo de rede de difracção para aplicações de monitorização de estruturas de engenharia.

No entanto, para a sua efectiva aplicação é necessário que os sistemas de interrogação apresentem, eles próprios, boas características de medição. Assim, sensibilidade, linearidade, resolução, gama e multiplexagem são factores decisivos na escolha destes sistemas. Mas, são também as propriedades como portabilidade, robustez e, principalmente, custos associados, que permitirão que os sistemas de monitorização ópticos consigam estabelecer-se efectivamente.

Neste quadro, o objectivo central deste trabalho é o de desenvolver novas soluções para os sistemas de interrogação que permita aumentar a sua aplicabilidade.

No início do trabalho, e depois de apresentados os vários tipos de sensores ópticos, são caracterizados os sensores de Bragg em fibra óptica no âmbito das necessidades para a sua aplicação em instrumentação, nomeadamente da sensibilidade à deformação e temperatura. São ainda analisados muitos dos sistemas de interrogação reportados ao longo da última década e meia. Destes, são definidos dois métodos a serem desenvolvidos e optimizados: o primeiro, baseado na interrogação espectral passiva por analisador de espectro óptico; o segundo, baseado na filtragem activa através de sintonia de uma segunda rede de Bragg.

Utilizando um espectrómetro comercial de baixo custo, baseado em tecnologia CCD, é desenvolvido um algoritmo de resolução ao sub-*pixel* capaz de incrementar a resolução física do analisador de espectros em cerca de duzentas vezes. O sistema, composto ainda por uma fonte de espectro largo, apresenta características de medição apropriadas à sua aplicação em monitorização de estruturas, nomeadamente em linearidade, resolução e taxa de aquisição. A multiplexagem ficou também demonstrada com a aquisição simultânea das grandezas de deformação e de temperatura.

Devido à sensibilidade do espectrómetro à polarização, e de forma a tornar o sistema imune às perturbações ou variações mecânicas, nomeadamente sobre as fibras ópticas de ligação entre o sensor e o espectrómetro, foi desenvolvido um sistema de despolarização da luz reflectida pela rede de difracção de Bragg. Este é um elemento essencial ao sistema de medição.

O segundo sistema de interrogação desenvolvido é baseado na filtragem da reflexão do sensor de Bragg, através de uma segunda rede de difracção de Bragg sintonizada por um sistema de actuação piezoeléctrico e com medição de posicionamento por sensor capacitivo de elevada resolução. É um sistema de elevada sensibilidade, sem a necessidade de complexos e dispendiosos sistemas ópticos de medição de posicionamento.

A validação dos sistemas de interrogação desenvolvidos é demonstrada por resultados experimentais, obtidos quer em ensaios de calibração laboratoriais, quer em várias aplicações de monitorização em estruturas de engenharia civil, onde os sensores de Bragg foram instalados em diferentes tipos de cabeças sensoras.

RÉSUMÉ

Les réseaux de Bragg en fibre optique se sont affirmés dans les champs de l'instrumentation et des télécommunications grâce à ses caractéristiques intrinsèques. Insensibilité à la radiation électromagnétique, du poids et des dimensions réduits et de la capacité de multiplexage ce sont des propriétés qui placent les senseurs ayant pour base ce type de réseau de diffraction, à l'avant garde vis-à-vis à quelque autre modèle de senseurs pour surveillance de structures d'ingénierie.

Toutefois, pour que cette application devienne efficace il faut que les systèmes d'interrogation présentent aussi des caractéristiques compatibles. Les capacités de mesure comme la sensibilité, la linéarité, la résolution, la gamme de mesure et multiplexage ce sont des facteurs décisifs dans le choix de ces systèmes. Mais, ce sont aussi les propriétés comme la portabilité, la robustesse et surtout les coûts y associés qui permettront que les systèmes de surveillance optiques arrivent à dépasser les systèmes plus classiques, surtout ceux fondés en extensomètre électrique.

Dans ce contexte, l'objectif principal du travail est de développer de nouvelles solutions pour les systèmes d'interrogation qui peuvent les mener au même niveau de l'applicabilité que les sondes de Bragg.

Au début de cette thèse, et après avoir été présentés les différents modèles de senseurs optiques, on a fait une caractérisation des senseurs de Bragg en fibre optique dans le champ d'action des besoins pour son application en instrumentation, surtout de sensibilité à la déformation et température. A posteriori, on a étudié beaucoup des systèmes d'interrogation reportés le long de la dernière dizaine et demie d'années. Là, on en définit la méthode d'interrogation spectrale passive par analyseur de spectre optique comme base de départ ayant comme but le développement du système d'interrogation des senseurs de Bragg.

En employant un spectromètre commercial de bas coût, assis en technologie CCD, on arrive à un logarithme de résolution au sub-*pixel* capable d'incrémenter deux cent fois à peu près la résolution physique de l'analyseur de spectraux. Le système composé encore par une source large spectre, présente des capacités de mesure qui le rend doué à réaliser des mesures de réalisation de structures, surtout de résolution et taux d'acquisition. La capacité de multiplexage a été démontrée, avec l'acquisition simultanée des grandeurs de déformation et de température.

Dû à la sensibilité du spectromètre à la polarisation, a été développé un système qui rend le système de mesure immunisé contre des perturbations ou des variations mécaniques, à savoir au-dessus des fibres optiques liant la sonde au spectromètre. Ce système est essentiel et accomplit la dépolarisation de la lumière réfléchiée par le réseau de diffraction de Bragg.

Le deuxième système d'interrogation développé est basé sur le filtrage de la réflexion de sonde de Bragg, en utilisant un deuxième réseau de Bragg en fibre, réglable avec un système piézoélectrique de mise en action. Une sonde capacitive est utilisée pour donner une mesure de précision élevée de la position et de la contrainte appliquée. Ainsi, c'a été développé un système de sensibilité élevé, sans le besoin de système optique complexe pour placer la mesure.

La validation du système d'interrogation développé est démontrée par des résultats expérimentaux, obtenus soit en essais de calibration soit en plusieurs applications de surveillance en structures d'ingénierie civil, où les senseurs de Bragg ont été installés en différents modèles de têtes senseurs.

ABSTRACT

Fiber Bragg gratings have been established in the instrumentation and telecommunications fields due to its intrinsic characteristics. Insensitivity to electromagnetic radiation, reduced weight and dimensions, and multiplexing capability are properties that place these diffraction gratings as a good choice when the application is to monitor engineering structures.

However, their effective application depends a lot on appropriated interrogation systems, with the same type of characteristics. Measure abilities such as sensibility, linearity, resolution, measurement range and multiplexing are decisive in the choice of any of these systems. However, they are properties like portability, robustness and mainly the associated costs that will enable optical monitoring systems to beat traditional systems, mainly the ones based on electrical sensors.

So, the main objective of the work is to develop new solutions for interrogation systems that allow high level of applicability for Bragg sensors.

At the beginning of the thesis, and after presenting several types of optical sensors, fiber Bragg sensors are characterized in the scope of its application in instrumentation systems, namely the characteristic of sensitivity to deformation and temperature. Later, the interrogation systems reported in the last 15 years are studied. They are established two methods to be developed and optimized: the first one based on passive spectral interrogation by an optical spectrum analyzer and the second one based on active filtering by a tuned fiber Bragg grating.

Using a low cost commercial spectrometer, based on CCD technology, a sub-pixel resolution algorithm was developed. This algorithm allows at increasing physical resolution of the spectrum analyzer by two hundred times. The system, which is also composed by a broad band optical source, presents measure capabilities that become it appropriate to structure monitoring, namely the resolution and acquisition rate. The multiplexing capacity is also demonstrated for simultaneous measurement of deformation and temperature.

Due to the polarization sensibility of the spectrometer, a system is developed to make the measurement system immune to mechanical perturbations or variations, namely over the optic fibers linking the sensor to the spectrometer. This essential system accomplishes the depolarization of the diffraction Bragg grating reflected light.

The second developed interrogation system is based on filtering of the Bragg sensor reflection, using a second fiber Bragg grating, tuned by a piezoelectrical actuation system. A capacitive sensor is used to give a high precision measurement of position, and applied strain. Therefore, it is developed a high sensitivity system, with no need for a complex optic system of positioning measurement.

The validation of the interrogation system developed is demonstrated by experimental results, obtained in laboratorial calibration tests and in several applications of monitoring in civil engineering structures, where the Bragg sensors were installed in different types of sensor heads.

ÍNDICE

Agradecimentos	vii
Resumo	ix
Índice	xiii
Lista de Figuras	xvii
Lista de Símbolos e Acrónimos	xxv
1 Introdução	1
1.1 Motivação	2
1.2 Objectivos	3
1.3 Estrutura da Tese	3
1.4 Contribuições.....	5
2 Sensores de Bragg em Fibra Óptica	7
2.1 Introdução	7
2.1.1 Classificação dos Sensores Ópticos	8
2.1.2 Comparação dos Sensores Ópticos	10
2.2 Redes de Bragg em Fibra Óptica	12
2.2.1 FOTOSSENSIBILIDADE.....	15
2.2.2 Técnicas de FOTOSSENSIBILIZAÇÃO	16
2.3 Caracterização das Redes de Bragg	18
2.3.1 Variantes das Redes de Bragg	23
2.4 Métodos de Inscrição de Redes de Bragg em Fibra Óptica.....	26
2.4.1 Interferómetro	26
2.4.2 Máscara de Fase.....	28
2.4.3 Outros Métodos de Inscrição	30
2.5 Sensibilidade à Deformação e à Temperatura.....	31
2.5.1 Compensação da Temperatura nos Sensores Ópticos.....	33
2.6 Sensibilidade a Outras Grandezas Físicas	36
2.7 Conclusão do Capítulo	36
3 Desmodulação de Sensores de Bragg em Fibra Óptica	39
3.1 Introdução	39
3.2 Desmodulação Espectral Passiva	41
3.2.1 Analisador de Espectro Óptico	41
3.2.2 Filtragem Espectral	42
3.2.2.1 Filtro Espectral Edge	42
3.2.2.2 Acoplador com Divisão de Comprimentos de Onda.....	45
3.2.2.3 Redes de Período Longo (LPG)	46
3.3 Desmodulação Espectral Activa – Filtro Sintonizável de Banda-Estreta	47
3.3.1 Técnicas de Controlo da Sintonia	48

3.3.2	Filtro FBG Sintonizável.....	49
3.3.3	Filtro Fabry-Perot (FFP) em Fibra Óptica.....	52
3.3.4	Filtro Acustico-Óptico Sintonizável (AOTF).....	53
3.4	Desmodulação Interferométrica	56
3.5	Desmodulação por Laser Sintonizável	58
3.6	Multiplexagem de Sensores de Bragg.....	59
3.6.1	Multiplexagem por Divisão de Comprimento de Onda (WDM)	61
3.6.2	Multiplexagem por Divisão Temporal (TDM).....	62
3.6.3	Multiplexagem Combinada TDM e WDM.....	64
3.6.4	Multiplexagem por Divisão Espacial (SDM)	65
3.7	Conclusão do Capítulo.....	66
4	Sistema de Desmodulação Baseado em Espectrómetro CCD	69
4.1	Introdução e Motivação.....	69
4.1.1	Sistemas Espectrométricos.....	69
4.1.2	Considerações sobre o Espectrómetro utilizado	76
4.1.3	Motivação	79
4.2	Algoritmo de Determinação do Comprimento de Onda de Bragg.....	79
4.2.1	Algoritmo de Detecção do Centro de Massa (ADCM)	80
4.2.2	Algoritmo de Aproximação a uma Curva (AAC)	82
4.2.3	Algoritmo “Dois-Ajustes” (ADA).....	83
4.2.4	Análise da Resposta dos 3 Algoritmos – Ensaios de Calibração	83
4.2.4.1	Algoritmo de Detecção do Centro de Massa	84
4.2.4.2	Algoritmo de Aproximação a uma Curva.....	85
4.2.4.3	Algoritmo de “Dois-Ajustes”.....	85
4.2.5	Algoritmo de Detecção do Centro de Massa II (ADCM II)	86
4.3	Ensaios Experimentais de Calibração	90
4.3.1	Calibração em Plataforma de Aplicação de Deformação.....	90
4.3.2	Calibração em Varão Instrumentado	93
4.3.3	Calibração em Prismas de Betão.....	98
4.4	Protótipo da Unidade de Interrogação.....	103
4.5	Conclusão do Capítulo.....	106
5	Sensibilidade a Perturbações Mecânicas na Transmissão Óptica	109
5.1	Polarização da Luz	109
5.1.1	Luz Monocromática	110
5.1.2	Luz Policromática	111
5.1.2.1	Medição do Grau de Polarização.....	115
5.2	Necessidade de Despolarização da Luz.....	116
5.3	Ensaios de Verificação de Polarização	117
5.3.1	Grau de Polarização da Resposta do Sensor de Bragg	118
5.3.2	Grau de Sensibilidade à Polarização do Espectrómetro.....	121
5.3.3	Dispositivo de Varrimento de Estados de Polarização.....	122
5.4	Métodos de Despolarização.....	126
5.4.1	Despolarização Passiva – Despolarizador de Lyot.....	127
5.4.2	Despolarização Activa.....	128
5.5	Despolarização Activa com Cilindro Piezoelétrico.....	131
5.5.1	Parametrização do Despolarizador.....	134
5.5.2	Quantificação da Despolarização Introduzida	136
5.5.2.1	Despolarizador Inactivo.....	137

5.5.2.2	Despolarizador Activo	137
5.6	Conclusão do Capítulo	139
6	Sistema de Desmodulação Baseado em Filtro Sintonizável com Rede de Bragg	141
6.1	Introdução e Motivação	141
6.2	Dispositivos de Aplicação de Deformação	142
6.2.1	Sintonização por Indução Térmica	142
6.2.2	Sintonização por Deformação Mecânica	143
6.2.3	Elementos Electrostrictivos – Piezoeléctricos	145
6.3	Implementação do Sistema	149
6.3.1	Requisitos e Especificação do Sistema	149
6.3.1.1	Força a Aplicar	150
6.3.1.2	Alimentação do Actuador	151
6.3.1.3	Regime Dinâmico	152
6.3.1.4	Condicionamento de Sinal	152
6.3.1.5	Conversão Analógico-Digital	152
6.3.1.6	Actuador Piezoeléctrico Seleccionado	152
6.3.2	Sensor de Posicionamento	153
6.3.3	Plataforma de Aplicação de Deformação	155
6.3.4	Sistemas de Instrumentação: Sensorização e Controlo	158
6.3.4.1	Aquisição e Controlo	158
6.3.4.2	Condicionamento de Sinal	159
6.3.4.3	Fontes de Alimentação CC	161
6.4	Resultados Experimentais	162
6.4.1	Calibração do Sensor de Posicionamento	163
6.4.1.1	Método de Calibração	163
6.4.1.2	Curva de Calibração do Sensor Capacitivo	165
6.4.1.3	Sensibilidade e Estabilidade do Sensor Capacitivo	167
6.4.2	Medição do Ponto de Sintonia	168
6.4.2.1	Resultados de Simulação	168
6.4.2.2	Resultados Experimentais	170
6.4.3	Medição de Deformação	174
6.5	Conclusão do Capítulo	175
7	Aplicações do Método de Desmodulação Baseado em Espectrómetro CCD	177
7.1	Introdução	177
7.2	Ensaio de Dois Degraus da Bancada do Estádio do Dragão	178
7.2.1	Cabeça Sensora do Tipo «Clip» - Caracterização e Calibração	178
7.2.2	Ensaio Dinâmico da Estrutura de Engenharia Civil	182
7.3	Projecto de Investigação POCTI	184
7.3.1	Aplicação de Pré-Esforço	187
7.4	Projecto SMARTE	190
7.4.1	A Cabeça Sensora	191
7.4.2	Ensaio Experimentais de Calibração	193
7.4.2.1	Avaliação do Sensor de Temperatura	194
7.4.3	Aplicação em Obra	196
7.4.4	Resultados do Ensaio de Carga	198
7.4.4.1	Situação 1	200
7.4.4.2	Situação 2	201
7.4.4.3	Situação 3	202
7.4.4.4	Situação 4	202
7.5	Conclusão do Capítulo	205

8	Conclusões Finais e Perspectivas de Trabalho Futuro	207
8.1	Conclusões.....	207
8.2	Trabalho Futuro	209
	Referências	211
A	Inscrição das Redes de Bragg	221
A.1	Máscara de Fase	221
A.2	Hidrogenação.....	223
B	Características do Equipamento Óptico Utilizado	224
B.1	Espectrómetro StellarNet EPP-2000	224
B.2	Fonte Óptica – SLD-381-MP2-DIL-SM.....	226
C	Plataforma de Ensaio e Calibração	228
D	Diagrama de Fluxo do Algoritmo Utilizado no Software desenvolvido	230

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Classificação dos sensores para monitorização de estruturas. Exemplos de sensores pontuais e distribuídos.....	9
Figura 2.2 Sensores ópticos: (a) intrínsecos e (b) extrínsecos	10
Figura 2.3 Secção recta de uma fibra óptica e respectivo perfil do índice de refração.....	14
Figura 2.4 Índice de refração, n , e índice de grupo, N , para sílica pura a 20 °C	15
Figura 2.5 Dinâmica de crescimento da amplitude do índice de refração para uma fibra codopada com germânio e estanho, em três diferentes situações	17
Figura 2.6 Representação conceptual do princípio de funcionamento de uma rede de Bragg em fibra óptica	18
Figura 2.7 Variação do índice de refração do núcleo da fibra óptica na região que constitui a rede de Bragg.....	19
Figura 2.8 Luz emitida e reflectida no núcleo de uma fibra óptica por uma rede de difracção de Bragg.....	20
Figura 2.9 Espectro de reflexão de uma rede de Bragg uniforme.....	22
Figura 2.10 Espectro de reflexão de uma rede de Bragg (—), obtido com o analisador de espectros óptico (Anritsu [MS9780A]) e respectivo ajuste Gaussiano (x)	23
Figura 2.11 Rede de Bragg enviesada. O padrão de franjas inscritas no núcleo apresenta um ângulo diferente de 90° em relação ao eixo da fibra óptica.....	23
Figura 2.12 Diferentes tipos de redes de Bragg, classificados de acordo com o tipo de variação do índice de refração (Δn) ao longo do eixo da fibra (z) : (a) variação uniforme com valor sempre superior ao n_{nuc} inicial; (b) variação <i>chirped</i> ; (c) apodisado com função Gaussiana; (d) apodisado com variação sinusoidal e valor médio nulo; (e) superestrutura ou amostrada.....	25
Figura 2.13 Interferómetro ultravioleta para inscrição de redes de Bragg em fibra óptica	26
Figura 2.14 Esquema holográfico de inscrição de redes de Bragg, apresentado em 1983 por Caponi e Bernardi [Caponi, 1983].....	28
Figura 2.15 Modelo de uma máscara de fase	28
Figura 2.16 Inscrição de uma rede de Bragg em fibra óptica pelo processo de máscara de fase	29
Figura 2.17 Variação do comprimento de onda central (λ_B) de resposta de uma rede de Bragg em fibra óptica.....	31
Figura 2.18 Sensor FBG de temperatura encapsulado em tubo capilar.....	34
Figura 3.1 Modelo de desmodulação espectral passiva com utilização de um OSA	41
Figura 3.2 Analisador de espectro óptico (OSA) – Anritsu [MS9780A].....	42
Figura 3.3 Modelo de desmodulação com utilização de um filtro espectral <i>Edge</i>	42
Figura 3.4 Característica da resposta de um filtro espectral <i>Edge</i>	43
Figura 3.5 Curvas de resposta de vários filtros espectrais NIR [Andover, 2005].....	44
Figura 3.6 Modelo de desmodulação com utilização de um acoplador de divisão de comprimento de onda	45
Figura 3.7 Resposta de ambos os fotodetectores utilizando o acoplador de divisão de comprimento de onda.....	45
Figura 3.8 Modelo de desmodulação com utilização de duas redes de período longo (LPG's).....	46
Figura 3.9 Função espectral, em transmissão, dos dois LPG's utilizados no esquema da Figura 3.8	46
Figura 3.10 Modelo de desmodulação com filtragem sintonizável de banda estreita – montagem em reflexão	47

Figura 3.11 Modelo de Interrogação por Filtro Sintonizável – montagem em transmissão com varrimento completo da gama espectral.....	48
Figura 3.12 Modelo de desmodulação com Filtro Sintonizável – utilização de um sinal de <i>dither</i>	49
Figura 3.13 Utilização de um <i>dither</i> como forma de incremento da exactidão de medição com o filtro sintonizável.....	50
Figura 3.14 Largura da cavidade FFP com controlo de posicionamento.....	52
Figura 3.15 Resposta espectral em transmissão de um Filtro Fabry-Perot.....	53
Figura 3.16 Esquema de configuração e princípio de funcionamento de um filtro sintonizável acustico-óptico.....	54
Figura 3.17 Diagrama simplificado do método de desmodulação por filtragem sintonizável acustico-óptico [Measures, 2001].....	55
Figura 3.18 Esquema de um sistema interferométrico de Mach-Zehnder utilizado na desmodulação de sensores FBG.....	56
Figura 3.19 Interferómetro inclinado de Twyman-Green iluminado por uma onda plana.	58
Figura 3.20 Sistema de desmodulação de sensores FBG baseado num díodo laser sintonizável de varrimento rápido.....	59
Figura 3.21 Multiplexagem série de redes de Bragg em fibra óptica.....	60
Figura 3.22 Multiplexagem paralela de redes de Bragg em fibra óptica.....	60
Figura 3.23 Esquema do sistema de multiplexagem série por divisão em comprimento de onda (WDM)	61
Figura 3.24 Esquema do sistema de multiplexagem paralela por divisão em comprimento de onda (WDM)	62
Figura 3.25 Esquema do sistema de multiplexagem série por divisão de tempo.....	63
Figura 3.26 Esquema do sistema de multiplexagem paralela por divisão de tempo	63
Figura 3.27:Esquema do método de multiplexagem mista TDM e WDM [Kersey, 1994].....	65
Figura 3.28 Esquema do modelo de multiplexagem por divisão espacial (SDM) de vários sensores FBG	66
Figura 4.1 Esquema do sistema de interrogação espectral passivo com utilização de um espectrómetro CCD. Representação do seu princípio básico de funcionamento.....	70
Figura 4.2 Representação esquemática da estrutura interna de um espectrómetro baseado em rede de difracção em transmissão e em <i>array</i> de fotossensores.....	71
Figura 4.3 (a) Ilustração do funcionamento e (b) Aspecto da luz difractada por uma rede de difracção côncava [StellarNet, 2005]	74
Figura 4.4 Esquema do funcionamento de um espectrómetro PGP [Christiansen, 2001].....	74
Figura 4.5 Esquema do modelo de interrogação baseado num espectrómetro com rede de difracção de Bragg enviesada [Simpson, 2003; Simpson, 2004].....	75
Figura 4.6 Registo da luz de um laser de HeNe com o espectrómetro EPP2000	77
Figura 4.7 Aberração do tipo coma.....	78
Figura 4.8 Efeito do alargamento de uma das bases da resposta espectral.....	79
Figura 4.9 Resposta de um sensor de Bragg registada pelo espectrómetro EPP2000. Intensidade (u.a.) <i>vs.</i> Comprimento de onda, λ (nm).....	81
Figura 4.10 Ajuste do conjunto de pontos obtidos com o espectrómetro a uma curva Gaussiana: ‘x’ – pontos recolhidos; ‘- - -’ – curva de aproximação	82
Figura 4.11 Ajuste a duas funções polinomiais independentes com o ponto de intercepção das duas curvas a definir o λ_B da medida.....	83

Figura 4.12 Resposta do sistema de desmodulação à deformação aplicada ao sensor de Bragg – ciclo de carga/descarga.....	84
Figura 4.13 Deformação registada vs. Deformação aplicada com utilização do algoritmo de cálculo do centro de massa.....	85
Figura 4.14 Resultado do ensaio de calibração com o algoritmo “Dois-Ajustes” Aplicação de um ciclo de carga/descarga.....	86
Figura 4.15 Influência da entrada no cálculo do ponto mais afastado do centro de massa	87
Figura 4.16 Representação da resposta espectral de uma rede de Bragg com λ'	88
Figura 4.17 Aquisição de dados para verificação da estabilidade de medição	89
Figura 4.18 Plataforma de aplicação de deformação controlada à fibra óptica	90
Figura 4.19 Respostas espectrais dos dois sensores de Bragg, registadas pelo espectrómetro CCD	91
Figura 4.20 Ensaio de calibração – sensor de Bragg de 810 nm. Aplicação de dois ciclos de carga/descarga (Def 1 e Def 2)	92
Figura 4.21 Ensaio calibração – Sensor de Bragg 816 nm. Aplicação de dois ciclos de carga/descarga (Def 1 e Def 2).....	92
Figura 4.22 Varão instrumentado com o Sensor em Fibra Óptica (SFO) e com o Extensómetro de Resistência Eléctrica (ERE)	93
Figura 4.23 Varão instrumentado: (a) Instalado na máquina de tracção; (b) Posicionamento dos três sensores de posicionamento	95
Figura 4.24 Resultados obtidos com os três sensores com a aplicação de onze ciclos de carga/descarga em tracção.....	95
Figura 4.25 Deformação medida pelos sensores durante a descarga do segundo ciclo. Comparação com o valor calculado (Teórico).....	96
Figura 4.26 Deformação registada pelos sensores durante o segundo ciclo de carga/descarga. Comparação com o valor calculado (Teórico)	97
Figura 4.27 Desvios dos valores registados em relação ao valor teórico calculado para o segundo ciclo de carga/descarga.....	97
Figura 4.28 Imagem de um Prisma, após a betonagem e em período de secagem.....	98
Figura 4.29 Esquema e dimensões (em mm) da cabeça multisensora de embeber no betão	98
Figura 4.30 Imagem da instalação do sensor de fibra óptica (SFO_810) na cabeça sensora.....	99
Figura 4.31 Prensa utilizada para a aplicação de compressão ao prisma de betão	100
Figura 4.32 Resultado da medição dos quatro sensores de deformação em dois ciclos de carga/descarga – visualização ao longo do tempo.....	100
Figura 4.33 Resultado das medições dos sensores de deformação para dois ciclos de carga/descarga – visualização em função da tensão aplicada.....	101
Figura 4.34 Desvios entre as medições obtidas com o sensor SFO_810 e os dois sensores instalados na cabeça sensora (EREC e SFO_1550)	102
Figura 4.35 Resultado da medição dos dois sensores de deformação para dois ciclos de carga/descarga – visualização ao longo do tempo.....	102
Figura 4.36 Resultado da medição dos dois sensores de deformação para dois ciclos de carga/descarga – visualização em função da tensão aplicada.....	103
Figura 4.37 Esquema de ligação dos vários módulos componentes da unidade de interrogação.....	104
Figura 4.38 Imagens do protótipo desenvolvido para a unidade de interrogação de sensores de Bragg	105
Figura 4.39 Imagem da interface gráfica da aplicação desenvolvida para comunicação e aquisição de dados	105

Figura 5.1 Componentes ortogonais da radiação monocromática	110
Figura 5.2 Representação gráfica da elipse de polarização e respectivos parâmetros	111
Figura 5.3 Representação gráfica de luz polarizada na esfera de Poincaré.....	114
Figura 5.4 Representação de luz parcialmente polarizada na esfera de Poincaré.....	115
Figura 5.5 Esquema da montagem para medição do grau de polarização	116
Figura 5.6 Esquema da montagem para medição do grau sensibilidade do espectrómetro à polarização.....	116
Figura 5.7 Montagem para verificação e medição do grau de polarização da resposta do sensor de Bragg.....	118
Figura 5.8 Imagens do (a) polarizador em fibra óptica e (b) circuitos de condicionamento e aquisição de dados.....	119
Figura 5.9 Gráfico do resultado da aplicação de stress à fibra: valores de potência (u.a.) da rede de Bragg obtidos com o fotodíodo, para a excursão 0-1000 μ m-0, com polarizador	120
Figura 5.10 Gráfico do resultado da aplicação de stress à fibra: valores de potência (u.a.) da rede de Bragg obtidos com o fotodíodo, para a excursão 0-1000 μ m-0, sem polarizador.....	121
Figura 5.11 Montagem para verificação e medição do grau de sensibilidade do espectrómetro à polarização da resposta do sensor de Bragg.....	121
Figura 5.12 Gráfico do resultado da aplicação de stress à fibra: espectro da rede de Bragg, para um ciclo de carga/descarga, 0-1000 μ m-0, com passos de 50 μ m	122
Figura 5.13 Gráfico do resultado da aplicação de stress à fibra: valores de potência (u.a.) da rede de Bragg, obtidos com o espectrómetro para as várias posições consideradas.....	123
Figura 5.14 Esquema da montagem do dispositivo de aplicação de tensão mecânica à fibra óptica.....	124
Figura 5.15 Fotografias do dispositivo de aplicação de tensão mecânica a um troço de fibra óptica monomodo	123
Figura 5.16 Esquema da variação das dimensões físicas da fibra óptica. Deformação axial dependente da distância entre os dois veios	124
Figura 5.17 Gráfico do resultado da aplicação de tensão à fibra: valores de potência (u.a.) da rede de Bragg, obtidos com o espectrómetro, para as várias posições consideradas.....	125
Figura 5.18 Gráfico do resultado da aplicação de tensão à fibra: valores de potência (u.a.) da rede de Bragg, obtidos com o espectrómetro, para as várias posições consideradas.....	126
Figura 5.19 Modelo de um despolarizador de Lyot formado por dois troços de fibra óptica birrefringente.....	127
Figura 5.20 Vista conceptual do <i>scrambling</i> temporal do estado de polarização.....	129
Figura 5.21 Diferentes variações do estado de polarização conseguidas durante o tempo de <i>scrambling</i>	129
Figura 5.22 Alteração das dimensões da fibra óptica bobinada (d_t) em torno de uma superfície circular de raio r_c	131
Figura 5.23 Fotografia do tubo cerâmico piezoelétrico após a soldagem das necessárias ligações eléctricas	132
Figura 5.24 Esquema da bobinagem da fibra óptica monomodo em torno do tubo piezoelétrico	133
Figura 5.25 Imagem do despolarizador implementado, baseado num tubo piezoelétrico e bobina de fibra óptica monomodo.....	133
Figura 5.26 Esquema da montagem utilizada para verificar o funcionamento do despolarizador desenvolvido.....	134
Figura 5.27 Respostas espectrais da rede de Bragg para a aplicação de um ciclo de tensão ao piezoelétrico em passos de 50 V	135
Figura 5.28 Resultado da medição dos λ_{Bi} do sensor de Bragg para um ciclo de carga/descarga, em passos de 50 V	135

Figura 5.29 Valores de potência das respostas espectrais para um ciclo de carga/descarga, em passos de 50 V.....	136
Figura 5.30 Espectros de reflexão da rede de Bragg para os diferentes estados de polarização – despolarizador inactivo	137
Figura 5.31 Resultado do deslocamento do veio móvel. Valores de potência dos espectros de resposta da rede de Bragg – despolarizador inactivo.....	138
Figura 5.32 Espectros de reflexão da rede de Bragg para os diferentes estados de polarização – despolarizador activo	138
Figura 5.33 Resultado do deslocamento do veio móvel. Valores de potência dos espectros de resposta da rede de Bragg – despolarizador activo	139
Figura 6.1 Esquema de ensaio do filtro FBG em fibra de polímeros, por variação térmica (elemento Peltier) [Liu, 2001]	143
Figura 6.2 Estrutura de aplicação de deformação para sintonia de rede de Bragg por um actuador magnético linear [Chan, 2002].....	145
Figura 6.3 Pontos de funcionamento Força/Alongamento de um piezoeléctrico	146
Figura 6.4 Histerese verificada na operação de um actuador piezoeléctrico [PI, 2005].....	147
Figura 6.5 Suportes de aplicação de deformação à fibra óptica embebida em resina.....	149
Figura 6.6 Representação da placa de resina epóxica com a fibra óptica (e respectiva rede de Bragg) embebida	150
Figura 6.7 Esquema e dimensões (em mm) do actuador piezoeléctrico P-843.30, da PI (Physik Instrumente)	153
Figura 6.8 Esquema e dimensões (em mm) das placas do sensor capacitivo (a) vista frontal (b) vista traseira (c) vista lateral.....	154
Figura 6.9 Esquema da estrutura de aplicação de tensão à fibra óptica através de um elemento piezoeléctrico. (a) vista lateral (corte A), (b) vista superior, (c) vista de topo (corte B)	155
Figura 6.10 Vista geral da estrutura de aplicação de deformação ao filtro rede de Bragg	157
Figura 6.11 Pormenores de construção: (a) Sensor capacitivo, veio e mola (b) Aperto do filtro FBG embebido em resina	157
Figura 6.12 Imagem da placa de aquisição e controlo da Texas Instruments MSC1210EVM	158
Figura 6.13 Diagrama de blocos simplificado da placa de aquisição e controlo MSC1210EVM	159
Figura 6.14 Imagem da placa de condicionamento de sinal desenvolvida	160
Figura 6.15 Circuito de condicionamento do sensor de posicionamento Ponte capacitiva com amplificador operacional.....	161
Figura 6.16 Diagrama de blocos do circuito de condicionamento para o sensor capacitivo	161
Figura 6.17 Diagrama de blocos da constituição das diferentes tensões de alimentação	162
Figura 6.18 Conversor CC/CC do tipo <i>step-up</i>	162
Figura 6.19 Esquema do interferómetro de Michelson para a calibração do sensor capacitivo	163
Figura 6.20 Imagem do interferómetro de Michelson utilizado na calibração do sensor capacitivo	164
Figura 6.21 Respostas do fotodíodo (V_{FD}) e sensor capacitivo de posição (V_{SC}) durante o ensaio de calibração.....	164
Figura 6.22 Curva de calibração do sensor capacitivo de posicionamento	165
Figura 6.23 Verificação de repetibilidade do ensaio de calibração do sensor capacitivo	166
Figura 6.24 Desvios absolutos dos dados de calibração: (a) à aproximação linear; (b) à aproximação com polinómio de 2º grau.....	167

Figura 6.25 Curva de sensibilidade do sistema de medição de posicionamento	167
Figura 6.26 Verificação da estabilidade do sistema de medição de posicionamento.....	168
Figura 6.27 Resultados da simulação efectuada com um filtro FBG com 55 % de reflectividade.....	169
Figura 6.28 Potência do sinal que chega ao fotodíodo. Resultado da simulação efectuada com um filtro FBG com 55 % de reflectividade	169
Figura 6.29 Resultados da simulação efectuada com um filtro FBG com 99 % de reflectividade.....	170
Figura 6.30 Potência do sinal que chega ao fotodíodo. Resultado da simulação efectuada com um filtro FBG com 99 % de reflectividade	171
Figura 6.31 Medição do espectro em transmissão do Filtro FBG-1 - Reflectividade 55%	171
Figura 6.32 Nível de potência recebida pelo fotodíodo, configuração em transmissão	172
Figura 6.33 Medição do espectro em transmissão do Filtro FBG-2 - Reflectividade 92%	172
Figura 6.34 Medição do nível de potência recebida pelo fotodíodo Configuração em reflexão.....	173
Figura 6.35 Medição do nível de potência recebida pelo fotodíodo - Configuração em reflexão – Verificação da coerência entre carga e descarga	173
Figura 6.36 Vista da mesa de ensaios experimentais com o filtro FBG sintonizável.....	174
Figura 6.37 Diagrama das ligações utilizadas para o ensaio de medição de deformação.....	174
Figura 6.38 Medição da deformação aplicada a um sensor FBG.	175
Figura 7.1 Fotografias do par de bancadas do estádio do Dragão montadas na estrutura de deformação estrutural.....	178
Figura 7.2 Representação esquemática do transdutor de posição com fibra óptica (dimensões em mm). (a) Vista lateral; (b) Vista superior.....	179
Figura 7.3 Imagens do transdutor de posição desenvolvido, montado na bancada de ensaios de calibração.....	179
Figura 7.4 Resultado de calibração do transdutor eléctrico – excursão total (-2000 - +2000 μm)	180
Figura 7.5 Desvios calculados entre as medições efectuadas com o transdutor eléctrico e a recta de aproximação	180
Figura 7.6 Resultados das medições do transdutor óptico com variação de posicionamento entre - 2000 e + 2000 μm	181
Figura 7.7 Desvios calculados entre as medições efectuadas com o transdutor óptico e as duas rectas de aproximação	181
Figura 7.8 Fotografias de dois transdutores tipo “clip”, instalados na secção central traseira de um dos degraus da bancada.....	182
Figura 7.9 Imagem do posto de observação utilizado durante o ensaio dos degraus da bancada.....	183
Figura 7.10 Gráfico de comparação de resultados entre os dois transdutores – ensaio de carga de um degrau da bancada	183
Figura 7.11 Desvios de posição entre as leituras do sensor óptico e o sensor eléctrico.....	184
Figura 7.12 Geometria e dimensões gerais do demonstrador	184
Figura 7.13 Localização das secções instrumentadas no demonstrador; posicionamento dos sensores de deformação na secção S3	185
Figura 7.14 Sensores de Bragg em fibra para monitorização de deformação e temperatura.....	186
Figura 7.15 Imagem da instalação dos vários sensores na secção 3 (S3)	186
Figura 7.16 Vista geral do demonstrador, em particular da secção 3 (S3), e do posto de observação (PO) antes da betonagem.....	187
Figura 7.17 Vistas do demonstrador após a betonagem e durante o período de secagem	188

Figura 7.18 Vista do demonstrador antes da aplicação do pré-esforço. Pormenores dos cordões de aplicação do pré-esforço.....	188
Figura 7.19 Resultado da monitorização durante a aplicação de pré-esforço ao demonstrador – comparação com os sensores eléctricos	189
Figura 7.20 Perfil longitudinal da ponte sobre o rio Sorraia, monitorizada por sensores ópticos	190
Figura 7.21 Imagem da ponte e viaduto da A13, sobre o rio Sorraia.....	190
Figura 7.22 Pormenor da instalação dos vários sensores na Secção S2. OAT – Sensor de deformação Óptico Alternativo com compensação de Temperatura. ES – Sensor de deformação Eléctrico. FO – Sensor de deformação em fibra óptica	191
Figura 7.23 Pormenor da instalação dos vários sensores na Secção S4.....	192
Figura 7.24 Vista geral da cabeça sensora S2-3I durante o processo construtivo.....	192
Figura 7.25 Geometria e localização dos sensores de deformação e temperatura na cabeça sensora S2-3I.....	193
Figura 7.26 Imagem de uma cabeça sensora antes de instalada em obra	193
Figura 7.27 Ensaio de calibração de OATS4-1I. Aplicação de 2 ciclos de carga/descarga.....	194
Figura 7.28 Imagem da cofragem do prisma com os sensores posicionados, antes da betonagem	195
Figura 7.29 Gráfico de comparação de resultados da medição de temperatura entre um sensor de Bragg e um PT100, durante a fase de betonagem de um prisma	195
Figura 7.30 Imagens da instalação de sensores na laje de fundo da ponte, secção S2	197
Figura 7.31 Imagens das caixas de ligação aos sensores embebidos: (a) antes da betonagem; (b) depois da betonagem.....	197
Figura 7.32 Imagens da secção S2: (a) durante a fase de construção; (b) no seu interior depois de terminada a construção, com o Posto de Observação (PO) instalado	198
Figura 7.33 Duas diferentes vistas do Posto de Observação (PO) instalado em obra.....	198
Figura 7.34 Imagens da fase de posicionamento “quase-estático” dos camiões sobre o tabuleiro da ponte.....	199
Figura 7.35 Resultado gráfico da deformação e temperatura, adquiridos ao longo de aproximadamente três horas.....	200
Figura 7.36 Resultados gráficos de deformação: posições quase estáticas. Comparação entre os três sistemas de monitorização	201
Figura 7.37 Resultados gráficos de deformação: ensaio dinâmico – passagens lentas. Comparação entre os três sistemas de monitorização	202
Figura 7.38 Resultados gráficos de deformação: ensaio dinâmico – passagens rápidas. Comparação entre os três sistemas de monitorização	203
Figura 7.39 Resultados gráficos de deformação: ensaio dinâmico – passagens com ressalto. Comparação entre os três sistemas de monitorização	203
Figura 7.40 Resultados gráficos de deformação: ensaio dinâmico – primeira e segunda passagens com ressalto. Comparação entre os três sistemas de monitorização.....	204
Figura 7.41 Resultados gráficos de deformação: ensaio dinâmico – terceira passagem com ressalto. Comparação entre os três sistemas de monitorização	205
Figura 7.42 Resultados gráficos de deformação: ensaio dinâmico – quarta passagem com ressalto. Comparação entre os três sistemas de monitorização	205
Figura A.1 Imagem da máscara de fase Ibsen para inscrição de redes de Bragg em fibra	222
Figura A.2 Reflexão de uma rede de Bragg produzida: reflectividade calculada de 3 % e $\lambda_B = 807,08$ nm	222
Figura A.3 Reflexão de uma rede de Bragg produzida: reflectividade calculada de 99,6 % e $\lambda_B = 810,15$ nm.....	223
Figura B.1 Imagem do espectrómetro StellarNet EPP-2000.....	224

Figura B.2 Curva de sensibilidade aos comprimentos de onda do <i>array</i> de CCD's Sony ILX511	225
Figura B.3 Curva de eficiência da rede difracção utilizada (H6) [Hamamatsu, 2005]	225
Figura B.4 (a) Imagem de uma fonte óptica SLD com caixa do tipo DIL; (b) Suporte de montagem para o SLD tipo DIL.....	226
Figura B.5 Espectro de saída característico de um SLD-381-HP (2 mW)	226
Figura B.6 Espectro de saída característico de um SLD-47-HP (10 mW)	227
Figura B.7 Fonte de alimentação do SLD com controlo da temperatura e corrente de funcionamento – PILOT-2	227
Figura C.1 Esquema de aplicação de deformação à fibra óptica em plataforma de ensaio	228
Figura C.2 Imagens da estrutura de aplicação de deformação (a) mesa de deslocamento e suporte fixo; (b) controlador de posição da mesa (Micro-Controle TL78)	229
Figura C.3 Gráfico representativo das respostas obtidas com o EPP2000 para três deformações distintas aplicadas ao sensor	229
Figura D.1 Diagrama de fluxo da aplicação desenvolvida em <i>Delphi</i> para comunicação com o espectrómetro e determinação dos λ_B	231

LISTA DE SÍMBOLOS E ACRÓNIMOS

Acrónimos

AAC	Algoritmo de Aproximação a uma Curva
ADA	Algoritmo “Dois-Ajustes”
ADCM	Algoritmo de Detecção do Centro de Massa
AOTF	<i>Acousto-optic Tunable Filter</i> – Filtro sintonizável acustico-óptico
CCD	<i>Charge Couple Device</i> (dispositivo semiconductor fotossensível)
CW	<i>Continuous Wave</i> – Onda constante
DCF	<i>Dispersion Compensation Fiber</i> – Fibra óptica de compensação de dispersão
DOP	<i>Degree Of Polarization</i> – Grau de Polarização
EFPI	<i>Extrinsic Fabry-Perot Interferometer</i> – Interferómetro de Fabry-Perot extrínseco
ERE	Extensómetro de Resistência Eléctrica
EREC	Extensómetro de Resistência Eléctrica de Colar
EREE	Extensómetro de Resistência Eléctrica de Embeber
FBG	<i>Fiber Bragg Grating</i> – Rede de difracção de Bragg em fibra óptica
FBGLS	<i>Fiber Bragg Grating Laser Sensor</i> – Sensor laser com redes de Bragg em fibra óptica
FBG _R	Rede de Bragg de referência
FDM	<i>Frequency Division Multiplexing</i> – Multiplexagem por Divisão de Frequências
FFP	Filtro Fabry-Perot
FPI	<i>Fabry-Perot Interferometer</i> – Interferómetro de Fabry-Perot
FSR	<i>Free-Spectral Range</i> – Gama espectral livre
FWHM	<i>Full-Width Half-Maximum</i> – Largura total a meia altura
GC-DFB	<i>Gain-Coupled Distributed Feedback</i> – Laser sintonizável
IFPI	<i>Intrinsic Fabry-Perot Interferometer</i> – Interferómetro de Fabry-Perot intrínseco
IV	Infra Vermelho
LMAq	Limite Mínimo de Aquisição
LPG	<i>Long Period Grating</i> – Rede de período longo
MEMS	<i>Micro-Electro-Mechanical Systems</i> – Dispositivos micro-electro-mecânicos
NP	Número de planos de modulação da rede de Bragg
OSA	<i>Optical Spectrum Analyzer</i> – Analisador de espectro óptico

OTDR	<i>Optical Time Domain Reflectometry</i> – Refletometria óptica no domínio dos tempos
PDA	<i>Photo Diode Array</i> – Conjunto linear de fotodíodos
PDL	<i>Polarization Dependent Loss</i> – Perdas ópticas dependentes da polarização
PGP	<i>Prism-Grating-Prism</i> – Espectrómetro com tecnologia Prisma-Rede de Difracção-Prisma
PMD	<i>Polarization Mode Dispersion</i> – Dispersão do modo de polarização
PO	Posto de Observação
SDM	<i>Spatial Division Multiplexing</i> – Multiplexagem por Divisão Espacial
SFBG	<i>Superstructure Fiber Bragg Grating</i> – Superestrutura de Rede de Bragg
SFO	Sensor de Fibra Óptica
SLD	<i>Superluminescent Diode</i> – Díodo Super Luminescente
SOP	<i>State Of Polarization</i> – Estado de polarização
TDE	Transdutor de Deformação Eléctrico
TDM	<i>Time Division Multiplexed</i> – Multiplexagem por divisão temporal
UV	Ultra Violeta
VCO	<i>Voltage Controlled Oscillator</i> – Oscilador controlado em tensão
VPH	<i>Volume Phase Holographic</i> (rede de difracção holográfica de variação interna de n)
WDM	<i>Wavelength Division Multiplexed</i> – Multiplexagem por divisão em comprimento de onda
WSFL	<i>Wavelength-Swept Fiber Laser</i> – Laser em fibra sintonizável em comprimento de onda

Símbolos

$\mathcal{A}$	Função Airy de um filtro Fabry-Perot
A	Área das placas do sensor capacitivo
A_i	Valores de vibração da malha de uma fibra óptica
$\mathbf{B}$	Vector campo magnético
c	Velocidade da luz no vazio
C_{MR}	<i>Crosstalk</i> de múltipla reflexão
d	Distância entre as placas do sensor capacitivo
D	Declive de uma função linear
$\mathbf{E}$	Vector campo eléctrico
E_a, E_b	Eixo maior e menor, respectivamente, de uma elipse
$\mathbf{E}_x, \mathbf{E}_y$	Componentes ortogonais do campo eléctrico

G_g	Factor <i>strain-gauge</i> de um sensor de Bragg
I	Intensidade luminosa
l_c	Comprimento de coerência da radiação luminosa
L_C	Largura da cavidade de um interferómetro de Fabry-Perot
L_r	Comprimento da rede de Bragg
L_{sep}	Distância de separação entre dois sensores adjacentes
n	Índice de refração do meio
n_{bai}	Índice de refração da bainha
n_{ef}	Índice de refração efectivo da fibra óptica
n_{nuc}	Índice de refração do núcleo
n_{UV}	Índice de refração da sílica para os ultravioletas
N	Índice de grupo
NP	Número de planos de modulação da rede de Bragg
m	Ordem de difracção de uma rede de difracção
M_i	Resultado da medida i de um sensor
p_{11}, p_{12}	Coefficientes de Pockel da fibra (coeficientes fotoelásticos)
p_e	Contribuição fotoelástica total sobre a fibra óptica
P_ε	Contribuição fotoelástica total sobre o sensor óptico
p_{11}, p_{12}	Coefficientes de Pockel (coeficientes fotoelásticos)
R	Reflectividade de um sensor FBG
R_{ef}	Coefficiente de reflectividade dos espelhos de um interferómetro de Fabry-Perot
s	Constante relacionada com a eficiência da rede de Bragg
S_ε	Sensibilidade à deformação do sensor óptico
S_α	Sensibilidade térmica aparente
S_0, S_1, S_2, S_3	Parâmetros de Stokes
S_T	Sensibilidade térmica do sensor óptico
t	Tempo
t_c	Tempo de coerência de radiação luminosa
T_{atraso}	Tempo de viagem de uma onda electromagnética entre sensores adjacentes
ν	Razão de Poisson
ν_{ent}	Tensão de entrada
$\nu_{saída}$	Tensão de saída

V	Volume
V_{sc}	Tensão de saída do sensor capacitivo de posicionamento
Y	Módulo de Young de um determinado material
z	Eixo de propagação de uma onda

Símbolos Gregos

α	Coefficiente de expansão térmica
γ	Ângulo de inclinação do padrão das redes enviesadas
ψ	Ângulo de azimute de uma elipse
χ	Ângulo de elipticidade
δ	Diferença de fase entre duas ondas
ω	Frequência angular
ν	Frequência dominante da luz emitida por uma fonte óptica
$\Delta\nu$	Largura de banda de uma fonte óptica
$\mathcal{E}_{ip}$	Elipticidade – relação entre os dois semi-eixos de uma elipse
ϵ_0	Permitividade do vácuo
Δt_c	Tempo de coerência de um feixe de luz
Δx_c	Comprimento de coerência de um feixe de luz
ΔT	Variação de temperatura
$\Delta \epsilon$	Variação de deformação
$\Delta \epsilon_T$	Deformação térmica aparente
$\Delta \lambda_B$	Desvio em comprimento de onda da resposta da rede de Bragg
$\Delta \lambda_C$	Largura espectral a meia altura do pico de ressonância de um FFP
$\Delta \lambda_{FSR}$	Largura espectral livre de um interferómetro de Fabry-Perot
$\Delta \lambda_{ma}$	Largura a meia altura da resposta espectral de uma rede de Bragg
$\Delta \xi_L$	Variação da grandeza de resposta de um sensor
Δn	Amplitude de modulação do índice de refração
Δn_{POL}	Diferença entre índices de refração dos dois estados de polarização ortogonal (AOTF)
ΔV	Variação do volume
Λ	Período de uma rede de difracção
Λ_A	Comprimento de onda acústico

A_{mf}	Período da máscara de fase
A_r	Período da rede de Bragg inscrita na fibra óptica
α_E	Coefficiente de expansão térmica do material onde a fibra óptica está embebida
α_F	Coefficiente de expansão térmica da fibra óptica
β	Constante de propagação do modo guiado
λ	Comprimento de onda da luz no vazio
λ_B	Comprimento de onda de Bragg
λ_i	Ressonâncias electrónicas de uma fibra óptica
λ_m	Comprimentos de onda de ressonância de um filtro Fabry-Perot
λ_{RES}	Comprimento de onda de ressonância de um AOTF
λ_{UV}	Comprimento de onda do feixe de radiação laser ultravioleta
θ	Ângulo de intercepção de dois feixes de radiação ultravioleta
θ_i	Ângulo de incidência do feixe de radiação ultravioleta
θ_m	Ângulo da ordem de refração m da máscara de fase
ϕ	Diferença de fase inicial entre as ondas dos dois braços de um interferómetro
ρ	Factor de deslizamento no funcionamento de um actuador piezoeléctrico
ξ_L	Grandeza de resposta de um sensor
τ_L	Duração do impulso laser
κ	Coefficiente de acoplamento
Γ	Fracção de potência do modo fundamental que se propaga no núcleo da fibra óptica
ζ	Coefficiente termo óptico da fibra óptica

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

Numa área tão abrangente como a das estruturas, o objectivo final é o desenvolvimento de estruturas mecânicas tão capazes de sentir e actuar como o corpo humano, estruturas não biológicas inteligentes, adaptáveis a qualquer modificação do meio envolvente. Sistemas sensores, actuadores, de processamento de sinal e de controlo, desenvolvidos de forma a cumprir todas as funções analógicas dos sistemas nervoso, muscular e cerebral humano, são portanto uma necessidade crescente.

Embora idealizadas há algumas décadas, técnicas associadas a este objectivo só recentemente começaram a ter uma maior expressão. Nos últimos anos foram concretizadas grandes evoluções neste domínio, quer por parte dos investigadores, quer por parte da própria indústria, como o demonstra as centenas de artigos científicos publicados em revistas e conferências. Aplicações no campo aeroespacial, espacial, naval, ferroviário, viário, indústria automóvel, biomedicina e construção civil, são exemplos onde estas estruturas inteligentes estão a ser cada vez mais implementadas. O propósito é a optimização do desempenho das estruturas, nomeadamente ao nível da segurança, fiabilidade e custo.

Da terminologia inglesa, o conceito aqui aplicado é o de *Structural Health Monitoring*, ou seja, a monitorização da robustez estrutural através de técnicas como a inspecção não destrutiva, controlo de qualidade, redução de ruído, isolamento às vibrações e controlo da forma e estrutura. A intenção não é apenas monitorizar a integridade da estrutura mas também alertar antecipadamente sobre possíveis falhas que possam provocar a interrupção de serviço. Com isto, consegue-se diminuir o tempo de indisponibilidade do sistema, resultando ainda numa superior eficiência dos materiais, maior segurança, fiabilidade e economia.

Várias tecnologias e vários materiais, como ligas com memória de forma, materiais piezoeléctricos, materiais electro e magnetostrictivos, fluidos electro e magnetoreológicos, materiais foto activos e dispositivos micro-electro-mecânicos (MEMS), têm vindo a ser usados no desenvolvimento de estruturas inteligentes. Estes materiais e tecnologias podem servir tanto como sensores como actuadores. No entanto, o maior impedimento à sua efectiva utilização reside muitas vezes nas suas dimensões ou

formato, que os torna incapazes de ser embebidos ou integrados nas estruturas a monitorizar. Assim, de entre todos os tipos de sensores, os sensores ópticos baseados em fibra óptica surgem como aqueles que mais facilmente permitem a sua integração em todos os ambientes e estruturas. As suas propriedades, nomeadamente o seu peso e dimensões reduzidas, insensibilidade à radiação electromagnética e elevada largura de banda, colocam-nos numa posição de supremacia funcional face aos tipos de sensores mais tradicionais. Mais ainda, as fibras ópticas têm vindo sustentadamente a diminuir os seus custos devido aos avanços tecnológicos e à sua cada vez maior aplicação, principalmente no domínio das telecomunicações, permitindo que os sensores em fibra óptica estejam cada vez mais competitivos economicamente. Uma das principais aplicações desta tecnologia tem sido a monitorização de estruturas de engenharia civil, juntamente com sistemas de produção industrial, química, ou até mesmo militares, através de sensores de deformação, temperatura, pressão, posição, aceleração, detecção de concentrações químicas, níveis de pH, humidade, ondas acústicas, campos eléctricos/magnéticos...

Em contraste com os sensores mais clássicos, que baseiam a sua informação principalmente na medição de parâmetros eléctricos, como a resistência ou capacidade, os sensores em fibra óptica usam uma variedade de fenómenos ópticos que ocorrem quando a fibra é sujeita a variações das suas próprias propriedades físicas ou químicas, ou do ambiente que a envolve. Esta tese ocupa-se particularmente com um tipo de sensores em fibra óptica: a rede de Bragg em fibra óptica (FBG). Ao longo do tempo têm sido comprovadas as propriedades deste tipo de sensor face aos restantes sensores, nomeadamente os sensores ópticos, onde o sensor de Fabry-Perot se mantém como o seu mais sério concorrente, considerando as propostas comerciais actualmente disponíveis no mercado.

1.1 Motivação

Depois de enumeradas as várias características importantes dos sensores ópticos, que os tornam elementos particularmente atractivos para a instrumentação de diferentes tipos de estruturas de engenharia, torna-se necessário o seu condicionamento através de um sistema de interrogação igualmente válido para que a sua aplicação seja efectiva. Um sistema de interrogação que apresente elevadas características de medição como sensibilidade, resolução, gama e multiplexagem é assim essencial. No entanto, outras propriedades como a portabilidade, a robustez e principalmente os custos associados influenciam fortemente a opção do sistema de monitorização quando em paralelo com os sistemas ópticos existem sistemas mais clássicos, baseados em extensometria eléctrica, com dezenas de anos de avaliação e provas dadas.

A instrumentação, e em particular a instrumentação óptica, constitui actualmente um imenso campo de trabalho dado a diversidade de aspectos, ligados quer ao desenvolvimento do sistema de interrogação, quer à própria aplicação dos sensores. Para o autor, docente do Departamento de Física do Instituto

Superior de Engenharia do Porto, na área disciplinar de Física Tecnológica, este projecto constituía assim uma possibilidade interessante de aumentar o conhecimento em torno da área científica de instrumentação.

1.2 Objectivos

Este trabalho tem como principal objectivo o estudo, projecto, desenvolvimento e validação de um sistema de interrogação de sensores de Bragg, baseado em técnicas de uso generalizado nos diversos domínios da Engenharia e de baixo custo.

Pela análise do estado da arte no domínio, foi entendido que a técnica utilizada seria baseada na análise espectral da luz de resposta da rede de Bragg através de um espectrómetro comercial de tecnologia CCD. Com esta técnica cumpre-se de imediato o objectivo de se conseguir um sistema de baixo custo. O seu desenvolvimento implica a aplicação de técnicas de processamento de sinal de forma a incrementar significativamente a resolução física de medida permitida pelo espectrómetro, de maneira a que este tenha uma utilização no âmbito pretendido, de monitorização estrutural. A evolução do trabalho obrigou no entanto a estabelecer outros objectivos, nomeadamente a investigação de um segundo método, em que a medição é suportada por filtragem sintonizável através do uso de uma segunda rede de Bragg.

A validação experimental é um factor importante, principalmente quando se refere a um sistema de medição de grandezas físicas, como a deformação e temperatura. Assim, além dos ensaios laboratoriais de calibração do sistema de interrogação e dos próprios sensores de Bragg, foram previstos ensaios em ambiente fora do laboratório de forma a validar as características de portabilidade e robustez do sistema.

1.3 Estrutura da Tese

Esta tese encontra-se organizada numa estrutura de 8 capítulos e 4 anexos.

O Capítulo 1, de introdução, começa por situar o nível de desenvolvimento e aplicação das redes de Bragg em fibra óptica no domínio da instrumentação. A motivação e os objectivos são explanados, bem como o plano de estruturação do documento. Termina com uma listagem das contribuições efectuadas pelo autor, em termos de apresentações e publicações de artigos técnicos em conferências, sobre o tema deste trabalho.

O Capítulo 2, depois de classificar os diferentes tipos de sensores ópticos, apresenta uma comparação onde se percebe que os sensores de Bragg em fibra óptica são um dos sensores que reúnem boas condições para se afirmarem definitivamente no campo da instrumentação de estruturas de engenharia.

As diferentes técnicas utilizadas na interrogação dos sensores de Bragg, para se obter a leitura da mensuranda aplicada, influenciam as características finais do sistema de monitorização. Assim, o Capítulo 3 apresenta um estudo dos principais métodos de interrogação, nomeadamente dos princípios de funcionamento e características principais de medição, como sensibilidade, resolução e taxa de aquisição.

Sendo uma das principais contribuições deste trabalho de doutoramento, no Capítulo 4 é descrito um sistema de interrogação baseado num espectrómetro CCD. Para além do modelo e estrutura do sistema, são apresentados os vários algoritmos implementados e testados. São expostos os resultados dos principais ensaios de calibração, que validam o princípio de funcionamento do algoritmo e do sistema de medição desenvolvido.

A abordagem sobre a despolarização da luz de reflexão das redes de Bragg, realizada no Capítulo 5, surge na estrutura desta tese depois de analisadas e quantificadas as perturbações induzidas nas leituras, originadas pelas tensões mecânicas exercidas sobre a fibra óptica. O capítulo descreve o desenvolvimento de um despolarizador activo, que reduz para valores desprezáveis os erros de medição.

No Capítulo 6 é descrito um segundo método de interrogação, baseado em filtragem espectral através de uma segunda rede de Bragg, estudado face ao objectivo último de trabalhar sistemas de baixo custo. Sendo um método de concepção simples, é um método que recorre à instrumentação electrónica, conseguindo assim aliar boas características de medição a portabilidade e baixo custo.

O Capítulo 7 resume os ensaios efectuados para validação do sistema de interrogação baseado num espectrómetro CCD comercial. São descritas várias aplicações, com os sensores de Bragg instalados em diversos tipos de cabeças sensoras, quer de embeber, de colar ou apertar à superfície das estruturas. Referência especial é feita à monitorização de uma ponte da auto-estrada sobre o rio Sorraia, trabalho desenvolvido em colaboração, onde os dados obtidos são representativos da elevada qualidade das medições efectuadas pelo sistema desenvolvido.

Finalmente, no Capítulo 8, depois de discutidos os vários aspectos ligados ao desenvolvimento do sistema de interrogação e respectivos ensaios de calibração e validação, são apontadas perspectivas para futuro do trabalho, dado ser um tema aberto e com muitos campos a serem explorados.

Foi deixado para anexo a abordagem de alguns aspectos, nomeadamente de aplicação, relativa a algumas fases do trabalho. Assim, no Anexo A é descrito o processo de inscrição das redes de Bragg, necessárias para a realização dos sensores. No Anexo B são descritos e apresentados os elementos ópticos, principais constituintes do sistema de interrogação, como o espectrómetro e a fonte óptica. Para a realização dos ensaios de calibração com o sistema desenvolvido foi implementada uma plataforma de testes, a qual é descrita no Anexo C. No último anexo, Anexo D, é apresentado o principal bloco de software

desenvolvido, através do diagrama de fluxo do algoritmo de comunicação entre o computador e o espectrómetro, e respectivo processamento de sinal.

1.4 Contribuições

O autor apresenta com esta tese diversas contribuições à optimização de sistemas de instrumentação baseados em redes de Bragg inscritas em fibra óptica. Essencialmente, estão associadas à prossecução dos objectivos do trabalho:

1. Baseado em técnicas de processamento de sinal, aplicadas sobre os dados recolhidos pelo espectrómetro e enviados para um computador portátil, foi desenvolvido um método de incremento da resolução física de medida. É assim possível incrementar a resolução de medição para valores superiores à da informação fornecida por cada *pixel* do *array* de CCD. O algoritmo de resolução ao sub-*pixel* desenvolvido, permite um incremento de cerca de 200 vezes face à resolução física permitida pelo analisador de espectros CCD, e reduz para valores desprezáveis as discontinuidades em termos de linearidade de resposta, verificadas com a utilização de outros algoritmos implementados e descritos na literatura.
2. Durante a realização do trabalho foi verificada a sensibilidade do analisador de espectros à polarização, nomeadamente da luz reflectida pelas redes de Bragg. Assim, foi desenvolvida uma técnica de despolarização da luz, que permite a melhoria do comportamento do sistema de medição, tornando-o insensível às perturbações, ou tensões mecânicas, exercidas sobre a fibra óptica de ligação entre o sensor e o espectrómetro.
3. Demonstração de resultados de acordo com o objectivo principal do trabalho, com a utilização do sistema de interrogação baseado no princípio da balança. Este método é implementado através de uma segunda rede de difracção de Bragg, sintonizada por um sistema de actuação piezoeléctrico e com medida de posicionamento por sensor capacitivo de elevada resolução. É um sistema que elimina a necessidade dos complexos sistemas ópticos de medição de posicionamento, implementados em outros trabalhos descritos na literatura.

Durante o período em que decorreu este trabalho foram efectuadas acções de comunicação e publicação no âmbito da tese, quer em conferências nacionais quer internacionais, as quais são listadas de seguida:

Desenvolvimento e Aplicação de um Sistema de Interrogação de Redes de Bragg, Joaquim Alves, Adriano Carvalho e Armindo Lage – Comunicação oral em Abril de 2003, Évora, Conferência Internacional: VII Congresso de Mecânica Aplicada e Computacional, Publicado nos *Proceedings* da conferência - pág. 1361-1368.

The Development and Application of a Fiber Bragg Sensor Interrogation System Using a Commercial CCD Spectrometer, Joaquim Alves, Carlos Félix, José Luís Santos, Adriano Carvalho e Armindo Lage – Apresentado em Setembro de 2003, em Guimarães, na Conferência Internacional: EuroSensors XVII – The 17th European Conference on Solid-State Transducers, Publicado nos Proceedings da conferência - pág. 212-215.

Fiber Bragg Sensor Interrogation System Based on a CCD Spectrometer, Joaquim Alves, José Luís Santos, Adriano Carvalho e Armindo Lage – Apresentado oralmente em Outubro de 2003 em Toronto, Canadá, na Conferência Internacional: IEEE Sensors 2003 – The 2nd IEEE International Conference on Sensors, Publicado nos Proceedings da conferência - pág. 909-913.

Monitorização de Estruturas de Engenharia Baseado em Redes de Bragg em Fibra Óptica. Comunicação oral no 1^o Encontro Ibérico de Investigadores em Óptica., na FEUP, Porto, em 22-23 de Outubro de 2004. Publicado em 1^o Encontro Ibérico de Investigadores em Óptica – Actas, pág. 48-52.

Sistema de Monitorização de Obras de Arte Aplicado à Ponte Sobre o Rio Sorraia, V. Perdição, P. Barros, I. Dias, D. Pereira, J. Alves, H. Sousa, J. C. Matos, J. A. Figueiras – Apresentado oralmente na Conferência: Betão Estrutural 2004, 17-19 Novembro de 2004, na FEUP, Porto.

Evaluation of a Fiber Bragg Sensor Interrogation System on a Commercial CCD Spectrometer, Joaquim Alves, Adriano Carvalho e Armindo Lage – Apresentado em Setembro de 2005, em Barcelona, Espanha, na Conferência Internacional: EuroSensors XIX – The 19th European Conference on Solid-State Transducers, Publicado nos Proceedings da conferência – CD – MP52.

Design of a PZT Based Tunable filter for an Interrogation System of Fiber Bragg Sensors, Vítor Oliveira, Joaquim Alves, Adriano Carvalho e Armindo Lage – Apresentado em Setembro de 2005, em Barcelona, Espanha, na Conferência Internacional: EuroSensors XIX – The 19th European Conference on Solid-State Transducers, Publicado nos Proceedings da conferência – CD – TP67.

Evaluation of an Interrogation System of Fiber Bragg Sensors Conditioned with a PZT Based Tunable Filter, Vítor Oliveira, Joaquim Alves, Adriano Carvalho e Armindo Lage – Apresentado em Novembro de 2005, em Irvine, Califórnia, Estados Unidos da América, na Conferência Internacional: IEEE Sensors 2005 – The 4th IEEE International Conference on Sensors.

SENSORES DE BRAGG EM FIBRA ÓPTICA

Neste segundo capítulo, depois de uma introdução onde foi definido o tema e estrutura da tese, é realizada uma abordagem aos Sensores de Rede de Bragg em Fibra Óptica (FBG). Depois de um enquadramento inicial deste tipo de sensores, são classificados e comparados entre vários tipos de sensores ópticos e é apresentada uma descrição mais pormenorizada das redes de Bragg. O fenómeno de fotosensibilidade das fibras ópticas é analisado, bem como as várias técnicas para o seu incremento. Depois de descritos os diferentes métodos de inscrição das redes de Bragg na fibra óptica, estas são caracterizadas e enumeradas as suas variantes. É analisada a sensibilidade à deformação e temperatura dos sensores FBG, sendo definidas as condições de variação da resposta destes sensores bem como a necessária compensação de temperatura.

2.1 Introdução

O interesse nos sensores ópticos continua a crescer. A contínua evolução das várias áreas a eles ligadas, nomeadamente da optoelectrónica, do processamento de sinal e em particular, da tecnologia das fibras ópticas, tem contribuído para a sua crescente implantação.

O desenvolvimento das fibras ópticas tem permitido a franca expansão dos sensores ópticos em todos os campos de aplicação, tendo, no entanto, no domínio das telecomunicações a sua área de eleição. O seu sucesso deve-se essencialmente às propriedades intrínsecas das fibras ópticas. Perdas de transmissão muito baixas (na ordem de 1 dB/km) e elevada linearidade óptica elegem-nas como o canal ideal para transmissão de informação. Aspectos como elevada resolução e exactidão de medição, alta sensibilidade e gama de medição, imunidade à radiação electromagnética e possibilidade de funcionamento nos ambientes mais hostis, tornam estes sensores muito interessantes para a monitorização de todos os tipos de estruturas. Outro dos aspectos não desprezáveis desta tecnologia está na redução do custo de implementação. A grande aplicação de fibras ópticas em serviços de telecomunicações, nomeadamente no fornecimento de serviços como a internet, tem feito baixar significativamente a despesa associada a esta tecnologia. É por tudo isto manifesto que as fibras ópticas têm, e terão, um lugar no mundo do

futuro. No entanto, e como em todos os domínios tecnológicos, serão as exigentes regras de mercado a definir a tecnologia mais válida.

Os avanços tecnológicos verificados na última década e meia na área da fotosensibilidade das fibras ópticas estão a permitir que estas se tornem ainda mais numa solução de eleição, permitindo a sua integração em sistemas de instrumentação, a operar simultaneamente como sensores e meio de comunicação, ou em sistemas de transmissão.

Algumas das aplicações mais usuais de sensores ópticos encontram-se nas indústrias de construção civil (pontes, edifícios, auto-estradas, barragens, etc.), espacial e aeroespacial. Ainda que menos frequentes, estes sensores podem também ser encontrados em aplicações navais, ferroviárias, automóvel, indústrias de energia (geração e distribuição), petrolífera (exploração, armazenamento e distribuição), mineira, biomédica, etc.

2.1.1 Classificação dos Sensores Ópticos

Antes de uma descrição pormenorizada do sensor utilizado neste trabalho, no âmbito da monitorização estrutural, é realizado um enquadramento prévio dos vários tipos de sensores ópticos disponíveis.

A primeira classificação que se poderá efectuar corresponde à divisão entre sensores de curto e longo comprimento de medição (Figura 2.1). Dentro dos sensores de **curto comprimento de medição** encontram-se os sensores clássicos como os extensómetros de resistência eléctrica e os termopares. Estes são geralmente referidos como sensores pontuais, ou discretos, e tipicamente medem parâmetros físicos com extensões de apenas alguns milímetros, até não mais do que 20 mm. Os sensores de **longo comprimento de medição**, por seu lado, têm comprimentos de medição que podem variar desde alguns centímetros até algumas centenas de metros, embora o mais normal seja que a distância de medição não ultrapasse os 5 m [Mrad, 2002]. Estes sensores são conhecidos como sensores distribuídos, integradores ou de média.

Se vários sensores pontuais forem usados, o sistema adquire a classificação de sistema quase-distribuído, que pode ser designado também por sistema multiplexado ou multiponto. Podem ainda ser utilizadas abordagens híbridas que englobem sensores integradores com sensores multiplexados.

Outra possível classificação para os sensores passa pela distinção entre sensores **intrínsecos e extrínsecos**. Esta distinção é referida consoante a região onde a grandeza a medir é sentida, no interior ou no exterior da fibra óptica, respectivamente. No modo intrínseco (directo), a própria fibra óptica funciona como elemento sensor, ou seja, actua simultaneamente como transdutor e meio de comunicação (Figura 2.2 (a)). Os sensores deste tipo apresentam a vantagem de serem imunes a

ambientes sujos, já que o caminho óptico é fechado. Exemplos deste tipo de sensor são as redes de Bragg em fibra óptica (FBG) e os interferómetros intrínsecos de Fabry-Perot (IFPI). No modo extrínseco (indirecto), a fibra óptica actua apenas como meio de comunicação ou meio de transmissão da luz. O elemento sensor recebe a luz da fibra óptica, altera-a consoante a perturbação física que esteja a sofrer e reencaminha-a para o fotodetector, Figura 2.2 (b). O efeito óptico ocorre portanto num meio diferente da fibra óptica. Um exemplo de um sensor extrínseco é o interferómetro extrínseco de Fabry-Perot (EFPI).

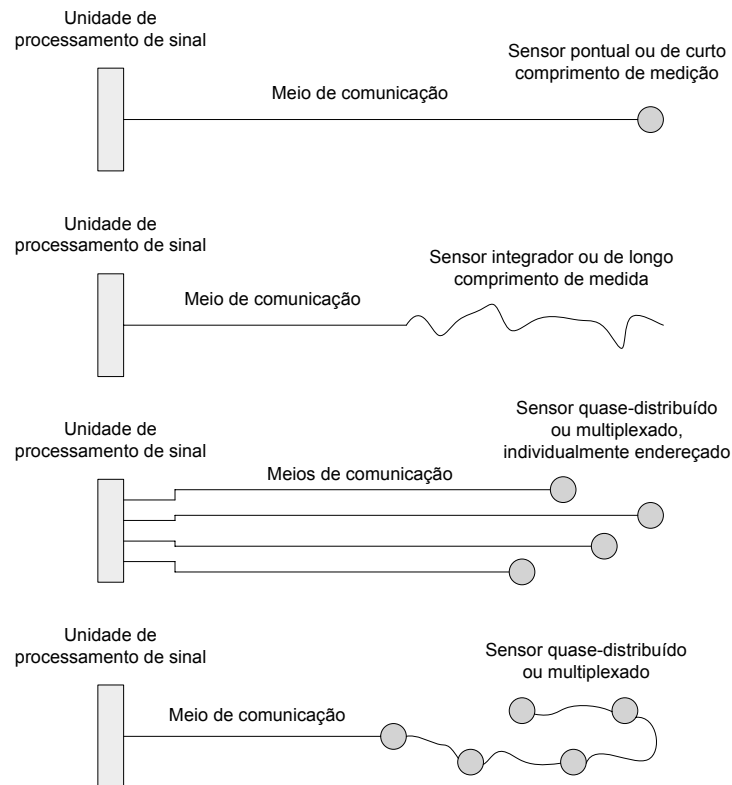


Figura 2.1 Classificação dos sensores para monitorização de estruturas. Exemplos de sensores pontuais e distribuídos

Algumas vantagens são tipicamente apontadas aos sensores do tipo intrínseco face aos do tipo extrínseco [Mrad, 2002]:

- Maior sensibilidade;
- Maior facilidade de multiplexagem;
- Eliminam as dificuldades de ligação das fibras ópticas, que existem nos sensores extrínsecos;
- Menor tamanho, o que implica menor intrusão e menos dificuldades para serem embebidos.

De um ponto de vista comercial, e pelas razões apontadas, os sensores do tipo intrínseco tendem a ser mais robustos e mais versáteis na sua instalação. Estas vantagens conseguem superar um dos seus aspectos mais negativos, o facto de apresentarem um maior investimento financeiro em relação aos sensores do tipo extrínseco [Mrad, 2002].

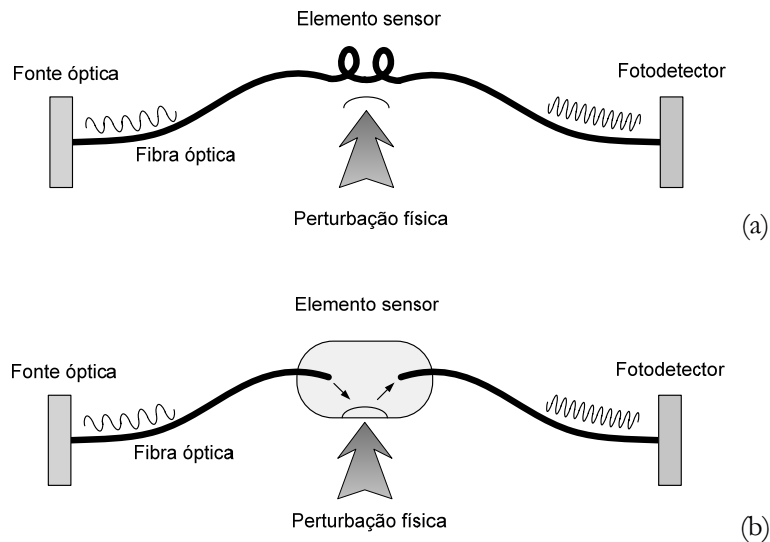


Figura 2.2 Sensores ópticos: (a) intrínsecos e (b) extrínsecos

Um último tipo de classificação dos sensores ópticos pode ser feita relativamente ao seu mecanismo de transdução. É o mecanismo de transdução que altera as propriedades da luz transmitida, ou reflectida, consoante a perturbação física provocada, ou sentida. Assim, podem ser definidos sensores de intensidade, polarização, fase e comprimento de onda, consoante a modulação óptica aplicada.

A Tabela 2.1 resume estas técnicas de modulação, bem como os respectivos mecanismos físicos e métodos de medição. Estas técnicas, bem como as respectivas aplicações comerciais, serão abordadas novamente no Capítulo 3, onde os seus princípios de funcionamento serão aprofundados.

2.1.2 Comparação dos Sensores Ópticos

Embora cada vez mais empregues nas mais diversas aplicações, os sensores ópticos continuam a estar sujeitos a um grande esforço de investigação para tornar a sua utilização cada vez mais generalizada.

As dificuldades iniciais surgidas com este tipo de sensores levaram a que os investigadores pesquisassem diferentes mecanismos físicos de transdução, bem como diferentes técnicas de interrogação. Assim, são considerados vários tipos de sensores, cada um dos quais com diferentes características que os tornam mais ou menos adaptados, ou adaptáveis, a determinada aplicação.

Tabela 2.1 Métodos de modulação da luz e respectivos métodos de medição

Modulação	Mecanismo Físico	Método de medição
Intensidade	Mudança na luz transmitida devido à alteração da absorção, emissão ou dispersão	Analógico
Polarização	Mudança no tensor de polarização	Análise de polarização e comparação de amplitudes
Fase	Interferência entre o sinal sentido e um sinal de referência	Contagem de franjas ou medição de fase
Comprimento de onda	Dependência do comprimento de onda face à reflexão, absorção, emissão e índice de refração	Medição de intensidades para cada comprimento de onda

Em 2002, Nezih Mrad, investigador do instituto aeroespacial do Canadá, compila uma tabela onde resume de forma simples os vários tipos de sensores ópticos e avalia o respectivo desempenho em termos de vários parâmetros de funcionamento [Mrad, 2002]. Da sua compilação sobressaem sobretudo três tipos de sensores: os interferométricos (Mach-Zehnder e Michelson), os de Fabry-Perot (intrínsecos e extrínsecos) e os de rede de Bragg.

Embora os sensores interferométricos tenham características de elevado desempenho, como a sensibilidade e gama de medição, apresentam grandes dificuldades de implementação nomeadamente pela necessidade de um sistema de interrogação complexo. Assim, este tipo de sensor acaba por se limitar a aplicações exclusivamente laboratoriais, de caracterização e avaliação mecânica de materiais.

Assim, pelas suas características gerais, as redes de Bragg e os Fabry-Perot são os sensores ópticos que se destacam. Estes dois tipos apresentam as funcionalidades mais interessantes para a sua aplicação como sensores de monitorização de estruturas, tais como: elevada sensibilidade às grandezas físicas de interesse, como a deformação e temperatura, e ainda boa resposta em frequência, linearidade de resposta, gama de medição, e custo, características nas quais se equiparam. Os factores que os distingue, e que classifica as redes de Bragg em fibra óptica como as mais interessantes para este tipo de aplicação, é a possibilidade de medição de parâmetros multiaxiais, bem como a possibilidade de multiplexagem de um número elevado de sensores no mesmo troço de fibra sem a necessidade de acrescentar muitos mais meios ao sistema de interrogação.

Outro dos aspectos de relevo, relativamente aos sensores com a função de monitorização de estruturas, é a sua fiabilidade de funcionamento, em particular o seu tempo de missão. Na Tabela 2.2 são sumariadas

algumas características de fiabilidade, verificadas para os sensores de rede de Bragg e de Fabry-Perot, em função de várias grandezas aplicadas [Mrad, 2002].

Tabela 2.2 Características de fiabilidade entre os sensores de rede de Bragg e de Fabry-Perot

	Rede de Bragg	Fabry-Perot
Humidade	Sem alteração das propriedades da rede após 1000 h, a 85 °C e a 85 % de humidade relativa	Não são conhecidos trabalhos publicados sobre o assunto
Temperatura	Sem alteração das propriedades da rede após 1000 ciclos térmicos entre -40 a 85 °C ou 512 ciclos entre 21 e 427 °C	Operação estável em ciclos entre -20 e 350 °C, entre -272 e 350 °C e entre -272 e 750 °C (utilização de revestimento de ouro)
Tensão	Falha média a uma tensão de 1,38 GPa	Muito baixa (valores não especificados)
Perdas	As perdas de ligação entre redes são inferiores a 0,1 dB	Muito elevadas (mas não consideradas importantes, dado que estes sensores não são normalmente multiplexados por endereçamento individual)
Deformação	Sem alteração das propriedades da rede após 1,4 milhões de ciclos entre 0 e 2500 $\mu\epsilon$	Demonstrados 10 milhões de ciclos entre 0 e 3600 $\mu\epsilon$ mas não em sensores comerciais

No âmbito do trabalho desenvolvido nesta tese, os sensores de rede de Bragg em fibra foram o objecto de estudo e aplicação. Assim, apenas este tipo de sensor óptico é a partir de agora focado, bem como os respectivos métodos de interrogar, desmodular, encontrar, ou traduzir a sua resposta, de acordo com a grandeza física de medição, a deformação ou a temperatura.

2.2 Redes de Bragg em Fibra Óptica

Todo o processo evolutivo deste tipo particular de sensores ópticos em fibra foi iniciado com a descoberta da fotosensibilidade das fibras ópticas em 1978, no Canadá (no *Canadian Communication Research Center*), por Kenneth O. Hill *et al* [Hill, 1978]. Durante experiências realizadas com a incidência de radiação laser de iões de árgon em fibra de sílica dopada com germânio, foi notado que a luz lançada na fibra estava a ser reflectida em valores crescentes ao longo do tempo, até a um ponto em que toda a luz emitida era reflectida. A confirmação deste efeito foi conseguida através de medições espectrais indirectas, por aplicação de deformação e temperatura à fibra. Foi verificado que o fenómeno tem origem na variação periódica do índice de refacção que se forma no núcleo da fibra. Este padrão é resultante do padrão ondulatório estacionário, formado pela interferência entre o feixe de luz coerente irradiado pela

emissão laser e o feixe de luz reflectido pela face de saída da fibra óptica. A descoberta, que no início não passava de uma curiosidade científica, revelou um princípio de relevância incontestável para várias aplicações futuras, quer em sistemas de comunicações ópticas quer em sistemas de instrumentação. Curiosamente, o conhecimento e domínio do fenómeno manteve-se restrito a um pequeno grupo de investigadores durante a década seguinte à sua descoberta. A primeira razão para este facto deveu-se à dificuldade em restabelecer as condições da montagem inicial, mas também por se ter acreditado que a fibra óptica utilizada continha algumas características especiais que a tornavam única [Kashyap, 1999].

Em 1989 foi dado o segundo grande passo no desenvolvimento desta área: a escrita holográfica da rede de Bragg. Gerry Meltz *et al* [Meltz, 1989] demonstraram a inscrição de redes de reflexão no núcleo da fibra óptica através da interferência de dois feixes externos à fibra. O esquema assim demonstrado fornecia o necessário grau de liberdade para a alteração da condição de Bragg para outros comprimentos de onda, mais elevados e de maior interesse (até aos 1530 nm, comprimento de onda de interesse para as telecomunicações). O parâmetro mais significativo para a alteração desta condição é o ângulo entre os dois feixes de interferência. Mais ainda, foi verificado que este processo de formação de redes apresenta uma eficiência que é várias ordens de grandeza superior ao processo de Hill.

Embora todos os processos de fotosensibilidade descobertos e desenvolvidos ao longo dos últimos 25 anos exibam semelhanças, apresentam simultaneamente diferenças muito significativas ao nível do detalhe de implementação. O processo físico do efeito, devido ao elevado número de parâmetros envolvidos e à diversidade de efeitos observados, permanece ainda como uma área aberta ao estudo científico, sendo reconhecido que a presença de impurezas no material utilizado na concepção da fibra está no centro de toda a discussão.

Relativamente ao material de construção das fibras ópticas, em particular para as aplicações de instrumentação, é utilizado normalmente o vidro, ou mais especificamente a sílica. Este é um material de uma homogeneidade praticamente perfeita, muito próxima do ideal. Como apontamento de curiosidade, refira-se que a descoberta de certas propriedades físicas, que permitiram que as perdas ópticas passassem de alguns dB/km, há alguns anos atrás, para os actuais ~ 1 dB/km, é considerado como perfeitamente fortuito por alguns autores [Kashyap, 1999].

O índice de refração de uma fibra óptica apresenta um perfil de variação como o esquematizado na Figura 2.3. A zona do núcleo tem um valor de índice de refração ligeiramente superior ao do material circundante, da bainha. A relação entre valores dos índices de refração das duas zonas ronda os $4,5 \times 10^{-3}$ para uma vulgar fibra monomodo utilizada em telecomunicações. Ambas as zonas são compostas por sílica, embora com diferentes níveis de dopagem, com materiais como o germânio, o boro, o fósforo, entre outros.

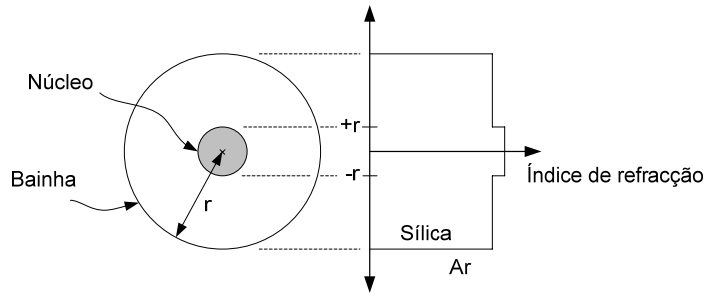


Figura 2.3 Secção recta de uma fibra óptica e respectivo perfil do índice de refracção

A luz que é feita incidir no interior da fibra fica contida no interior do núcleo através de reflexão total na fronteira núcleo/bainha e é assim capaz de viajar dezenas de quilómetros com baixa atenuação. Os comprimentos de onda mais utilizados em fibras, que dependem essencialmente das fontes ópticas utilizadas, variam entre os 800 e os 1600 nm, e implicam diferentes diâmetros do núcleo, que podem variar entre os 2 e os 10 μm .

O índice de refração de um material dielétrico, n , na sua forma mais completa, é definido como uma grandeza complexa, na qual a parte real define a velocidade de propagação da luz (a constante de propagação), enquanto a parte imaginária define a existência de perda ou ganho na transmissão. Através de alguma simplificação pode chegar-se à expressão que define o índice de refração para as fibras ópticas normalmente utilizadas em instrumentação e telecomunicações, considerando-se apenas a sua parte real [Kashyap, 1999]:

$$n = \sqrt{1 + \sum_i \frac{A_i \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_i^2}} \quad (2.1)$$

sendo i o número de osciladores que contribuem para a vibração do dielétrico, λ_i as ressonâncias electrónicas e A_i os valores de vibração da malha. Todos estes valores são dependentes do material constituinte da fibra. λ representa o comprimento de onda da luz que é feita passar pela fibra óptica.

É ainda possível definir o índice de grupo, N , que determina a velocidade à qual um impulso viaja através da fibra óptica.

$$N = n - \lambda \frac{dn}{d\lambda} \quad (2.2)$$

Ambas as grandezas estão representadas no gráfico da Figura 2.4, calculado através das equações (2.1) e (2.2), recorrendo ainda aos valores experimentais apresentados em [Kashyap, 1999] para a sílica pura a

20°C. Pelo gráfico, é notório que n é inferior para o comprimento de onda de 1550 nm relativamente a 810 nm, facto que influencia a sensibilidade do sensor de Bragg, como será analisado na secção 2.2.4.

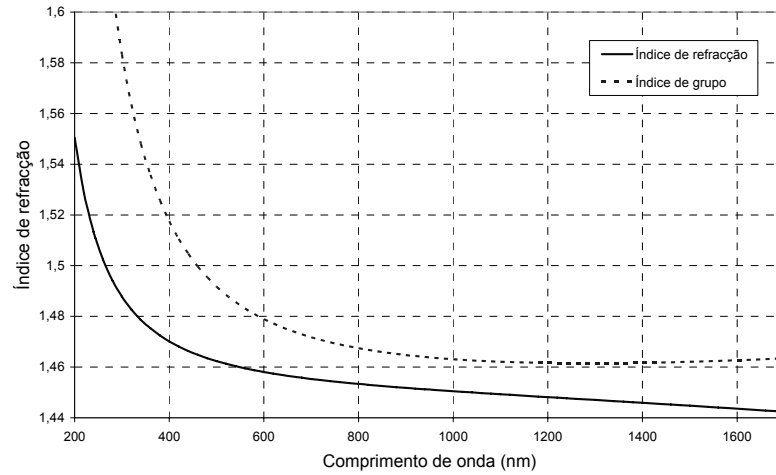


Figura 2.4 Índice de refração, n , e índice de grupo, N , para sílica pura a 20 °C

O índice de refração do vidro depende da densidade do material. Uma alteração do volume, ΔV , induzida pela relaxação térmica do vidro, provoca uma alteração Δn no índice de refração, n , da forma:

$$\frac{\Delta n}{n} \approx \frac{\Delta V}{V} \quad (2.3)$$

A noção desta expressão é importante quando mais tarde se abordar o assunto da variação da resposta das redes de Bragg com grandezas físicas como a deformação ou a temperatura.

2.2.1 Fotosensibilidade

A fotosensibilidade pode ser definida como uma alteração permanente no índice de refração ou opacidade, induzida pela exposição a radiação luminosa. O termo é vulgarmente utilizado quando certos vidros sofrem uma mudança de cor quando expostos simultaneamente a radiação ultravioleta e a calor. Existem, no entanto, outros tipos de vidro que não necessitam de aplicação de calor para sofrerem alteração na sua opacidade, sendo ainda esta uma acção reversível. Este último fenómeno é ainda mal conhecido, mantendo-se numa fase de estudo.

Como já referido na subsecção anterior, os fenómenos ligados à fotosensibilidade nas fibras ópticas, incluindo os processos de fotoindução ultravioleta do índice de refração, não são inteiramente

conhecidos e entendidos. Até à data da escrita desta tese, todos os processos conhecidos para aumento da fotosensibilidade intrínseca da fibra são baseados na introdução de impurezas na composição da fibra durante o processo químico do seu fabrico.

2.2.2 Técnicas de Fotosensibilização

As técnicas de fotosensibilização necessárias à produção de redes de Bragg são sobretudo condicionadas pelo tipo de fonte laser disponível para o processo de inscrição. Por questões de facilidade e custo, muitas das redes de Bragg são inscritas em fibras standard, usadas em telecomunicações. Há no entanto aplicações mais específicas em que esta escolha não é a ideal, sendo necessário o recurso a fibras com algumas características especiais. Podem distinguir-se assim dois tipos de técnicas: aumento directo da fotosensibilidade da fibra através de alteração da sua própria constituição, ou através de métodos indirectos, normalmente por hidrogenação.

A fotosensibilidade das fibras ópticas dopadas com germânio a certos comprimentos de onda de emissão laser foi a primeira a ser conhecida e estudada [Hill, 1978]. Esta é uma das técnicas mais simples de aumento da fotosensibilidade já que a amplitude de modulação do índice de refração da fibra, depois de sujeita a radiação ultravioleta, é directamente proporcional à concentração de germânio na sua constituição. Os valores desta modulação podem variar entre $\sim 3 \times 10^{-5}$ para uma fibra vulgar de telecomunicações (com uma concentração de 3 mol% GeO_2) e $\sim 2,5 \times 10^{-4}$ para fibras com elevadas concentrações de germânio (~ 20 mol% GeO_2), quando sujeitas a um laser CW a funcionar nos 224 nm [Kashyap, 1999]. Verifica-se que a alteração no índice de refração em fibras vulgares (de baixa concentração de germânio), induzido pela exposição ultravioleta, é proporcional ao quadrado da densidade de energia laser aplicada.

Dentro dos métodos de fotosensibilização mais conhecidos e implementados está a codopagem das fibras com boro (B-Ge) ou com estanho (Sn-Ge). No caso da adição de boro, redutor do índice de refração, a vantagem obtida prende-se com a possibilidade de aumento da concentração de germânio, este um elemento que provoca o incremento da amplitude de modulação do índice de refração. Já no caso da adição de estanho, os efeitos são mais directos pois permite um aumento imediato nos níveis de fotosensibilidade, acrescentando a característica de uma maior resistência da fibra às altas temperaturas.

As diferentes propriedades das fibras influenciam directamente o processo de inscrição, em parâmetros como o tempo e a intensidade da exposição ultravioleta. As diferenças verificadas nestas condições provocam diferentes características nas redes que se obtêm. Na Figura 2.5 [Douay, 1997] é ilustrada a variação, ao longo do tempo, da amplitude de modulação do índice de refração para uma fibra óptica codopada com germânio e estanho, em três condições diferentes: **A** – fibra normal; **B** – fibra depois de

passar por um processo de recozimento a 1100 °C, durante 1 hora, e arrefecimento durante 2 horas e **C** – fibra normal, traccionada com 2000 $\mu\epsilon$. O comprimento total da rede de Bragg é de 2,5 mm e a intensidade de energia aplicada pelo laser é de 26 W/cm². As diferenças verificadas entre as três curvas são assim muito significativas.

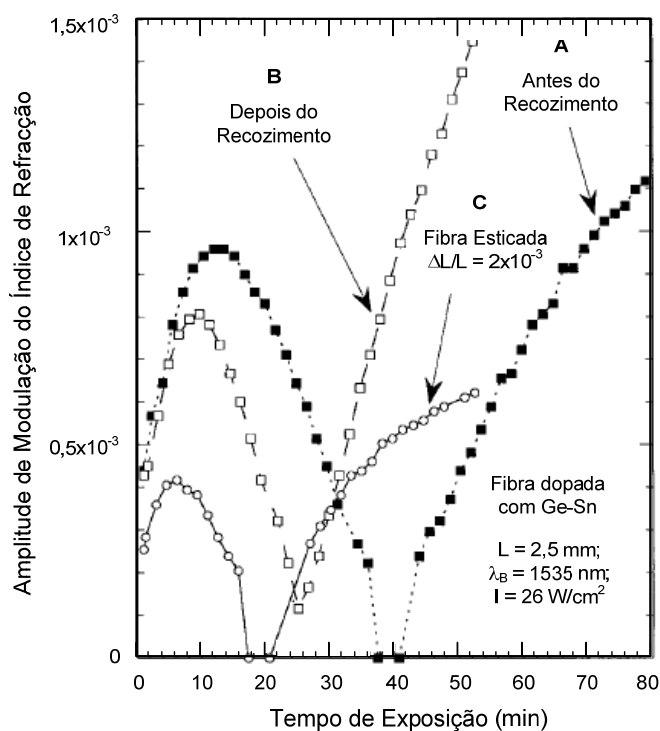


Figura 2.5 Dinâmica de crescimento da amplitude do índice de refração para uma fibra codopada com germânio e estanho, em três diferentes situações

Como se pode verificar pelo gráfico da Figura 2.5 uma forma simples de alteração da fotosensibilidade das fibras ópticas é através da deformação provocada na fibra. Neste caso específico, a deformação aplicada de + 2000 $\mu\epsilon$, permite que o valor máximo de reflectividade, para as redes de Bragg de Tipo I, seja atingido mais rapidamente, embora com um valor inferior.

No entanto, as técnicas mais usadas para o incremento da fotosensibilidade, e dada a grande utilização de fibras ópticas monomodo vulgarmente utilizadas em telecomunicações, são as técnicas de hidrogenação. Está demonstrado que a reacção química que surge no interior da própria fibra entre as moléculas de hidrogénio e as moléculas de oxigénio provoca uma combinação que, durante um determinado período de tempo, aumenta a fotosensibilidade da fibra. Mais ainda, foi verificado experimentalmente que a maior alteração no índice de refração ocorre em fibras dopadas com germânio depois de estarem embebidas em hidrogénio a baixa temperatura. No entanto, foi também verificado que embeber a fibra em hidrogénio a 200 bar, à temperatura ambiente e durante cerca de duas semanas, é o suficiente para a

inscrição de redes de Bragg de elevada reflectividade em fibra de 125 μm de diâmetro [Lemaire, 1993], precisamente a medida usada nas fibras mais vulgares e utilizadas para a inscrição dos sensores ópticos. As técnicas de hidrogenação permitem apenas a constituição de redes de Bragg do Tipo I (num menor período de tempo e com menos energia do feixe laser), não havendo qualquer referência a redes de Bragg do Tipo IIA inscritas em fibra fotosensibilizada por esta técnica.

A técnica de hidrogenação foi a utilizada na inscrição de todas as redes de Bragg utilizadas ao longo do trabalho desta tese. Assim, a fibra óptica utilizada, de 125 μm de diâmetro, antes do processo de inscrição foi sempre sujeita a uma pressão de 200 bar durante um período nunca inferior a uma semana.

2.3 Caracterização das Redes de Bragg

Quando uma forma de onda de luz incide sobre uma região de variação periódica de índice de refração ocorre um fenómeno denominado de acoplamento dos modos de radiação. Estas regiões são conhecidas como redes de Bragg porque a interferência que ocorre entre a forma de onda incidente e as ondas dispersas por estas variações periódicas, ou redes, é semelhante à interacção observada pelo famoso cientista William Lawrence Bragg (1890-1971) no seu trabalho com raios-X dispersos nas malhas planas de certas estruturas cristalinas. Nestas redes é gerada uma forte reflexão de banda estreita quando a condição de ressonância (ou ajuste de fase) se verifica. Esta reflexão resulta da interferência construtiva entre a onda de propagação (incidente) e a onda de contra propagação formada pela rede. A representação esquemática deste fenómeno é mostrada na Figura 2.6.

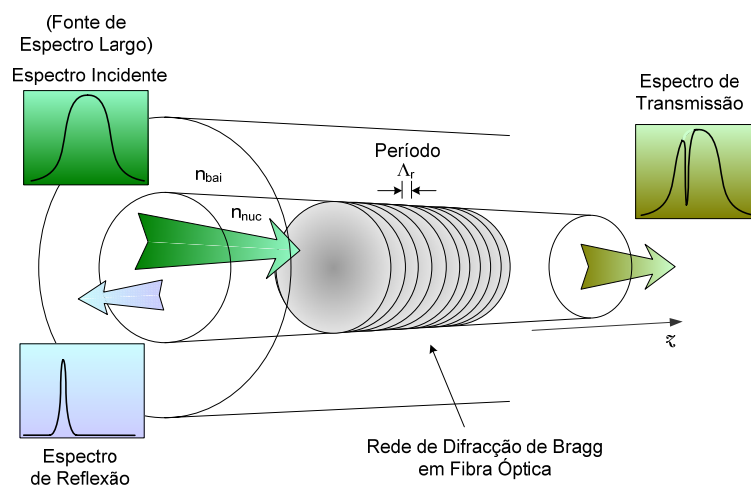


Figura 2.6 Representação conceptual do princípio de funcionamento de uma rede de Bragg em fibra óptica

A teoria de acoplamento dos modos de radiação permite a descrição matemática do fenómeno [Yariv, 1973; Erdogan, 1997; Ferreira, 1999; Kashyap, 1999; Ferreira, 2001; Measures, 2001]. A descrição que se

segue, termina com a expressão de reflectividade para as redes de Bragg uniformes, simplificada para a situação de fibra óptica monomodo com uma distribuição em degrau do índice de refração do núcleo para a bainha (*step-index*), sendo este o tipo de fibra óptica usada ao longo deste trabalho. Uma descrição mais geral e pormenorizada, para diferentes tipos de fibras e de redes, pode ser encontrada em [Erdogan, 1997].

Assim, é considerada a propagação de uma forma de onda plana monocromática, na direcção dos z , através de uma região na qual o índice de refração tem uma variação sinusoidal descrita pela equação:

$$n(z) = n_{ef} + \Delta_n \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda_r} z\right) \quad (2.4)$$

onde n_{ef} é o valor médio do índice de refração do núcleo, ou valor efectivo, Δ_n é a amplitude de modulação do índice de refração e Λ_r é o período de modulação do índice de refração, Figura 2.7.

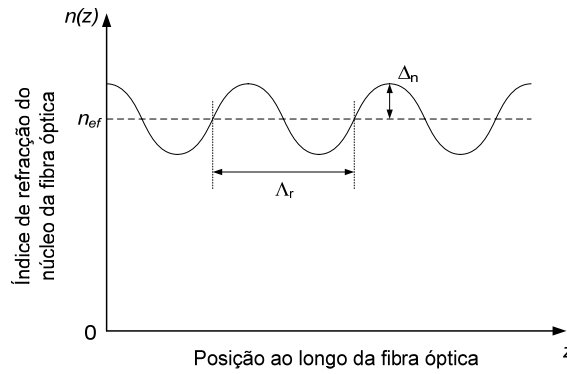


Figura 2.7 Variação do índice de refração do núcleo da fibra óptica na região que constitui a rede de Bragg

Uma rede de Bragg em fibra pode ser considerada simplesmente como uma rede de difracção óptica de período Λ . O seu efeito, sobre a luz incidente com um ângulo θ_1 , é descrito pela equação geral das redes de difracção:

$$n \sin\theta_2 = n \sin\theta_1 + m \frac{\lambda}{\Lambda} \quad (2.5)$$

onde θ_2 é o ângulo da onda difractada e o inteiro m determina a ordem de difracção.

Com a equação (2.5) é possível determinar o comprimento de onda para o qual existe um acoplamento mais eficiente entre os dois modos de propagação.

No caso das redes de Bragg, e ao contrário das redes de período longo, o acoplamento ocorre entre modos que se propagam em sentidos opostos, o que implica que $\theta_2 = -\theta_1$ (Figura 2.8).

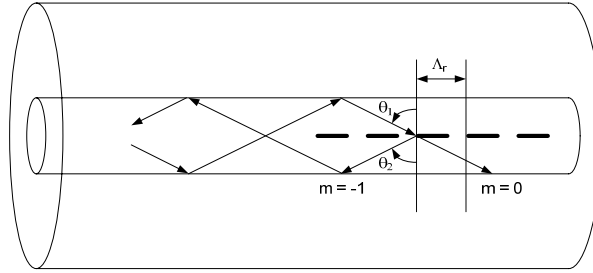


Figura 2.8 Luz emitida e reflectida no núcleo de uma fibra óptica por uma rede de difracção de Bragg

Considerando que a constante de propagação do modo guiado, β , é dada por:

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} n_{ef} \quad (2.6)$$

em que $n_{ef} = n_{nuc} \sin \theta$ (n_{nuc} é o índice de refração do núcleo quando não sujeito à radiação ultravioleta) e λ é o comprimento de onda no vazio, o que permite reescrever a equação (2.5) para os modos guiados como:

$$\beta_2 = \beta_1 + m \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.7)$$

Da equação (2.7), e dado que $\beta_2 < 0$ (valores negativos de β representam modos que se propagam no sentido $-z$), chega-se à equação que define o comprimento de onda de reflexão, do modo guiado com índice n_{ef1} para o modo guiado com índice n_{ef2} :

$$\lambda = (n_{ef1} + n_{ef2}) \Lambda \quad (2.8)$$

Se os dois índices forem idênticos, como acontece nas redes de Bragg em fibra óptica, a expressão toma então a seguinte forma:

$$\lambda_B = 2 n_{ef} \Lambda_r \quad (2.9)$$

ou seja, o comprimento de onda de Bragg, para o qual a reflectividade da rede é máxima.

A expressão completa da reflectividade de uma rede de Bragg é dada por [Bennion, 1996; Ferreira, 1999]:

$$\begin{cases} R(\lambda) = \frac{\kappa^2 \sinh^2(SL_r)}{\delta\beta^2 \sinh^2(SL_r) + S^2 \cosh^2(SL_r)} & \kappa^2 > \delta\beta^2 \\ R(\lambda) = \frac{\kappa^2 \sin^2(QL_r)}{\delta\beta^2 + \kappa^2 \cos^2(QL_r)} & \kappa^2 < \delta\beta^2 \end{cases} \quad (2.10)$$

em que L_r é o comprimento da rede, $\delta\beta = \beta - \pi / \Lambda_r$, $S = (\kappa^2 - \delta\beta^2)^{1/2}$, $Q = (\delta\beta^2 - \kappa^2)^{1/2}$ e κ é o coeficiente de acoplamento, dado por:

$$\kappa = \frac{\pi \Delta n}{\lambda_B} \Gamma \quad (2.11)$$

em que Γ é a fracção de potência correspondente ao modo fundamental que se propaga no núcleo da fibra óptica, e está relacionado com a frequência normalizada da fibra [Bennion, 1996].

Para o comprimento de onda de Bragg é atingido o valor máximo de reflectividade, e a equação (2.10) toma a forma:

$$R_{\text{máx}} = R(\lambda_B) = \tanh^2(\kappa L_r) \quad (2.12)$$

O factor κL_r é designado por força da rede de Bragg. À medida que este factor aumenta, o valor máximo de reflectividade também aumenta, aproximando-se da unidade, sendo no entanto acompanhado por um aumento das amplitudes dos lóbulos laterais, e da largura espectral do pico de resposta.

A largura a meia altura ($\Delta\lambda_{\text{ma}}$), uma das grandezas de interesse no espectro de resposta de uma rede de Bragg, é calculada de forma aproximada pela seguinte equação (considerando que $\Delta\lambda_{\text{ma}} \ll \lambda_B$):

$$\Delta\lambda_{\text{ma}} \approx \lambda_B s \sqrt{\left(\frac{\Delta n}{2n_{\text{nuc}}}\right)^2 + \left(\frac{1}{NP}\right)^2} \quad (2.13)$$

Onde s é uma constante relacionada com a eficiência da rede de Bragg, e varia num intervalo entre 0,5 (para redes fracas, de baixa reflectividade) e 1 (para redes fortes, com reflectividade próxima de 100 %). NP define o número de planos de modulação da rede de Bragg, sendo dado por $NP = L_r / \Lambda_r$.

A Figura 2.9 ilustra a resposta espectral de uma rede de Bragg, calculada através da equação (2.10) e utilizando os seguintes parâmetros: $L_r = 10$ mm; $\Lambda_r = 280$ nm; $n_{\text{ef}} = 1,45357$; $\Delta n = 1 \text{ e}^{-4}$ e $\Gamma = 0,8$.

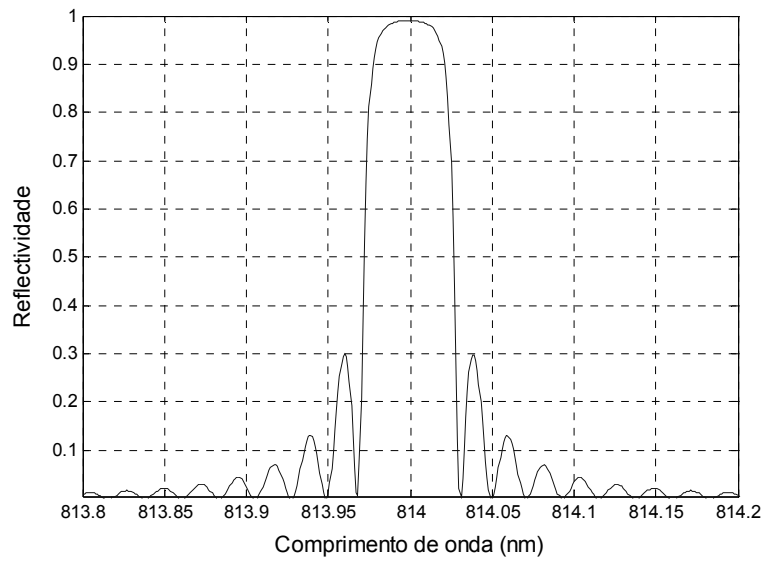


Figura 2.9 Espectro de reflexão de uma rede de Bragg uniforme

No entanto, nos espectros obtidos experimentalmente, os lóbulos laterais não são visíveis da mesma forma que o mostrado na Figura 2.9, obtido pela equação exacta. A razão prende-se essencialmente com a baixa resolução dos instrumentos de medição utilizados na leitura destes espectros (normalmente na ordem de 0,1 nm), tendo em consideração a largura espectral que se pretende medir, tipicamente entre 0,05 e 0,3 nm (em aplicações de instrumentação). Assim, e por uma questão de simplificação, é utilizada por vezes a função Gaussiana como forma de aproximação ao espectro reflectido pelas redes de Bragg. A reflectividade assim obtida passa a ser dada por:

$$R(\lambda) = R_{\max} e^{-\ln(0,5) \frac{(\lambda - \lambda_B)^2}{\left(\frac{\Delta\lambda_{ma}}{2}\right)^2}} \quad (2.14)$$

Na Figura 2.10 é ilustrado um espectro óptico de reflexão de uma rede de Bragg obtido com um analisador de espectros óptico (OSA), Anritsu - MS9780A, e a respectiva aproximação Gaussiana, através do cálculo da equação (2.14) com os parâmetros: $\lambda_B = 810,136$; $\Delta\lambda_{ma} = 0,14$ e $R_{\max} = 0,99$.

O facto do espectro de reflexão da rede de Bragg não apresentar os lóbulos laterais tem ainda algumas vantagens acrescidas, nomeadamente o de permitir a diminuição de *crossstalk* (interferência entre sinais adjacentes) em sistemas de medição multiplexados, em que os comprimentos de onda dos vários sensores estejam muito próximos. Uma das técnicas utilizadas para a diminuição dos lóbulos laterais é designada por apodisação e consiste na alteração da uniformidade da rede de difracção ao longo do seu comprimento. Esta técnica será abordada com maior detalhe na subsecção seguinte.

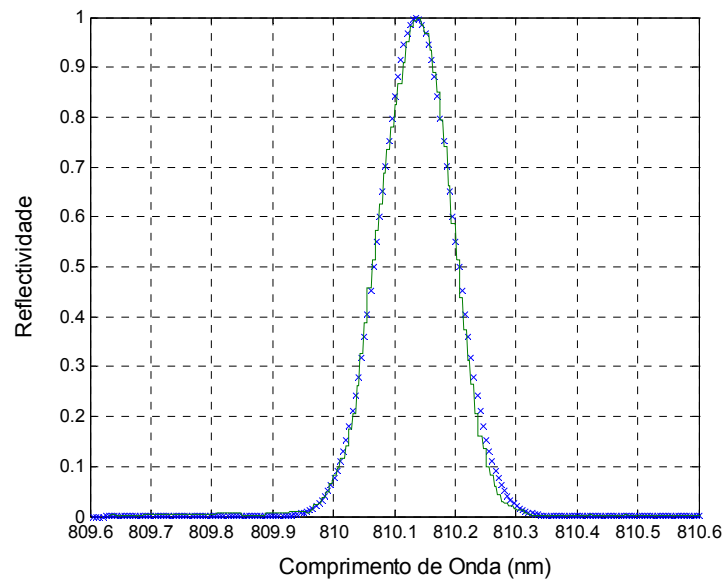


Figura 2.10 Espectro de reflexão de uma rede de Bragg (--), obtido com o analisador de espectros óptico (Anritsu [MS9780A]) e respectivo ajuste Gaussiano (x)

2.3.1 Variantes das Redes de Bragg

É de notar que todas as redes de Bragg consideradas até este ponto são do tipo uniforme e com o padrão de variação do índice de refração perpendicular ao eixo da fibra óptica. No entanto, além deste tipo de redes de Bragg existem outros, que têm vindo a ser utilizados para vários tipos de aplicações.

Um destes tipos é a rede de Bragg enviesada, Figura 2.11. Nestas redes, o acoplamento de fase dos modos de radiação ocorre de tal forma que a luz difractada é radiada para o exterior. Foram divulgados resultados sobre estruturas deste género, em que 75 % da luz incidente é reflectida para o exterior da fibra [Bennion, 1996].

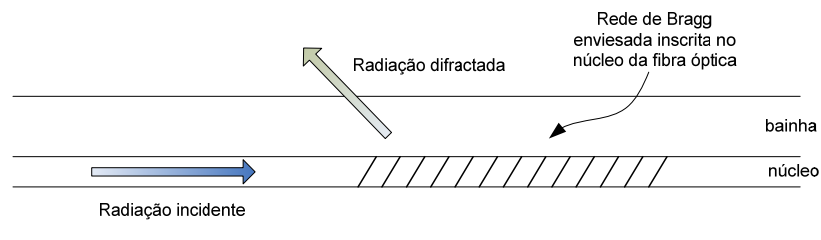


Figura 2.11 Rede de Bragg enviesada. O padrão de franjas inscritas no núcleo apresenta um ângulo diferente de 90° em relação ao eixo da fibra óptica

Uma das aplicações mais simples é o funcionamento como filtro à passagem de luz. Outras aplicações, mais elaboradas e muito recentes, passam pelo aproveitamento da luz que passa para o exterior da fibra, formando, em conjunto com um *array* linear de fotosensores, um sistema de interrogação de sensores de redes de Bragg [Simpson, 2003; Simpson, 2004]. Este sistema é abordado em mais pormenor no próximo capítulo, sobre sistemas de interrogação.

Uma variante das redes de Bragg uniformes (Figura 2.12 (a)), que sofreu nos últimos tempos um grande investimento no seu desenvolvimento, são as denominadas redes *chirped*¹, Figura 2.12 (b). Estas redes apresentam uma variação não uniforme (que pode, ou não, ser linear) do período da rede, Λ_r , ao longo do eixo da fibra. São utilizadas em certas aplicações onde a largura de banda das redes uniformes é demasiado estreita, como forma de compensação de temperatura em sistemas de instrumentação [Xu, 1995; Spammer, 2000; Frazão, 2003], como o próprio sensor de temperatura [Won, 2003], ou como elementos de compensação da dispersão em sistemas de elevada taxa de transmissão [Ouellette, 1994]. A condição de Bragg para estas redes é dada por:

$$\lambda_B(z) = 2n_{ef}(z)\Lambda_r(z) \quad (2.15)$$

o que significa que o comprimento de onda de Bragg *chirped* pode ser conseguido através de uma variação não uniforme do índice de refração (n_{ef}) ao longo do eixo da fibra (z), conseguido, por exemplo, pelo desbaste da fibra ao longo do comprimento de fibra onde a rede é inscrita [Byron, 1993].

Uma forma distinta de se conseguir a variação de λ_B é através da variação do próprio período da rede, Λ_r , ao longo do eixo da fibra. O primeiro método, mais simples, é através do posicionamento em curva da fibra durante o processo de inscrição. Assim, consegue-se que, em toda a extensão da rede, haja uma variação de Λ_r , relacionado com o raio de curvatura imposto. Outra forma de se conseguir esta variação é através da técnica denominada de “estica e escreve”. O princípio é escrever, ao longo de um determinado comprimento, em troços adjacentes, pequenas redes de Bragg uniformes, mas em que para cada troço a fibra está sobre diferentes tensões [Byron, 1995].

Por último, é referida a técnica de inscrição interferométrica que faz uso de duas lentes cilíndricas. Esta técnica permite uma maior flexibilidade e controlo sobre os parâmetros de variação *chirped*, tendo sido apresentadas redes com 100 % de reflexão e com larguras de banda desde valores de cerca de 0,1 nm até valores superiores a 100 nm [Bennion, 1996].

¹ Da terminologia inglesa - *chirped* – “chilreado”. Por se considerar que o termo em português não apresenta o mesmo conceito que em inglês, optou-se por manter a terminologia inglesa.

As denominadas redes apodisadas são outra forma distinta, já mencionada anteriormente, de redes de Bragg que, mantendo a uniformidade do período ao longo do seu comprimento, fazem variar a modulação do índice de refração [Albert, 1996; Kashyap, 1996; Cortès, 1998]. Matematicamente, corresponde à aplicação de uma determinada função janela sobre a normal variação de n_{ef} da rede de Bragg. Nas Figura 2.12 (c) e (d), são apresentados dois tipos diferentes de apodisação. Estes métodos visam tornar as respostas espectrais das redes de Bragg mais regulares. O seu princípio de funcionamento consiste na variação da constante de acoplamento ao longo da rede de Bragg, atenuando dessa forma os lóbulos laterais existentes nas redes de Bragg ditas uniformes. Assim, a resposta espectral da rede assemelha-se à função Gaussiana, ilustrada na Figura 2.10.

Um tipo de redes também com funções especiais em termos de utilização são as superestruturas de redes de Bragg (SFBG ou SSFBG) [Nasu, 2002]. Estas redes apresentam zonas não adjacentes de variação uniforme do índice de refração, Figura 2.12 (e). Exemplos da sua utilização surgem na compensação de temperatura, quando combinadas com os sensores de rede de Bragg ou na área das telecomunicações, em multiplexagem por divisão de comprimento de onda.

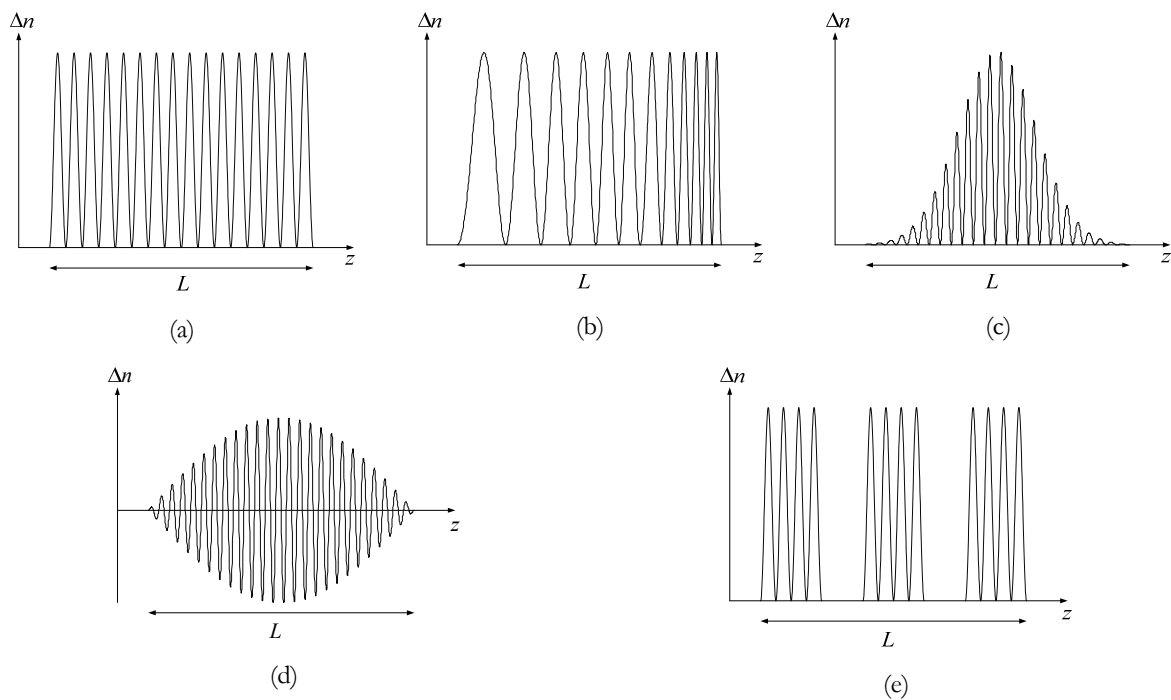


Figura 2.12 Diferentes tipos de redes de Bragg, classificados de acordo com o tipo de variação do índice de refração (Δn) ao longo do eixo da fibra (z)²: (a) variação uniforme com valor sempre superior ao n_{nuc} inicial; (b) variação *chirped*; (c) apodisado com função Gaussiana; (d) apodisado com variação sinusoidal e valor médio nulo; (e) superestrutura ou amostrada

² De notar que na Figura 2.12 o período da rede foi consideravelmente aumentado em relação ao comprimento total, L , de forma a tornar mais notória a variação do índice de refração.

Finalmente, podem ainda ser referidas as redes inscritas em fibra óptica birrefringente que, podendo apresentar variações uniformes quer do período da rede, quer do índice de refração, apresentam respostas diferentes nos dois eixos principais de transmissão. Dessa forma, consegue-se obter respostas diferentes para o comprimento de onda de Bragg, consoante a pressão a que o sensor está sujeito, quer a nível axial, quer transversal, funcionando assim como se de dois sensores distintos se tratasse. Várias aplicações dos sensores inscritos neste tipo de fibra têm vindo a ser apresentadas [Udd, 2000; Udd, 2002; Chehura, 2003; Yamate, 2003].

2.4 Métodos de Inscrição de Redes de Bragg em Fibra Óptica

Exceptuando as redes inscritas internamente, tradicionalmente conhecidas por redes “Hill”, as redes de Bragg em fibra são inscritas por técnicas que podem ser divididas em duas grandes categorias: holográficas (ou interferométricas) e não holográficas. Para a primeira categoria é utilizado um divisor de feixe para dividir em dois o feixe de saída de um laser ultravioleta. Em consequência da posterior sobreposição, estes dois feixes geram um padrão de interferência sobre a fibra óptica. Na segunda categoria, a fibra óptica é exposta em posições periódicas a um feixe ultravioleta contínuo ou pulsado [Hill, 1990], ou através de uma máscara com amplitude espacialmente periódica.

2.4.1 Interferómetro

O primeiro método de inscrição interferométrica de redes de Bragg é baseado no interferómetro normalmente utilizado em holografia [Meltz, 1989], apresentado na Figura 2.13. Neste, o feixe ultravioleta é dividido em dois por um divisor 50/50. Os dois feixes assim constituídos voltam a interceptar-se com um ângulo θ sobre a fibra óptica, depois de reflectidos por dois espelhos. De notar a inclusão de um elemento de compensação para que os dois caminhos ópticos tenham o mesmo comprimento.

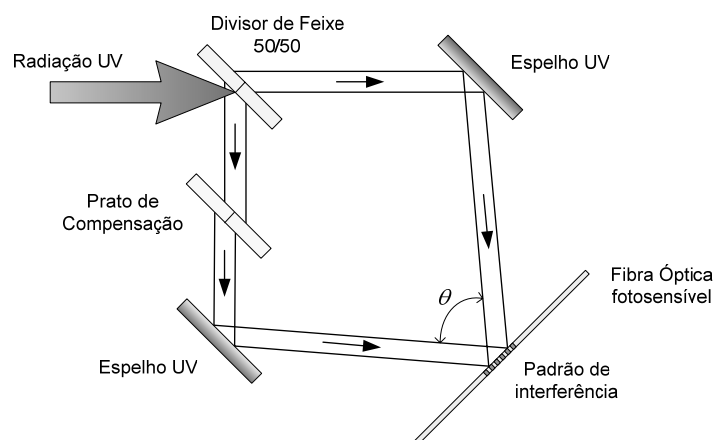


Figura 2.13 Interferómetro ultravioleta para inscrição de redes de Bragg em fibra óptica

A primeira vantagem deste método é o facto de permitir que o comprimento de onda de Bragg, λ_B , seja facilmente configurável, não dependendo apenas do comprimento de onda da radiação ultravioleta [Kashyap, 1999]. A equação (2.16) traduz a influência das várias grandezas envolvidas neste processo.

$$\lambda_B = \frac{n_{ef} \lambda_{UV}}{n_{UV} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (2.16)$$

onde λ_B representa o comprimento de onda de Bragg, n_{ef} é o índice de refração efectivo da fibra, n_{UV} é o índice de refração da sílica para os ultravioleta, λ_{UV} é o comprimento de onda da radiação utilizada no processo de inscrição e θ é o ângulo de intercepção dos dois feixes ultravioleta. Através da equação (2.16) e considerando que o índice de refração efectivo e o índice de refração da sílica para os ultravioleta têm valores muito aproximados, e ainda que o ângulo θ pode variar entre os 0 ° e os 180 °, verifica-se que a técnica exposta possibilita o ajuste do comprimento de onda de Bragg desde um valor igual ao comprimento de onda do laser até ao infinito.

Este método, no entanto, requer elevada estabilidade de todos os componentes e do meio envolvente. Assim, este método é particularmente adaptado para a escrita de redes de Bragg muito curtas (na ordem dos mm) e com tempos de inscrição também muito reduzidos (no limite, de impulso único). A utilização de fontes de radiação de baixa coerência requer que os percursos dos feixes sejam perfeitamente idênticos. Para isso, e como ilustrado na Figura 2.13, é introduzido um elemento de compensação num dos braços do interferómetro para possibilitar o ajuste dos caminhos ópticos dos feixes.

Outros modelos, ou arranjos, têm vindo a ser apresentados, em que são feitos variar vários parâmetros. Uma das propostas é relativa aos interferómetros baseados em prismas, que oferecem a vantagem de estabilidade, perdendo no entanto o controlo e flexibilidade permitido pelo método holográfico vulgar [Kashyap, 1999; Zhang, 1999]. Outro dos parâmetros que continua a ser estudado é a fonte óptica utilizada no processo. Vários tipos de lasers têm sido propostos [Paddison, 1998; Zhang, 1999].

O esquema holográfico apresentado por Caponi e Bernardi em 1983 (Figura 2.14) só recentemente foi utilizado para a inscrição de redes de Bragg [Caponi, 1983; Arguel, 1995]. Este modelo reduz substancialmente os problemas de estabilidade da montagem interferométrica da Figura 2.13 e permite ainda uma elevada reprodutibilidade e precisão, na ordem dos nm. A sua principal diferença está na forma como o feixe laser é dividido e na possibilidade de rotação da base em três eixos, o que torna este esquema extremamente versátil. A radiação utilizada, necessariamente coerente, é de um laser de argon.

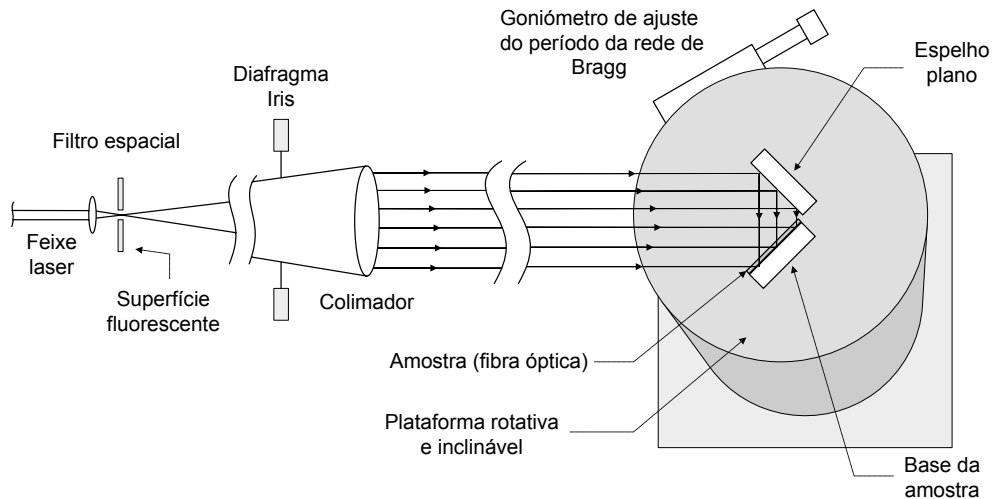


Figura 2.14 Esquema holográfico de inscrição de redes de Bragg, apresentado em 1983 por Caponi e Bernardi [Caponi, 1983]

2.4.2 Máscara de Fase

Um dos grandes passos dados no sentido da facilidade de inscrição de redes de Bragg foi conseguido com a introdução da máscara de fase [Hill, 1993]. A rede de fase de transmissão, ou máscara de fase, é uma placa de sílica na qual está definido, em relevo, um conjunto de ranhuras lineares que formam uma rede periódica, Figura 2.15. Estas ranhuras são realizadas com grande precisão nas suas especificações de dimensão, quer nas larguras a e b , quer na profundidade, d . Além da sílica, outros materiais e técnicas de inscrição continuam a ser testados para a produção destas máscaras de fase [Dyer, 1994].

O princípio de funcionamento destas máscaras é baseado na difracção da radiação ultravioleta em várias ordens: $m = 0; \pm 1; \pm 2; \dots$. A equação (2.17) representa a relação geral para o período da máscara de fase, Λ_{mf} , em função das condições de incidência e difracção.

$$\Lambda_{mf} = \frac{m\lambda_{UV}}{\text{sen} \frac{\theta_m}{2} - \text{sen} \theta_i} \quad (2.17)$$

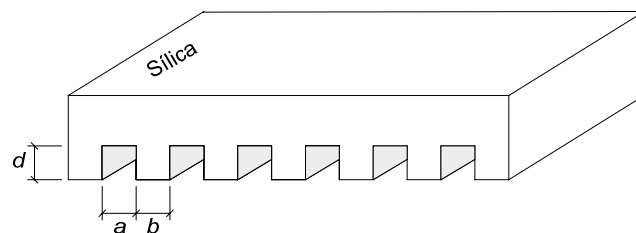


Figura 2.15 Modelo de uma máscara de fase

onde θ_m é o ângulo da ordem de difracção m e λ_{UV} e θ_i são o comprimento de onda e ângulo de incidência do feixe de radiação ultravioleta, respectivamente.

No caso mais vulgar, de radiação incidente normal à superfície da máscara de fase, $\theta_i = 0$, a radiação difractada é apenas dividida nas ordens $m = 0$ e ± 1 . Se a fibra óptica a inscrever for colocada imediatamente encostada à superfície inferior da máscara de fase (posição relativa à Figura 2.15), o período da rede nela inscrita, Λ_r , relacionado com o ângulo de difracção θ_m , é dado por:

$$\Lambda_r = \frac{\lambda_{UV}}{2 \sin \frac{\theta_m}{2}} = \frac{\Lambda_{mf}}{2} \quad (2.18)$$

O período da rede gravada na máscara, Λ_{mf} , é determinado unicamente pelo comprimento de onda de Bragg, λ_B , pretendido, assim como o período da rede de Bragg, Λ_r .

$$\Lambda_r = \frac{\lambda_B}{2 n_{ef}} = \frac{\Lambda_{mf}}{2} \quad (2.19)$$

Outro dos parâmetros importantes na constituição da máscara de fase é a profundidade das ranhuras que definem a rede, d , e que é função do comprimento de onda da fonte ultravioleta utilizada. É necessário garantir que a ordem zero do feixe difractado seja bloqueada para que apenas as ordens ± 1 incidam sobre a fibra óptica fotosensibilizada (Figura 2.16).

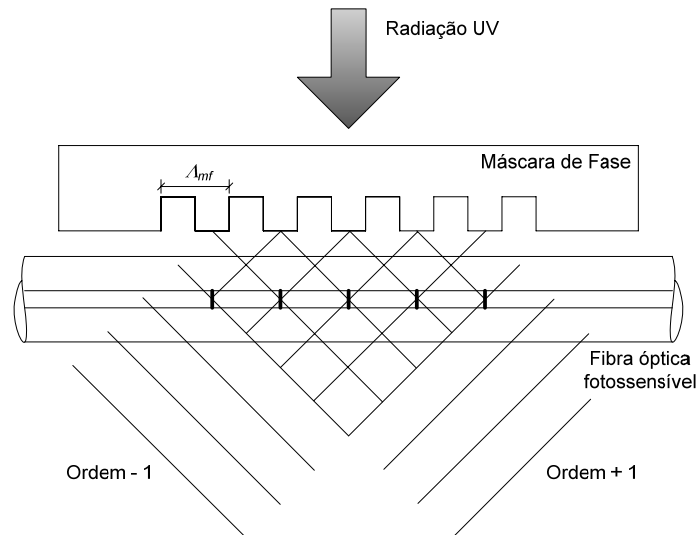


Figura 2.16 Inscricção de uma rede de Bragg em fibra óptica pelo processo de máscara de fase

Assim, para minimizar a radiação da ordem zero terá que se definir um valor mínimo para d , dado por:

$$d(n_{UV} - 1) = \frac{\lambda_{UV}}{2} \quad (2.20)$$

em que é assumida radiação monocromática. Na prática, no entanto, fontes puramente monocromáticas não existem, pelo que a ordem zero não é totalmente anulada mas apenas minimizada. Para que a difracção nas ordens ± 1 seja eficiente há ainda que garantir que a largura das ranhuras seja exactamente a mesma que a largura da superfície entre ranhuras (na Figura 2.15, $a = b$), ou garantir que a forma das ranhuras seja puramente sinusoidal. As máscaras de fase comercializadas actualmente apresentam valores de eficiência para a ordem zero em torno de 1 %, e para as ordens ± 1 superiores a 30 %, com valores de uniformidade do período (a e b) de $\pm 0,01$ nm [Ibsen, 2005; StokerYale, 2005].

Uma das diferenças fundamentais entre o método interferométrico e o método de inscrição por máscara de fase está na fonte óptica utilizada. Este último método não requer a utilização de um laser com elevada coerência de radiação. Assim, são normalmente utilizados lasers de excímeros de elevada potência, como os lasers KrF [Hill, 1993; Sun, 2002].

A técnica de inscrição por máscara de fase foi utilizada para a inscrição de todas as redes de difracção de Bragg em fibra utilizadas em todos os trabalhos e aplicações descritos nesta tese. Uma informação mais detalhada, relativa à inscrição das redes de Bragg por este processo, é apresentada no anexo A.1.

2.4.3 Outros Métodos de Inscrição

Várias mutações dos dois tipos de métodos de inscrição descritos atrás foram sendo apresentadas ao longo dos últimos anos. Uma destas técnicas é a interligação dos dois métodos anteriores, através da utilização de um interferómetro (subsecção 2.3) com uma máscara de fase, utilizada como elemento divisor de feixe ultravioleta [Kashyap, 1999]. Outra dessas técnicas, que é mesmo considerada por vários autores como fazendo parte de uma categoria totalmente independente, é a técnica de inscrição ponto a ponto [Hill, 1990]. Consiste em fazer incidir sobre pontos específicos da fibra óptica um feixe de radiação laser. Estes pontos, a intervalos regulares, são feitos variar através do movimento linear da fibra, que é puxada em contínuo, com o laser a ser disparado automaticamente e em intervalos regulares, ou passo-a-passo, com o laser a ser disparado apenas quando a fibra pára. Hill *et al* chegaram à conclusão que esta segunda forma apresenta melhores resultados que a primeira. Mais recentemente, em 1997, Asseh *et al* desenvolveram um sistema que permite inscrever redes de Bragg muito longas (acima de 20 cm), com larguras de banda muito estreitas (na ordem de 5 pm a meia altura). São utilizadas técnicas de inscrição

sequencial, semelhante ao princípio de inscrição ponto a ponto, mas recorrendo a um elevado controlo de posicionamento da fibra óptica [Asseh, 1997].

2.5 Sensibilidade à Deformação e à Temperatura

O princípio básico de funcionamento dos sensores baseados em redes de Bragg em fibra óptica é dado pela equação (2.9), que corresponde à variação do comprimento de onda reflectido, λ_B , de acordo com a alteração da grandeza que o deforma, ou que altera as suas propriedades físicas, nomeadamente a deformação e a temperatura. A resposta à deformação é provocada quer pelo alongamento físico do sensor (e correspondente alteração no período da rede, Λ_r) quer pela alteração do índice de refração da fibra devido a efeitos fotoelásticos. A resposta à temperatura é originada pela natural expansão térmica do material da fibra e à dependência da temperatura do índice de refração. Assim, são apontadas algumas vantagens a este tipo de sensor, como a insensibilidade às flutuações de potência da fonte, às perturbações electromagnéticas externas, às variações na resposta do fotodetector (dependendo do sistema de interrogação utilizado), e às perdas introduzidas pelos conectores ou pelas curvaturas na fibra óptica. A Figura 2.17 ilustra as condições de variação da resposta da rede de Bragg às duas grandezas físicas, deformação e temperatura.

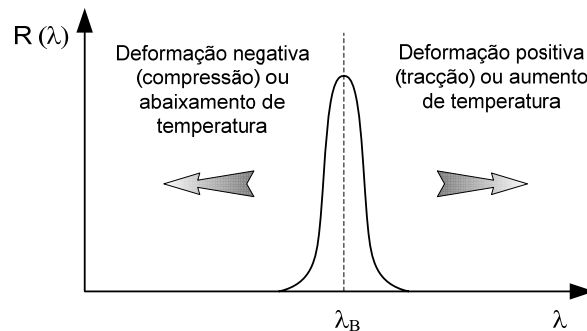


Figura 2.17 Variação do comprimento de onda central (λ_B) de resposta de uma rede de Bragg em fibra óptica

O desvio registado na resposta por estas perturbações ($\Delta\lambda_B$) é encontrado pela derivada da equação (2.9) em ordem à deformação (ϵ) e à temperatura (T) [Kersey, 1997]:

$$\Delta\lambda_B = \left[2\Lambda_r \left(\frac{\partial n_{ef}}{\partial \epsilon} \right)_{T=cte} + 2n_{ef} \left(\frac{\partial \Lambda_r}{\partial \epsilon} \right)_{T=cte} \right] \Delta\epsilon + \left[2\Lambda_r \left(\frac{\partial n_{ef}}{\partial T} \right)_{\epsilon=cte} + 2n_{ef} \left(\frac{\partial \Lambda_r}{\partial T} \right)_{\epsilon=cte} \right] \Delta T \quad (2.21)$$

Para o caso de aplicação de deformação apenas ao longo do eixo longitudinal da fibra, a equação (2.21) pode ser reescrita de outra forma, de acordo com os parâmetros físicos que definem o fenómeno:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \left[1 - \left(\frac{n_{ef}^2}{2} \right) [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \right] \Delta\varepsilon + \left[\alpha + \frac{1}{n_{ef}} \frac{dn_{ef}}{dT} \right] \Delta T \quad (2.22)$$

onde p_{11} e p_{12} são os coeficientes de Pockel da fibra (coeficientes fotoelásticos), ν é a razão de Poisson e α é o coeficiente de expansão térmica da fibra óptica. [Wagreich, 1996], [Udd, 2000], [Abe, 2001], [Measures, 2001] e [Simpson, 2004] apresentam vários estudos e ensaios sobre o desvio da resposta em reflexão de uma rede de Bragg em fibra óptica em função da aplicação de deformação transversal.

Considerando valores típicos para a sílica utilizada nas fibras ópticas vulgares, o factor dependente da deformação, $\left\{ 1 - \left(\frac{n_{ef}^2}{2} \right) [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \right\}$, toma um valor numérico de 0,22 [Kersey, 1997].

Assim, o valor da resposta à deformação, para valores de temperatura constante é dada por:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - p_e) \Delta\varepsilon \cong 0,78 \cdot 10^{-6} \Delta\varepsilon \quad (2.23)$$

em que p_e representa toda a contribuição fotoelástica sobre a fibra óptica. O factor $(1 - p_e)$ é ainda designado por G_e e representa o factor *strain-gauge* do sensor que, para o caso considerado de deformação puramente axial, representa também a **sensibilidade à deformação**, S_e . O valor definido em (2.23) descreve o factor de conversão típico para os sensores de rede de Bragg em fibra óptica, usado ao longo de todo este trabalho:

$$\Delta\lambda_B = 1 \text{ pm} \rightarrow \Delta\varepsilon = 1,58 \text{ } \mu\varepsilon \text{ (para } \lambda_B = 810 \text{ nm)} \quad (2.24)$$

Ensaio experimentais permitiram demonstrar que a resposta à deformação é linear, sem apresentar qualquer indício de histerese, pelo menos até uma temperatura de 370 °C [Hill, 1997].

De forma semelhante, a **sensibilidade à temperatura**, S_T , tem, na variação do índice de refração com a temperatura (dn/dT), a sua primeira causa (cerca de 95 %), e é dada por:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \left(\alpha + \frac{1}{n_{ef}} \frac{dn_{ef}}{dT} \right) \Delta T = S_T \Delta T = 6,67 \cdot 10^{-6} \Delta T \quad (2.25)$$

O que, e mais uma vez para o comprimento de onda de trabalho de 810 nm, corresponde à relação:

$$\Delta\lambda_B = 1 \text{ pm} \rightarrow \Delta T = 0,185 \text{ }^\circ\text{C} \quad (2.26)$$

2.5.1 Compensação da Temperatura nos Sensores Ópticos

No funcionamento dos sensores de rede Bragg em fibra óptica é assinalado como um erro o desvio sentido na resposta devido à variação de temperatura [Kashyap, 1999; Measures, 2001; Mrad, 2002; Silvanesan, 2002]. Esta variação aparente no valor da deformação medida, devido à temperatura, é um problema bem conhecido na área de instrumentação clássica, em que qualquer extensómetro tem que ser necessariamente compensado em temperatura. Além do desvio da resposta devido à variação directa da temperatura (ΔT) é necessário ainda considerar o desvio de deformação ($\Delta\epsilon_T$) resultante dos diferentes coeficientes de expansão: do material constituinte da fibra óptica (α_F) e do material onde o sensor está colado ou embebido (α_E). A deformação a que a fibra óptica passa a estar sujeita, devido exclusivamente à variação de temperatura, é dada pela equação da deformação térmica aparente:

$$\Delta\epsilon_T = \left[\alpha_E - \alpha_F + \frac{S_T}{S_\epsilon} \right] \Delta T \quad (2.27)$$

Assim, a equação (2.22) pode ser reescrita de uma forma mais completa, onde a sensibilidade à temperatura é considerada:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} &= S_\epsilon \left[\Delta\epsilon + (\alpha_E - \alpha_F) \right] \Delta T + S_T \Delta T \\ &= S_\epsilon \Delta\epsilon + S_\alpha \Delta T \end{aligned} \quad (2.28)$$

onde o novo coeficiente introduzido, S_α , representa a sensibilidade térmica aparente:

$$S_\alpha = S_T + S_\epsilon (\alpha_E - \alpha_F) \quad (2.29)$$

A solução para este problema passa pela compensação de temperatura. Assim, podem ser utilizadas várias técnicas, descritas a seguir, que se enquadram em dois princípios genéricos: medição independente da temperatura ou por acção combinada de dois sensores, com diferentes sensibilidades.

Havendo um conhecimento independente da temperatura, por qualquer método, incluindo um sensor óptico preparado para não sofrer qualquer tipo de variação excepto de temperatura (Figura 2.18), torna-se

possível a compensação de temperatura. Nesta situação, a única variável desconhecida na equação (2.28) passa a ser a deformação.

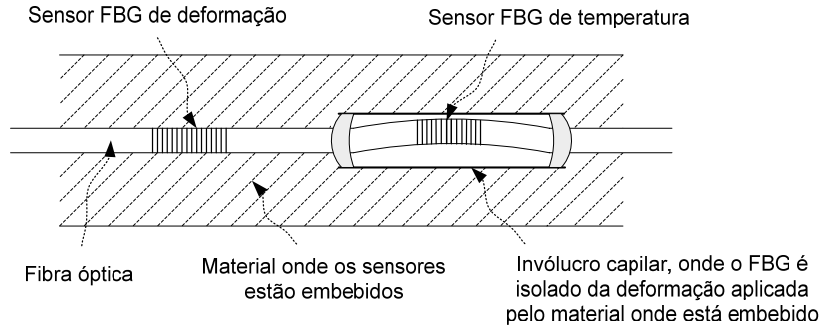


Figura 2.18 Sensor FBG de temperatura encapsulado em tubo capilar

Outra forma de compensação passa pela medição simultânea da deformação e da temperatura, utilizando a combinação de dois métodos de medição que podem ser iguais (duas redes de Bragg) ou diferentes (uma rede de Bragg e, por exemplo, um interferómetro de Fabry-Perot). É assim possível determinar as duas variáveis desconhecidas (ϵ e T), das duas medições independentes. Para isso, considera-se as duas medições obtidas com os dois métodos, e engloba-se as duas componentes, deformação e temperatura, num determinado instante i , na forma:

$$M_i = \begin{bmatrix} \frac{\Delta \xi_L}{\xi_L} \end{bmatrix}_i \quad (2.30)$$

em que M_i representa o resultado da medição i , e ξ_L representa a grandeza de resposta do sensor utilizado (no caso das redes de Bragg: $\xi_L = \lambda_B$). Com o resultado das duas medições, para dois comprimentos de onda distintos, λ_1 e λ_2 , a equação (2.30) pode ser escrita na forma:

$$\begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^1S_\epsilon & {}^1S_\alpha \\ {}^2S_\epsilon & {}^2S_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \epsilon \\ \Delta T \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

onde $i = 1, 2$ S_ϵ representa a sensibilidade à deformação nos comprimentos de onda λ_1 e λ_2 , respectivamente, e $i = 1, 2$ S_α representa a sensibilidade térmica aparente nos comprimentos de onda λ_1 e λ_2 , respectivamente. A inversão da equação (2.31) permite obter os resultados pretendidos para $\Delta \epsilon$ e ΔT . Esta equação é perfeitamente genérica, permitindo que os dois métodos de medição utilizados, 1 e 2, sejam quaisquer, e não apenas referidos às redes de Bragg. Há no entanto que ter em atenção que, para

minimizar os erros introduzidos com este modelo de compensação, as sensibilidades das respostas dos dois sistemas de medição sejam o mais diferenciadas possível.

De acordo com o atrás referido, são resumidas de seguida várias técnicas que têm sido apresentadas para efectuar a necessária compensação de temperatura. Outras compilações podem ainda ser encontradas em [Measures, 2001; Mrad, 2002; Zhao, 2002].

- Encapsulamento de uma rede de Bragg num tubo capilar metálico para que o sensor não sofra qualquer outra perturbação que não a própria variação de temperatura, servindo assim como sensor de referência de temperatura (Figura 2.18). Deve estar colocado o mais próximo possível da rede de Bragg que serve como sensor de deformação, para que ambos sofram a mesma variação de temperatura. Este método foi o seleccionado e utilizado ao longo de todo o desenvolvimento deste trabalho. Será novamente abordado no capítulo 7, relativo às aplicações do sistema de interrogação desenvolvido;
- Combinação de uma rede de Bragg com uma outra estrutura sensora em fibra, como LPG's, SFBG's ou FPI's. [Patrick, 1996; Bhatia, 1997; Jin, 1997; Liu, 1997a; Liu, 1997b; Wei-Chong, 1999; Bai-Ou, 2000b; Frazão, 2002];
- Escrita de uma única rede de Bragg na zona de *splice*³ de duas fibras ópticas com diferentes materiais dopantes do núcleo, que resulta numa estrutura com dois picos espectrais com sensibilidades idênticas à deformação mas sensibilidades diferentes à temperatura [Cavaleiro, 1999; Bai-Ou, 2000a]. Outra forma semelhante é a escrita de duas redes, com comprimentos de onda de Bragg muito próximos, unidas por *splice* [James, 1996], ou ainda, duas redes de Bragg inscritas em fibras com diferentes diâmetros [Song, 1997];
- Utilização da birrefringência da fibra óptica, do estado de polarização (SOP) e respectivas perdas dependentes da polarização (PDL), com uma ou duas redes de Bragg, fabricadas por exposição de um único lado aos raios laser ultravioleta [Ferreira, 2000; Abe, 2003; Oh, 2003];
- Escrita sobreposta de duas redes de Bragg na mesma posição de fibra, em dois comprimentos de onda distintos [Xu, 1994];

³ Da terminologia inglesa, *splice*, é o termo vulgarmente utilizado para denominar a união de duas fibras ópticas, topo-a-topo, por fusão, com uma perda introduzida que em média ronda os 0,02 dB.

- Utilização conjunta de um sensor de rede de Bragg com um sistema de interrogação de dispersão de Brillouin. Neste método é utilizada a informação conjunta da frequência e da potência da dispersão de Brillouin [Davis, 1997; Bao, 2002];
- Construção particular da rede de Bragg para que, quando sujeita a deformações, a rede se torne *chirped*. Dessa forma, a sua largura espectral é alterada, mas apenas com a aplicação de deformação e não devido à variação de temperatura. Dois exemplos distintos de aplicação foram apresentados: utilização de uma rede de Bragg curvada em círculo a formar uma estrutura em anel ligada a um laminado de material compósito [Frazão, 2003]; rede de Bragg inscrita numa zona onde o material da bainha está desbastado, com variação linear do diâmetro ao longo do comprimento da rede [Xu, 1995].

2.6 Sensibilidade a Outras Grandezas Físicas

Como já referido no Capítulo 1, de introdução, as redes de Bragg podem ainda ser utilizadas como elemento sensor para a medição de inúmeras grandezas físicas, para além de deformação e temperatura. A variação de pressão ou a detecção de sinais acústicos são um exemplo destas medições, que apresentam, no entanto, uma baixa sensibilidade devido à própria rigidez do material que constitui a fibra óptica. Foram introduzidos, por Hill *et al*, alguns aperfeiçoamentos no sistema transdutor que permitiram um incremento da sensibilidade à pressão [Hill, 1997].

Outras grandezas, como campos eléctrico e/ou magnético, podem ser medidas através de redes de Bragg com a aplicação de revestimentos especiais, materiais piezoeléctricos ou magnetostrictivos, respectivamente. Ao deformarem-se devido à acção dos campos, estes revestimentos induzem desvios na resposta do sensor consoante a grandeza aplicada. No entanto, a linearidade de resposta nestes casos é afectada, pois deixa de ser apenas dependente da resposta da rede de Bragg, passando a ser dependente da resposta do próprio material utilizado no revestimento.

2.7 Conclusão do Capítulo

Neste capítulo, e depois de apresentados e classificados os principais tipos de sensores ópticos, são mostrados os aspectos que permitem que as redes de Bragg sejam actualmente um dos principais elementos no domínio da instrumentação óptica, como sensores e filtros, mas também no domínio das telecomunicações. As redes de Bragg são neste capítulo totalmente caracterizadas no seu princípio de acção através das equações que descrevem a sua reflectividade em função dos vários parâmetros físicos envolvidos. A inscrição das redes de Bragg em fibra óptica é também abordada, começando pelos aspectos da fotosensibilidade e das técnicas existentes para o seu incremento, terminando na descrição

dos vários métodos de inscrição, em particular os métodos interferométrico e por máscara de fase, os mais utilizados tanto a nível laboratorial como comercial.

Também neste capítulo é avaliada a sensibilidade à deformação e temperatura, aspectos necessários à compreensão do funcionamento dos vários métodos de interrogação, abordados no capítulo seguinte, bem como dos principais problemas associados ao seu desenvolvimento.

DESMODULAÇÃO DE SENSORES DE BRAGG EM FIBRA ÓPTICA

3.1 Introdução

Desde o aparecimento das primeiras redes de Bragg, inscritas pelo exterior da própria fibra, vários métodos têm sido apresentados para a obtenção da resposta deste tipo de sensores ópticos [Meltz, 1989]. De acordo com o princípio de funcionamento das redes de difracção de Bragg, o objectivo a atingir com um Sistema de Desmodulação, ou Interrogação⁴, é sempre o de medir o comprimento de onda de Bragg, λ_B , de um sensor, ou mais concretamente, a sua variação, $\Delta\lambda_B$, em função da grandeza física actuante sobre o sensor.

Uma primeira caracterização dos sistemas de desmodulação pode ser feita de acordo com o tipo de aplicação dos sensores de Bragg, ou mais genericamente do sistema de instrumentação. Assim, algumas características, ou factores de selecção dos métodos de interrogação podem ser enunciados, quer de acordo com as suas características de medição, quer pelas suas propriedades físicas:

- Resolução e exactidão de medição;
- Gama de medição;
- Regime dinâmico;
- Multiplexagem;
- Robustez e dimensões físicas do sistema;
- Custo associado.

⁴ Dado não existir uma normalização nesta terminologia, mesmo na língua inglesa, onde se usam, sem qualquer critério, os termos *demodulation* e *interrogation*, optou-se também nesta tese por usar os dois termos: desmodulação e interrogação, para designar o método de obter a resposta do sensor óptico.

Neste capítulo é realizada uma análise aos diversos métodos de desmodulação, em função dos seus princípios de medição, e utilização da própria rede de Bragg em fibra óptica. Neste sentido, foram identificadas quatro grandes classes para a realização da desmodulação de sensores de Bragg, nomeadamente.

- Espectral Passiva;
- Espectral Activa;
- Interferométrica;
- Por Laser Sintonizável;

Os métodos de desmodulação por análise espectral foram dos primeiros a surgir, inclusivamente pela sua simplicidade conceptual, em particular a análise espectral passiva implementada por um analisador de espectro óptico. A utilização de um filtro de banda estreita sintonizável permite um segundo tipo de análise espectral, na qual o posicionamento mecânico do filtro é um dos aspectos críticos para o seu funcionamento. O estado de desenvolvimento de ambas as formas de análise espectral confirmam um bom desempenho ao nível das suas propriedades de medição. O método baseado em interferometria aplica conceitos substancialmente diferentes dos anteriores, nomeadamente a conversão da variação de comprimento de onda em variação de fase da luz transmitida. Com ele, são obtidas elevadas resoluções de medição, que chegam a ser várias ordens de grandeza superiores às dos métodos de análise espectral. Mais recentemente, com a evolução tecnológica e redução de custo dos vários componentes ópticos envolvidos, foi possível a utilização prática do modelo baseado numa fonte laser sintonizável, obtendo-se excelentes resultados a vários níveis.

Sendo a multiplexagem um dos factores de mérito revelados pelos sensores de rede de Bragg em fibra óptica, será também abordada neste capítulo (secção 3.6). Os diferentes géneros de multiplexagem, para além das suas várias combinações, podem ser classificados em:

- Multiplexagem por divisão de comprimento de onda (WDM);
- Multiplexagem por divisão temporal (TDM);
- Multiplexagem por divisão espacial (SDM);

3.2 Desmodulação Espectral Passiva

3.2.1 Analisador de Espectro Óptico

O primeiro método a surgir para a determinação do comprimento de onda central de redes de Bragg faz uso, como elemento principal, de um analisador de espectro óptico. Os resultados obtidos com este método estão num bom nível em termos da resolução e exactidão de medição, sendo o seu princípio de funcionamento bastante simples. Os elementos utilizados são uma fonte de espectro largo, um acoplador 50:50, uma fibra com o sensor, ou sensores ópticos inscritos e um analisador de espectros, da forma indicada no esquema da Figura 3.1. O espectrómetro é utilizado para fazer uma leitura directa de toda a largura da banda espectral da fonte óptica, na qual se incluem as assinaturas espectrais dos vários sensores em fibra óptica (SFO). Como no exemplo da figura, sendo incluído no esquema de montagem um computador (os OSA apresentam normalmente uma porta de comunicação digital, como é o caso do MS9780A - Figura 3.2), é possível ainda fazer a aquisição e respectivo processamento dos dados recolhidos em Tempo-Real.

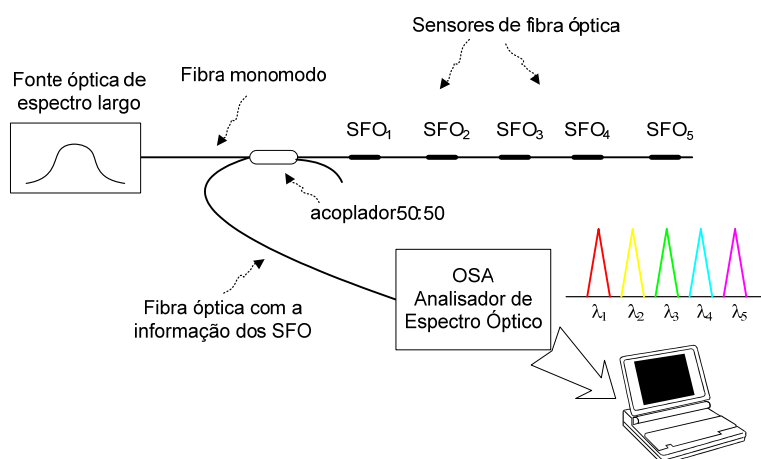


Figura 3.1 Modelo de desmodulação espectral passiva com utilização de um OSA

No entanto, a utilização de um OSA de varrimento introduz algumas dificuldades à aplicação prática deste método devido essencialmente ao tamanho, peso e custo do próprio espectrómetro. Sendo instrumentos dedicados a uma utilização laboratorial, estes aparelhos revelam uma utilização muito limitada fora deste ambiente, em particular se se considerar um estaleiro de uma obra de engenharia civil.

Um exemplo destes analisadores de espectro é o mostrado na figura seguinte, com o Anritsu [MS9780A]. Apresenta uma exactidão de medição de $\pm 0,05$ nm, uma gama espectral de leitura desde os 600 aos 1750 nm e uma resolução, em comprimento de onda, de 0,07 nm [Anritsu, 2000].



Figura 3.2 Analisador de espectro óptico (OSA) – Anritsu [MS9780A]

A evolução da implementação deste método tem sido efectuada principalmente ao nível do analisador de espectro óptico, que se pretende mais simples, mais pequenos e de menor custo. A descrição e análise das alternativas é aqui remetida para o Capítulo 4. Neste capítulo é também descrito todo o desenvolvimento de um sistema baseado neste método de desmodulação, utilizando um espectrómetro baseado numa rede de difracção holográfica de reflexão e um *array* de CCD, trabalho realizado durante o período da tese.

3.2.2 Filtragem Espectral

3.2.2.1 *Filtro Espectral Edge*

Para além do analisador de espectro óptico, outra das primeiras técnicas utilizadas para a desmodulação de sensores FBG é baseada num filtro espectral [Measures, 2001]. Uma ilustração esquemática deste conceito de medição é apresentada na Figura 3.3.

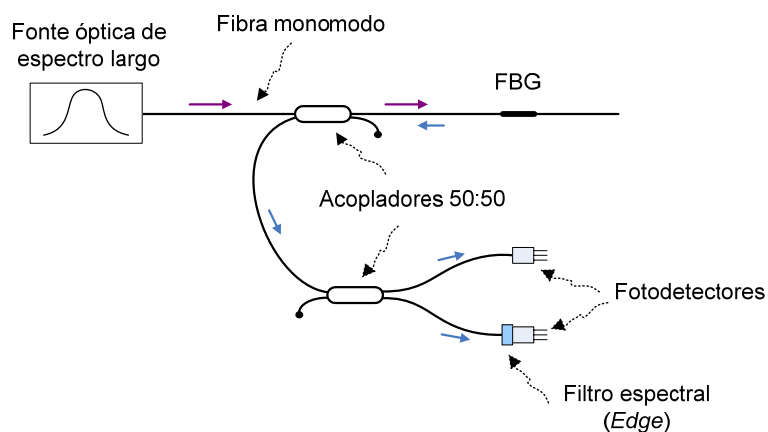


Figura 3.3 Modelo de desmodulação com utilização de um filtro espectral *Edge*

A descrição do seu princípio de funcionamento pode ser resumida da seguinte forma: a luz emitida por uma fonte óptica de espectro largo é enviada para o sensor de Bragg através de um acoplador 50:50. Por

sua vez, a luz reflectida pelo FBG volta a passar pelo mesmo acoplador, em sentido oposto, sendo enviada para um segundo acoplador 50:50. A luz é dividida por este último acoplador e enviada para dois fotodetectores. À entrada de um dos fotodetectores é colocado um filtro espectral, fazendo com que a intensidade de luz do sinal recebida por este dispositivo seja dependente do comprimento de onda do sinal óptico, Figura 3.4. O segundo fotodetector, sem qualquer filtro, funciona como referência, compensando as variações de intensidade que possam ser provocadas por flutuações da fonte de alimentação, por variações no alinhamento dos conectores ou perdas provocadas por eventuais torções na fibra óptica.

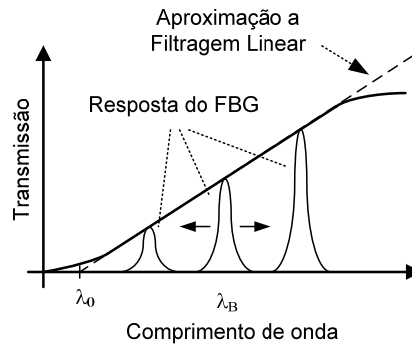


Figura 3.4 Característica da resposta de um filtro espectral *Edge*

Idealmente, o ganho de transmissão do filtro espectral deverá ser uma função linear, em comprimento de onda, como indicado na Figura 3.4. Se a resposta do filtro for efectivamente uma função linear, $F(\lambda)$, pode escrever-se:

$$F(\lambda) = D(\lambda - \lambda_0) \quad (3.1)$$

onde D representa o declive da função de transferência do filtro e λ_0 representa o comprimento de onda para o qual $F(\lambda) = 0$.

Assumindo a simplificação de que o sinal reflectido pelo FBG tem uma forma Gaussiana, equação (2.14), com uma largura espectral $\Delta\lambda$ e um comprimento de onda central λ_B , pode ser demonstrado que a relação entre o sinal filtrado (F) e a referência (R - não filtrado) é dada por [Measures, 2001]:

$$\frac{I_F}{I_R} = D \left(\lambda_B - \lambda_0 + \frac{\Delta\lambda}{\sqrt{\pi}} \right) \quad (3.2)$$

e é linearmente proporcional ao comprimento de onda de Bragg, λ_B .

Na Figura 3.5 representa-se graficamente as curvas de resposta de vários filtros espectrais comerciais dentro da zona dos Infra-Vermelhos [Andover, 2005; Schott, 2005]. Como se pode verificar, a resposta não é perfeitamente linear. Depois de definido o comprimento de onda de trabalho do FBG, o filtro tem que ser escolhido para que a zona de maior linearidade na resposta seja aquela a ser utilizada. De qualquer forma, e conhecendo-se à partida a resposta do filtro dentro da gama espectral pretendida, é sempre possível fazer a correcção dos desvios em relação à linearidade através de pós processamento de sinal.

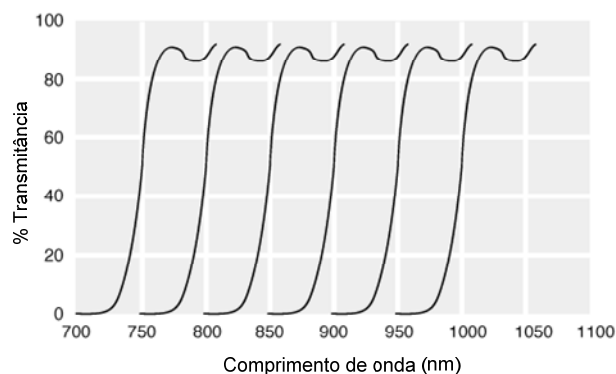


Figura 3.5 Curvas de resposta de vários filtros espectrais NIR [Andover, 2005]

O valor da intensidade de luz lida pelo fotodetector está assim relacionada com o comprimento de onda de Bragg, e portanto, relacionada com a deformação, ou temperatura, a que o sensor está sujeito.

Uma das vantagens deste esquema de desmodulação é o facto de apresentar uma elevada resposta dinâmica, permitindo a sua aplicação na monitorização de vibrações em estruturas [Measures, 2001].

Apesar de alguns problemas iniciais na implementação deste sistema de interrogação, nomeadamente, a elevada sensibilidade à temperatura dos filtros espectrais, a não linearidade da função de transferência do filtro e a sensibilidade dos acopladores ao estado de polarização combinada com a birrefringência induzida pela deformação nos FBG's, algumas empresas introduziram no mercado instrumentos de medição nele baseado. Algumas especificações da versão comercial lançada pela ElectroPhotonics Corporation, modelo FLS-3500 [Measures, 2001; Tennyson, 2001]: gama de medida - 8500 $\mu\epsilon$; resolução em deformação - 1 $\mu\epsilon$; exactidão de medida - $\pm 5 \mu\epsilon$; resposta dinâmica (1 único canal): 1 kHz.

Uma variante a este tipo de filtros foi apresentada por Ribeiro *et al* em 1996 [Ribeiro, 1996]. No seu trabalho usou um filtro em fibra que apresenta uma resposta espectral periódica, com um período de ~ 45 nm. Num intervalo de 10 nm, entre um máximo e um mínimo, o filtro apresenta uma linearidade de $\sim 0,5$ dB/nm. Estes parâmetros permitem uma resolução de medição, em deformação, de $\pm 3,5 \mu\epsilon$.

3.2.2.2 Acoplador com Divisão de Comprimentos de Onda

Uma segunda forma de promover a filtragem espectral, mais eficiente em termos ópticos e mais compacta, passa pela utilização de um acoplador com divisão de comprimentos de ondas. Se um destes acopladores for usado no lugar do segundo acoplador da montagem definida na Figura 3.3, para além de servir como divisor de sinal, funciona também como filtro espectral de duplo ganho. Neste caso, cada fotodetector vai receber um sinal óptico já processado por um filtro espectral, mas cada um deles com um ganho de sinal contrário. A configuração completa da montagem é representada na Figura 3.6.

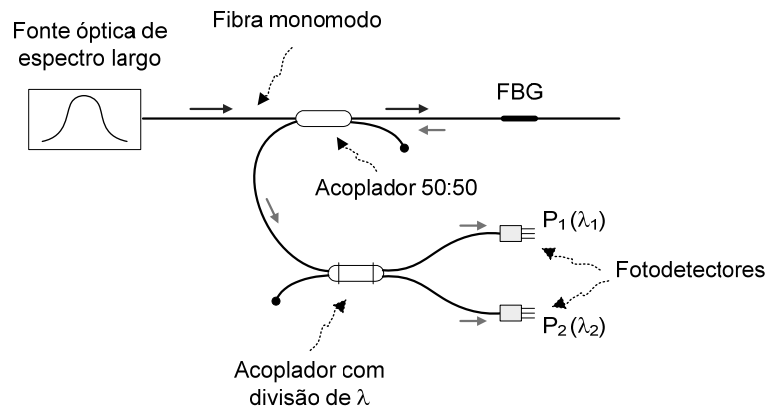


Figura 3.6 Modelo de desmodulação com utilização de um acoplador de divisão de comprimento de onda

Com este sistema é possível obter uma resposta (R) linear, em função da deformação aplicada, dada pela seguinte relação, que utiliza a resposta dos dois fotodetectores:

$$R = \frac{P_1 - P_2}{P_1 + P_2} \quad (3.3)$$

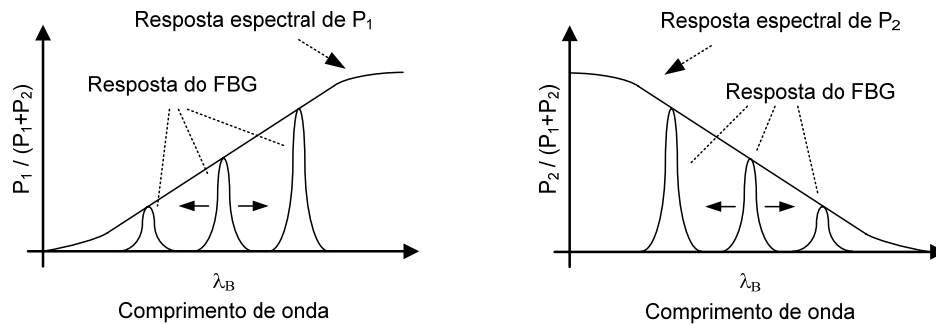


Figura 3.7 Resposta de ambos os fotodetectores utilizando o acoplador de divisão de comprimento de onda

Dos ensaios efectuados e relatados sobre este sistema, foram apresentados resultados que comprovam o seu funcionamento. Davis e Kersey obtiveram valores de $\pm 3 \mu\epsilon$ para a resolução de medição, numa gama de total de $1050 \mu\epsilon$ [Davis, 1994]. Embora os autores tenham utilizado uma taxa de aquisição de apenas 10 Hz, a taxa máxima de aquisição está unicamente limitada pela electrónica de instrumentação utilizada. Como aspecto negativo, este esquema apresenta grande sensibilidade do acoplador de divisão de comprimento de onda às variações de temperatura e mudanças no estado de polarização (assunto abordado no capítulo 5).

3.2.2.3 Redes de Período Longo (LPG)

Uma terceira forma de implementar a desmodulação espectral passiva é conseguida com a utilização de duas Redes de Período Longo (LPG), que servem como filtros espectrais em oposição [Spillman, 2002]. O esquema de montagem desta técnica de desmodulação é ilustrado na Figura 3.8.

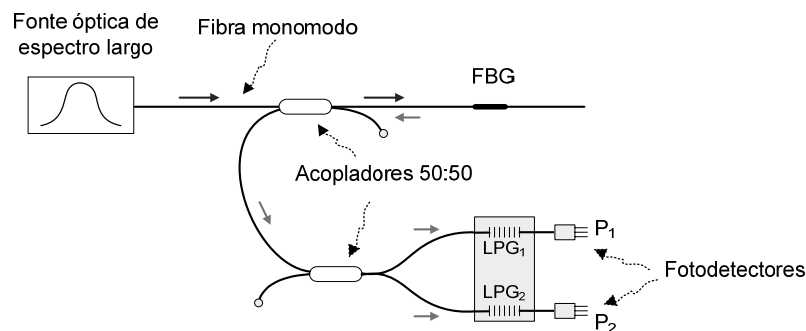


Figura 3.8 Modelo de desmodulação com utilização de duas redes de período longo (LPG's)

Da mesma forma que no sistema anterior, o valor de deformação é obtido através da relação entre a subtracção e a soma dos sinais obtidos dos dois fotodetectores, equação (3.3).

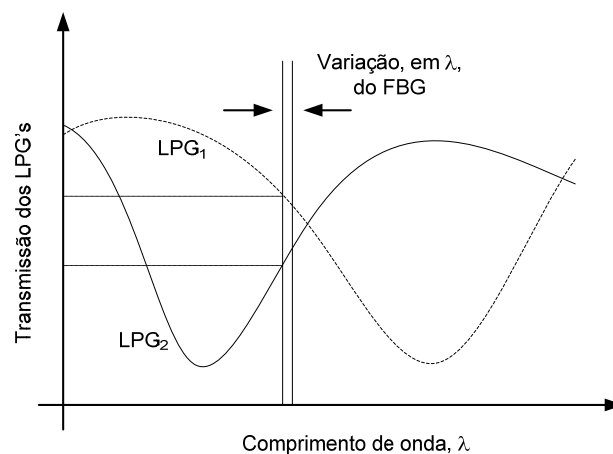


Figura 3.9 Função espectral, em transmissão, dos dois LPG's utilizados no esquema da Figura 3.8

Os ensaios efectuados permitem observar a obtenção de resultados de medição com uma resolução de $\pm 1 \mu\epsilon$ [Measures, 2001]. No entanto, e da mesma forma que no sistema anterior, foram registados desvios nas leituras na ordem dos $90 \mu\epsilon$ devido à sensibilidade à polarização, tanto do acoplador como dos LPG's.

3.3 Desmodulação Espectral Activa – Filtro Sintonizável de Banda-Estreita

Os filtros sintonizáveis de banda estreita são o elemento central de várias técnicas de desmodulação de sensores FBG. Este método de desmodulação apresenta um princípio de funcionamento simples, de acordo com esquema da Figura 3.10.

Neste esquema é utilizada uma fonte óptica de espectro largo que alimenta o sensor FBG através de um acoplador 50:50. A resposta do sensor, em reflexão, volta a passar pelo mesmo acoplador, em sentido contrário, e por um segundo acoplador, antes de chegar ao filtro sintonizável. Este filtro apresenta um comprimento de onda central próximo do λ_B do sensor FBG e é sintonizável através da aplicação de deformação, ou temperatura. O sinal óptico reflectido pelo filtro, e depois de voltar a atravessar o segundo acoplador, incide sobre um elemento fotodetector.

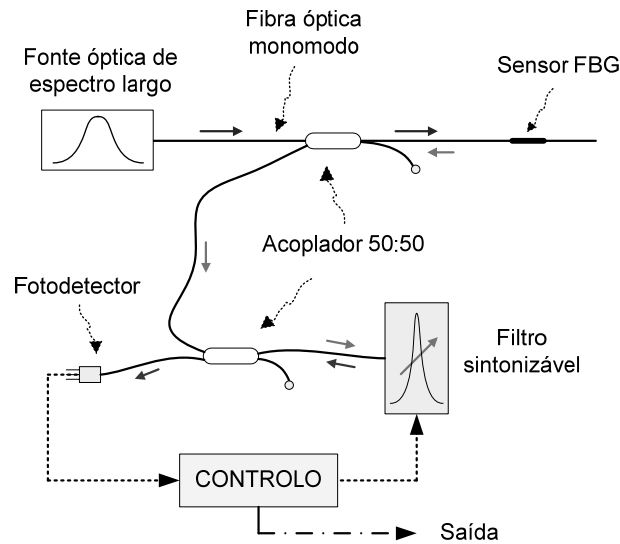


Figura 3.10 Modelo de desmodulação com filtragem sintonizável de banda estreita – montagem em reflexão

Actuando sobre a grandeza de sintonia do filtro, através de um bloco de controlo mais ou menos elaborado, consegue-se fazer com que o λ_B do sensor e o comprimento de onda central do filtro sejam totalmente coincidentes. Nesta situação, o sinal reflectido pelo filtro apresenta a sua amplitude máxima.

Quando os dois comprimentos de onda começam a divergir, a amplitude do sinal de reflexão do filtro diminui em conformidade. Assim, o sinal recolhido pelo fotodetector, nomeadamente a sua amplitude, traduz a variação de λ_B do sensor FBG e, dessa forma, a deformação ou temperatura a que o sensor está sujeito.

Para a implementação do filtro sintonizável existem basicamente três possibilidades: através de um segundo FBG, através de um filtro Fabry-Perot em fibra óptica ou através de um filtro acustico-óptico. No entanto, a técnica actualmente mais popular baseia-se no filtro sintonizável de Fabry-Perot, de acordo com a forte presença nos mercados comerciais de equipamento óptico [Fabry-Perot, 2005].

Uma das principais dificuldades na implementação desta técnica em reflexão reside nos reduzidos níveis de sinal, ópticos e eléctricos, com que é necessário trabalhar.

3.3.1 Técnicas de Controlo da Sintonia

A sintonia do filtro de banda estreita, no sentido de se encontrar o ponto de equilíbrio entre o comprimento de onda central do sensor e do filtro, é conseguida de várias formas.

A mais simples, em termos de estratégia e de implementação, corresponde ao varrimento contínuo da gama espectral do filtro (Figura 3.11) [Kersey, 1993]. A simplicidade conseguida com esta técnica em malha aberta apresenta como factor negativo uma baixa dinâmica de medição. Para cada leitura é necessário esperar um tempo correspondente ao varrimento completo de toda a gama.

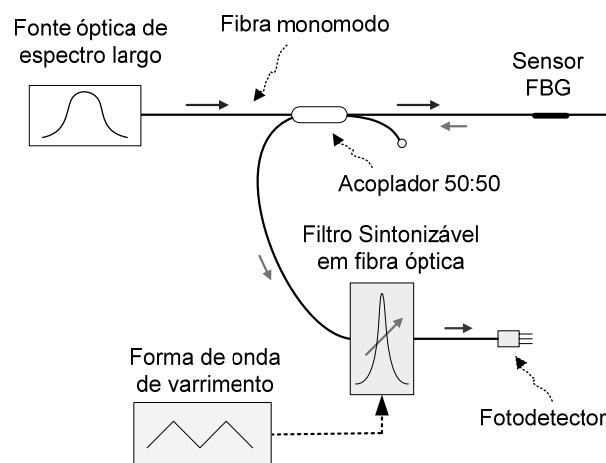


Figura 3.11 Modelo de Interrogação por Filtro Sintonizável – montagem em transmissão com varrimento completo da gama espectral

A Figura 3.11 mostra uma técnica diferente relativamente à mostrada na Figura 3.10. Aqui é utilizada uma configuração em transmissão, encontrando-se o fotodetector após o filtro. A eliminação de uma reflexão

no esquema de medição, bem como do segundo acoplador, faz com que o sinal que chega ao fotodetector tenha um nível de potência superior, melhorando assim o seu desempenho, reduzindo o principal problema apontado à técnica anterior. A detecção efectuada deixa de ser de um valor máximo e passa agora a ser de um valor mínimo (no limite, zero), quando os comprimentos de onda do sensor e do filtro estão perfeitamente sintonizados.

Várias técnicas semelhantes foram estudadas e desenvolvidas. Para além das mais sofisticadas, que utilizam uma malha fechada de controlo, uma das técnicas utilizadas é a ilustrada no esquema da Figura 3.12 [Kersey, 1993; Measures, 2001]. Através da adição de um sinal de *dither* à tensão de varrimento do filtro (em rampa) consegue-se a modulação do comprimento de onda da banda de passagem do filtro sintonizável, trazendo mais informação à medição efectuada. O sinal obtido é posteriormente filtrado por um filtro passa-baixo para retirar a componente à frequência do *dither*.

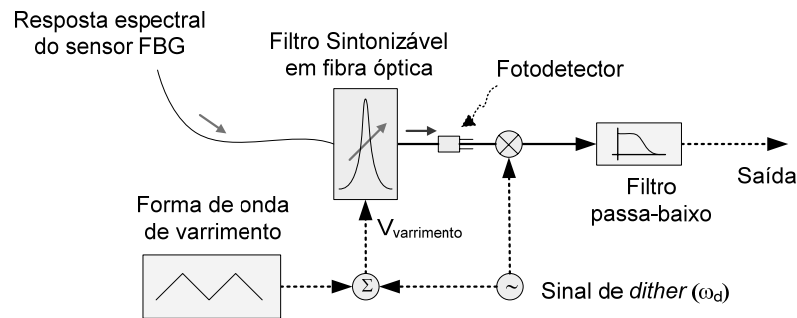


Figura 3.12 Modelo de desmodulação com Filtro Sintonizável – utilização de um sinal de *dither*

O sinal de *dither*, embora possa ser dispensável através de técnicas de controlo e pesquisa do valor máximo (ou mínimo), é uma forma simples de incrementar a exactidão de medição. Este sinal, adicionado ao controlo de posicionamento, quando em malha fechada, faz variar a resposta do filtro sintonizável em torno do λ_B do sensor. Quanto menor for a variação de amplitude observada pelo fotodetector mais correspondência terá a saída do sistema com o λ_B do sensor (Figura 3.13).

3.3.2 Filtro FBG Sintonizável

O primeiro sistema de interrogação de FBG a usar o princípio de filtragem sintonizável foi apresentado em 1993 por Jackson *et al* [Jackson, 1993]. É um filtro sintonizável implementado por um FBG e utiliza a configuração em reflexão já descrita, e mostrada na Figura 3.10. A actuação do filtro é executada através da aplicação de deformação, em tracção, por um elemento piezoeléctrico.

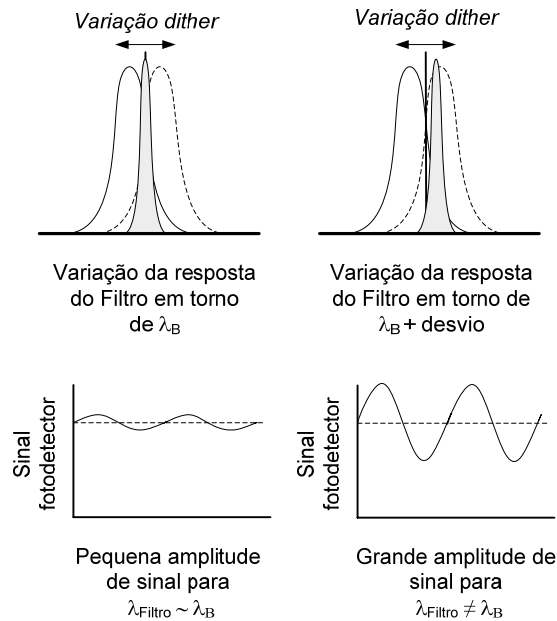


Figura 3.13 Utilização de um *dither* como forma de incremento da exactidão de medição com o filtro sintonizável

Os resultados obtidos com o seu trabalho, além de verificar a funcionalidade do esquema permitem também verificar a possibilidade de implementação de multiplexagem através da colocação de vários filtros FBG em paralelo sobre o mesmo elemento piezoeléctrico. Neste caso, não é possível a utilização de uma malha de controlo individual para fazer o seguimento do sinal de cada um dos sensores. Todos os filtros passam a funcionar num modo de varrimento linear, em que é coberta a excursão total do piezoeléctrico por cada passagem. Com os ensaios de calibração realizados por Jackson *et al* foi conseguida uma resolução de $\pm 4 \mu\epsilon$.

Davis *et al*, em 1995, apresentaram um modelo semelhante mas mais completo, no qual são também utilizados FBG como elementos de filtragem, a funcionar em transmissão [Davis, 1995]. O princípio básico da técnica é semelhante ao apresentado anteriormente por Jackson, excepto na particularidade do fotodetector estar localizado a jusante do filtro, ou seja, a funcionar em transmissão. Isto faz com que o sinal que chega ao fotodetector tenha um nível de potência superior, melhorando assim o seu desempenho. Neste esquema, cada par de FBG's, sensor e filtro, são produzidos com o mesmo comprimento de onda central de referência. Este trabalho introduz ainda uma nova forma de multiplexagem de vários sensores FBG, através do controlo individual de cada um dos filtros FBG. Os resultados apresentados permitem verificar boas características de medição deste esquema, nomeadamente a elevada resolução atingida, de $\pm 0,4 \mu\epsilon$. No entanto, a utilização de dois amplificadores *lock-in* (aparelhos tipicamente de bancada de laboratório) na malha de realimentação e controlo não

permite que este sistema de interrogação possa ser considerado como portátil e menos ainda como económico.

Em 1994 Morey introduziu, dentro do mesmo modelo de interrogação, uma nova técnica de aplicação de deformação à fibra óptica [Morey, 1994]. Esta é a primeira referência à aplicação de deformação em compressão à fibra óptica. São utilizados passadores metálicos que envolvem totalmente a fibra óptica. Através da aplicação conjunta de compressão e de tracção é obtida uma variação de comprimento de onda de 45 nm, valor muito elevado quando comparado com o permitido apenas por tracção. O aspecto menos positivo deste trabalho está no baixo regime dinâmico conseguido, imposto pela utilização de um motor para aplicar deformação à fibra.

Em 1997 Iocco *et al* apresentaram os primeiros resultados da sua investigação, na mesma linha do trabalho iniciado por Morey, ou seja, com a fibra óptica a poder ser traccionada e comprimida [Iocco, 1997; Iocco, 1999]. Uma das grandes inovações apresentadas consiste na utilização de um actuador piezoeléctrico, capaz de deformar a fibra (com uma rede de Bragg com apenas 2,5 mm) com elevado regime dinâmico (variação máxima de 21 nm/ms). É também o primeiro a utilizar sensores de posicionamento para melhorar a exactidão da medição, implementados por *strain gauges* resistivos. A variação de comprimento de onda conseguida é de 45 nm o que, em termos de aplicações de telecomunicações, torna estes filtros capazes de funcionar em diferentes bandas.

Um dos mais recentes sistemas de interrogação apresentados, baseado na filtragem espectral por FBG foi apresentado por Allison *et al* [Allison, 2002]. Toda a ênfase do trabalho é dada no desenvolvimento de uma estrutura de aplicação de deformação à fibra óptica, baseada em novas ligas de material piezoeléctrico. É obtida uma excursão, em deformação, de $\approx 5000 \mu\epsilon$ com uma montagem que apresenta ainda como vantagens reduzidas dimensões e baixo peso.

Não podendo ser considerados como sistemas de interrogação, mas apenas como filtros FBG sintonizáveis, foram apresentados muito recentemente dois trabalhos equivalentes no seu princípio de funcionamento [Goh, 2003; Tay, 2004]. É demonstrada a possibilidade de deformação da fibra óptica, quer em tracção como em compressão, através de torção. A fibra óptica é embebida numa placa de material compósito, permitindo excursões, em comprimento de onda, de 90 nm, valor superior a qualquer uma das técnicas anteriormente apresentadas.

A continuação do estudo deste método, depois de terem sido introduzidos os princípios de funcionamento deste método de interrogação bem como algumas das principais referências sobre o assunto, é remetida aqui para o capítulo 6. Este capítulo é referente ao desenvolvimento e implementação de um sistema de interrogação por filtragem sintonizável de redes de Bragg em fibra óptica.

3.3.3 Filtro Fabry-Perot (FFP) em Fibra Óptica

Precisamente na mesma altura que Jackson *et al* apresentaram o primeiro modelo para um sistema de interrogação de redes de Bragg baseado em filtragem sintonizável, em Agosto de 1993 Kersey *et al* apresentaram um esquema análogo, mas no qual o filtro FBG é substituído por um filtro Fabry-Perot (FFP) em fibra óptica [Kersey, 1993]. A Figura 3.11 ilustra este sistema de interrogação. Nesta técnica, a luz reflectida pelos sensores de Bragg é conduzida através do FFP. Este filtro deve apresentar um intervalo entre dois máximos (gama espectral livre – FSR) suficientemente largo de forma a assegurar que apenas um dos seus picos de ressonância, em comprimento de onda, cai dentro da gama de excursão de um sensor FBG. Na situação de correspondência total de dois picos espectrais, o do sensor FBG e um do FFP, o fotodetector recebe o máximo de intensidade de luz. Se se conhecer a largura da cavidade do FFP, L_c , passa então a conhecer-se a posição do sensor (Figura 3.14). Da mesma forma que para os filtros FBG, uma das formas de controlo da posição, ou largura, da cavidade do FFP é através de um actuador piezoeléctrico acoplado à extremidade móvel do FFP. Assim, consegue-se o ajuste do comprimento de onda da banda de passagem do filtro.

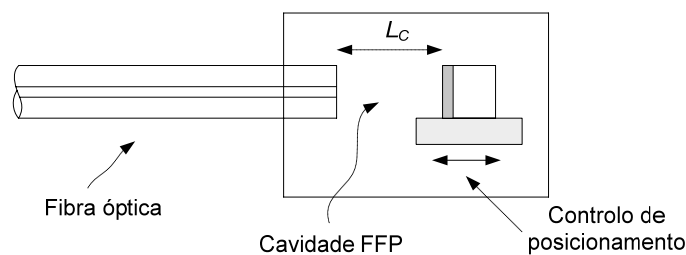


Figura 3.14 Largura da cavidade FFP com controlo de posicionamento

Na Figura 3.15 é mostrada a resposta espectral em transmissão (função *Airy*, $\mathcal{A}$) de um filtro Fabry-Perot, em função dos coeficientes de reflexão dos dois espelhos que compõe o interferómetro (R_{eff}), da largura da cavidade (L_c) e respectiva constante de propagação (β) [Measures, 2001; Cao, 2004]. $\Delta\lambda_c$ representa a largura espectral a meia altura do pico de ressonância do FFP, e $\Delta\lambda_{FSR}$, a largura espectral livre, dada por:

$$\Delta\lambda_{FSR} = \frac{\lambda^2}{2nL_c} \quad (3.4)$$

onde n representa o índice de refração do meio entre os espelhos que formam o FFP.

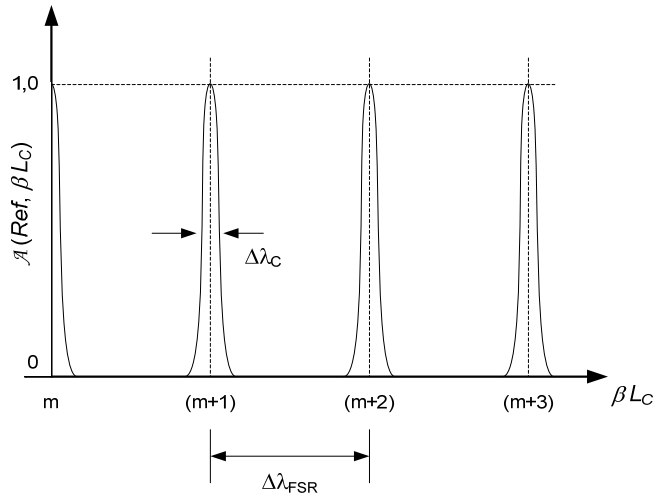


Figura 3.15 Resposta espectral em transmissão de um Filtro Fabry-Perot

Os comprimentos de onda de ressonância, λ_m , são encontrados pela expressão:

$$\lambda_m = \frac{2nL_C}{m} \quad (3.5)$$

onde m é um número inteiro.

Alguns destes filtros, surgidos recentemente, apresentam umas características típicas de $\Delta\lambda_C = 0,01$ nm e $\Delta\lambda_{FSR} = 360$ nm [Fabry-Perot, 2005]. Estes valores permitiriam, se não existissem outras limitações, que mais de 100 sensores FBG, espaçados de ~ 3 nm, pudessem ser multiplexados por um único FFP.

Este modelo de desmodulação foi já testado e ensaiado em diferentes configurações. A primeira, e mais simples, à qual a Figura 3.11 diz respeito, envolve a aplicação de uma tensão em rampa ao elemento piezoeléctrico, permitindo um varrimento repetitivo do comprimento de onda do filtro FFP em toda a banda espectral do sensor FBG.

Alguns dos ensaios de calibração efectuados com as várias técnicas de filtragem baseadas em FFP permitiram verificar a obtenção de bons resultados, entre os quais resoluções na ordem de ± 1 μ e com uma exactidão de $\pm 0,1$ % da gama total de variação e uma taxa de aquisição que, na sua versão mais recente, alcança os 100 kHz [Measures, 2001; Fukuchi, 2002; Bang, 2005].

3.3.4 Filtro Acustico-Óptico Sintonizável (AOTF)

Uma forma alternativa de implementar um filtro sintonizável é através do efeito acustico-óptico, que utiliza uma onda acústica para controlar a transmissão de luz de um determinado comprimento de onda.

Num Filtro Acustico-Óptico Sintonizável (AOTF), um cristal com propriedades simultaneamente piezoelétricas e electro-ópticas, permite que apenas uma banda estreita de comprimentos de onda seja transmitida através do dispositivo. O AOTF utiliza um guia de onda óptico plano, agrupado com um guia de onda acústico colocado à superfície e um par de polarizadores ortogonais (Figura 3.16).

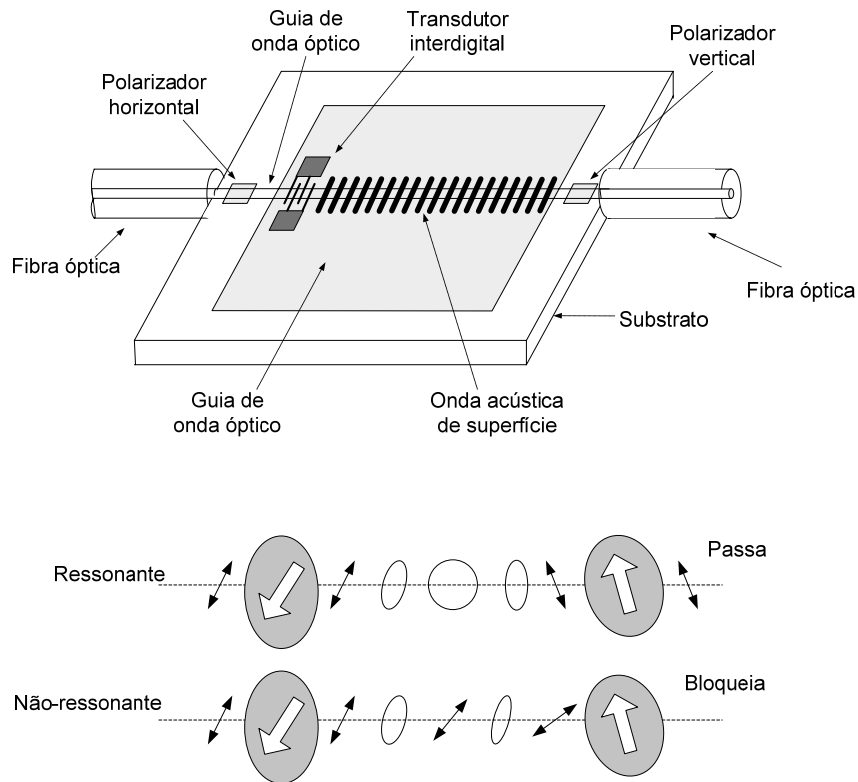


Figura 3.16 Esquema de configuração e princípio de funcionamento de um filtro sintonizável acustico-óptico

Quando se verifica a condição de ressonância:

$$\lambda_{RES} = \Delta n_{POL} \Lambda_A \quad (3.6)$$

a luz de comprimento de onda λ_{RES} que passa pelo guia de onda óptico, vê o seu plano de polarização rodar da orientação inicial (com que atravessa o primeiro polarizador) para a orientação necessária para atravessar o segundo polarizador. Na equação (3.6), Δn_{POL} representa a variação entre os índices de refração dos dois estados de polarização ortogonal e Λ_A é o comprimento de onda acústico transmitido pela guia de onda. Assim, os comprimentos de onda que estão fora de ressonância não são transmitidos, uma vez que a onda transmitida na superfície guia de onda acústica não realiza a necessária rotação de 90° do plano de polarização [Xu, 1993].

O comprimento de onda do sinal acústico é controlado pela frequência do sinal aplicado aos eléctrodos interdigitais do transdutor de onda acústica. Desta forma, este dispositivo pode ser operado em modo de varrimento, onde a banda de passagem do filtro varia dentro de um intervalo de comprimento de onda determinado através da alteração da frequência do sinal de tensão aplicado aos eléctrodos interdigitais.

Uma vantagem apresentada por este sistema é a sua elevada gama de sintonização, tipicamente maior do que $1\text{ }\mu\text{m}$. No entanto, o filtro AOTF apresenta uma baixa resolução espectral, num intervalo entre 1 e 4 nm.

Um diagrama de uma montagem deste método é mostrado na Figura 3.17 [Volanthen, 1996; Xu, 1996; Volanthen, 1997]. Nela, foi utilizada uma fonte óptica de espectro largo para iluminar os sensores FBG e um AOTF com uma banda de transmissão de 3,3 nm está posicionado imediatamente a montante do fotodetector. A sintonia do filtro acustico-óptico é conseguida através de um VCO (Oscilador Controlado em Tensão) controlado por computador. O controlo efectuado permite que o AOTF actue apenas sobre um único sensor FBG ou simultaneamente sobre todos os sensores, ajustando para isso a gama de varrimento em comprimento de onda. A elevada largura de banda do AOTF em comparação com a dos FBG's (3 nm em comparação com $\approx 0,2\text{ nm}$) não permite que a exactidão da medição seja elevada. Assim, foram obtidos valores de $\pm 6\text{ }\mu\epsilon$ [Volanthen, 1996].

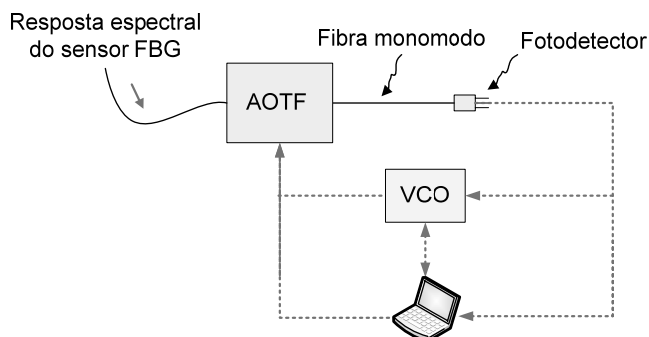


Figura 3.17 Diagrama simplificado do método de desmodulação por filtragem sintonizável acustico-óptico [Measures, 2001]

No entanto, a questão da baixa resolução pode ser ultrapassada e a assinatura espectral de um FBG pode ser medida com uma exactidão aceitável através da adição de um sinal *dither* ao sinal acústico aplicado ao AOTF, de uma forma em tudo semelhante à mostrada na secção 3.3.1 (Figura 3.13). Com a utilização desta técnica foram registados valores de exactidão de medição da ordem de $\pm 2\text{ }\mu\epsilon$ com taxas de aquisição de 5 Hz [Measures, 2001].

3.4 Desmodulação Interferométrica

O método de interrogação interferométrico, ou baseado em interferometria, envolve a aplicação de conceitos e técnicas consideravelmente diferentes de todos os anteriormente apresentados. É também um método utilizado na detecção dos desvios, em comprimento de onda, verificados na resposta do sensor FBG, que apresenta elevadas prestações em termos de resolução de medição.

O seu princípio de funcionamento básico baseia-se na utilização de um interferómetro de Mach-Zehnder como elemento de filtragem óptica, onde a sua função de transferência depende do termo de fase, $\delta(\lambda)$, e portanto do comprimento de onda de entrada, λ . A luz reflectida pelo sensor, ou seja, a resposta espectral do FBG, passa pelo interferómetro onde os desvios no comprimento de onda de Bragg são convertidos em variações de fase.

A Figura 3.18 ilustra o esquema da montagem e caracteriza o princípio geral de funcionamento deste método quando aplicado à desmodulação de sensores FBG.

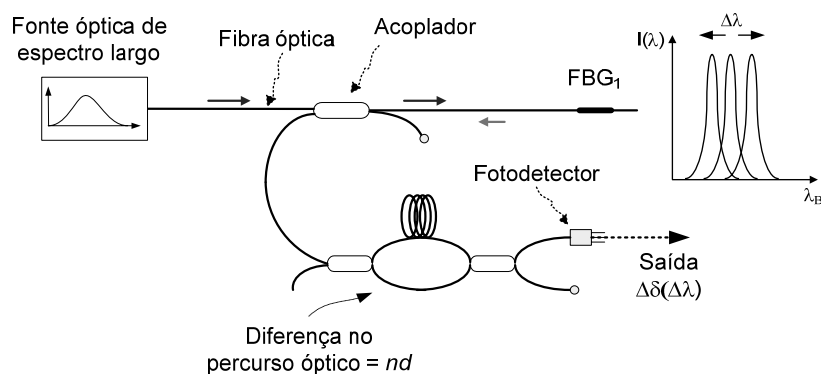


Figura 3.18 Esquema de um sistema interferométrico de Mach-Zehnder utilizado na desmodulação de sensores FBG

Qualquer desequilíbrio óptico entre os dois braços do interferómetro de Mach-Zehnder, $nd = n(d_1 - d_2)$, provoca uma diferença de fase dada por:

$$\delta(\lambda_B) = \frac{2\pi nd}{\lambda_B} + \phi \quad (3.7)$$

onde λ_B representa o comprimento de onda da luz reflectida pelo sensor FBG, d_1 e d_2 os comprimentos respectivos dos dois braços do interferómetro e ϕ é um factor de referência da fase, parâmetro este que reflecte as perturbações externas sobre o interferómetro e que apresenta uma variação aleatória ao longo do tempo [Kersey, 1992; Kersey, 1994; Measures, 2001].

Sendo um método interferométrico, para que esta técnica funcione é necessário garantir que a diferença entre o comprimento dos dois braços do interferómetro não exceda o comprimento de coerência efectivo da luz reflectida pela rede de Bragg, que é de apenas 0,3 cm para uma rede com 1 cm, nos 810 nm de comprimento de onda (ou cerca de 1,2 cm nos 1550 nm). É necessário portanto ter atenção ao comprimento da própria rede, L_r , dado que esta influencia directamente a largura espectral da rede de Bragg a meia altura, $\Delta\lambda_{ma}$ [equação (2.13)] e pelas leis de transmissão óptica, quanto maior for a largura espectral da luz mais curto é o comprimento de coerência, l_c :

$$l_c = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda} \quad (3.8)$$

A variação de fase, $\Delta\delta$, provocada por um desvio $\Delta\lambda_B$ no comprimento de onda de Bragg do FBG, λ_B , pode ser escrita como:

$$\Delta\delta = -\frac{2\pi nd}{\lambda_B^2} \Delta\lambda_B \quad (3.9)$$

A equação (3.9) pode ser reescrita usando a relação entre o desvio do comprimento de onda de Bragg, λ_B , e a variação da deformação axial, $\Delta\epsilon$, aplicada no sensor (assumindo temperatura controlada):

$$\Delta\delta = -\frac{2\pi nd}{\lambda_B} S_\epsilon \Delta\epsilon \quad (3.10)$$

onde S_ϵ representa a sensibilidade à deformação do sensor.

A alteração de fase pode ser determinada simplesmente com um único fotodetector através da contagem de franjas (Figura 3.18). No entanto, técnicas mais elaboradas e mais precisas utilizam dois fotodetectores, um por cada braço do interferómetro de Mach-Zehnder [Kersey, 1992; Kersey, 1994]. Utilizam ainda um cilindro piezoeléctrico, alimentado por uma malha de realimentação, à volta do qual é enrolada a fibra óptica que constitui o segundo braço do interferómetro. O controlo exercido pelo piezoeléctrico, para além de manter os dois braços em permanente quadratura de fase, permite a compensação de flutuações de baixa frequência. Através de ensaios de calibração com este sistema, Kersey *et al* obtiveram valores de resolução dinâmica, em deformação, de ~ 6 nε, para frequências na ordem de 100 Hz.

Evoluções deste método têm sido reportadas, nomeadamente na forma de avaliação e compensação das referidas flutuações aleatórias no desvio de fase, que torna este sistema pouco eficiente na medição de deformações com baixos regimes dinâmicos [Rao, 1997; Jorge, 2000; Measures, 2001].

Um outro tipo de interferómetro usado para a interrogação de redes de Bragg foi apresentado mais recentemente, em 2001, por Murphy *et al* (Figura 3.19) [Murphy, 2001; Murphy, 2002].

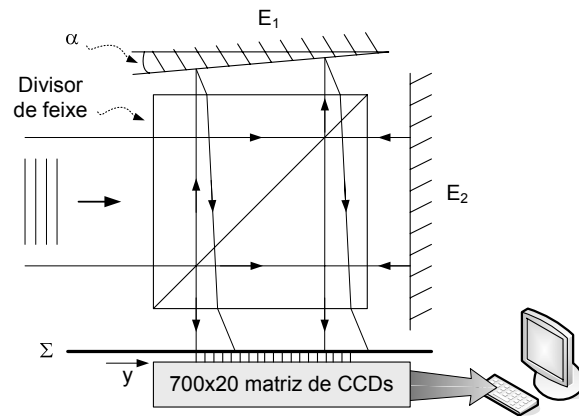


Figura 3.19 Interferómetro inclinado de Twyman-Green iluminado por uma onda plana.

Neste esquema, E1 e E2 são dois espelhos fixos; α é o ângulo de inclinação de E1 em relação à quadratura com E2 e Σ é o plano onde o interferograma é projectado.

Este interferómetro, denominado de Twyman-Green, utiliza um espelho inclinado, para que a diferença de comprimento óptico entre os dois braços conduza a uma diferença de posição sobre uma matriz de fotodetectores, no caso implementado por CCD's. Com os ensaios de calibração efectuados a este sistema, Murphy *et al* obtiveram uma resolução de medição de 25 pm para uma gama máxima de 200 μm .

3.5 Desmodulação por Laser Sintonizável

Desde há muito que é considerada a aplicação de lasers sintonizáveis na desmodulação de sensores FBG. A técnica implica o varrimento do comprimento de onda do laser sobre o intervalo espectral correspondente à resposta dinâmica do sensor. No entanto, o elevado custo dos díodos laser adequados a esta técnica fez com que esta fosse sendo esquecida até ao final da década anterior. De facto, as recentes evoluções tecnológicas permitiram uma redução muito significativa no preço destes componentes. Ao considerar-se ainda a possibilidade de interrogação de um elevado número de sensores FBG, esta técnica passou a ser economicamente viável.

Measures *et al* desenvolveram uma arquitectura de desmodulação modular, capaz de funcionar com qualquer uma das modalidades possíveis com sensores FBG (sensores de curta ou longa extensão; multiplexagem de sensores dispostos em série ou em paralelo). No centro deste sistema de interrogação universal está um díodo laser capaz de executar um varrimento de 10 nm em cerca de 1 ms. O esquema

de funcionamento básico desta técnica está ilustrado na Figura 3.20 [Measures, 2001]. A primeira versão a ser desenvolvida e ensaiada, em 1998, utiliza um laser sintonizável (GC-DFB) para a interrogação de um sensor FBG.

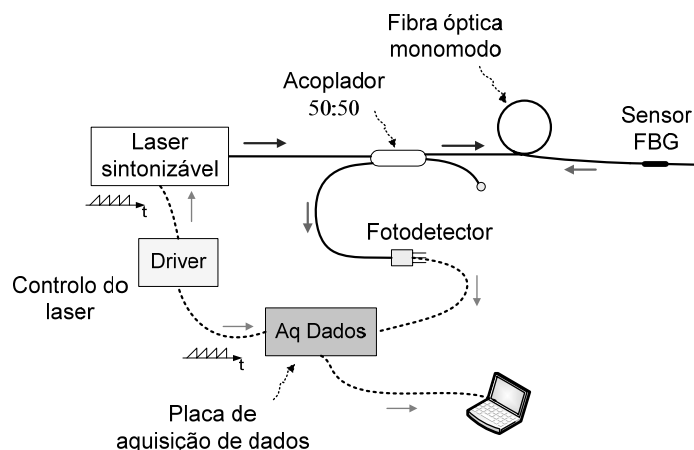


Figura 3.20 Sistema de desmodulação de sensores FBG baseado num diodo laser sintonizável de varrimento rápido

O sinal reflectido pelo FBG é recolhido por um fotodetector. O sinal de saída do fotodetector, que representa a intensidade do sinal de resposta do FBG, juntamente com o sinal de corrente utilizado para sintonizar em comprimento de onda o laser, é adquirido e processado por um computador. É utilizada uma técnica de detecção de pico para medir a posição, em comprimento de onda, do sinal reflectido pelo FBG. Os resultados obtidos durante os ensaios de calibração permitem observar valores de resolução de medição, em deformação, na ordem de $0,1 \mu\epsilon$, com uma taxa de aquisição naturalmente limitada pela frequência de varrimento do laser e restante electrónica de instrumentação.

Sendo das técnicas mais recentes, surgida apenas em 1998, esta é também aquela sobre a qual têm sido efectuadas as maiores evoluções, nomeadamente a nível comercial. Ryu e Hong, em 2002, apresentaram um sistema de interrogação baseado num laser sintonizável (WSFL), onde conseguem obter uma largura de varrimento de 40 nm [Ryu, 2002]. A Micron Optics é uma empresa de soluções e equipamento para instrumentação óptica que comercializa actualmente sistemas de interrogação baseados nesta técnica, divididos em diferentes níveis consoante as necessidades em termos de regime dinâmico, resolução e número de sensores a monitorizar [MicronOptics, 2005].

3.6 Multiplexagem de Sensores de Bragg

Uma das grandes vantagens inerentes aos sensores em fibra óptica reside no facto da fibra servir simultaneamente de sensor e via de transmissão, através da qual são recolhidos os dados relativos à

medição. No entanto, como já referido no capítulo anterior, a característica que torna os sensores de redes de Bragg particularmente atractivos, mesmo face a outros sensores ópticos, é a possibilidade de multiplexagem de um elevado número de sensores. Mais ainda, a multiplexagem pode ser conseguida sem incluir elementos adicionais no sistema de aquisição. Por oposição, não é possível endereçar, de forma série, vários *strain gauge* resistivos, ou piezoeléctricos, ao longo do mesmo condutor. Cada sensor eléctrico tem que ser ligado individualmente ao respectivo elemento de condicionamento de sinal ou através um multiplexador. Esta característica apresentada pelos sensores ópticos revela-se de grande importância, nomeadamente em aplicações onde é necessário um elevado número de sensores, e principalmente quando estes têm que estar embebidos na própria estrutura a monitorizar.

Numa primeira abordagem aos vários tipos de multiplexagem, é considerada a divisão entre multiplexagem série e paralela. Na multiplexagem série, o conjunto de sensores a ser monitorizado está posicionado ao longo do mesmo tramo de fibra óptica (Figura 3.21).

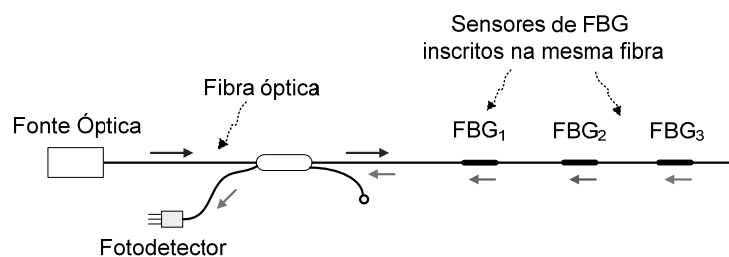


Figura 3.21 Multiplexagem série de redes de Bragg em fibra óptica

Na multiplexagem paralela, um *array* de fibras ópticas é posicionado de maneira a que todos os sensores sejam acedidos em simultâneo pela fonte óptica e, de igual forma, façam chegar a sua resposta ao fotodetector (Figura 3.22). A utilização de sensores em fibra óptica, nomeadamente sensores FBG, permite ainda uma fácil combinação entre multiplexagem série e paralela.

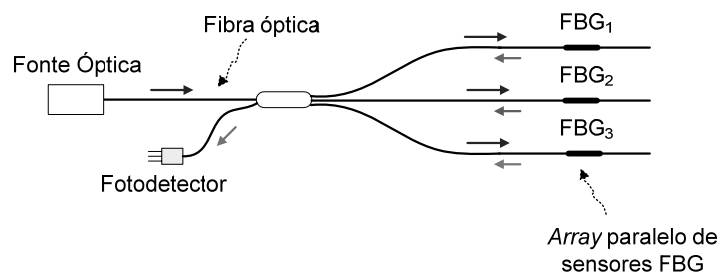


Figura 3.22 Multiplexagem paralela de redes de Bragg em fibra óptica

Diferentes esquemas de multiplexagem/demultiplexagem de sensores de Bragg, bem como algumas combinações entre estes, podem ser encontrados nas secções seguintes.

3.6.1 Multiplexagem por Divisão de Comprimento de Onda (WDM)

Este é claramente o esquema de multiplexagem mais apropriado para os sensores ópticos que codificam em comprimento de onda a informação da grandeza a medir, como é o caso particular dos sensores FBG. Neste sentido, todos os métodos de desmodulação apresentados neste capítulo podem ser utilizados com esta técnica de multiplexagem.

Neste esquema, cada sensor funciona em diferentes intervalos espectrais, havendo a necessidade de assegurar que nenhum dos intervalos de comprimento de onda, relativos a um sensor específico, se sobrepe aos dos sensores adjacentes. A demultiplexagem pode ser conseguida de várias formas, uma das quais através da utilização de um analisador de espectros, mostrado na secção 3.2.1. O método requer uma fonte óptica com uma largura de banda espectral elevada, de acordo com o número de sensores FBG a desmodular. Dois esquemas simplificados deste método, com multiplexagem série e multiplexagem em paralela, são mostrados nas Figura 3.23 e Figura 3.24, respectivamente.

Em ambas as figuras, a fonte óptica aparece como um conjunto de fontes de espectro estreito (λ_1 , λ_2 e λ_3). No entanto, na sua implementação é normalmente utilizada ou uma fonte óptica de espectro largo, tipo LED ou SLD, ou um laser sintonizável sobre o intervalo espectral dos sensores utilizados. O comprimento de onda central dos espectros reflectidos pelos vários sensores é representado por (λ_1^* , λ_2^* e λ_3^*).

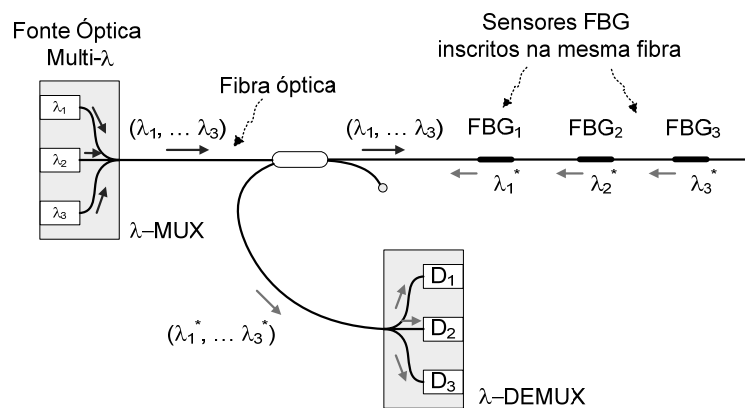


Figura 3.23 Esquema do sistema de multiplexagem série por divisão em comprimento de onda (WDM)

A implementação deste método foi viabilizada depois do rápido desenvolvimento de tecnologia a ele associada, nomeadamente com a crescente importância do WDM na indústria de telecomunicações em

fibra óptica (como já referido no capítulo anterior). Como exemplo de alguns destes dispositivos podem ser referidas as fontes ópticas de espectro largo, como os SLD's (actualmente com potências na ordem dos mW e larguras espectrais a meia altura de cerca de 50 nm) e os lasers sintonizáveis, ou os acopladores e divisores ópticos (*beam splitters*).

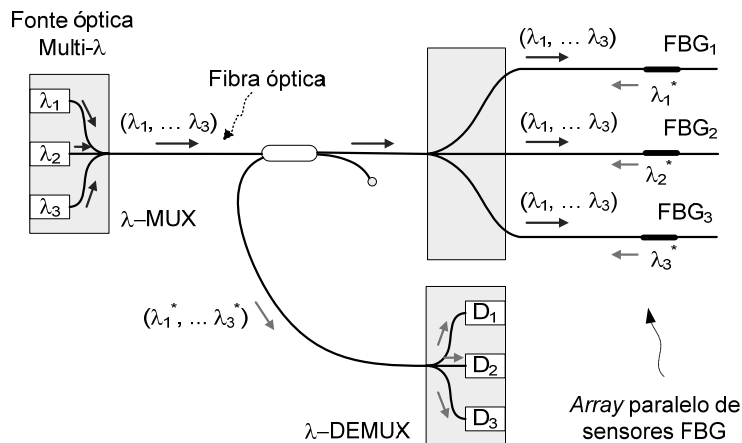


Figura 3.24 Esquema do sistema de multiplexação paralela por divisão em comprimento de onda (WDM)

Além dos métodos apresentados atrás, outros têm vindo a ser apresentados, nomeadamente a combinação entre diferentes métodos. Um destes métodos de multiplexação WDM, que combina a interrogação interferométrica com a utilização de filtros sintonizáveis acustico-ópticos, foi apresentado em 2001 por Boulet *et al* [Boulet, 2001]. Neste, um interferómetro de Mach-Zehnder é usado para recuperar os desvios de comprimento de onda dos sensores FBG, enquanto um filtro AOTF, que utiliza várias frequências de modulação, uma por sensor, é utilizado para a multiplexação. Com este esquema são conseguidas elevadas resoluções dinâmicas de medição, na ordem de $0,15 \mu\epsilon \text{ Hz}^{-1/2}$, permitindo ainda a multiplexação de vários sensores FBG.

3.6.2 Multiplexação por Divisão Temporal (TDM)

No esquema de multiplexação por Divisão Temporal são utilizados impulsos de luz para identificar os sensores através da medição do tempo de viagem (*time-of-flight*) entre a fonte óptica e o fotodetector. Na sua implementação são necessários impulsos muito curtos, o que implica trabalhar com sinais de muito baixa intensidade e com electrónica de muito alta velocidade. Neste método, vulgarmente designado por OTDR (*Optical Time Domain Reflectometry*), os sensores são colocados a diferentes distâncias ao longo da fibra óptica. Desta forma, um único impulso de interrogação de curta duração origina uma série de sinais distintos, relativos a cada um dos respectivos sensores FBG [Kersey, 1994]. Na Figura 3.25 e Figura 3.26 são ilustradas duas variantes deste método de multiplexação, série e paralelo, respectivamente.

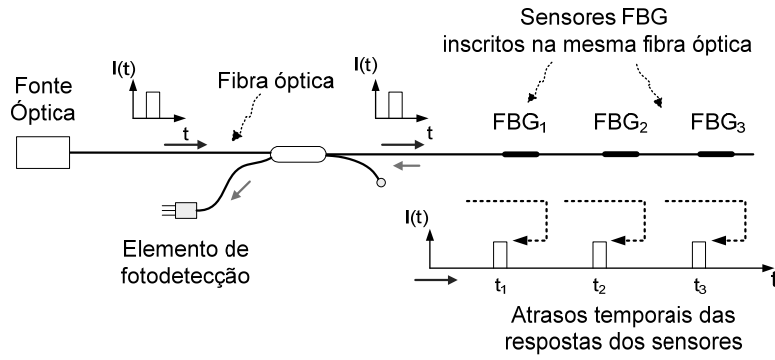


Figura 3.25 Esquema do sistema de multiplexagem série por divisão de tempo

É condição necessária ao funcionamento deste método que a duração do impulso laser seja menor que o tempo de viagem da onda electromagnética entre dois sensores adjacentes, T_{atraso} :

$$\tau_L \leq T_{\text{atraso}} = \frac{2nL_{\text{sep}}}{c} \quad (3.11)$$

onde τ_L representa a duração do impulso laser, L_{sep} é a distância de separação entre dois sensores adjacentes, n é o índice de refração do núcleo da fibra óptica e c é a velocidade da luz no vácuo.

De forma a quantificar os parâmetros descritos na equação (3.11), supor o seguinte exemplo numérico: pretende-se que a distância espacial entre sensores seja de 10 cm. Pela equação obtém-se um tempo de viagem do impulso laser entre dois sensores de 1 ns (assumindo um valor aproximado de $n = 1,5$). Assim, a duração do impulso laser terá que ser inferior a 1 ns, sendo portanto necessário recorrer a electrónica de controlo que permita a gestão de sinais de tão curta duração.

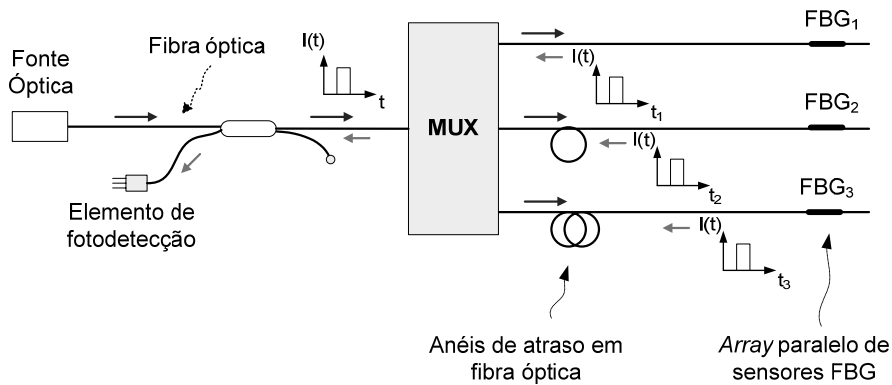


Figura 3.26 Esquema do sistema de multiplexagem paralela por divisão de tempo

Uma forma de conseguir a implementação deste método de multiplexagem é através da utilização do equipamento comercial também designado por OTDR. No entanto, sendo este um instrumento de medição de bancada, desenvolvido para utilização em ambiente laboratorial, da mesma forma que um analisador de espectro óptico, torna-se muito pouco prático e económico em aplicações de monitorização de estruturas de engenharia.

Neste método, cada sensor é endereçado através da selecção temporal do sistema de fotodetecção. A multiplexagem série de vários sensores é conseguida através da utilização de reflectores parciais ao longo da fibra óptica. No entanto, um conjunto de sensores de reflexão como os FBG com λ_B iguais entre si, colocados em série ao longo de uma mesma fibra óptica, origina múltiplos impulsos de reflexão e *crosstalk*. Isto significa que o sinal óptico reflectido do terceiro sensor da Figura 3.25 aparece, no elemento de fotodetecção, com um valor de amplitude dependente dos sinais ópticos referentes às reflexões do segundo e primeiro sensores. Assim, na implementação desta técnica, para que o *crosstalk* seja mantido num valor desprezável, há a necessidade de utilização de sensores com baixos valores de reflectividade. Os sensores de redes de Bragg em fibra óptica, de entre os diferentes tipos de sensores ópticos, são aqueles que melhor se adaptam ao esquema de multiplexagem por divisão temporal, TDM. Sendo fácil a produção de sensores de Bragg com diferentes reflectividades, podem ser definidos níveis crescentes de reflectividade à medida que a distância entre a fonte óptica e sensor vai aumentando. Isto permite uma optimização do sistema, nomeadamente na situação de um elevado número de sensores colocados em série.

Uma última referência a um tipo de fonte óptica que, apresentada recentemente por Li-Jun *et al*, contribui para o desenvolvimento deste método de multiplexagem [Li-Jun, 2005]. O laser *Mode-Locked* é um tipo de laser em fibra óptica capaz de emitir impulsos de duração muito curta, inferior a 1 ps, mas de elevada potência, além de apresentar um período facilmente ajustável.

3.6.3 Multiplexagem Combinada TDM e WDM

A limitada largura de banda das fontes ópticas é um factor que restringe o número de sensores FBG que podem ser multiplexados em comprimento de onda. Assim, a combinação de multiplexagem WDM com TDM é um método que oferece a possibilidade de endereçamento de um número elevado de sensores FBG, podendo mesmo atingir as várias centenas [Kersey, 1994; Valente, 2002]. Um esquema deste método é ilustrado na Figura 3.27.

Uma condição necessária para o funcionamento deste esquema passa pela utilização de sensores FBG com baixa reflectividade (na ordem de 1 %), e agrupados em conjuntos de sensores inscritos com diferentes comprimentos de onda. É utilizada uma fonte óptica de espectro largo e pulsada [Valente,

2002]. A detecção das variações de comprimento de onda de cada um dos sensores FBG, de cada um dos sub conjuntos, pode ser conseguida de várias formas, como por exemplo através de um método de desmodulação por filtro sintonizável (secção 3.3). Por fim, é utilizado um controlo temporal na leitura do fotodetector, que permite que cada conjunto de respostas, de cada um dos sub grupos de sensores FBG, seja processado em tempos distintos. Os resultados apresentados por Valente *et al* mostram valores de resolução linear de $\pm 0,6 \%$ para a gama total de variação de $2500 \mu\epsilon$.

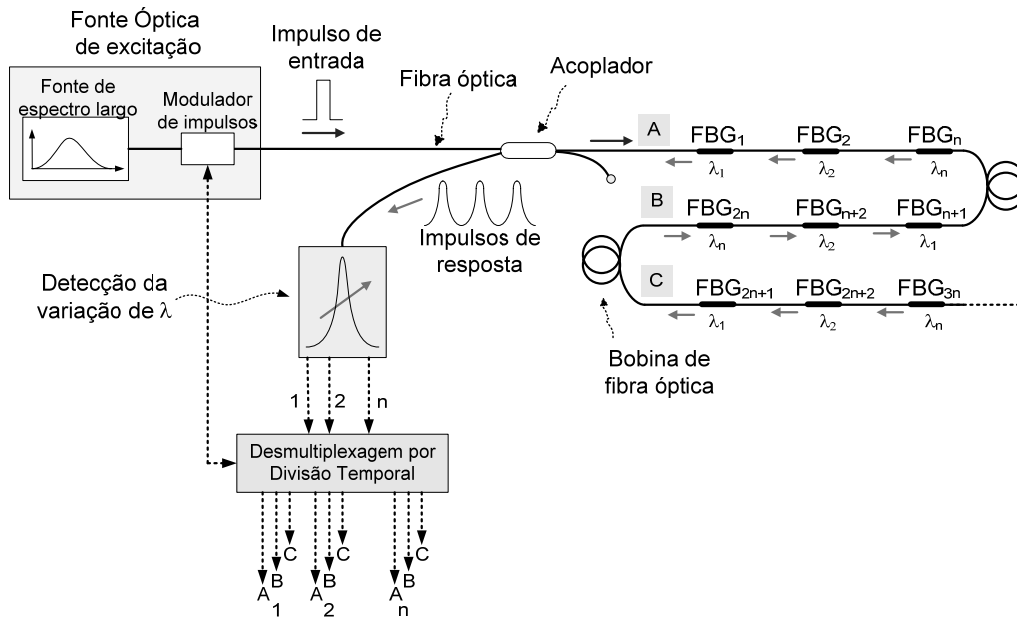


Figura 3.27: Esquema do método de multiplexagem mista TDM e WDM [Kersey, 1994]

É também possível a combinação de multiplexagem TDM com desmodulação interferométrica. Este método de desmodulação além de permitir a implementação de técnicas WDM, em que a resposta dos sensores é determinada pela variação do seu comprimento de onda de reflexão, permite também a sua implementação em técnica conjunta com TDM. No esquema apresentado por Weis *et al* as variações de comprimento de onda central dos sensores FBG são convertidas linearmente em variações de fase sobre sinais eléctricos portadores de baixa frequência e separados temporalmente. À semelhança do apresentado na secção 3.4 foram mantidas as características de elevada resolução de medição [Weis, 1994].

3.6.4 Multiplexagem por Divisão Espacial (SDM)

Por fim, a técnica que em termos conceptuais apresenta uma maior simplicidade, a multiplexagem por divisão espacial, SDM. Nesta técnica, cada sensor é ligado fisicamente, à vez, ao canal de medição através de um sistema mecânico ou electro-óptico (*switch* óptico) que faz o varrimento entre todos os sensores. O

switch óptico utilizado tem que apresentar transições de canal muito rápidas para permitir que o sistema apresente regimes dinâmicos comparáveis com os restantes métodos.

O método de interrogação utilizado pode ser qualquer um dos apresentados atrás, uma vez que cada sensor está, em cada instante, ligado fisicamente ao sistema de medição. Na Figura 3.28 é ilustrada a introdução de um *switch* óptico na cadeia de medição, o que permite a multiplexagem paralela de vários sensores FBG.

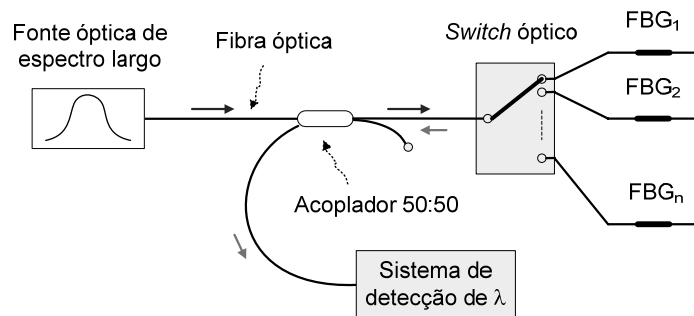


Figura 3.28 Esquema do modelo de multiplexagem por divisão espacial (SDM) de vários sensores FBG

O *switch* óptico pode ainda ser utilizado para a multiplexagem de vários canais, cada um dos quais com vários sensores FBG. Neste caso há a utilização combinada de SDM com um dos outros métodos de multiplexagem apresentados, WDM ou TDM.

3.7 Conclusão do Capítulo

Neste terceiro capítulo são discutidos e avaliados os diferentes tipos de métodos de desmodulação de sensores de Bragg em fibra óptica. Verifica-se que um grande investimento científico tem sido mantido a nível global para evoluir estes sistemas, capazes de traduzir as variações da grandeza física actuante, deformação, temperatura ou outras, sentidas pelo sensor. Ainda assim, esta área persiste como sendo um campo aberto a novas contribuições e desenvolvimentos, de forma a tornar cada vez mais viável este sistema óptico de instrumentação. Os actuais sistemas de desmodulação apresentam já características de resolução, sensibilidade, taxa de aquisição e multiplexagem perfeitamente capazes de uma aplicação fora do ambiente laboratorial. No entanto, outras características como a robustez, dimensões físicas e custo associado, levam a que estes sistemas sejam muitas vezes preteridos por sistemas de monitorização clássicos, como os de extensometria eléctrica. Nos capítulos seguintes são descritas as contribuições dadas pelo autor para a optimização de dois sistemas de desmodulação, nomeadamente: um sistema de desmodulação espectral passivo, com utilização de um espectrómetro de baixo custo baseado numa rede de difracção holográfica e um *array* de CCD e, um segundo, que corresponde a um sistema de

desmodulação espectral activa, recorrendo a um filtro de rede de Bragg em fibra óptica, sintonizável através de um actuador piezoeléctrico.

SISTEMA DE DESMODULAÇÃO BASEADO EM ESPECTRÓMETRO CCD

4.1 Introdução e Motivação

Como já referido no capítulo anterior, secção 3.2, o método de desmodulação de redes de Bragg em fibra óptica através da utilização de um analisador de espectro óptico (OSA), ou espectrómetro, foi o primeiro a surgir em aplicações laboratoriais. É um método passivo que se baseia na análise do conteúdo espectral da resposta da rede de difracção de Bragg. Apresenta um princípio de funcionamento simples, no qual o OSA é claramente o elemento que define as características de medição como a sensibilidade, a resolução, a reprodutibilidade e a taxa de aquisição, bem como outras características mais genéricas, mas que influenciam globalmente o sistema de instrumentação, como a facilidade de utilização, a robustez, as dimensões físicas e o custo de implementação.

Os primeiros sistemas a serem apresentados utilizavam espectrómetros com boas características de medição mas simultaneamente revelavam-se impróprios para utilizações exteriores ao laboratório devido a vários factores, como:

- Dimensões físicas – tamanho e peso elevados;
- Baixa robustez – o varrimento da gama espectral é realizado com um elemento óptico móvel;
- Elevado custo – são essencialmente um equipamento de bancada, de elevadas prestações e multifunções.

4.1.1 Sistemas Espectrométricos

O continuado desenvolvimento de fotodetectores com tecnologia CCD, CMOS ou PDA (*array* de fotodíodos de InGaAs), bem como a sua conjugação com redes de difracção óptica e a possibilidade de comunicação com computadores, permitiu que novos espectrómetros fossem apresentados para a

medição do comprimento de onda de Bragg. Algumas empresas apresentam actualmente uma gama comercial alargada destes produtos, com características diversas dentro das respectivas: gama de medição espectral, resolução óptica, dispersão, sensibilidade, tempos e taxas de conversão/aquisição, etc. [Avantes, 2005; Hamamatsu, 2005; Horiba, 2005; OceanOptics, 2005; StellarNet, 2005]. Estes novos tipos de espectrómetro, de baixo custo e de dimensões reduzidas, vieram assim colmatar as já referidas falhas dos primeiros analisadores de espectro a serem apresentados. Na Figura 4.1 é representado o esquema de montagem desde método de desmodulação passivo, assim como o princípio básico de funcionamento destes espectrómetros, utilizando a configuração de Czerny-Turner [Lerner, 1988].

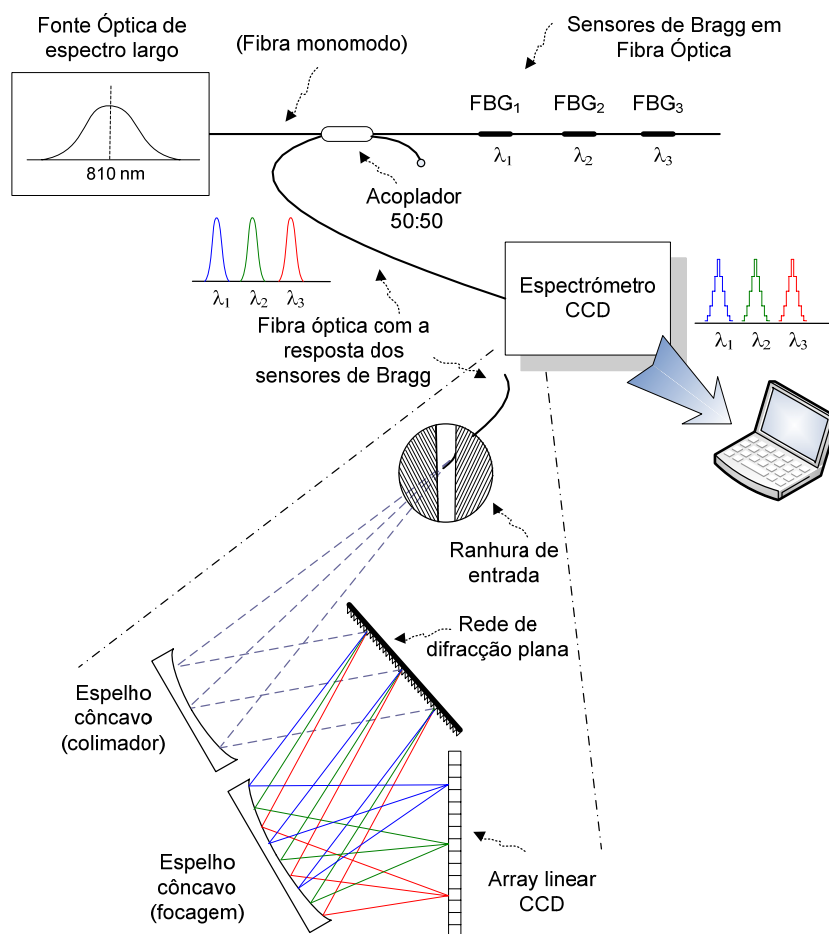


Figura 4.1 Esquema do sistema de interrogação espectral passivo com utilização de um espectrómetro CCD. Representação do seu princípio básico de funcionamento

De uma forma simplificada, o princípio de funcionamento deste espectrómetro é descrito pelos seguintes passos: a luz que transporta a informação relativa à resposta dos sensores de Bragg chega à entrada do espectrómetro e é difractada por uma ranhura de entrada; um espelho côncavo colima o feixe, que por sua vez é reflectido e difractado por uma rede de difracção; um segundo espelho côncavo reflecte e foca

o feixe sobre um *array* linear de CCD⁵ que recolhe o sinal; a imagem assim obtida é convertida para o formato digital e posteriormente transferida para um computador, para análise e tratamento.

A estrutura óptica mostrada na Figura 4.1, equivalente em termos ópticos à representada na Figura 4.2, pode também ser descrita de uma forma analítica [Allington-Smith, 2002].

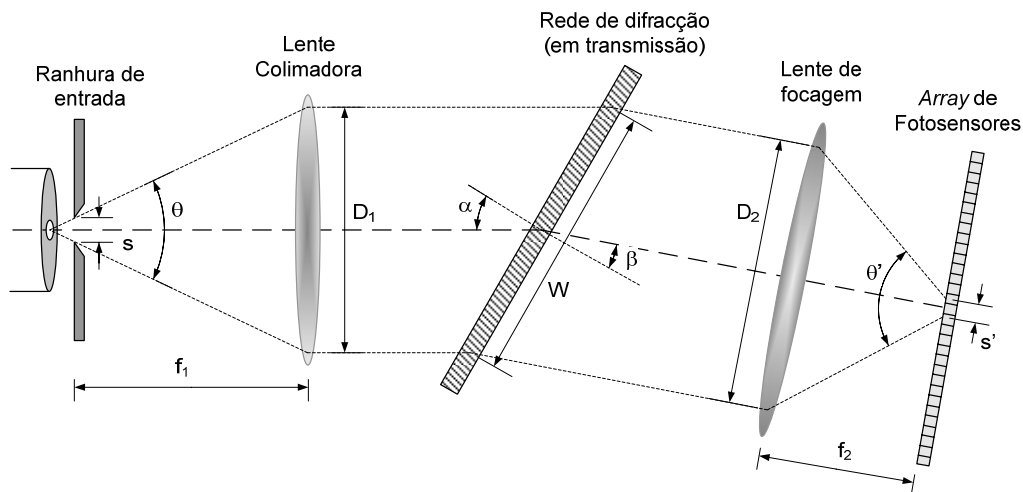


Figura 4.2 Representação esquemática da estrutura interna de um espectrómetro baseado em rede de difracção em transmissão e em *array* de fotosensores

As variáveis representadas na figura são, respectivamente:

- s – dimensão da ranhura, ou do núcleo (o valor mais reduzido entre os dois);
- s' – dimensão da imagem de entrada, projectada sobre o *array* de fotosensores;
- θ – ângulo de abertura de entrada;
- θ' – ângulo de focagem sobre o *array* de fotosensores;
- f_1 – distância focal da lente colimadora;
- f_2 – distância focal da lente de focagem;
- D_1 – diâmetro da área iluminada da lente colimadora;
- D_2 – diâmetro da área iluminada da lente de focagem;
- W – comprimento da rede de difracção;
- α – ângulo entre a direcção de propagação de incidência e a normal da rede de difracção;
- β – ângulo entre a direcção de difracção e a normal à rede;

⁵ Embora o princípio de funcionamento seja semelhante para os espectrómetros com fotodíodos InGaAs (PDA), são referidos neste exemplo os CCD dado o espectrómetro utilizado se basear nesta tecnologia.

A primeira equação a ser considerada, e uma das mais relevantes, é a que define a condição de difracção de uma determinada onda, de comprimento de onda λ , sobre uma rede com ρ linhas por mm (considerando que os índices de refacção a montante e a jusante da rede são iguais, n):

$$m\rho\lambda = n \sin\alpha + n \sin\beta \quad (4.1)$$

onde m representa a ordem espectral da difracção.

A **dispersão**, do comprimento de onda em função do ângulo de difracção, é obtida através da derivação da equação (4.1) em ordem a $d\beta$:

$$\frac{d\lambda}{d\beta} = \frac{\cos\beta}{m\rho} \quad (4.2)$$

e reescrevendo esta equação em função de dx , ou seja, a dispersão linear:

$$\frac{d\lambda}{dx} = \frac{d\lambda}{d\beta} \frac{d\beta}{dx} = \frac{\cos\beta}{m\rho f_2} \quad (4.3)$$

Uma segunda equação relevante da estrutura óptica deste espectrómetro relaciona as dimensões da imagem de entrada e saída, s e s' , respectivamente, com as razões focais das duas lentes, colimadora, F_1 , e de focagem, F_2 (a razão focal da lente é definida como: $F_i = f_i / D_i$) [Allington-Smith, 2002]:

$$s' = s \frac{F_2}{F_1} \quad (4.4)$$

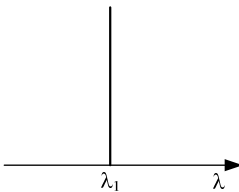
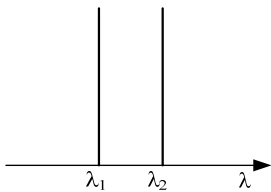
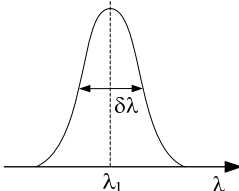
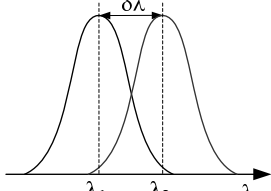
A **resolução óptica** é uma das características mais importantes na especificação de um espectrómetro. No entanto, este é um parâmetro que é frequentemente mal interpretado [Allington-Smith, 2002]. A resolução óptica, ou resolução espectral, é o desvio mínimo em comprimento de onda, $\delta\lambda$, a FWHM (largura máxima a meia altura), que um espectrómetro apresenta como leitura (saída), considerando à sua entrada uma fonte puramente monocromática (Definição 1 da Tabela 4.1). O conceito pode ser ainda enunciado de uma outra forma: é a menor diferença de comprimentos de onda, entre duas respostas espectrais adjacentes, que um espectrómetro consegue identificar (Definição 2 da Tabela 4.1).

Em termos físicos, a resolução óptica está relacionada com vários factores, ou propriedades do sistema, nomeadamente [Lerner, 1988]:

- A largura da ranhura de entrada;

- A largura de cada pixel constituinte do array de fotodetectores;
- O fenómeno de difracção;
- Aberrações nos espelhos ou lentes utilizados;
- Características e alinhamentos dos restantes componentes do sistema óptico.

 Tabela 4.1 Definição de resolução óptica, $\delta\lambda$

	Definição 1	Definição 2
<u>Entradas</u> : Espectros de uma fonte monocromática ideal		
<u>Saídas</u> : leituras obtidas no espectrómetro		

Analicamente, a resolução óptica é definida como o produto da dispersão linear pela dimensão da ranhura de entrada projectada sobre o detector:

$$\delta\lambda = \left(\frac{d\lambda}{dx} \right) s' \quad (4.5)$$

Substituindo as equações (4.3) e (4.4) na equação (4.5) esta pode reescrita como:

$$\delta\lambda = \frac{s D_1 \cos \beta}{m \rho D_2 f_1} = \frac{s}{m \rho F_1 W} \quad (4.6)$$

A resolução óptica é portanto dependente dos parâmetros da estrutura óptica interna do espectrómetro. No entanto, os fabricantes destes espectrómetros comerciais apresentam como opções de configuração dois parâmetros: o número de linhas por milímetro da rede de difracção, ρ , e a dimensão da ranhura de entrada, s [Avantes, 2005; Hamamatsu, 2005; Horiba, 2005; OceanOptics, 2005; StellarNet, 2005].

Uma outra montagem óptica implementada em alguns espectrómetros comerciais [Hamamatsu, 2005; StellarNet, 2005], diferencia-se das anteriores pela utilização de uma rede de difracção côncava, que

simultaneamente difracta e reflecte a luz, dispensando assim os espelhos ou as lentes auxiliares [Lerner, 1988; Willsch, 2002; Ecke, 2003; Willsch, 2003].

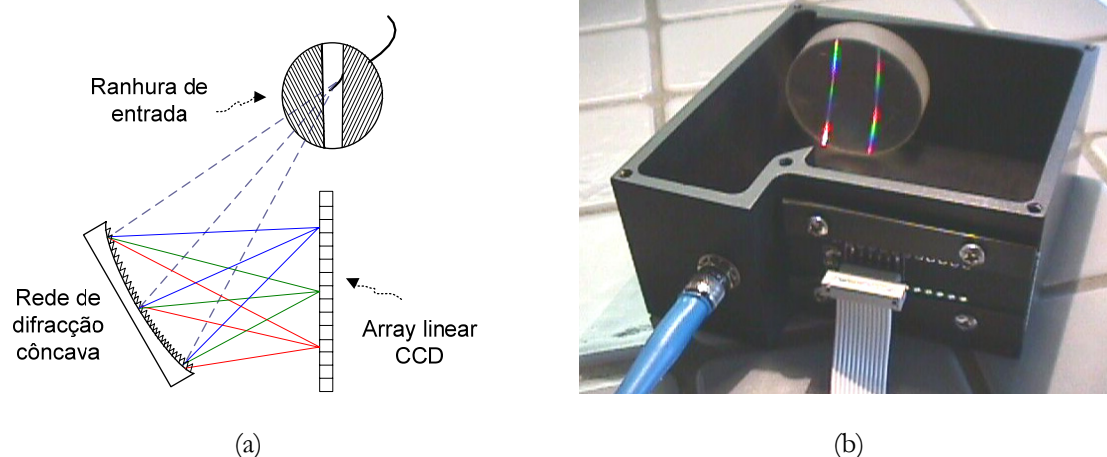


Figura 4.3 (a) Ilustração do funcionamento e (b) Aspecto da luz difractada por uma rede de difracção côncava [StellarNet, 2005]

É uma estrutura compacta, robusta e de custo inferior. A redução do número de elementos ópticos na montagem reduz os efeitos de aberrações ópticas e os efeitos da temperatura, melhorando assim a estabilidade e restantes características de medição. A Figura 4.3 (a) ilustra o funcionamento desta montagem óptica enquanto a Figura 4.3 (b) mostra o feixe de difracção no interior de um espectrómetro [StellarNet, 2005].

Baseado no mesmo sistema espectrométrico ilustrado na Figura 4.2, foi desenvolvido um espectrómetro que utiliza a tecnologia PGP (*Prism-Grating-Prism*) [Aikio, 2001; Christiansen, 2001; Cheng, 2002; TNO, 2005]. De uma forma resumida, esta montagem é ilustrada na Figura 4.4. A difracção da luz, neste caso, é obtida com uma montagem óptica mais complexa que as anteriores, onde a rede de difracção do tipo VPH (*Volume Phase Holographic*) é montada entre dois prismas [Allington-Smith, 2002].

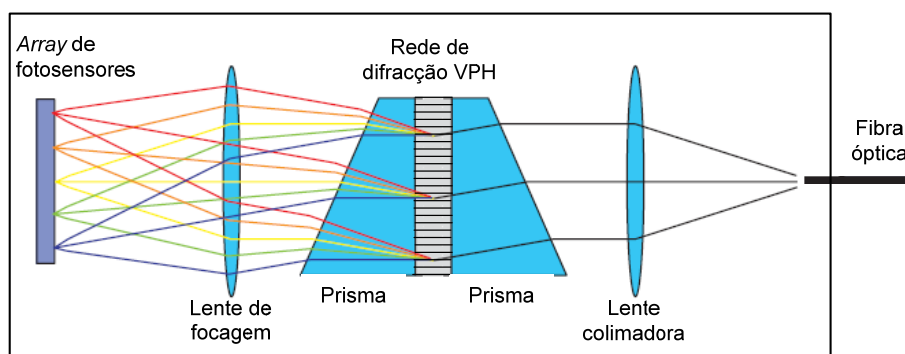


Figura 4.4 Esquema do funcionamento de um espectrómetro PGP [Christiansen, 2001]

Neste tipo de rede de difracção, a condição de interferência não é obtida por rasgos ou facetas na superfície, mas pela variação periódica do índice de refração do material que a constitui (ou seja, de uma forma muito semelhante às redes de Bragg em fibra óptica). Segundo Aikio *et al.*, a vantagem destes espectrómetros face aos baseados em redes de difracção planas holográficas de reflexão consiste numa difracção mais eficiente da luz em toda a gama espectral considerada [Aikio, 2001]. Um sistema de interrogação baseado num espectrómetro deste género, com elevada taxa de aquisição e multiplexagem, é actualmente comercializado por uma empresa Holandesa, a TNO TPD [TNO, 2005].

Por último, referência a um espectrómetro proposto recentemente e que apresenta um princípio de funcionamento consideravelmente diferente dos anteriores, no qual a difracção da luz é conseguida através de redes enviesadas em fibra óptica (secção 2.3.1) [Simpson, 2003; Simpson, 2004]. A técnica apresentada é ilustrada no esquema da Figura 4.5.

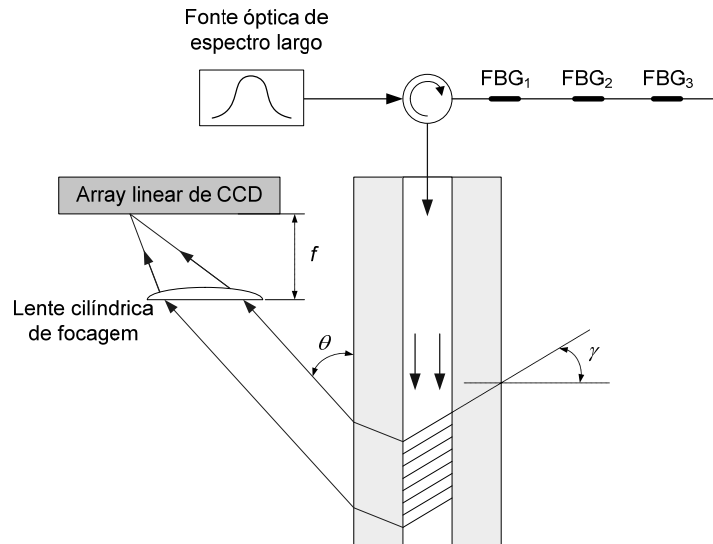


Figura 4.5 Esquema do modelo de interrogação baseado num espectrómetro com rede de difracção de Bragg enviesada [Simpson, 2003; Simpson, 2004]

O princípio de funcionamento é baseado na difracção da luz provocada pela rede de Bragg enviesada que, ao contrário das normais redes de Bragg, reflecte para o exterior da fibra óptica. A luz assim difractada atravessa a bainha com diferentes ângulos θ , dependendo do comprimento de onda central da luz reflectida pelo sensor FBG, λ_B :

$$\cos \theta = \frac{\cos(\gamma) \frac{\lambda_B}{\Lambda} - n_{ef}(\lambda_B)}{n_{bai}(\lambda_B)} \quad (4.7)$$

A luz difractada é conduzida através de uma lente cilíndrica que a foca sobre um *array* linear de CCD. A leitura realizada é convertida para valores digitais e posteriormente adquirida e processada por um PC. Na análise espectral podem ainda ser utilizados algoritmos de resolução ao sub-pixel, semelhantes aos utilizados na secção 4.2, permitindo melhorar as resoluções físicas permitidas pelo espectrómetro assim desenvolvido. Os resultados obtidos por Simpson *et al* durante os ensaios efectuados com este sistema permitiram confirmar alguns bons resultados, como são a largura de banda de 70 nm com uma dispersão linear sobre o *array* de CCD de 38 pm/pixel.

Relativamente à tecnologia actual dos fotodetectores, verifica-se a tecnologia CMOS está menos adaptada à medição de baixos níveis de intensidade, pelo que a sua utilização num espectrómetro é apenas adequada à avaliação do espectro de fontes ópticas ou em aplicações químicas onde os requisitos não sejam muito elevados [Hamamatsu, 2005]. Embora com maior sensibilidade de medição, a utilização de sensores PDA obriga à utilização de um sistema de arrefecimento de forma a manter em níveis baixos a corrente de escuro, o que faz elevar consideravelmente o custo final do equipamento. Assim, a tecnologia CCD mantém-se como um compromisso aceitável entre desempenho e custo de implementação.

4.1.2 Considerações sobre o Espectrómetro utilizado

No anexo B.1 são apresentados os dados e características mais relevantes sobre o espectrómetro utilizado ao longo do trabalho desenvolvido nesta tese. No entanto, alguns aspectos tiveram que ser esclarecidos, após terem sido detectadas algumas aparentes inconsistências no seu funcionamento.

Depois do que foi referido atrás sobre a influência da dimensão da cavidade de entrada, e de forma a avaliar a influência da utilização de uma entrada no espectrómetro com uma fibra com núcleo de 5 μm , inferior aos 25 μm da ranhura de entrada, foi realizada um ensaio com um laser de HeNe. A luz deste laser, com um comprimento de onda central de 632,8 nm e uma largura espectral (teórica) de apenas algumas dezenas de pico metros, foi introduzida no espectrómetro através do *patchcord* de entrada (fibra óptica monomodo de diâmetros 5/125 μm , respectivamente para o núcleo e bainha). Depois dos necessários ajustes dos parâmetros de aquisição do espectrómetro, o resultado recolhido é o mostrado na Figura 4.6.

As medições efectuadas a esta resposta espectral, através do próprio software do espectrómetro (SpectraWiz, da StellarNet [StellarNet, 2005]), são de:

- Valor central da curva (centroid): 632,24 nm;
- Largura a meia altura (FWHM): 0,79 nm

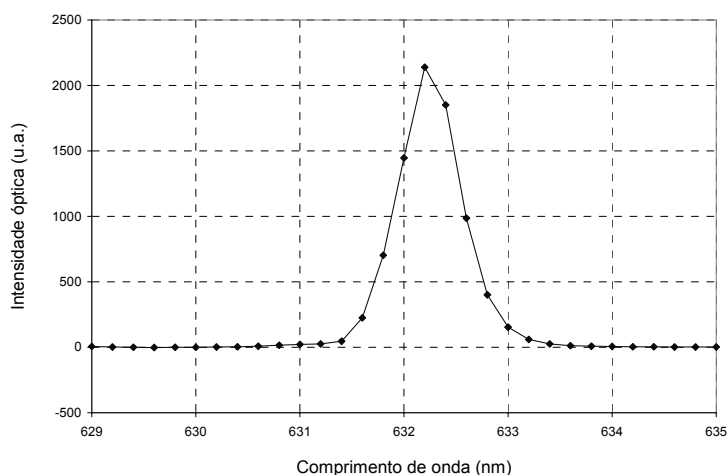


Figura 4.6 Registo da luz de um laser de HeNe com o espectrómetro EPP2000

Da análise da Figura 4.6 e das medições efectuadas retiram-se algumas conclusões relativamente à calibração e resolução óptica apresentada pelo espectrómetro:

- Dado o comprimento de onda central do laser de HeNe ser de 632,82 nm, verifica-se que o espectrómetro apresenta um desvio na sua medição de - 0,58 nm;
- Considerando que a resposta espectral de um laser de HeNe deverá apresentar uma largura espectral de apenas alguns pm, a largura a meia altura verificada neste caso, de 0,79 nm corresponde à resolução óptica do espectrómetro.

Este último resultado mostra que a resolução óptica apresentada pelo fabricante para o espectrómetro, com a ranhura de 25 μm , foi reduzida de 1,2 nm para 0,8 nm devido à utilização de uma entrada de dimensões mais reduzidas, ou seja, a fibra óptica com um núcleo de 5 μm .

Um outro aspecto que teve que ser examinado, no que se refere ao funcionamento do espectrómetro, refere-se à detectada falta de simetrismo nas respostas espectrais dos sensores de Bragg, quando registadas com o espectrómetro EPP2000 (exemplo da Figura 4.8). Deste estudo conclui-se que existem vários factores que determinam esta situação, nomeadamente:

- O processo de inscrição das redes de Bragg e efeitos de birrefringência que surgem quando é aplicada deformação ao sensor (estes dois factores são abordados novamente no Capítulo 5);
- A fonte óptica não apresenta uma intensidade constante em toda a sua gama de comprimento de onda, apresentando uma forma próxima de uma curva Gaussiana (anexo B.2), que origina uma deformação da reflexão do sensor de Bragg.

Para além destes, outros factores são também incluídos pelo espectrómetro utilizado, baseado em rede de difracção holográfica:

A rede de difracção não tem uma eficiência constante em toda a gama de comprimento de onda, apresentando uma forma que se aproxima a uma curva Gaussiana (anexo B.1). Esta condição deforma a imagem projectada sobre o array de CCD, de uma forma equivalente ao efeito introduzido pela fonte óptica;

O tipo de estrutura óptica utilizada pelo espectrómetro, no qual são usados espelhos ou lentes côncavas e propagação não paralela ao eixo óptico, apresenta um tipo de aberração óptica denominada aberração coma. Esta aberração advém do facto da lente não focar a luz sempre no mesmo ponto, consoante a distância ao eixo óptico, ou centro da lente. A aberração coma, quando relacionada com a difracção da luz, como é o caso, é também função do comprimento de onda. A imagem da Figura 4.7 ilustra este tipo de aberração, quando a propagação da luz é feita com um ângulo θ em relação ao eixo óptico.

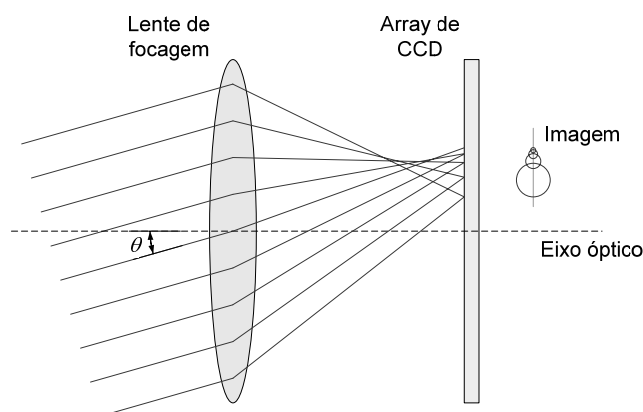


Figura 4.7 Aberração do tipo coma

O efeito da aberração coma corresponde sempre ao alargamento de uma das bases da resposta espectral do sensor de Bragg, da forma mostrada na Figura 4.8, onde a zona a tracejado corresponde ao desvio em relação ao simetrismo.

No entanto, e uma vez que todo o princípio de medição do comprimento de onda de Bragg, λ_B , com este sistema de interrogação é baseado na variação relativa e não na medição de comprimentos de onda absolutos, todos estes efeitos de distorção não são relevantes para o resultado final a alcançar, como se verifica pelos resultados experimentais obtidos e mostrados neste capítulo.

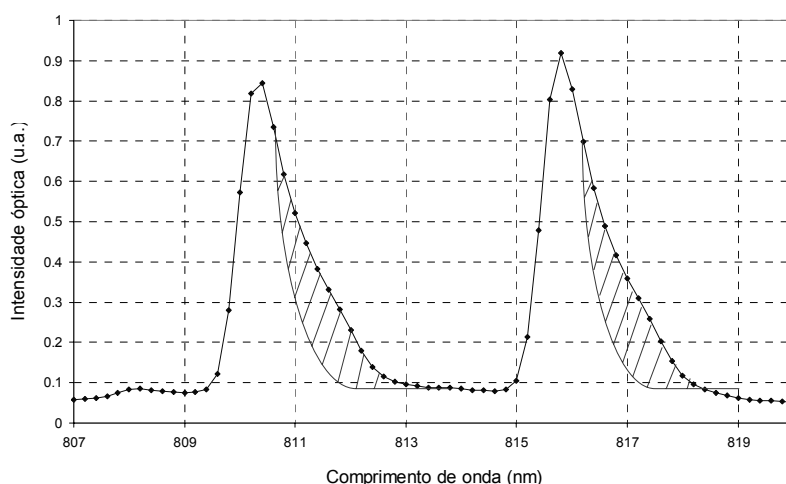


Figura 4.8 Efeito do alargamento de uma das bases da resposta espectral

4.1.3 Motivação

A motivação para o desenvolvimento de um sistema de interrogação baseado neste método resulta do interesse em se obter um sistema de instrumentação óptico com características de medição como gama, linearidade de resposta, sensibilidade e resolução, mas também em robustez e custo de implementação que permitam a sua utilização em aplicações de monitorização de estruturas de engenharia.

Para a realização deste sistema de interrogação optou-se pela utilização de um espectrómetro comercial de baixo custo, com baixas características de medição, utilizado sobretudo em aplicações químicas onde a resolução de medição não é dos aspectos mais relevantes. Assim, o desafio passa nomeadamente pelo incremento do desempenho deste espectrómetro e simultaneamente desenvolver um equipamento de instrumentação para interrogação de sensores de Bragg em aplicações e ambientes mais exigentes, como a monitorização de estruturas de engenharia civil.

4.2 Algoritmo de Determinação do Comprimento de Onda de Bragg

O método de interrogação passivo com recurso a um espectrómetro óptico baseia-se na identificação e análise da resposta espectral do sensor de Bragg (Figura 2.10), nomeadamente na determinação do seu valor central. Teoricamente, segundo a equação (2.12), este valor corresponde ao ponto de máxima reflectividade, obtido para o comprimento de onda de Bragg, λ_B . No entanto, como já referido na secção 4.1.2, devido a diferentes condicionantes da estrutura óptica, a imagem registada no *array* de CCD do espectrómetro, correspondente à resposta espectral do sensor de Bragg, aparece distorcida (Figura 4.8). Assim, o objectivo não passa por identificar o valor máximo mas um valor central que com ele seja correlacionado.

Como já foi visto atrás, a dispersão linear do espectrómetro ($d\lambda/dx$), depende de toda a sua estrutura óptica interna, equação (4.3). Este valor é particularmente influenciado pelas dimensões do próprio *array* de fotodetectores, tanto no comprimento total como fundamentalmente nas dimensões de cada pixel. Com uma gama total de 400 nm (dos 600 nm aos 1000 nm) distribuída sobre 2048 elementos fotodetectores, o espectrómetro utilizado neste trabalho apresenta uma dispersão linear de 0,2 nm por pixel.

Este valor de 0,2 nm representa a resolução física permitida pelo instrumento. No entanto, este valor é insuficiente em aplicações onde sejam necessários valores de sensibilidade e resolução de medição na ordem de $1\mu\epsilon$, como é o caso da monitorização de estruturas de engenharia civil, sabendo-se que o sensor de Bragg apresenta uma sensibilidade à deformação de apenas 0,63 pm por cada $1\mu\epsilon$ [equação (2.24)]. Conclui-se que a utilização de um espectrómetro deste género num sistema de desmodulação de sensores de Bragg impõe um pós-processamento dos dados recolhidos. Para isso, foram desenvolvidos e testados diferentes algoritmos de resolução ao sub-pixel, baseados em diferentes técnicas de processamento de sinal, mas que apresentam em comum o facto de utilizarem a informação adicional fornecida pela dispersão espectral verificada em torno do comprimento de onda de Bragg, λ_B . Esta dispersão espectral, provocada pelas mesmas características ópticas que definem a resolução óptica, é apresentada como um factor importante para a obtenção de um bom valor de resolução de medição. No entanto, esta dispersão também apresenta um aspecto negativo, no sentido em que reduz o número de sensores que podem ser multiplexados por divisão de comprimento de onda (WDM).

Não sendo citadas no texto das próximas secções, mas pela sua relevância, são aqui deixadas algumas contribuições apresentadas nos últimos anos sobre o assunto de incremento da resolução em espectrómetros compactos: [Hu, 1997; Kersey, 1997; Measures, 2001; Riesenber, 2001].

Nas secções seguintes é apresentada a descrição de cada uma das técnicas de resolução ao sub-pixel desenvolvidas sendo, posteriormente apresentados os resultados obtidos com cada uma.

4.2.1 Algoritmo de Detecção do Centro de Massa (ADCM)

O primeiro algoritmo a ser desenvolvido e avaliado é baseado no cálculo do “centro de massa” da resposta espectral. Este algoritmo considera para o cálculo um conjunto de pontos de interesse (definido mais adiante) que compõem a assinatura espectral reflectida pela rede de difracção de Bragg [Ezbiri, 1998]. O valor do comprimento de onda de Bragg, λ_B , da resposta do sensor é dado por:

$$\lambda_B = \frac{\sum_k \lambda_k i_k}{\sum_k i_k} \quad (4.8)$$

onde λ_k e i_k representam, respectivamente, o comprimento de onda central e a intensidade de luz incidente sobre o k^{mo} pixel do *array* de CCD do espectrómetro.

O gráfico da Figura 4.9 corresponde à resposta espectral de um dos sensores FBG. Cada ponto deste gráfico caracteriza a intensidade de cada pixel do *array* de CCD em função do comprimento de onda. É também mostrado neste gráfico a linha do *LMAq* (Limite Mínimo de Aquisição), que representa o limite mínimo a partir do qual os pontos recolhidos do espectro são considerados para o cálculo do “centro de massa”. Esta linha apresenta-se como um nível dinâmico no sentido em que ao ser definida como uma percentagem do valor máximo vai sendo recalculada a todas as iterações do algoritmo. O objectivo deste cálculo é o de maximizar o número de pontos no conjunto considerado e em simultâneo mantê-lo independente da intensidade da resposta espectral obtida. A linha representada na figura apresenta um valor de 15% do valor de intensidade máxima. Os pontos com intensidade inferior ao nível assim definido são rejeitados, considerando-se que a relação sinal-ruído é demasiado baixa ou que a possibilidade de ocorrência de *crosstalk* entre as assinaturas espectrais de sensores de Bragg adjacentes é elevada.

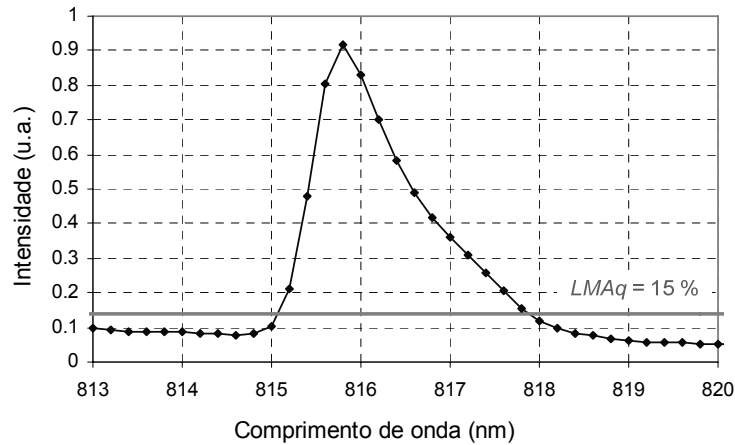


Figura 4.9 Resposta de um sensor de Bragg registada pelo espectrómetro EPP2000.
Intensidade (u.a.) vs. Comprimento de onda, λ (nm)

Assim, o somatório da equação (4.8) tem um número limitado de parcelas, geralmente entre 12 e 15, sendo de 14 no exemplo apresentado na Figura 4.9. Depende da forma da resposta espectral e principalmente do nível *LMAq* considerado. Este facto influencia directamente o tempo de

processamento necessário para o cálculo, que no entanto nunca chega a ser um factor crítico neste processo, tendo em atenção os tempos de aquisição necessários para o funcionamento do próprio espectrómetro, que é no mínimo de 50 ms. Da equação (4.8) pode ainda concluir-se que quanto maior o número de pontos considerados mais exacto poderá ser o resultado, dado que mais informação é processada no cálculo. Simultaneamente, o ruído existente sobre um qualquer pixel individual é compensado pelas contribuições dos restantes pixels do conjunto considerado, uma vez que o valor médio do ruído é zero.

4.2.2 Algoritmo de Aproximação a uma Curva (AAC)

O segundo algoritmo tem por base o conhecimento da forma da curva de resposta da rede. A função Gaussiana é a que melhor se adequa à resposta espectral obtida das redes de Bragg como demonstrado na secção 2.3. Da mesma forma que para o Algoritmo de Detecção do Centro de Massa, o conjunto de pontos considerado para o ajuste é formado por aqueles que apresentam um nível de intensidade superior a um dado nível pré determinado. O comprimento de onda de Bragg, λ_B , é definido como sendo o ponto de valor mais elevado (ponto de derivada nula) da curva obtida por aproximação (Figura 4.10). No entanto, a correlação verificada entre a curva de aproximação calculada e os pontos obtidos está longe de ser satisfatória, como é visível pelo gráfico da Figura 4.10 e também pelos restantes resultados experimentais obtidos (secção 4.2.4). Embora os pontos mais centrais contêmham mais informação, essencialmente devido à sua melhor relação sinal/ruído, o cálculo efectuado com um baixo número de pontos não permite a obtenção de um bom resultado.

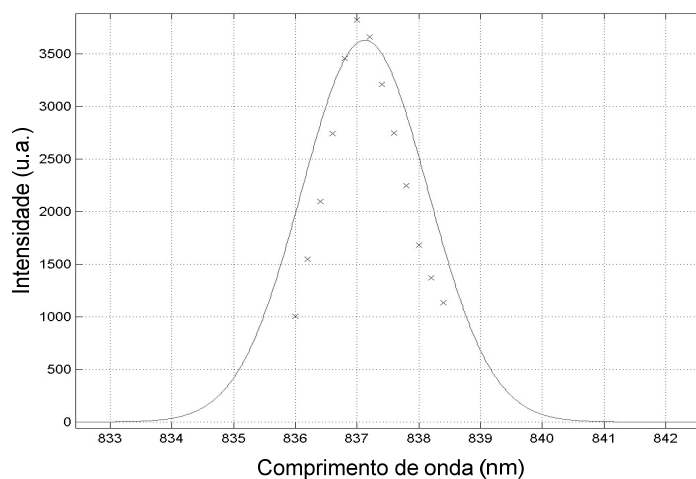


Figura 4.10 Ajuste do conjunto de pontos obtidos com o espectrómetro a uma curva Gaussiana: 'x' – pontos recolhidos; '—' – curva de aproximação

4.2.3 Algoritmo “Dois-Ajustes” (ADA)

Um terceiro algoritmo de resolução ao sub-*pixel* foi desenvolvido e testado, o qual foi denominado “Algoritmo Dois-Ajustes”, de acordo com o seu princípio de funcionamento. O algoritmo é descrito da seguinte forma: reunindo o conjunto de pontos definido pela leitura da resposta espectral da rede de Bragg, é feito um duplo ajuste, a dois polinômios independentes. O primeiro definido pela rampa positiva e o segundo definido pela rampa negativa (Figura 4.11). O ponto de cruzamento das duas curvas assim obtidas corresponde ao valor de referência da medição, ou seja, ao comprimento de onda de Bragg do sensor, λ_B .

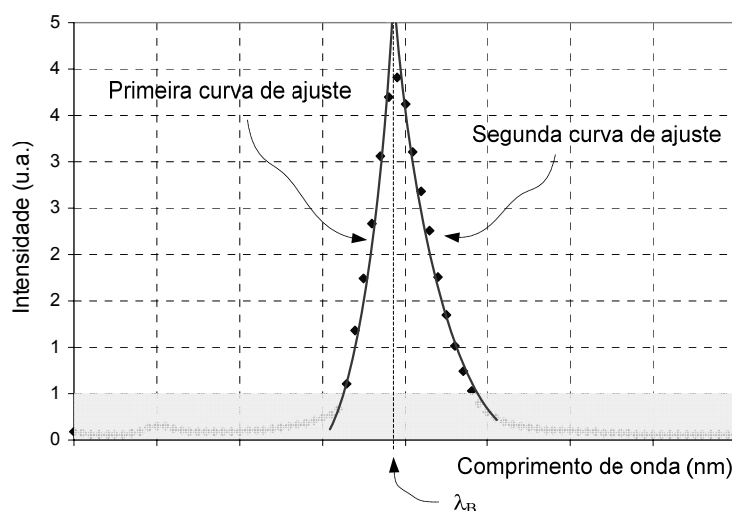


Figura 4.11 Ajuste a duas funções polinomiais independentes com o ponto de intercepção das duas curvas a definir o λ_B da medida

Neste algoritmo foram ensaiadas várias funções de aproximação, quer a nível do grau do polinômio de aproximação, quer do próprio algoritmo de aproximação implementado. Depois de ter sido implementado na linguagem de programação utilizada, *Delphi*, uma função de aproximação polinomial, foram também testadas funções matemáticas de duas bibliotecas comerciais: Optivec [Optivec, 2004] e SDL Component Suite [SDL, 2004]).

4.2.4 Análise da Resposta dos 3 Algoritmos – Ensaios de Calibração

Para cada um dos três algoritmos atrás descritos foram realizados ensaios de calibração de forma a testar e avaliar a sua performance. Para o efeito, foi desenvolvida uma plataforma de ensaios de aplicação de deformação ao sensor, descrita no anexo C. Nestes ensaios, diferentes níveis de deformação são aplicados e registados, sendo igualmente registados os valores das leituras do sistema de interrogação, criando assim os respectivos gráficos de calibração.

4.2.4.1 Algoritmo de Detecção do Centro de Massa

O gráfico da Figura 4.12 corresponde à aplicação de um ciclo de carga/descarga com uma deformação máxima aplicada de $1000\ \mu\epsilon$, em intervalos de $200\ \mu\epsilon$. Os dados recolhidos pelo espectrómetro foram adquiridos e processados através do primeiro algoritmo descrito, o ADCM.

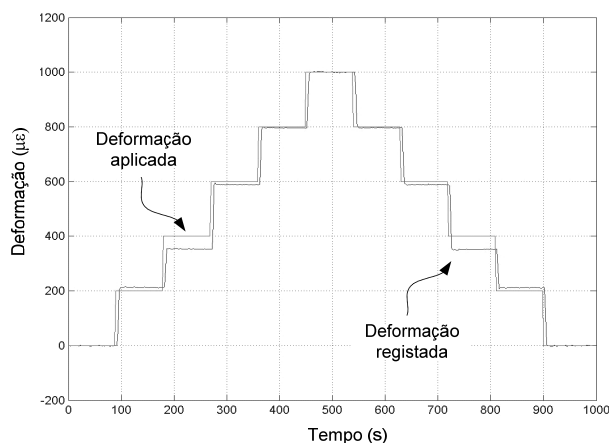


Figura 4.12 Resposta do sistema de desmodulação à deformação aplicada ao sensor de Bragg – ciclo de carga/descarga

Uma outra forma de representação da mesma informação, mas apresentada em termos da deformação registada pelo sistema de desmodulação em função da deformação aplicada, é ilustrada na Figura 4.13. Cada ponto assinalado neste gráfico corresponde à deformação média, registada durante os 90 s de cada patamar, para a carga e para a descarga.

Com a utilização deste algoritmo, e através dos vários ensaios efectuados, observa-se que o sistema de interrogação apresenta uma resposta com baixo nível de ruído e, simultaneamente, que a resolução de medição é francamente incrementada dos $320\ \mu\epsilon$ ⁶ iniciais, para os de $1,6\ \mu\epsilon$ (como se confirma pela estabilidade da resposta em cada patamar de deformação aplicada, da Figura 4.12). Sendo um algoritmo de implementação simples, revela-se ainda eficaz na sua utilização em Tempo-Real, permitindo um regime dinâmico que não interfere com os tempos de aquisição necessários para o funcionamento adequado do espectrómetro.

Esta técnica revela, no entanto, uma importante deficiência no seu funcionamento, que inviabiliza a sua utilização. Como se verifica através da análise gráfica, e nomeadamente pela Figura 4.13, a resposta do sistema de interrogação apresenta uma quebra de linearidade muito visível e significativa entre os 200 e os 400 $\mu\epsilon$. O estudo deste problema permitiu concluir que a falta de linearidade deve-se ao facto do

⁶ Utilizando a relação dada pela equação (2.23), os 0,2 nm de resolução física do espectrómetro equivalem a $320\ \mu\epsilon$.

conjunto de pontos utilizado para os cálculos, definido por uma linha fronteira, ser um conjunto dinâmico. Ao aplicar-se deformação (positiva ou negativa) ao sensor há um ponto que num determinado instante pertence ao conjunto e no instante seguinte deixa de pertencer, ou o inverso, provocando uma franca variação na leitura do sistema sem que exista uma variação de deformação aplicada correspondente. Com os ensaios experimentais efectuados verificou-se erros de linearidade de $\pm 50 \mu\epsilon$ numa gama de variação de $2000 \mu\epsilon$.

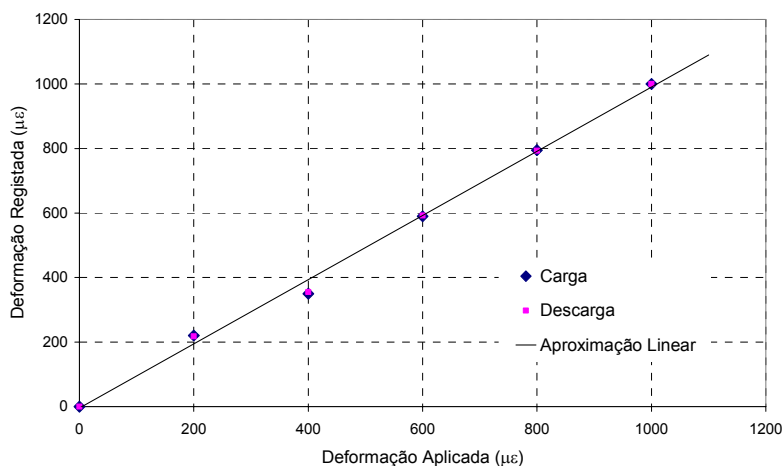


Figura 4.13 Deformação registrada *vs.* Deformação aplicada com utilização do algoritmo de cálculo do centro de massa

A opção de utilização de um número constante de pontos para o cálculo, tendo sido considerada e ensaiada, verifica não ser solução para este problema dado que, como já referido em 4.2.1, quanto maior o número de pontos considerado melhor será o resultado do cálculo.

4.2.4.2 Algoritmo de Aproximação a uma Curva

O algoritmo de Aproximação a uma Curva, e de acordo com todos os ensaios experimentais efectuados, revela resultados de melhoria da resolução de medição em tudo semelhantes aos do cálculo do centro de massa. No entanto, os problemas de falta de linearidade, obtidos com o algoritmo anterior, mantêm-se, verificando-se erros de linearidade de $\pm 50 \mu\epsilon$.

4.2.4.3 Algoritmo de “Dois-Ajustes”

Relativamente ao algoritmo de “Dois-Ajustes”, os ensaios experimentais revelaram problemas que inviabilizam a sua utilização. Estes problemas têm origem na própria forma da curva de resposta espectral da rede, que não é simétrica em torno de um valor médio. Os vários factores que contribuem para este facto foram referidos na secção 4.1.2.

Assim, há uma probabilidade elevada de que um dos ajustes de curva (“positivo” ou “negativo”) seja obtido com recurso a apenas dois ou três pontos. Experimentalmente, e no caso particular do espectrómetro utilizado, este problema verifica-se sempre na “rampa positiva”. O gráfico da Figura 4.9 é um exemplo disto mesmo, em que “rampa positiva” apresenta apenas 4 pontos para o cálculo da curva de aproximação, enquanto a “rampa negativa” seria aproximada com o recurso a 11 pontos. Como facilmente se depreende, a primeira situação traduz-se numa curva de aproximação pouco válida, na qual o erro associado ao ajuste é muito elevado (ou com uma correlação muito baixa). Assim, a resposta do sistema (que corresponde ao ponto de intercepção das duas curvas) apresenta erros de medição muito elevados, não apresentando a esperada variação linear, de acordo com a deformação do sensor.

O gráfico da Figura 4.14 representa o resultado de um ensaio de aplicação de um ciclo de carga/descarga ao sensor. Todos os patamares do gráfico representam a aplicação de uma deformação idêntica, de 145 $\mu\epsilon$. Como é ilustrado pela figura, as discrepâncias entre amplitudes dos patamares são muito grandes, demonstrando assim a existência de uma baixa linearidade de medição, verificando-se ainda uma elevada componente de ruído no sistema assim constituído.

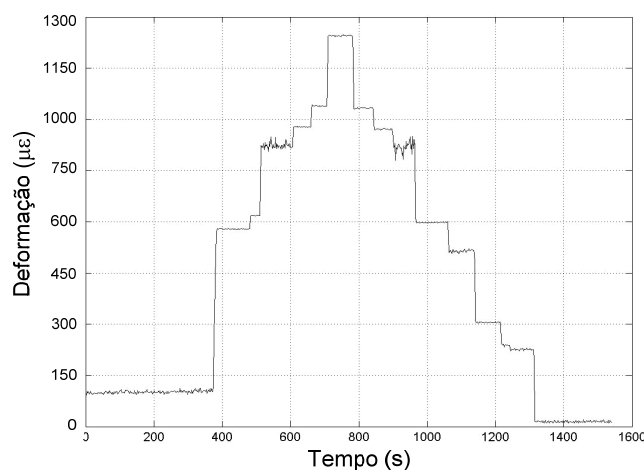


Figura 4.14 Resultado do ensaio de calibração com o algoritmo “Dois-Ajustes”
Aplicação de um ciclo de carga/descarga

4.2.5 Algoritmo de Detecção do Centro de Massa II (ADCM II)

Através de ensaios realizados com os algoritmos atrás descritos verificou-se que estes apresentam deficiências no seu funcionamento, nomeadamente uma resposta com erros de linearidade de $\pm 50 \mu\epsilon$. A dimensão destes erros reduz a aplicabilidade destes algoritmos num sistema de medição de deformação em estruturas. De facto, verifica-se a necessidade de uma técnica de processamento ao sub-pixel capaz de melhorar este resultado de linearidade, continuando a apresentar uma boa resolução.

O problema da falta de linearidade existente no cálculo do centro de massa surge com a entrada, ou saída, de um ponto no conjunto considerado para os cálculos, quando a resposta espectral da rede de Bragg se desloca para maiores ou menores comprimentos de onda. O gráfico da Figura 4.15 ilustra a condição de um ponto situado no limiar do *LMA_q* no conjunto de pontos considerados para o cálculo do centro de massa. O resultado numérico obtido com a inclusão de mais este ponto apresenta uma variação do valor de λ_B dos 816,221 nm para 816,258 nm, ou seja, de 37 pm.

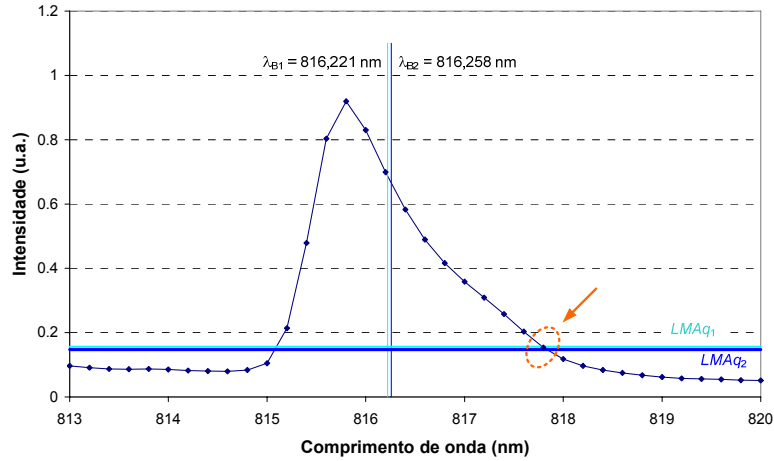


Figura 4.15 Influência da entrada no cálculo do ponto mais afastado do centro de massa

A solução para reduzir os problemas verificados no algoritmo de cálculo do centro de massa pode obter-se através da atribuição de um maior peso aos pixels que se encontram mais ao centro da curva de resposta espectral da rede de Bragg. Estes pixels, que são os que têm maior intensidade de luz incidente, são também os que apresentam uma qualidade de medição superior por englobarem mais informação das condições de ressonância da rede. Portanto, são mais relevantes para o cálculo do comprimento de onda de Bragg.

Por consequência, os pixels mais afastados do valor central são considerados como menos relevantes para o cálculo, sendo atribuído a estes pixels um peso menor. Quando o ponto mais afastado do centro de massa sai, ou entra, do conjunto considerado, a sua influência no cálculo de λ_B é menor. Portanto, os erros de linearidade introduzidos no sistema são também menores.

O cálculo pesado do comprimento de onda de Bragg da resposta do sensor é realizado através de:

$$\lambda_B = \frac{\sum_k \lambda_k i_k^n}{\sum_k i_k^n} \quad (4.9)$$

onde n é uma constante que representa o factor de pesagem.

A valorização dos pixels com maior intensidade através do aumento da constante n é ilustrada pelos dois gráficos da Figura 4.16, onde é representada a mesma resposta espectral de uma rede de Bragg mas em que a intensidade é dada por i^n . No limite, para $n = \infty$, a resposta espectral passa a ser representada por um único pixel, o de maior intensidade, situação não desejada para a medição, uma vez que elimina toda a informação contida nos pontos laterais.

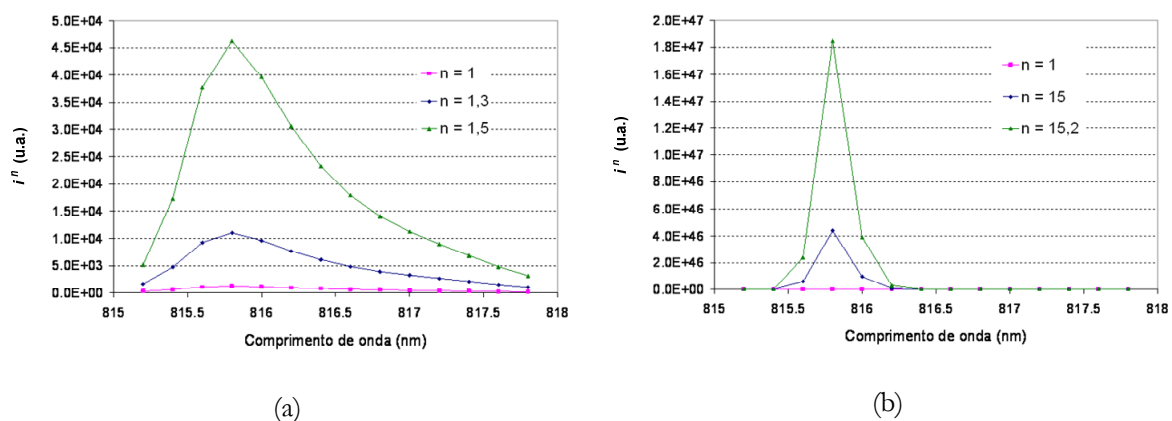


Figura 4.16 Representação da resposta espectral de uma rede de Bragg com i^n

Através de ensaios de avaliação da estabilidade de medição ao longo do tempo foi verificado que o espectrómetro apresenta flutuações de intensidade, classificável como ruído branco e inerente ao seu próprio funcionamento⁷. O gráfico da Figura 4.17 mostra o resultado da aquisição de dados realizada para a verificação da estabilidade de medição, ou do nível mínimo de ruído. Na situação do ensaio, o sensor encontra-se isolado, sem estar sujeito a qualquer tipo de influência, de deformação ou temperatura. A flutuação verificada, de ± 1 pm em torno de um valor central, é introduzida unicamente pelo ruído de funcionamento do sistema de detecção, nomeadamente pelo espectrómetro.

De acordo com os resultados encontrados com este ensaio, que se verificou serem sempre constantes, constata-se a impossibilidade física de utilizar valores de resolução inferiores a 1 pm.

Assim, e através de ensaios de simulação, foi ajustado o valor de n para a obtenção de um desvio máximo de 1 pm na situação de entrada ou saída do ponto de menor intensidade, minimizando assim o efeito da discretização do sinal quer em intensidade quer espacialmente. O valor mínimo que garante esta condição é de $n = 3,3$.

⁷ Uma forma de avaliar o nível destas flutuações de intensidade, ou ruído, é fazer a medição do escuro.

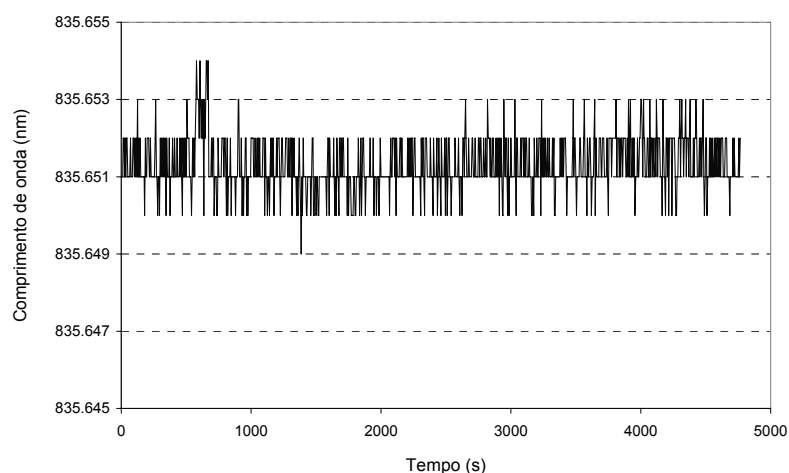


Figura 4.17 Aquisição de dados para verificação da estabilidade de medição

A Tabela 4.2 apresenta os valores dos λ_{Bi} , e respectivas variações, calculados para a situação descrita na Figura 4.15 e para diferentes valores de n .

 Tabela 4.2 Verificação dos desvios encontrados para diferentes valores de n

	Valor de n				
Nível de <i>LMAq</i>	1	2	3,3	4	15
15 % (14 pontos)	816.258	816.089	815.966	815,928	815,817
17 % (13 pontos)	816.221	816.079	815.865	815,928	815,817
$\Delta\lambda_{Bi}$ (pm)	37	10	1	0	0

Da análise da Tabela 4.2, verifica-se que com o aumento de n o valor do λ_B calculado vai diminuindo. Uma vez que no exemplo apresentado o valor do pixel de maior intensidade é de 815,8 nm e que a maioria dos restantes pixels estão distribuído para a direita deste, ou seja, com valores superiores de comprimento de onda, ao retirar-se relevância a estes pontos o cálculo do valor central desloca-se para a esquerda. Ao distorcer os valores da amostra, de facto é alterado o valor verdadeiro do comprimento de onda da resposta espectral da rede de Bragg que se pretende conhecer. No entanto, o processo de calibração permite compensar este desvio, que é constante em toda a gama de medição. Mais do que conhecer o valor absoluto de λ_B é importante ter uma resposta linear e conhecer a menor mudança do valor da mensuranda.

O aumento da influência dos pontos de maior qualidade, que implica a redução do peso dos pontos de menor intensidade, torna o algoritmo mais robusto quanto à dimensão da amostra, ou seja, à quantidade de pontos considerados, pela redução do erro de linearidade associado. A distorção aplicada à informação física da amostra deverá ser no entanto limitada pela resolução máxima atingível (associada ao nível de ruído branco da medição) pois a utilização de um baixo valor de n incrementa a informação associada ao cálculo de λ_B , fornecida por um maior número de pontos, reduzindo em simultâneo o ruído da medição, cuja média é zero.

Com a utilização deste novo algoritmo verifica-se uma melhoria da resposta obtida em relação à obtida com o simples cálculo do centro de massa. A utilização deste algoritmo permite que os erros globais do sistema de instrumentação óptico desenvolvido, no pior caso, não ultrapassem os 2 %. Isto mesmo é confirmado pelos resultados experimentais dos ensaios de calibração apresentados na secção seguinte.

4.3 Ensaios Experimentais de Calibração

Vários ensaios experimentais de calibração foram efectuados no sentido de avaliar o comportamento do sistema de interrogação desenvolvido. Assim, são apresentados de seguida alguns dos mais representativos, que demonstram a validade do sistema desenvolvido na medição de deformação em estruturas.

4.3.1 Calibração em Plataforma de Aplicação de Deformação

Os primeiros ensaios de calibração efectuados para verificação do funcionamento e avaliação do sistema de interrogação utilizaram uma plataforma de ensaios semelhante à descrita no anexo C (Figura 4.18).

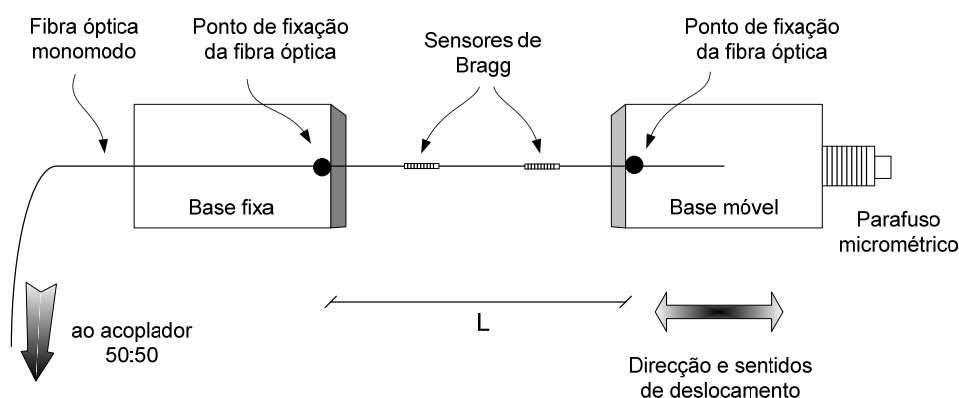


Figura 4.18 Plataforma de aplicação de deformação controlada à fibra óptica

A diferença encontra-se nas duas redes de Bragg inscritas no mesmo tramo de fibra óptica, colada entre as duas bases da plataforma. Desta forma, os ensaios permitem a calibração do sistema de medição em simultâneo com o teste à aptidão de multiplexagem do sistema de interrogação. Das duas redes de Bragg inscritas, a primeira apresenta um comprimento de onda de Bragg, λ_{B1} , próximo dos 810 nm, quando não sujeita a qualquer tipo de deformação. A segunda apresenta um λ_{B2} próximo dos 816 nm (também na situação de não estar sujeita a deformação)⁸. Na Figura 4.19 é mostrado o espectro dos sinais dos dois sensores, registado pelo espectrómetro, numa janela de 20 nm, entre os 805 e os 825 nm.

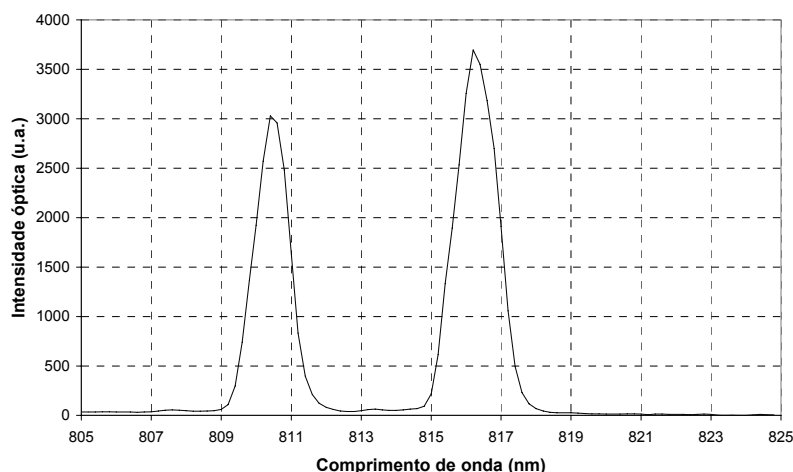


Figura 4.19 Respostas espectrais dos dois sensores de Bragg, registadas pelo espectrómetro CCD

As duas redes de Bragg utilizadas no ensaio apresentam uma reflectividade de baixo valor, na ordem dos 30 % (valor não perceptível através do gráfico da Figura 4.19, onde a escala utilizada está em unidades arbitrárias). Este facto, juntamente com o nível de intensidade da fonte óptica utilizada (anexo B.2) impõe à partida uma configuração do valor do «Tempo de Integração» do espectrómetro elevado, nunca inferior a 100 ms, para que o nível de sinal registado permita a utilização do algoritmo ADCM II dentro dos parâmetros de funcionamento preestabelecidos, com uma resolução em comprimento de onda de 1 pm (equivalente a 1,58 $\mu\epsilon$). Para cada valor registado é calculada uma média de 10 leituras consecutivas, obtendo-se assim uma taxa de aquisição de 1 amostra/s.

O ensaio efectuado permite ainda confirmar a repetibilidade do sistema. Assim, o ensaio é composto por dois ciclos de carga/descarga aplicados à fibra óptica e assim aos sensores. Graficamente, os dois ciclos são definidos como Def 1 e Def 2, respectivamente. A gama de variação de deformação é de 1020 $\mu\epsilon$,

⁸ Em termos de nomenclatura gráfica, as duas redes de Bragg são distinguidas pelos seus comprimentos de onda em vazio, ou seja, sem qualquer deformação aplicada.

aplicada em intervalos de 100 $\mu\epsilon$. Os resultados obtidos são mostrados nos gráficos das Figura 4.20 e Figura 4.21, respectivamente para o sensor de 810 nm e 816 nm. Os erros de linearidade, absolutos e relativos, obtidos com o ensaio para os sensores de 810 nm e de 816 nm são apresentados nas Tabela 4.3 e Tabela 4.4, respectivamente.

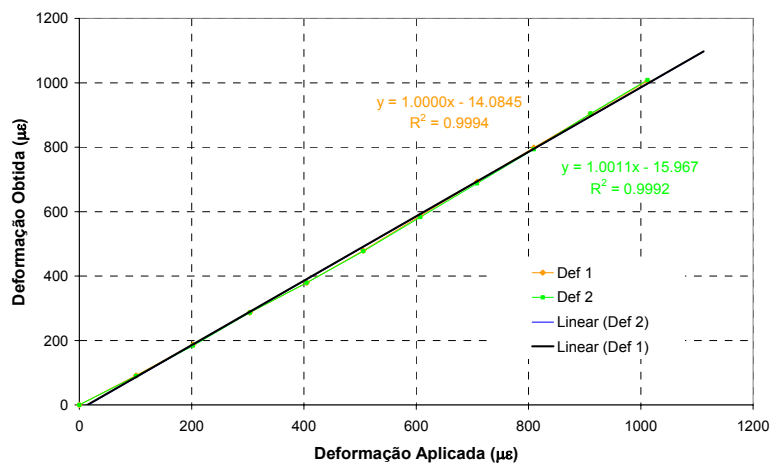


Figura 4.20 Ensaio de calibração – sensor de Bragg de 810 nm. Aplicação de dois ciclos de carga/descarga (Def 1 e Def 2)

Tabela 4.3 Erros de medição associados ao ensaio da Figura 4.20, sensor de Bragg de 810 nm

erro max linear:	Def 1	Def 2
Absoluto (μm)	12,9	13,3
Relativo (%)	1,29	1,32

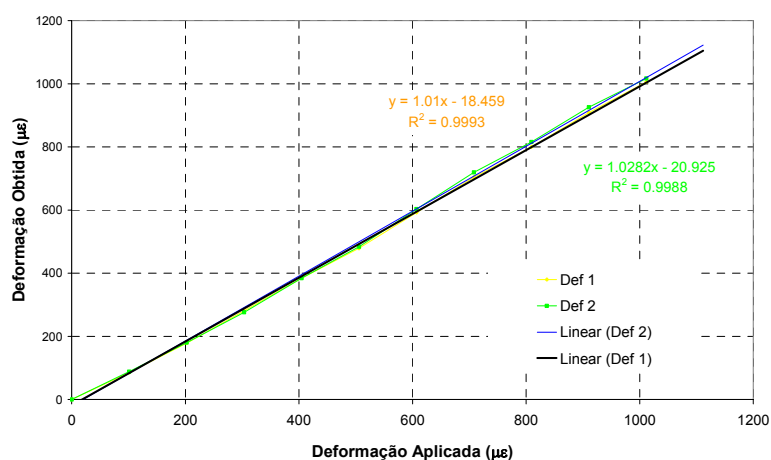


Figura 4.21 Ensaio calibração – Sensor de Bragg 816 nm. Aplicação de dois ciclos de carga/descarga (Def 1 e Def 2)

Tabela 4.4 Erros de medição associados ao ensaio da Figura 4.21, sensor de Bragg de 816 nm

erro max linear:	Def 1	Def 2
Absoluto (pm)	16,6	15,7
Relativo (%)	1,66	1,55

O dado de maior relevo a reter com este ensaio está relacionado com a linearidade de medição obtida. Assim, dentro da gama de medição utilizada no ensaio (1020 $\mu\epsilon$) a exactidão obtida é sempre melhor do que 2 % em qualquer um dos ciclos de carga/descarga, e para os dois sensores. O bom comportamento do sistema pode também ser verificado pelos coeficientes de correlação das rectas de aproximação (r^2), com valores nunca inferiores a 0,9988.

De referir como nota que, embora em ambiente laboratorial, estes resultados foram obtidos em condições de temperatura não controlada, pelo que, algumas das derivas observadas durante as aquisições podem ser atribuídas a pequenas variações térmicas.

4.3.2 Calibração em Varão Instrumentado

Um outro tipo de ensaio utilizado para a calibração do sistema de interrogação desenvolvido é baseado na comparação dos resultados obtidos com um Sensor em Fibra Óptica (SFO) e um Extensómetro de Resistência Eléctrica (ERE), ambos instalados num varão de aço nervurado, com 400 mm de comprimento e 6 mm de diâmetro (Figura 4.22). Este tipo de varão é utilizado como cabeça sensora na medição de deformações em estruturas de betão, conseguindo resultados muito positivos [Félix, 2004].

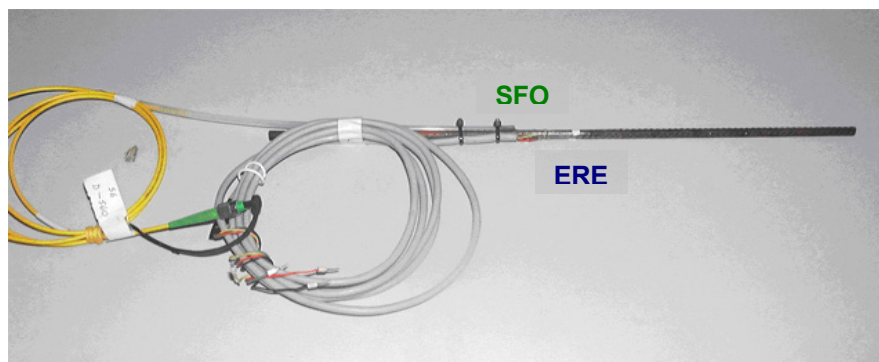


Figura 4.22 Varão instrumentado com o Sensor em Fibra Óptica (SFO) e com o Extensómetro de Resistência Eléctrica (ERE)

O sensor em fibra óptica está colado ao varão através de cola epóxica, num processo composto por variadas fases: a primeira corresponde à remoção das nervuras do varão com a utilização de uma rebarbadora eléctrica; numa segunda fase é utilizada uma lixa fina para retirar as possíveis irregularidades na superfície metálica, criados pelo disco; de seguida, a superfície de colagem é limpa com um produto solvente para que seja removida qualquer gordura existente; a fibra óptica, e respectivo sensor, bem como as bainhas utilizadas na sua protecção, são posicionados e fixos através de fita e abraçadeiras plásticas; a resina epóxica é derramada sobre a fibra; depois da cura da resina, que demora até algumas horas, é retirada a fita adesiva de fixação.

O processo de fixação do sensor eléctrico é em tudo semelhante ao utilizado para a colagem do sensor óptico. Ambos os sensores estão colados numa posição intermédia ao comprimento do varão, alinhados longitudinalmente, mas diametralmente opostos. Durante esta fase do trabalho verificou-se que as características da cola, bem como o próprio processo, são muito relevantes para a qualidade geral da medição conseguida com o sensor. Além da resina epóxica, material que apresenta elevada robustez à acção da humidade e agentes químicos, foi experimentada em outros ensaios uma cola à base de acrilatos (vulgarmente designada por cola-rápida ou super-cola). Esta apresenta como vantagem o baixo tempo de cura (alguns minutos, em vez das várias horas da resina epóxica) e à temperatura ambiente (para melhores resultados com a resina epóxica é aconselhada uma pós-cura a temperaturas elevadas). Como aspectos negativos da super-cola é apontada a alteração de características com a idade, humidade e temperatura. Ambos os tipos de cola apresentam boa resistência à fadiga mecânica e não apresentam fluência.

O ensaio de tracção efectuado compreendeu ainda a utilização de um terceiro extensómetro eléctrico, do tipo «clip», como o descrito no Capítulo 7, secção 7.2.1, onde são tratadas com maior detalhe as aplicações do sistema de interrogação. Este Transdutor de Deformação Eléctrico (TDE) foi fixado ao varão como indicado na Figura 4.23 (b), com um comprimento de referência de 300 mm. O objectivo da utilização deste transdutor é o de monitorizar o deslocamento relativo entre as extremidades traccionadas do varão.

Os pontos de ancoragem das garras da máquina de aplicação de tracção estão separados por 350 mm (Figura 4.23 (a)). Durante o ensaio fez-se variar a força aplicada ao varão entre 0 e 10 kN, em vários ciclos de carga e descarga. Os sinais dos três sensores foram registados pelos respectivos sistemas de interrogação, com uma taxa de 1 aquisição por segundo. Para os sinais eléctricos utilizou-se um equipamento dotado com um conversor ADC de 16 bits [Félix, 2004]. Além dos sinais dos três sensores, a força aplicada foi também registada automaticamente pelo sistema de actuação.

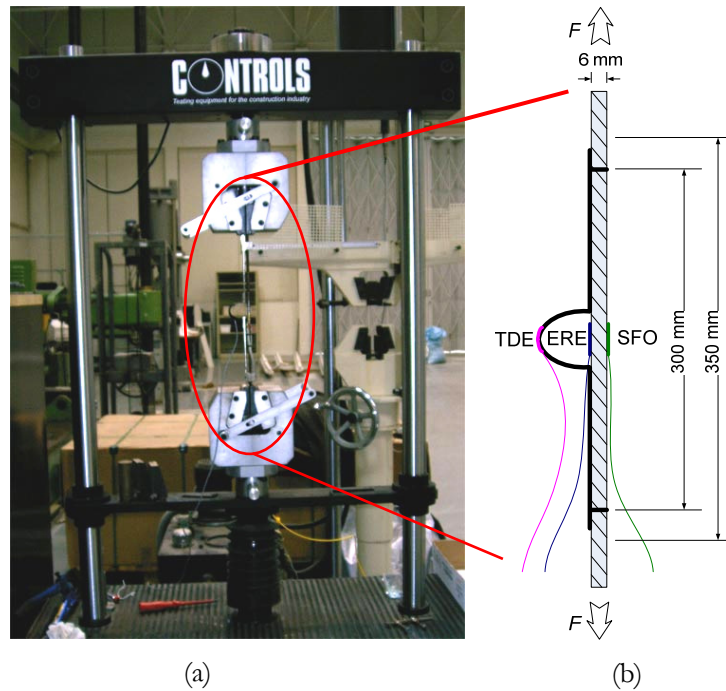


Figura 4.23 Varão instrumentado: (a) Instalado na máquina de tracção; (b) Posicionamento dos três sensores de posicionamento

Os resultados obtidos pelos três sensores de deformação, durante a aplicação de onze ciclos de carga e descarga, em que a deformação varia entre os 0 e aproximadamente os 1750 $\mu\epsilon$, são mostrados no gráfico da Figura 4.24. Neste gráfico é notória a elevada coerência entre o resultado dos três sensores.

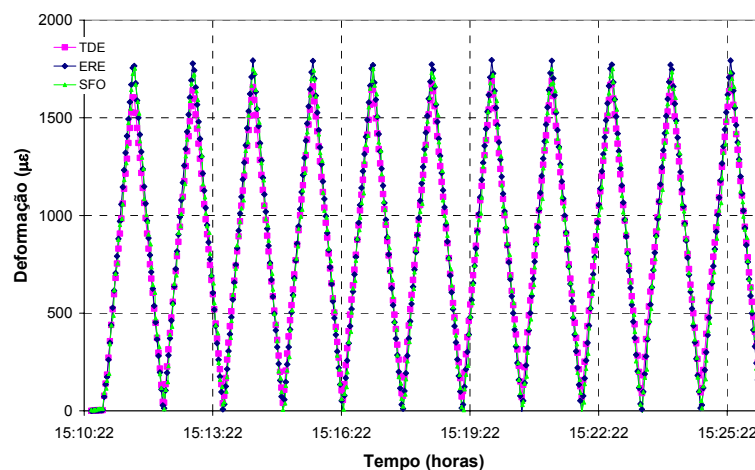


Figura 4.24 Resultados obtidos com os três sensores com a aplicação de onze ciclos de carga/descarga em tracção

Como forma de melhor visualizar os resultados obtidos, na Figura 4.25 é mostrado um detalhe da deformação registada pelos sensores durante a descarga do segundo ciclo de tracção aplicado ao varão.

Neste gráfico é ainda acrescentado duas linhas. A designada por “Teórico” corresponde ao cálculo da deformação, para cada instante, através da respectiva força aplicada pela máquina, considerando um valor do módulo de elasticidade do varão $E_s = 200 \text{ GPa}$ [Félix, 2004]. A segunda linha corresponde à aproximação a uma recta, por regressão linear, dos resultados obtidos com o sensor óptico e respectivo sistema de interrogação. O valor obtido para o coeficiente de correlação, $r^2 = 0,9988$, revela a elevada linearidade conseguida com o sistema desenvolvido.

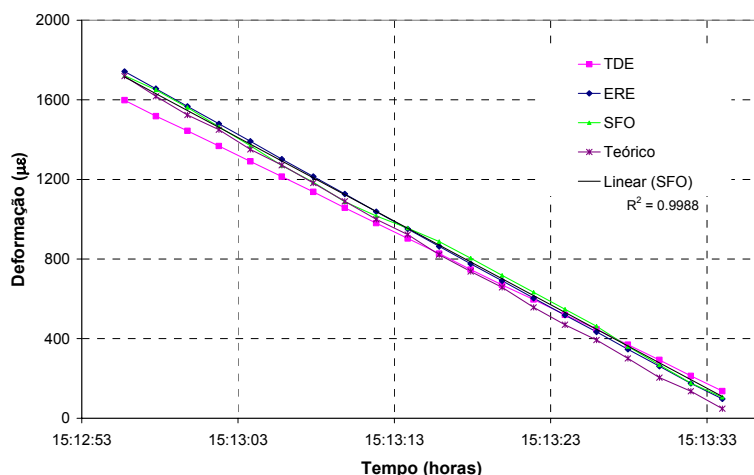


Figura 4.25 Deformação medida pelos sensores durante a descarga do segundo ciclo. Comparação com o valor calculado (Teórico)

Além da linearidade é notória a elevada coerência entre os valores registados pelos dois sensores instalados na superfície do varão (SFO e ERE). É no entanto visível a diferença dos valores registados pelo transdutor TDE, crescente à medida que a deformação, ou tensão aplicada, aumenta. Esta diferença é explicável por uma deficiência no aperto do transdutor ao varão (através de braçadeiras metálicas).

Na Figura 4.26 são representados os resultados registados pelos três sensores durante o segundo ciclo completo de carga/descarga, em função da tensão aplicada pela máquina. Da mesma forma que no gráfico anterior, é notória a elevada coerência entre os valores dos sensores óptico e eléctrico, colados na superfície do varão, e ainda com os valores teóricos, calculados de acordo com a tensão aplicada. Mais uma vez se regista um maior desvio dos valores do sensor TDE para valores de tensão aplicada mais elevados.

Para este segundo ciclo de carga/descarga foram ainda calculados todos os desvios percentuais dos valores registados pelos sensores em relação aos teóricos. Os resultados são mostrados no gráfico da Figura 4.27. Para cada instante, o desvio absoluto de deformação é calculado como sendo a diferença entre o valor registado pelo sensor respectivo e o valor calculado teoricamente. Os valores relativos, ou

percentuais, do desvio são calculados através da divisão do desvio absoluto pela gama completa de deformação aplicada, calculada teoricamente através dos valores de tensão aplicada [Félix, 2004].

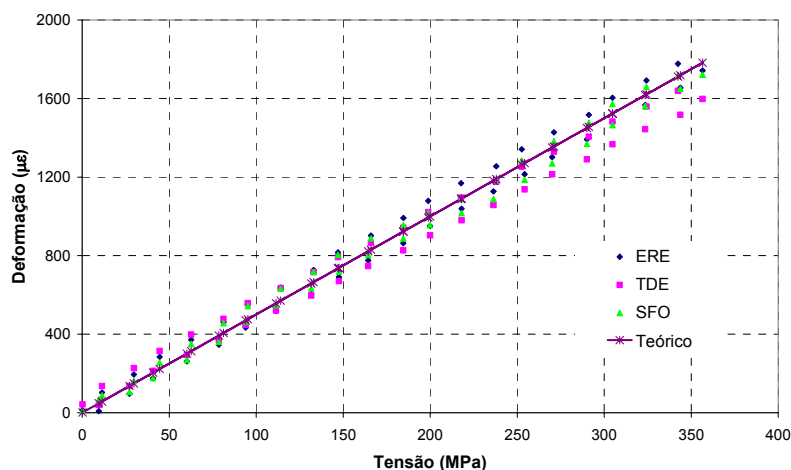


Figura 4.26 Deformação registada pelos sensores durante o segundo ciclo de carga/descarga. Comparação com o valor calculado (Teórico)

Pela análise do gráfico da Figura 4.27 verifica-se que os desvios encontrados para os sensores, óptico e eléctrico, colados na superfície do varão, se encontram dentro de um intervalo de $\pm 5\%$. No entanto, de referir que este intervalo, correspondente à diferença entre os valores experimentais e teóricos, derivam fundamentalmente da diferença de resposta do aço entre a carga e a descarga [Félix, 2004]. Assim, confirmam-se as boas características de medição deste sistema de instrumentação.

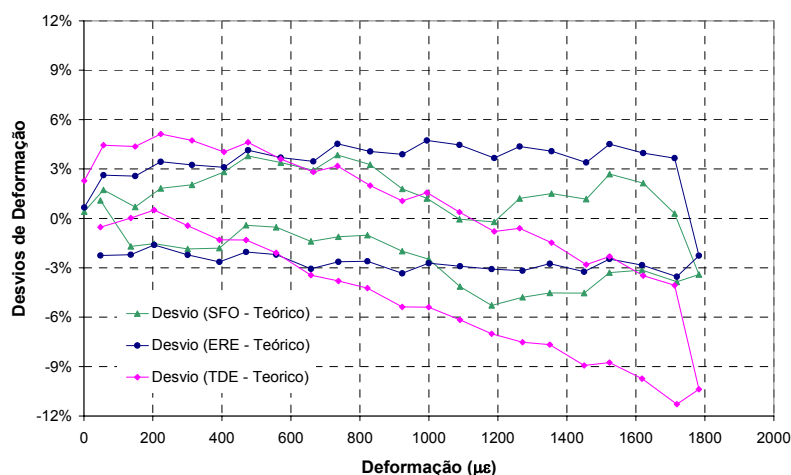


Figura 4.27 Desvios dos valores registados em relação ao valor teórico calculado para o segundo ciclo de carga/descarga

4.3.3 Calibração em Prismas de Betão

Um outro tipo de ensaio do sistema de interrogação desenvolvido foi realizado, uma vez mais, associado a estruturas de engenharia civil. Para o ensaio foram embebidos quatro diferentes sensores de deformação num prisma de betão (Figura 4.28), dois sensores eléctricos e dois sensores ópticos.



Figura 4.28 Imagem de um Prisma, após a betonagem e em período de secagem

Três dos sensores de deformação utilizados estão instalados numa mesma cabeça sensora, o que permite uma comparação directa dos resultados obtidos. A cabeça sensora utilizada foi desenvolvida especificamente para ser embebida em estruturas de betão [Félix, 2004]. Apresenta a possibilidade de poder albergar tanto sensores de fibra óptica como extensómetros de resistência eléctrica. A sua estrutura, em alumínio, é composta por um veio com 5 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento e por duas extremidades com 20 mm de diâmetro e 5 mm de espessura, como ilustrado na Figura 4.29. Com a gradual variação do diâmetro junto às extremidades pretende-se evitar a concentração de forças na junção veio-extremidade, quando a cabeça se encontra em esforço.

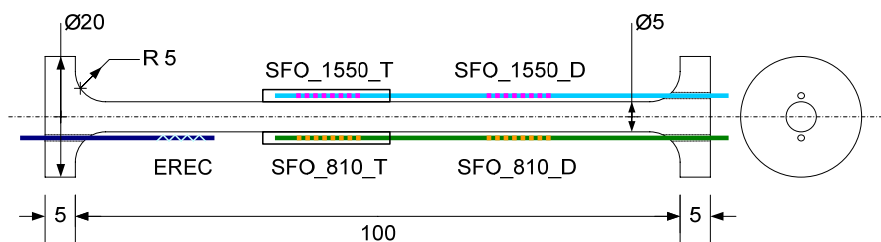


Figura 4.29 Esquema e dimensões (em mm) da cabeça multisensora de embeber no betão

Na Figura 4.29, para além do esquema e dimensões da estrutura da cabeça sensora, é também visível o posicionamento de cinco diferentes sensores, três de deformação e dois de temperatura. O designado por

EREC corresponde ao extensómetro eléctrico (de colar). O sinal deste sensor é recolhido através de um sistema de instrumentação comercial, constituído por um conversor ADC de 16 bits [Datataker, 2005]. Os sensores designados por SFO_810_ correspondem aos sensores ópticos de deformação (D) e de temperatura (T), nos quais as redes de Bragg utilizadas têm um λ_B que ronda os 810 nm. São estes os sensores utilizados na calibração do sistema de interrogação desenvolvido. Os SFO_1550_ correspondem, de forma semelhante, a sensores ópticos de deformação (D) e temperatura (T), mas neste caso com um comprimento de onda de Bragg na janela dos 1550 nm. Para a medição do sinal destes sensores foi utilizado um sistema de interrogação comercial da Micron Optics [MicronOptics, 2005].

Os dois sensores ópticos de temperatura foram instalados com o objectivo de permitir a compensação da temperatura das medições de deformação. A sua instalação tem ainda a função de verificação da capacidade de multiplexagem do sistema de interrogação desenvolvido. Na Figura 4.30 é mostrada a cabeça sensora durante a fase de instalação dos sensores SFO_810_. Alguns pormenores de construção foram tidos em consideração, nomeadamente a resistência mecânica da ligação do cabo óptico à cabeça sensora. Para melhorar a rigidez da ligação e do próprio cabo óptico até ao exterior do prisma de betão, é utilizado um fio metálico em paralelo com a normal protecção utilizada nos cabos ópticos de 3 mm. Um último revestimento é ainda adicionado, na forma de uma bainha térmica de protecção. Para a realização do sensor óptico de temperatura, a fibra óptica é deixada sem qualquer aplicação de esforço, no interior de um tubo capilar com um diâmetro interno de 0,5 mm de diâmetro, e colada em ambas as extremidades (Figura 2.18).

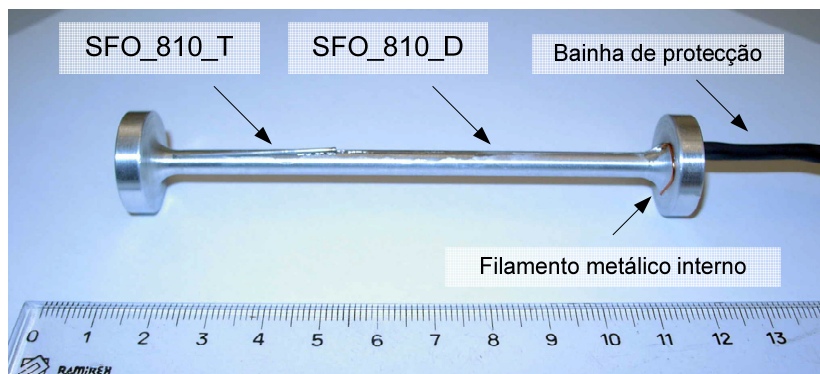


Figura 4.30 Imagem da instalação do sensor de fibra óptica (SFO_810) na cabeça sensora

O quarto sensor de deformação instalado no interior do prisma corresponde a um extensómetro eléctrico de embeber (EREE). É um extensómetro comercial, idêntico ao utilizado na aplicação descrita na secção 7.4.2.1 e mostrado na fotografia da Figura 7.28.

Para a calibração dos sensores, o prisma foi sujeito a vários ciclos de carga e descarga. A carga é conseguida por compressão do prisma, obtida através de uma prensa hidráulica automatizada (Figura 4.31), que simultaneamente regista o valor da pressão aplicada. Todos os valores, quer os da prensa quer os resultados das quatro medições de deformação, estão registados com uma taxa de aquisição de uma amostra por cada dois segundos.



Figura 4.31 Prensa utilizada para a aplicação de compressão ao prisma de betão

A comparação dos respectivos resultados obtidos durante a aplicação de dois ciclos de carga/descarga ao prisma de betão é feita no gráfico da Figura 4.32.

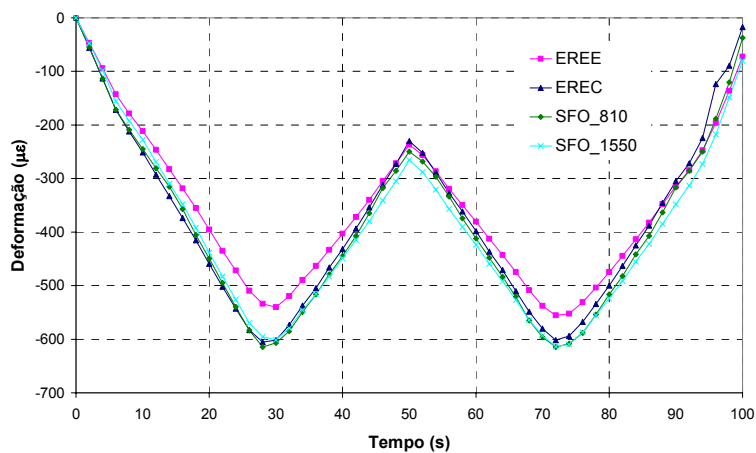


Figura 4.32 Resultado da medição dos quatro sensores de deformação em dois ciclos de carga/descarga – visualização ao longo do tempo

Como é visível, existe uma grande coerência entre os resultados obtidos com os três sensores instalados na cabeça sensora, mas uma diferença significativa entre estes e o resultado obtido com o extensómetro eléctrico de embeber. Este resultado foi analisado através da simulação por elementos finitos do comportamento da cabeça sensora. Verificou-se que, devido à protecção colocada em torno dos sensores ópticos e eléctrico, composta por uma tela asfáltica, e à deficiente rigidez do veio de alumínio, o encurtamento sofrido pelos sensores é superior ao do próprio betão [Félix, 2004]. Assim, a comparação efectuada teve em conta apenas os resultados dos sensores instalados na cabeça sensora.

No gráfico da Figura 4.33 são mostrados os resultados obtidos pelos três sensores de deformação instalados na cabeça sensora, mas agora em função da tensão aplicada pela prensa ao prisma de betão. Neste gráfico é notória a grande proximidade entre os vários resultados, nomeadamente entre as medições obtidas com o sistema de interrogação desenvolvido e o sensor eléctrico. O resultado obtido com o outro sensor óptico (SFO_1550) apresenta valores de deformação ligeiramente mais elevados.

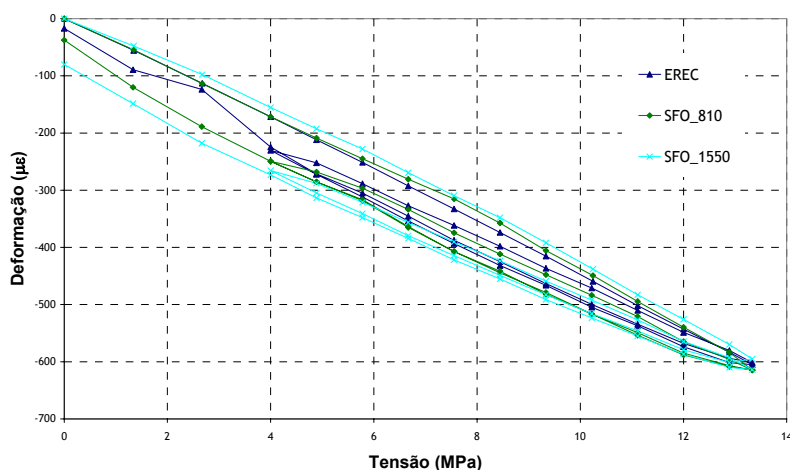


Figura 4.33 Resultado das medições dos sensores de deformação para dois ciclos de carga/descarga – visualização em função da tensão aplicada

No gráfico da Figura 4.34 são quantificados os desvios, ponto a ponto, entre os resultados obtidos com o sensor óptico SFO_810 e os outros dois sensores de deformação, EREC e SFO_1550. Neste gráfico, verifica-se que o desvio entre os resultados do sensor SFO_810 e o sensor EREC não ultrapassa os 3 %, quando considerada a excursão máxima da deformação aplicada, de 650 $\mu\epsilon$. Pelo gráfico é ainda notória a diferença existente entre as respostas dos sensores SFO_810 e EREC e o sensor SFO_1550, que apresenta um ganho diferente para a tensão aplicada. Esta tendência de resultados pode ser explicada por diferentes posicionamentos dos sensores sobre o eixo da cabeça sensora, ou por uma deficiente colagem. Diferenças semelhantes foram verificadas em outros ensaios de calibração efectuados ao longo do período de trabalho do doutoramento.

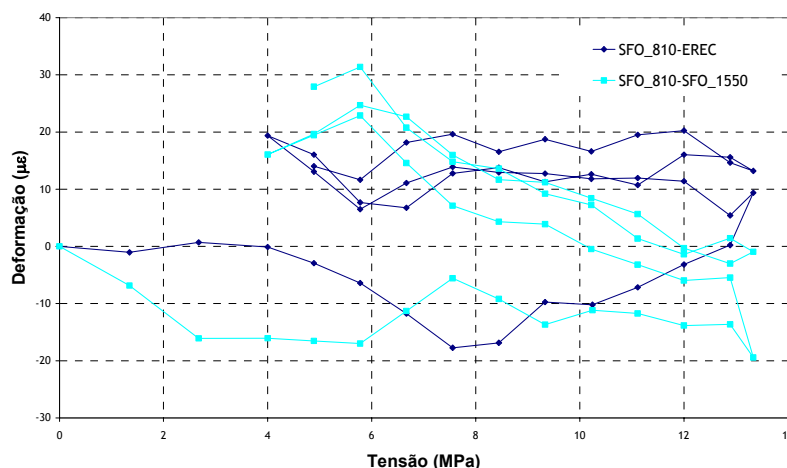


Figura 4.34 Desvios entre as medições obtidas com o sensor SFO_810 e os dois sensores instalados na cabeça sensora (EREC e SFO_1550)

Um novo ensaio de calibração foi efectuado em outro prisma de betão, utilizando um novo sensor de fibra óptica. Neste ensaio foi utilizada uma cabeça sensora idêntica à mostrada nas Figura 4.29 e Figura 4.30, mas onde foi utilizado um único sensor de Bragg num comprimento de onda na janela dos 810 nm. Foi também utilizado um extensómetro eléctrico de embeber (EREE). Os resultados obtidos, mais uma vez com a aplicação de dois ciclos de carga/descarga aplicados ao prisma pela mesma prensa hidráulica (Figura 4.31), são mostrados na Figura 4.35.

Da mesma forma que no ensaio anterior, verifica-se uma diferença de sensibilidade significativa entre os resultados do sensor óptico instalado na cabeça sensora e do sensor comercial de embeber. Confirma-se assim os resultados das medições obtidas no anterior ensaio, bem como os resultados da simulação efectuada com recurso a elementos finitos [Félix, 2004].

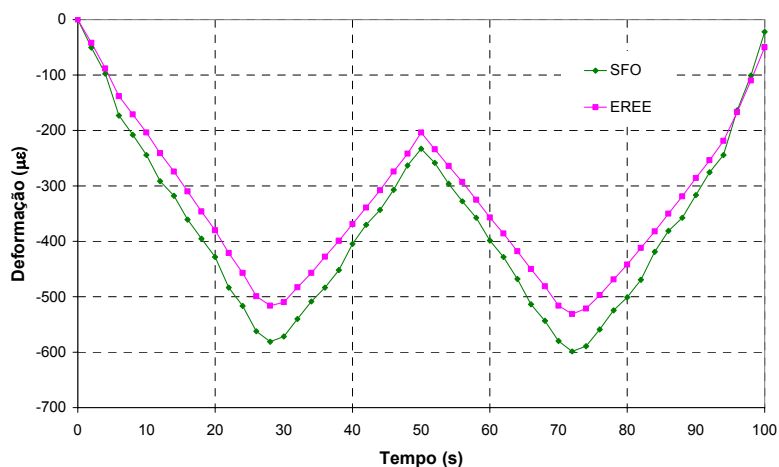


Figura 4.35 Resultado da medição dos dois sensores de deformação para dois ciclos de carga/descarga – visualização ao longo do tempo

Os resultados deste segundo ensaio, mas apresentando agora a deformação em função da tensão aplicada ao prisma, são mostrados no gráfico da Figura 4.36. Considerando apenas os valores registados para tensões superiores a 2,5 MPa, dado que abaixo deste valor o prisma de betão apresenta um comportamento diferente, é possível linearizar os resultados obtidos com as medições como mostrado na Figura 4.36. Embora mais uma vez se comprove as diferentes relações de sensibilidade obtidas pelos dois sensores, os factores de correlação são muito semelhantes e superiores a 0,99. Confirma-se assim a qualidade da medição efectuada com o sistema de instrumentação desenvolvido.

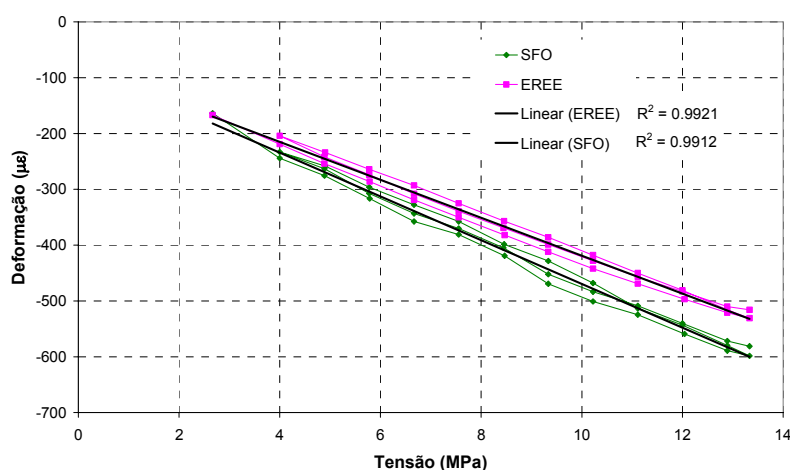


Figura 4.36 Resultado da medição dos dois sensores de deformação para dois ciclos de carga/descarga – visualização em função da tensão aplicada

4.4 Protótipo da Unidade de Interrogação

De acordo com o objectivo de desenvolvimento de um sistema de monitorização de estruturas de engenharia, foi desenvolvido um protótipo com a capacidade de uma utilização exterior ao ambiente laboratorial, em condições adversas para a aparelhagem utilizada. Assim, foi criado um protótipo portátil e autónomo, necessitando apenas de alimentação exterior em tensão alternada, 230 V. A Figura 4.37 ilustra as ligações entre os vários componentes constituintes da unidade de interrogação.

De forma resumida, as ligações existentes entre os vários componentes optoelectrónicos são as seguintes:

- Cabeça Sensora – Acoplador 50:50: através de *patchcord* (cabo em fibra óptica monomodo, conectorizado);
- Acoplador 50:50 – SLD: por fibra óptica monomodo (com *splice*);
- Acoplador 50:50 – Espectrómetro: através de *patchcord*;

- Espectrómetro – Computador: através de cabo de ligação paralelo/PCMCIA;
- SLD – Drive SLD: através de cabo próprio de ligação;
- Restantes ligações efectuadas por cabo eléctrico.

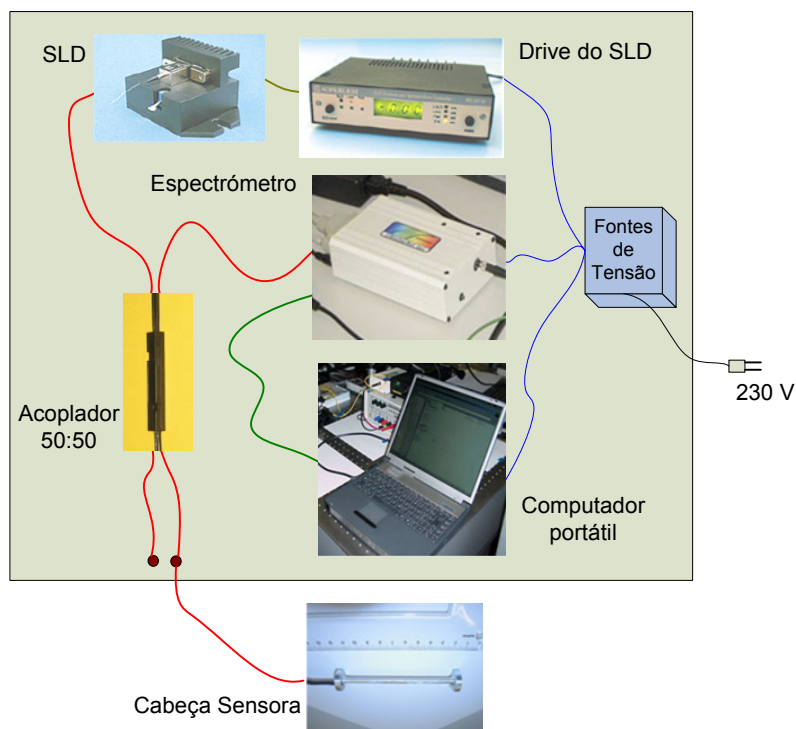


Figura 4.37 Esquema de ligação dos vários módulos constituintes da unidade de interrogação

Mesmo não sendo uma versão final, como se denota pelas fotografias da Figura 4.38, o protótipo apresenta uma robustez assinalável, ao suportar sem danos alguns esforços mais elevados (principalmente os relativos às várias viagens para o local da monitorização efectuada no âmbito do projecto SMARTE - secção 7.4). Apresenta uma estrutura simples, composta por 3 placas de acrílico, suportadas por 4 veios roscados, onde assentam os vários componentes optoelectrónicos. É simultaneamente uma estrutura robusta e flexível.

Para que um qualquer utilizador possa configurar e utilizar o sistema de instrumentação foi desenvolvido uma interface gráfica para o sistema de desmodulação. A linguagem de programação utilizada para o desenvolvimento desta interface gráfica, assim como para toda a restante programação da comunicação entre o espectrómetro e o computador portátil, é a linguagem orientada ao objecto, *Delphi*. Na Figura 4.39 é ilustrada a janela de interface desenvolvida e que possibilita a configuração da comunicação e aquisição de dados com o espectrómetro, bem como do registo dos dados adquiridos em disco duro.



Figura 4.38 Imagens do protótipo desenvolvido para a unidade de interrogação de sensores de Bragg

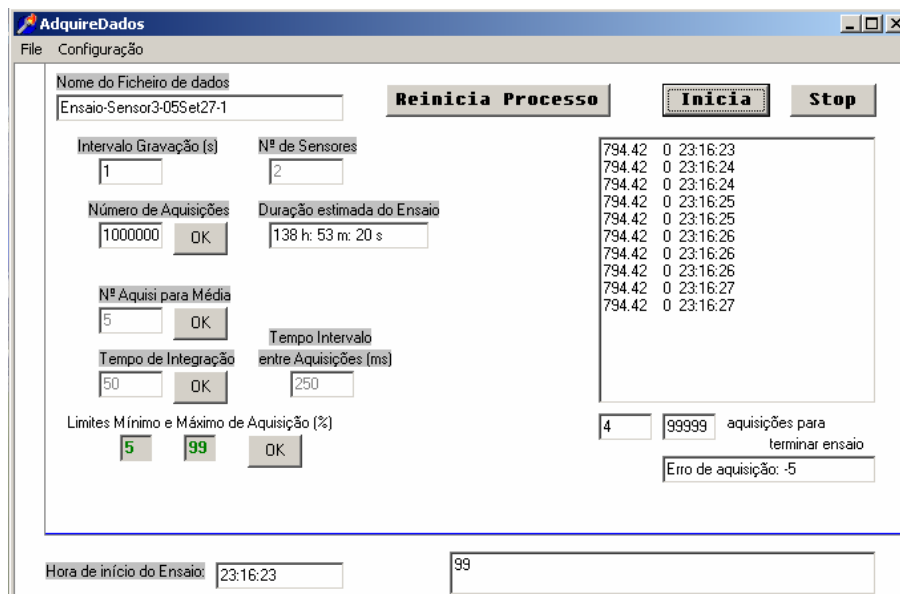


Figura 4.39 Imagem da interface gráfica da aplicação desenvolvida para comunicação e aquisição de dados

4.5 Conclusão do Capítulo

Neste capítulo é apresentado todo o processo de desenvolvimento de um sistema de interrogação baseado num analisador de espectro óptico de baixo custo, baseado numa rede de difracção plana holográfica e num *array* de fotosensores CCD. Numa primeira fase são discutidos os aspectos relativos ao funcionamento dos espectrómetros, avaliando os parâmetros que influenciam o seu desempenho. Foi verificado que o parâmetro que mais limita a utilização destes instrumentos numa aplicação de monitorização de deformação é a sua resolução física. Assim, foram utilizados algoritmos de processamento de sinal para incrementar esta característica física. O primeiro algoritmo testado, de cálculo do centro de massa da resposta espectral do sensor de Bragg, embora seja largamente utilizado por diferentes autores, verificou não ser capaz de gerar resultados adequados para a sua utilização na aplicação pretendida, nomeadamente devido à falta de linearidade da resposta. Os dois algoritmos testados a seguir, de ajuste dos pontos a uma curva ou por duplo ajuste, apresentavam problemas semelhantes, o que mais uma vez inviabilizou a sua utilização.

A evolução realizada no algoritmo de cálculo de centro de massa, através de uma pesagem diferenciada dos pixels de acordo com a sua qualidade de medição, permite ultrapassar as deficiências verificadas nos anteriores, apresentando uma resolução de medição de 1 pm, o que corresponde a um incremento de cerca de 200 vezes relativamente à resolução física inicial.

Baseado neste esquema de interrogação e no novo algoritmo desenvolvido, foram realizados vários ensaios experimentais de calibração que validaram o sistema de instrumentação. Dentro dos resultados obtidos sobressaem o erro de linearidade inferior a 2 %, numa gama de medição de $\pm 1500 \mu\epsilon$. Simultaneamente com os ensaios de calibração foram testadas várias soluções de encapsulamento dos sensores de Bragg de forma a poderem ser instalados em várias superfícies ou serem embebidos em diferentes materiais.

O sistema desenvolvido permite ainda a multiplexagem em divisão de comprimento de onda (WDM). Na secção 4.3 é mostrado os resultados dos ensaios experimentais onde são adquiridos os sinais de um sensor de deformação e um de temperatura. No capítulo 7 são mostrados novos resultados de multiplexagem em ambiente não laboratorial.

No final do capítulo é apresentado um protótipo de uma unidade de interrogação de sensores de Bragg com características de robustez e fiabilidade, capaz de uma aplicação em ambientes normalmente adversos à instrumentação.

Uma das possíveis evoluções da unidade de interrogação desenvolvida consiste na conversão do comprimento de onda de funcionamento da janela dos 800 nm para os 1550 nm. Algumas das vantagens conseguidas com esta alteração são: a obtenção de uma maior sensibilidade das redes de Bragg à deformação e temperatura e também a redução do custo de todos os componentes ópticos, nomeadamente da própria fibra, dado ser este o comprimento de onda utilizado nas telecomunicações e portanto com uma produção muito superior.

SENSIBILIDADE A PERTURBAÇÕES MECÂNICAS NA TRANSMISSÃO ÓPTICA

Ao longo do trabalho de desenvolvimento do sistema de interrogação apresentado no Capítulo 4 foi notada a existência de desvios nas medições, que se verificou não estarem relacionados com variações na mensuranda mas sim com perturbações mecânicas exercidas sobre a fibra óptica de ligação entre o sistema de interrogação e o sensor.

Neste capítulo é demonstrado que a origem destes desvios está relacionada com alterações da polarização da luz conduzida pela fibra óptica. Foram realizados ensaios para verificação da sensibilidade a este efeito dos vários componentes do sistema de interrogação desenvolvido, baseado num espectrómetro passivo com tecnologia CCD. As conclusões deste estudo conduziram ao desenvolvimento de um dispositivo óptico capaz de despolarizar a luz que chega ao espectrómetro e que corresponde à resposta espectral das redes de Bragg, baseado na variação activa da birrefringência da fibra óptica, bobinada em torno de um cilindro piezoeléctrico. Este equipamento é introduzido no sistema de interrogação imediatamente a montante do espectrómetro, portanto antes do sinal do sensor ser medido. Como se conclui pelos resultados mostrados, o despolarizador construído limita os efeitos das perturbações mecânicas a valores desprezáveis, inferiores a 1 %.

5.1 Polarização da Luz

No início deste capítulo são introduzidos alguns dos conceitos relacionados com a polarização da luz, necessários à compreensão deste assunto.

Na natureza, a radiação electromagnética é normalmente produzida por um largo conjunto de emissores que geram ondas independentes entre si, portanto radiação policromática. No entanto, a introdução à modelação da luz é feita através da luz monocromática, conceito ideal mas muito útil para a compreensão dos fenómenos que envolvem a radiação luminosa, nomeadamente os tratados neste capítulo.

5.1.1 Luz Monocromática

A radiação luminosa monocromática é constituída por um trem de ondas de extensão infinita com propriedades invariáveis no tempo [Hecht, 1991]. Isto significa que as suas componentes ortogonais têm a mesma frequência e amplitudes constantes e que a diferença de fase entre as duas componentes é constante, isto é, ambas as componentes são coerentes entre si. Assim, a sua polarização é bem definida, seja linear, circular ou elíptica [Klein, 1986; Hecht, 1991; Jones, 2000; Answers.com, 2005; Nave, 2005; Weisstein, 2005].

Considere-se duas formas de onda harmónicas ortogonais, com a mesma frequência, que se propagam na mesma região do espaço e segundo a mesma direcção (Figura 5.1).

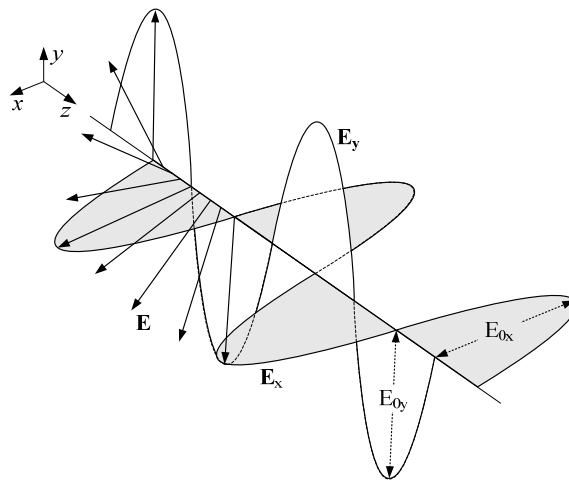


Figura 5.1 Componentes ortogonais da radiação monocromática

A resultante da sobreposição destas duas ondas harmónicas é também uma onda harmónica, mas a sua amplitude, fase e polarização podem ser muito variáveis dependendo da posição relativa entre as duas ondas iniciais. As duas componentes ortogonais do campo eléctrico, $\mathbf{E}_x$ e $\mathbf{E}_y$, que se propagam ao longo do eixo dos z , podem ser representadas na forma:

$$\mathbf{E}_x(z, t) = \hat{\mathbf{i}} E_{0x} \cos(kz - \omega t) \quad (5.1)$$

$$\mathbf{E}_y(z, t) = \hat{\mathbf{j}} E_{0y} \cos(kz - \omega t + \delta) \quad (5.2)$$

onde δ representa a fase relativa entre as duas ondas.

Por análise matemática, pode reescrever-se as duas equações anteriores, obtendo-se:

$$\left(\frac{\mathbf{E}_y}{E_{0y}}\right)^2 + \left(\frac{\mathbf{E}_x}{E_{0x}}\right)^2 - 2\left(\frac{\mathbf{E}_y}{E_{0y}}\right)\left(\frac{\mathbf{E}_x}{E_{0x}}\right)\cos\delta = \sin^2\delta \quad (5.3)$$

Esta equação, (5.3), representa a equação de uma elipse no sistema de coordenadas (x, y) , inclinada em relação ao eixo dos x de um ângulo:

$$\psi = \tan(2\delta) = \frac{2E_{0x}E_{0y} \cos \delta}{E_{0x}^2 - E_{0y}^2} \quad (5.4)$$

Os parâmetros da elipse assim definida (Figura 5.2), nomeadamente a sua orientação e alongação, permitem especificar os estados de polarização da radiação monocromática.

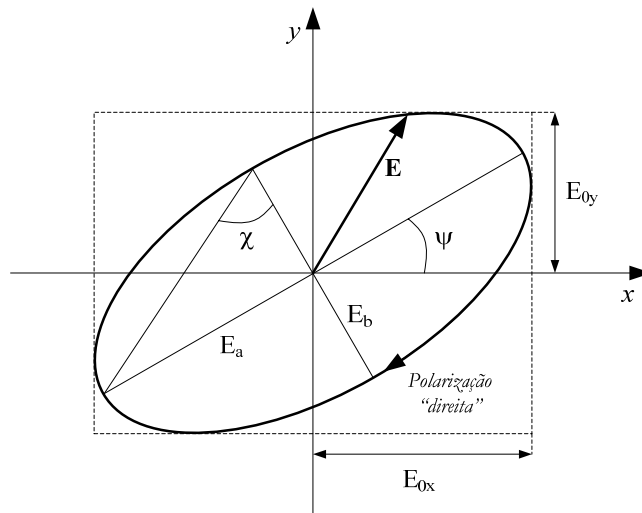


Figura 5.2 Representação gráfica da elipse de polarização e respectivos parâmetros

Nesta parametrização da polarização é utilizado o ângulo de azimute, ψ (o ângulo entre o maior semi-eixo da elipse e o eixo dos x), e a elipticidade, $\mathcal{E}lip$ (a relação entre os dois semi-eixos da elipse, E_a/E_b). Uma elipticidade de 0 corresponde à polarização linear e uma elipticidade de 1 corresponde à polarização circular. O arco-tangente da elipticidade, $\chi = \arctan \mathcal{E}lip$ (ângulo de elipticidade), é também frequentemente utilizado [Myers, 2004; Answers.com, 2005].

5.1.2 Luz Policromática

As fontes ópticas reais são sempre policromáticas, ou seja, emitem energia radiante dentro de uma determinada gama do espectro de frequências [Hecht, 1991]. Pode observar-se que qualquer electrão ao ser excitado emite radiação electromagnética. Esta energia radiante depende do estado de movimento do electrão e pode ser associada a um trem de ondas de extensão finita, $\Delta\lambda$. Assim, o estado de polarização

destas ondas apenas se mantém constante durante um curto período temporal (que corresponde ao tempo de coerência, $\Delta t_c = \Delta c/c$). Uma fonte óptica policromática, constituída por vários destes osciladores independentes, tem uma radiação que contém diferentes trens de ondas com diferentes fases, embora com frequências centradas numa frequência dominante, $\bar{\omega}$.

Verifica-se que os conceitos de polarização e coerência estão relacionados de um modo fundamental. Quando a largura de banda da radiação policromática, $\Delta\omega$, é elevada o tempo de coerência é pequeno ($\Delta t_c \sim 1/\Delta\omega$) e qualquer **estado de polarização** (SOP) é efêmero [Hecht, 1991].

De forma equivalente ao apresentado para a radiação monocromática, a radiação policromática pode ser representada pela sobreposição de dois estados de polarização linear, harmónicos e ortogonais [equações (5.1) e (5.2)], mas com amplitudes e fases na origem dependentes do tempo ($E_{0x}(t)$, $E_{0y}(t)$ e $\delta_x(t)$, $\delta_y(t)$, respectivamente), portanto de variação estocástica. Neste caso, a frequência corresponde ao valor médio associado ao espectro da onda, ou seja, $\bar{\omega}$. As expressões que representam este tipo de radiação são:

$$\mathbf{E}_x(z, t) = \hat{\mathbf{i}} E_{0x}(t) \cos[kz - \bar{\omega}t + \delta_x(t)] \quad (5.5)$$

$$\mathbf{E}_y(z, t) = \hat{\mathbf{j}} E_{0y}(t) \cos[kz - \bar{\omega}t + \delta_y(t)] \quad (5.6)$$

Na situação de radiação quase monocromática, onde a largura de banda é estreita, o estado de polarização varia muito lentamente e permanece constante ao longo de um comprimento elevado. No entanto, para intervalos de tempo muito maiores que o tempo de coerência, as amplitudes e as fases relativas variam, quer de forma independente, quer correlacionadas.

No caso das amplitudes e fases serem totalmente independentes, o estado de polarização mantém-se constante apenas durante um instante de tempo, ou seja, a elipse que descreve o estado de polarização altera constantemente a sua forma, orientação e sentido. Considera-se, nestes casos, que a radiação é não polarizada.

Quando, pelo contrário, a razão $E_{0x}(t)/E_{0y}(t)$ é constante, mesmo que ambos os termos variem, e que a diferença de fase $\delta = \delta_x(t) - \delta_y(t)$ é também constante, a onda é polarizada. Estas condições verificam-se quando a radiação policromática atravessa um polarizador e perde todas as restantes componentes. O intervalo de tempo ao longo do qual a onda mantém invariável o seu estado de polarização deixa de ser dependente da largura de banda. Portanto, a luz pode ser policromática e simultaneamente polarizada.

Portanto, podem ser considerados estados de polarização parcial entre estes dois extremos de polarização: ausência de polarização e polarização completa. Desta forma, é possível descrever a radiação policromática como a soma de duas partes independentes entre si: uma totalmente polarizada e outra não polarizada [Hecht, 1991].

No caso da luz policromática, a radiação é parcialmente polarizada e pode ser descrita em termos do seu **grau de polarização** (DOP) e dos parâmetros da elipse de polarização.

Uma forma conveniente de descrever esta polarização é dada pelos parâmetros de Stokes [Jones, 2000; Fiberpro, 2004; Myers, 2004; Answers.com, 2005; Weisstein, 2005], introduzidos por George Gabriel Stokes em 1852. Para luz polarizada, a relação dos parâmetros de Stokes com os parâmetros da elipse de polarização é representada pelas equações (5.7) a (5.10).

$$S_0 = E_a^2 + E_b^2 \quad (5.7)$$

$$S_1 = E_a^2 - E_b^2 \quad (5.8)$$

$$S_2 = 2E_a E_b \cos \delta \quad (5.9)$$

$$S_3 = 2E_a E_b \sin \delta \quad (5.10)$$

Alternativamente, os parâmetros de Stokes podem ser descritos em termos de coordenadas esféricas ⁹:

$$S_0 = E_a^2 + E_b^2 \quad (5.11)$$

$$S_1 = S_0 \cos 2\psi \cos 2\chi \quad (5.12)$$

$$S_2 = S_0 \sin 2\psi \cos 2\chi \quad (5.13)$$

$$S_3 = S_0 \sin 2\chi \quad (5.14)$$

A relação entre os parâmetros de Stokes, para a luz polarizada, pode ser escrita da forma:

$$S_0^2 = S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 \quad (5.15)$$

⁹ De notar os factores 2 antes de ψ e χ , que corresponde ao facto de qualquer elipse de polarização não ser distinguível de outra rodada de 180° , ou seja, representa a perda de informação sobre a fase absoluta.

Estes parâmetros podem constituir-se num vector, o denominado vector de Stokes:

$$S = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (5.16)$$

Os parâmetros de Stokes podem ainda ser representados num espaço vectorial tridimensional. Este espaço é denominado de Esfera de Poincaré e está ilustrado na Figura 5.3. A sua superfície esférica é ocupada apenas pelos estados totalmente polarizados.

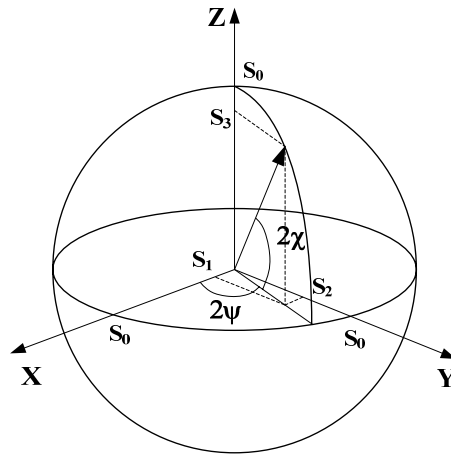


Figura 5.3 Representação gráfica de luz polarizada na esfera de Poincaré

Para luz parcialmente polarizada não existe uma única elipse pois esta é variável ao longo do tempo. Assim, o cálculo dos parâmetros de Stokes reflecte esta situação e é obtido através da média dos parâmetros do conjunto de possíveis elipses, da forma [Hecht, 1991; Fiberpro, 2004; Myers, 2004]:

$$S_0 = \langle E_a^2 \rangle + \langle E_b^2 \rangle \quad (5.17)$$

$$S_1 = \langle E_a^2 \rangle - \langle E_b^2 \rangle \quad (5.18)$$

$$S_2 = 2 \langle E_a E_b \cos \delta \rangle \quad (5.19)$$

$$S_3 = 2 \langle E_a E_b \sin \delta \rangle \quad (5.20)$$

Na situação de luz polarizada a relação dos parâmetros de Stokes é alterada, sendo agora apresentada por:

$$S_0^2 \geq S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 \quad (5.21)$$

Na abordagem à luz parcialmente polarizada é necessária ainda a definição de um outro parâmetro, o **grau de polarização** (DOP), definido através da equação (5.22).

$$DOP = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0} \quad (5.22)$$

Através da esfera de Poincaré a distinção entre as duas situações de polarização, total e parcial, é facilmente verificável. Para o caso de luz parcialmente polarizada as coordenadas que definem o vector estão compreendidas no interior da esfera (Figura 5.4), ao contrário da luz totalmente polarizada, em que o **estado de polarização** (SOP) está à superfície da esfera de Poincaré, de raio S_0 (Figura 5.3).

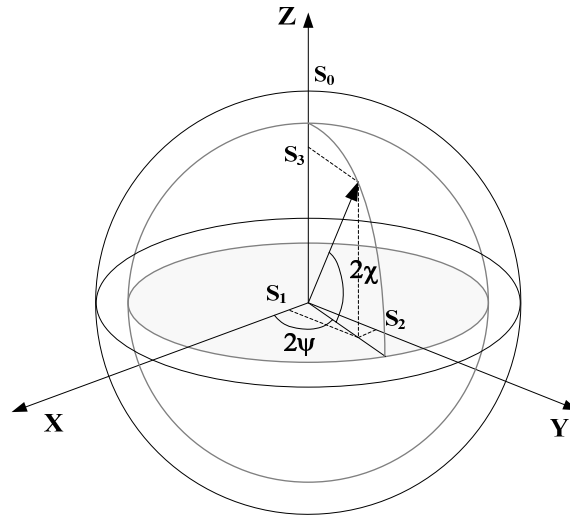


Figura 5.4 Representação de luz parcialmente polarizada na esfera de Poincaré

5.1.2.1 Medição do Grau de Polarização

Para a medição do grau de polarização podem ser utilizados instrumentos dedicados, denominados polarímetros. Estes são equipamentos de bancada e de custo elevado [Photonics, 2003]. Outra forma de medição do DOP utiliza a montagem ilustrada no diagrama da Figura 5.5.

À saída da fonte óptica, é colocado um dispositivo óptico que faz o varrimento de todos os estados de polarização da radiação emitida pela fonte. A radiação atravessa depois um polarizador antes de chegar a um fotodetector, que deverá ser totalmente insensível à polarização. A potência do sinal de saída deste fotodetector é registada e o seu valor utilizado para o cálculo do DOP.

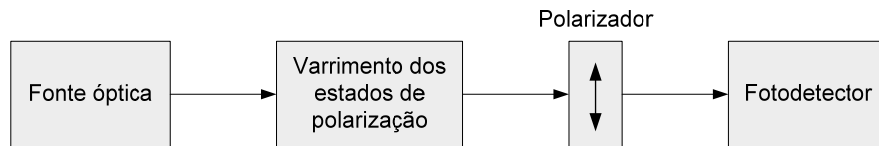


Figura 5.5 Esquema da montagem para medição do grau de polarização

A expressão utilizada para calcular o valor do grau de polarização é dada pela equação (5.23), obtida por análise matemática da expressão apresentada em (5.22) [Burns, 1983b; Photonics, 2003].

$$DOP = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{P_{\max} + P_{\min}} \times 100 \% \quad (5.23)$$

Nesta equação, $P_{\max}$ e $P_{\min}$ representam os valores máximos e mínimos, respectivamente, da potência do sinal recebido pelo fotodetector.

Uma parametrização semelhante é também utilizada neste trabalho para quantificar a sensibilidade do espectrómetro à polarização. A expressão utilizada para o cálculo continua a ser a (5.23), mas no esquema de montagem deixa de constar o polarizador (Figura 5.6).

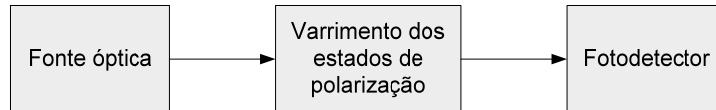


Figura 5.6 Esquema da montagem para medição do grau sensibilidade do espectrómetro à polarização

Assim, um valor nulo de DOP significa que o fotodetector não apresenta qualquer sensibilidade à variação do estado de espectrómetro, enquanto um valor unitário (100 %) significa que existe uma variação máxima na resposta do sensor, ou seja, que para um determinado estado de polarização a potência de sinal que o sensor recebe pode ser máxima e que para outro a potência recebida pode ser zero. Esta forma de medição do grau de polarização é utilizada ao longo deste trabalho.

5.2 Necessidade de Despolarização da Luz

Como já referido no início deste capítulo, desde o início do desenvolvimento do sistema de interrogação baseado no espectrómetro CCD foi notório um problema que pode ser descrito da seguinte forma: com o sistema em funcionamento, a interrogar os sensores de Bragg, qualquer perturbação mecânica exercida sobre a fibra óptica, criada por vezes por um simples deslocamento aleatório da fibra sobre a mesa de

ensaios, em qualquer um dos troços de ligação dos vários elementos constituintes da unidade de interrogação, provocava um desvio na medição do comprimento de onda de Bragg do sensor. Através de alguns testes experimentais observou-se que estes desvios na medição chegam aos $\pm 50 \mu\epsilon$. Considerando que um dos objectivos iniciais estabelecidos para o trabalho é permitir a sua aplicação na monitorização de estruturas, com uma resolução de medição de $1 \mu\epsilon$, facilmente se conclui que este nível de ruído é inaceitável.

Ao iniciar o estudo sobre a forma de resolução do problema surgido neste sistema de medição, verificou-se que este não é um problema exclusivo da área de instrumentação, mas também da área das transmissões. O problema é aqui denominado de dispersão do modo de polarização (PMD) e foi desconhecido até ao início dos anos 90, altura em que se começaram a utilizar taxas de transmissão na ordem dos Gbps [Audet, 2003; Photonics, 2003; IEC, 2004]. Como já referido na secção anterior, a propagação de radiação ao longo de fibra óptica pode ser descrita como apresentando dois modos de polarização que seguem o percurso de dois eixos ortogonais. Devido a impurezas ou imperfeições do núcleo da fibra, a luz que viaja ao longo de um eixo de polarização pode mover-se mais rapidamente do que a luz polarizada ao longo do outro eixo. Em transmissão de dados este efeito pode espalhar de tal forma o impulso emitido que provoca a sua sobreposição com impulsos adjacentes, ou alterar o formato do impulso de maneira a que se torne irreconhecível pelo receptor.

Problema semelhante resulta também em sistemas de instrumentação. A diferente distribuição da radiação emitida nas duas componentes ortogonais, consoante a birrefringência introduzida na fibra óptica, nomeadamente quando é deformada lateralmente, pode provocar erros elevados na medição se a fotodeteção for realizada por elementos sensíveis aos estados de polarização. Com os ensaios mostrados na secção seguinte é demonstrado este efeito, quando a fotodeteção do sinal de resposta do sensor de Bragg é realizada pelo espectrómetro.

5.3 Ensaios de Verificação de Polarização

Antes da realização de ensaios experimentais, foram recolhidas informações sobre a influência na polarização, ou sensibilidade a essa mesma polarização, de vários componentes constituintes do sistema de interrogação. Assim, segundo Ecke *et al* e Yu *et al*, os díodos super luminescentes, SLD, utilizados como fonte de espectro largo, são normalmente de emissão polarizada [Ecke, 1997; Yu, 2003]. Por sua vez, os sensores de Bragg em fibra óptica exibem uma resposta dependente da polarização, quer intrinsecamente, devido à birrefringência da própria fibra ou à natureza não simétrica do processo ultravioleta de inscrição das redes, quer por razões externas, quando o sensor fica sujeito a pressões/contracções laterais na instalação em cabeças sensoras. Finalmente, o espectrómetro CCD, que

por usar uma rede de difracção de reflexão, apresenta uma elevada sensibilidade ao estado de polarização da radiação que se pretende medir.

No sentido de se proceder à confirmação experimental desta análise foram realizados ensaios experimentais que permitem: primeiro, verificar a polarização da radiação emitida pela resposta das redes de Bragg, nomeadamente através da medição do seu grau de polarização e segundo, verificar a sensibilidade do espectrómetro a esse mesmo grau de polarização.

5.3.1 Grau de Polarização da Resposta do Sensor de Bragg

O primeiro ensaio realizado tem como objectivo demonstrar que a radiação reflectida pelo sensor FBG, depois de percorrer todo caminho até à entrada no espectrómetro, é parcialmente polarizada. Simultaneamente, é medido o respectivo grau de polarização. A montagem óptica utilizada para este ensaio é mostrada na Figura 5.7 ¹⁰.

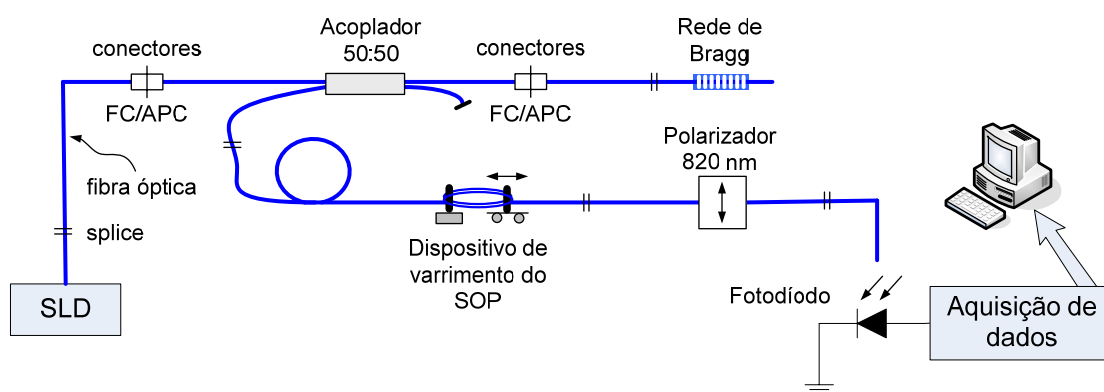


Figura 5.7 Montagem para verificação e medição do grau de polarização da resposta do sensor de Bragg

Como se pode observar pela Figura 5.7, a radiação reflectida pela rede de Bragg, depois de atravessar o acoplador 50:50 entra num elemento denominado dispositivo de varrimento dos estados de polarização (SOP). Tendo o seu efeito traduzido na sua denominação, este mecanismo é descrito e validado mais adiante, na secção 5.3.3. O varrimento completo dos estados de polarização é obtido por aplicação controlada de diferentes valores de stress sobre um troço de fibra óptica. A seguir a este componente óptico, é ligado, por *splice*, um polarizador em fibra óptica (para um comprimento de onda de 820 nm), ilustrado na Figura 5.8 (a). O sinal é depois medido com um fotodíodo, elemento fotosensor insensível à

¹⁰ A fibra óptica que sai do SLD é unida por fusão (*splice*) a outra fibra, conectorizada (com conector FC/APC) no outro extremo. A razão para a existência desta conectorização, desnecessária para o teste pretendido, deve-se ao aproveitamento da montagem do protótipo do sistema de interrogação desenvolvido. No entanto, e além da normal perda de potência existente na ligação dos conectores, desprezável para o ensaio, considera-se que não é introduzido qualquer outro efeito na montagem.

polarização (como mais à frente é comprovado experimentalmente), condição necessária para a medição do grau de polarização segundo o método apresentado na secção 5.1.2.1. A imagem da Figura 5.8 (b) mostra os dois circuitos que compõe o sistema de condicionamento e aquisição de dados utilizado para a verificação do nível de intensidade incidente sobre o fotodíodo. Este sistema de aquisição¹¹ apresenta uma resolução de 1 mV.

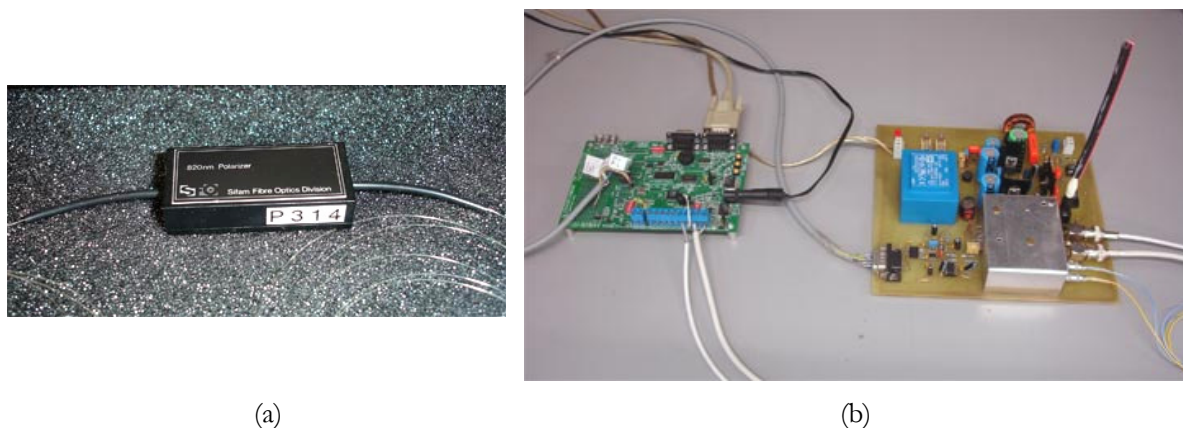


Figura 5.8 Imagens do (a) polarizador em fibra óptica e (b) circuitos de condicionamento e aquisição de dados

Com esta montagem, pretende-se que o valor da potência lida pelo fotodíodo varie de acordo com o estado de polarização da radiação, entre um valor máximo e um mínimo.

O varrimento do estado de polarização é obtido através da aplicação de stress à fibra óptica (Figura 5.16), que por sua vez é conseguido pelo deslocamento de um dos veios constituintes do mecanismo construído (Figura 5.15). No ensaio realizado, o veio móvel é deslocado em contínuo, num ciclo de carga/descarga, até a uma posição máxima de 1000 μm , com uma resolução de 0,1 μm . O gráfico da Figura 5.9 mostra os níveis de potência do sinal medido com o fotodíodo, em função da posição do veio móvel do dispositivo de varrimento.

A denominação “Carga” e “Descarga”, que se mantém para os restantes ensaios, corresponde ao afastamento e aproximação, respectivamente, do veio móvel em relação ao fixo, que provoca a aplicação de mais ou menos stress na fibra óptica. O resultado obtido com o ensaio mostra uma variação da potência do sinal em dois ciclos, para o intervalo de deslocamento aplicado, de 1000 μm . Observa-se ainda a grande correlação existente entre as variações na carga e descarga, à diferença de um atraso em função do posicionamento. Este atraso pode ser explicado pela inércia de retorno da fibra óptica à

¹¹ Este sistema de aquisição é tratado com maior detalhe no Capítulo 6.

posição inicial dada a inexistência de um mecanismo externo que obrigue a fibra a retornar a essa posição, a não ser a própria elasticidade da fibra.

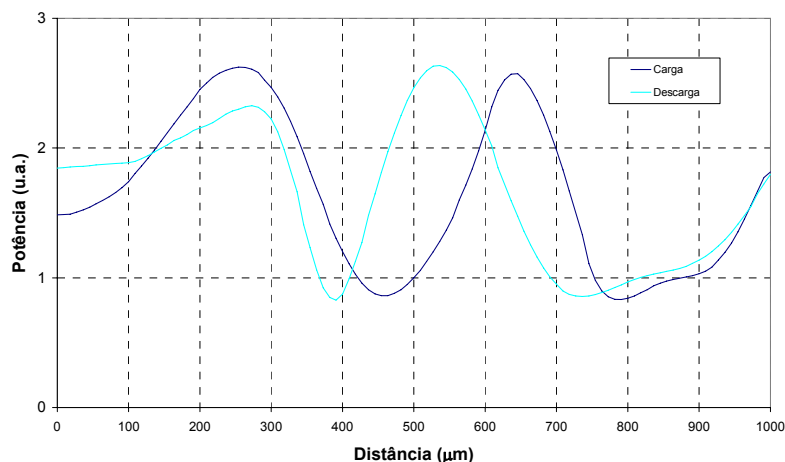


Figura 5.9 Gráfico do resultado da aplicação de stress à fibra: valores de potência (u.a.) da rede de Bragg obtidos com o fotodíodo, para a excursão 0-1000μm-0, com polarizador

A localização dos máximos e mínimos, em função da posição do veio móvel não é considerada relevante, nem é possível fazer qualquer comparação com outros ensaios, dado que ao efectuar as alterações na montagem de ensaio a fibra óptica fica colocada/assente de forma diferente, o que só por si provoca alteração na birrefringência causada na fibra óptica, ou como nestes ensaios se comprova, no estado de polarização da radiação que a atravessa.

O valor do grau de polarização obtido, calculado pela equação (5.23), é de $DOP = 51 \%$.

Este resultado demonstra que a radiação medida é parcialmente polarizada, de acordo com o esperado, uma vez que a resposta do sensor de Bragg é composta por uma determinada gama espectral, embora estreita, e não por uma frequência única (monocromática).

Como forma de verificação da insensibilidade do fotodíodo à polarização, foi realizado um segundo ensaio com uma montagem semelhante à mostrada na Figura 5.7, mas onde foi retirado o polarizador (de acordo com o referido na secção 5.1.2.1). O resultado da medição da potência do sinal que chega ao fotodíodo durante a aplicação do ciclo de carga/descarga é ilustrado na Figura 5.10.

Os resultados obtidos com estes ensaios confirmam que o fotodíodo apresenta uma sensibilidade à polarização completamente desprezável, de $0,1 \%$. De notar ainda que o valor indicado na escala das

ordenadas corresponde ao valor da tensão medida pelo sistema de aquisição e que a variação sentida é inferior a 5 mV, portanto próxima da resolução do equipamento, de 1 mV, e do seu nível de ruído.

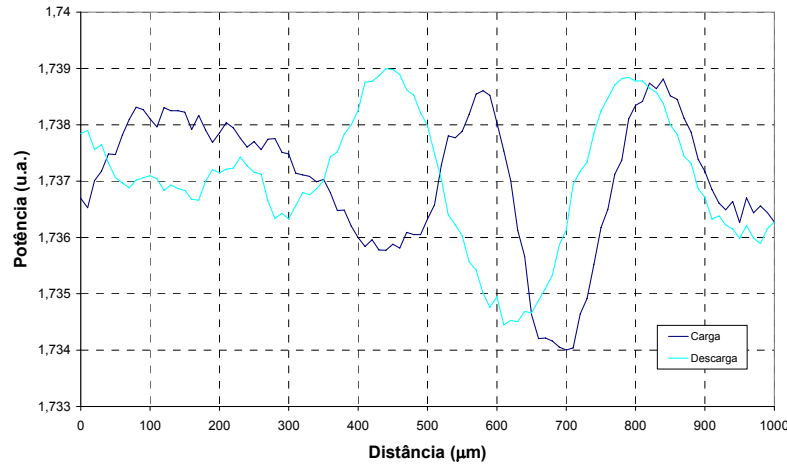


Figura 5.10 Gráfico do resultado da aplicação de stress à fibra: valores de potência (u.a.) da rede de Bragg obtidos com o fotodiodo, para a excursão 0-1000μm-0, sem polarizador

5.3.2 Grau de Sensibilidade à Polarização do Espectrómetro

Após a demonstração de que a radiação que se pretende medir, correspondente à resposta do sensor FBG, é parcialmente polarizada, verifica-se nesta secção a sensibilidade do espectrómetro a essa mesma polarização, assim como é também determinado o grau dessa sensibilidade. Para isso, foi realizado um novo ensaio experimental, semelhante aos mostrados em 5.3.1, mas de acordo com a montagem mostrada na Figura 5.11, onde o fotodetector é substituído pelo espectrómetro e é retirado o polarizador.

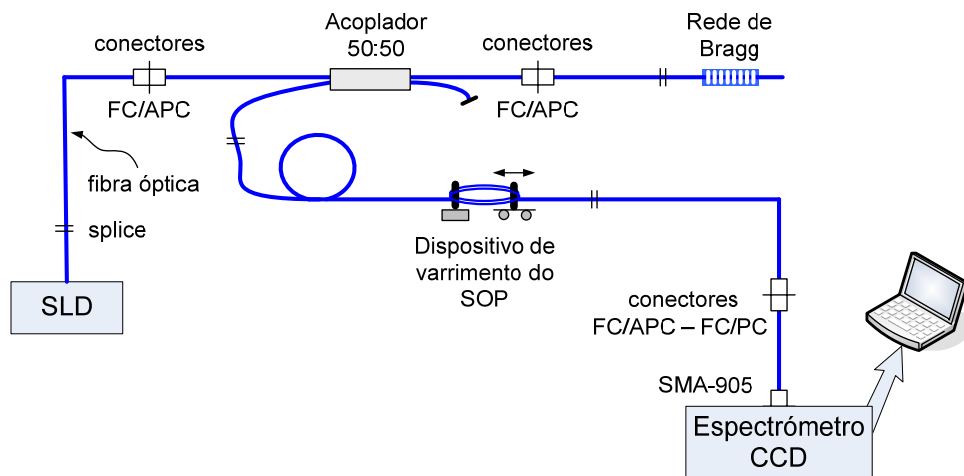


Figura 5.11 Montagem para verificação e medição do grau de sensibilidade do espectrómetro à polarização da resposta do sensor de Bragg

Uma outra diferença em relação aos ensaios anteriores, realizados com o fotodíodo, verifica-se no registo de valores. O deslocamento neste caso não foi efectuado de forma contínua mas em intervalos de 50 μm devido à incapacidade do espectrómetro de registar em Tempo-Real a potência de cada resposta espectral. Assim, em cada passo são registadas as intensidades de cada pixel das respostas espectrais e posteriormente realizado o cálculo da potência. A gama total de deslocamento do ciclo de carga/descarga manteve-se em 1000 μm .

Além do registo das potências recebidas para cada posição considerada, neste ensaio foram também registados os vários espectros obtidos pelo espectrómetro para essas mesmas posições (Figura 5.12).

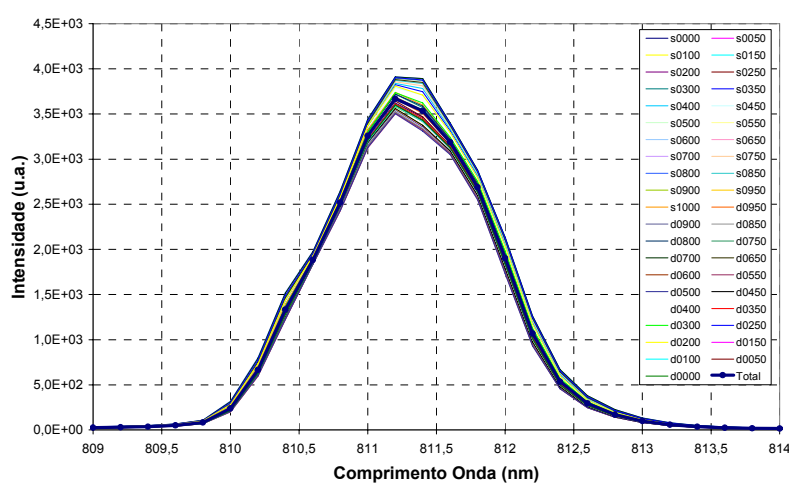


Figura 5.12 Gráfico do resultado da aplicação de stress à fibra: espectro da rede de Bragg, para um ciclo de carga/descarga, 0-1000 μm -0, com passos de 50 μm

No gráfico da Figura 5.12 são distinguíveis visualmente os desvios existentes entre os vários espectros adquiridos. Para a determinação do grau de sensibilidade foram calculadas as potências recebidas em cada resposta espectral, e traçado o gráfico da Figura 5.13.

O gráfico da Figura 5.13, de forma semelhante ao gráfico Figura 5.9 (correspondente ao ensaio com o fotodíodo e polarizador), revela uma variação cíclica dos níveis de potência registada, com os mesmos 2 ciclos completos para a excursão total aplicada, de 1000 μm . É assim demonstrado os efeitos da variação do estado de polarização na resposta do espectrómetro. A quantificação da sensibilidade a esta polarização, calculada novamente pela equação (5.23), é de $\text{DOP} = 10 \%$.

5.3.3 Dispositivo de Varrimento de Estados de Polarização

Um dos elementos necessários à realização dos ensaios experimentais referidos neste capítulo é o dispositivo de varrimento de estados de polarização.

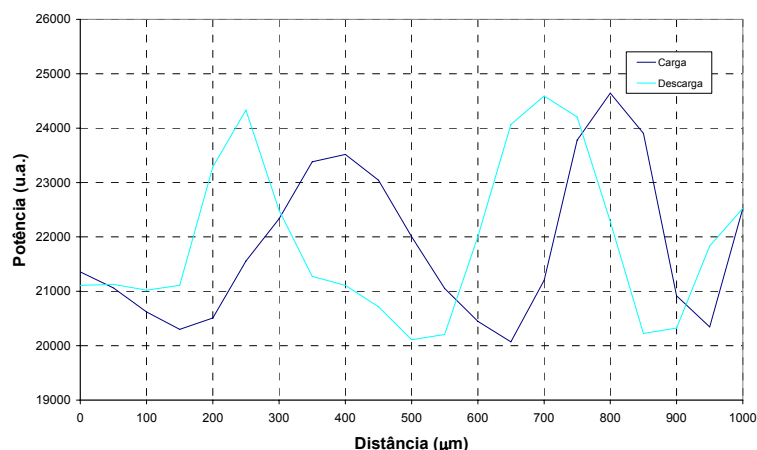


Figura 5.13 Gráfico do resultado da aplicação de stress à fibra: valores de potência (u.a.) da rede de Bragg, obtidos com o espectrómetro para as várias posições consideradas

Assim, foi criado um equipamento que permite, através da aplicação controlada de tensão mecânica (stress) a uma determinada extensão de fibra óptica, variar a birrefringência da fibra, e assim varrer toda a gama de estados de polarização da radiação que se pretende medir. Este dispositivo permite ainda reproduzir, também de forma controlada, as perturbações mecânicas exercidas sobre a fibra óptica.

A base deste dispositivo é formada por dois veios de alumínio, com 16 mm de diâmetro e um afastamento de 125 mm entre os centros dos eixos. Um dos veios está fixo a uma base rígida e o outro fixo a uma mesa de deslocamento. A mesa de deslocamento utilizada apresenta uma resolução de posicionamento de 0,1 μm numa gama de movimento de alguns centímetros. Em torno dos dois eixos, e de forma cruzada, foi enrolada cerca de 1,4 m de fibra óptica monomodo, o que corresponde a 4 voltas completas, de acordo com o esquema da Figura 5.15. As extremidades da fibra foram fixadas às bases através de ímanes para que a fibra se mantenha permanentemente sob tensão. A Figura 5.14 mostra duas fotografias do dispositivo criado.

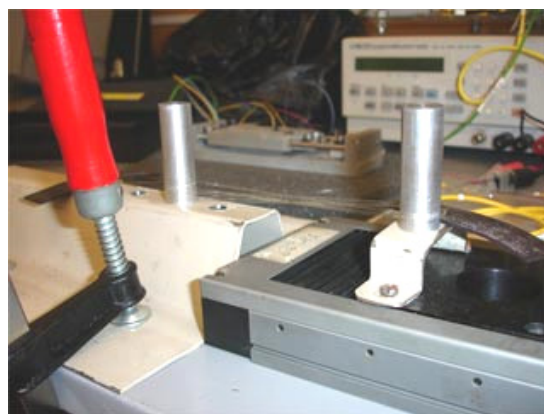


Figura 5.14 Fotografias do dispositivo de varrimento dos estados de polarização

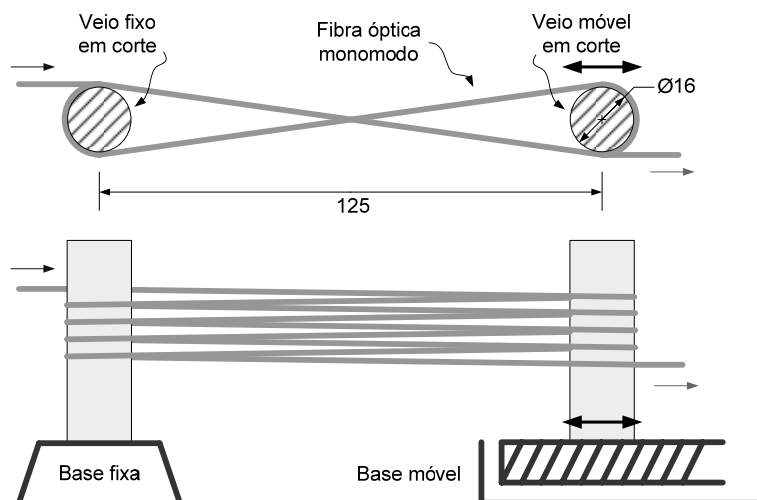


Figura 5.15 Esquema da montagem do dispositivo de aplicação de tensão mecânica à fibra óptica

Para que o dispositivo altere o estado de polarização da radiação luminosa é necessário fazer com que a birrefringência do percurso óptico, neste caso fibra óptica monomodo, seja alterada. Ao aumentar a distância entre os dois veios, através do deslocamento longitudinal do veio instalado na base móvel, consegue-se deformar a fibra da forma ilustrada na Figura 5.16. Ao deixar a forma circular, passando a ter uma forma elipsoidal devido ao stress aplicado, a fibra passa a ter os seus dois eixos ortogonais com índices de refração diferentes e portanto a conduzir a luz também a velocidades diferentes nesses dois eixos. Os ensaios experimentais realizados validam esta teoria, além de parametrizar o mecanismo criado.

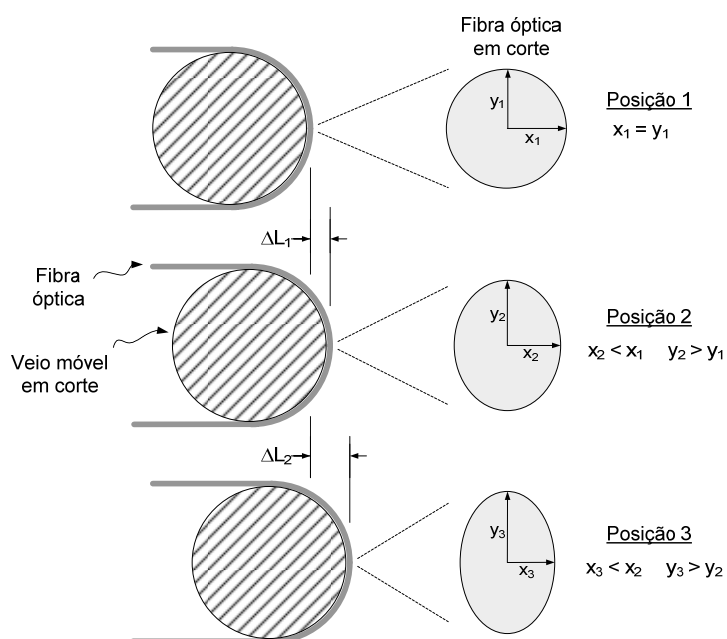


Figura 5.16 Esquema da variação das dimensões físicas da fibra óptica. Deformação axial dependente da distância entre os dois veios

De forma a avaliar os diferentes parâmetros do mecanismo foram realizados ensaios com diferentes composições. Assim, foram alteradas de forma independente, a distância entre veios e o número de voltas de fibra.

Na primeira montagem, utilizada nos restantes ensaios mostrados neste capítulo, os dois veios estão separados por 125 mm e a fibra óptica dá 4 voltas completas aos dois veios, como é ilustrado na Figura 5.15. Na segunda montagem foi utilizada a mesma distância entre eixos, 125 mm, mas utilizadas o dobro das voltas, 8. Na terceira montagem foi mantido o número de voltas inicial, 4, mas a distância entre os eixos é reduzida para metade, 63 mm.

O esquema óptico utilizado para a realização dos ensaios é mostrado na Figura 5.11, que utiliza o espectrómetro como elemento de fotodeteção.

Para a primeira montagem testada o resultado foi apresentado na Figura 5.13.

Para a segunda montagem testada, com o dobro das voltas, foram obtidos os resultados mostrados no gráfico da Figura 5.17.

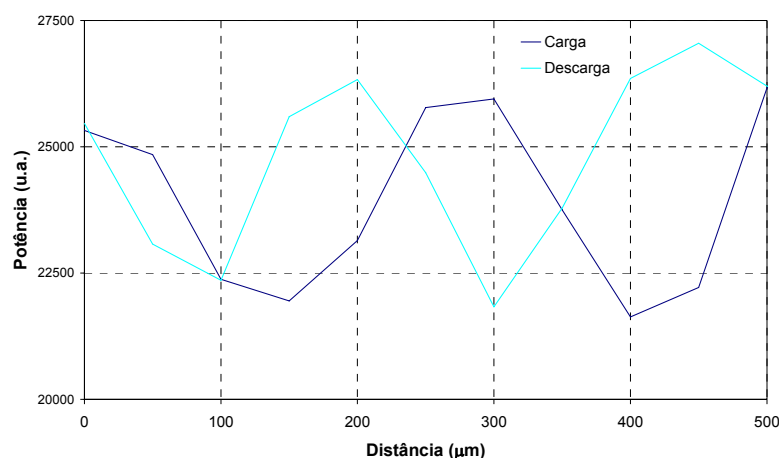


Figura 5.17 Gráfico do resultado da aplicação de tensão à fibra: valores de potência (u.a.) da rede de Bragg, obtidos com o espectrómetro, para as várias posições consideradas.

Para a terceira montagem testada, com a redução da distância entre veios para metade, foram obtidos os resultados da Figura 5.18.

Como se verifica pela comparação entre os resultados dos três gráficos das Figura 5.13, Figura 5.17 e Figura 5.18, para a situação em que o número de voltas é o mesmo, a variação do nível de potência para o afastamento entre os eixos é também a mesma, ou seja, para um intervalo de 500 μm há uma variação de

aproximadamente um ciclo completo (com uma forma aproximada a uma sinusóide). Quando o número de voltas é o dobro verifica-se que a potência da radiação recebida apresenta uma variação de potência também com o dobro da frequência. No mesmo intervalo de 500 μm considerado, existe uma variação de dois ciclos completos, Figura 5.17.

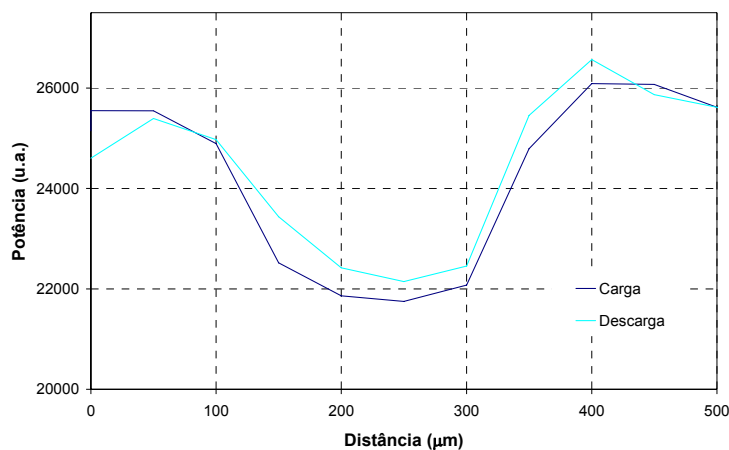


Figura 5.18 Gráfico do resultado da aplicação de tensão à fibra: valores de potência (u.a.) da rede de Bragg, obtidos com o espectrómetro, para as várias posições consideradas.

De acordo com o esperado, para as três situações ensaiadas o grau de sensibilidade à polarização do espectrómetro manteve-se constante, entre 10 e 11 %. Estes resultados confirmam ainda que as variações na polarização da luz são provocadas pela deformação axial em torno dos veios e não pelo alongamento da fibra (deformação longitudinal do troço de fibra entre os dois veios). O resultado obtido com este dispositivo é a transformação de uma fibra monomodo numa fibra com grau de birrefringência controlável, de acordo com a distância de separação entre os eixos.

5.4 Métodos de Despolarização

Depois de confirmado experimentalmente que a origem dos desvios verificados nas medições, quando a fibra óptica é sujeita a diferentes tensões mecânicas, é a variação aleatória do estado de polarização da radiação de resposta dos sensores de Bragg, foi necessário implementar, na unidade de interrogação, um dispositivo capaz de eliminar, ou atenuar a valores desprezáveis, estes erros. Este dispositivo é conhecido como despolarizador e é fornecido comercialmente por alguns fabricantes [Fiberpro, 2004; Intelmac, 2005; Phoenix, 2005].

Para a realização de um dispositivo despolarizador podem ser usados dois métodos de distintos: um passivo e outro activo. No entanto, a ideia base subjacente a ambos os métodos é semelhante: o

varrimento completo dos estados de polarização, SOP, de forma a que o cálculo da média das potências recebidas, no domínio do comprimento de onda, no primeiro caso, e no domínio do tempo, no segundo caso, permita obter um grau de polarização, DOP, nulo, ou próximo de zero.

5.4.1 Despolarização Passiva – Despolarizador de Lyot

A despolarização no domínio do comprimento de onda é conseguida através do dispositivo passivo conhecido como filtro de Lyot, ou despolarizador de Lyot [Bohm, 1983; Burns, 1983a; Burns, 1983b; Kersey, 1990; Ecke, 1997; Wang, 1999]. É constituído por dois elementos birrefringentes em série, com uma rotação relativa, entre eixos de polarização, de 45° , e uma relação de comprimentos de 2:1, como é mostrado na Figura 5.19. Os primeiros filtros de Lyot a serem desenvolvidos utilizavam placas de cristal birrefringente mas, com maior interesse para o presente trabalho, pode ser implementado com dois troços de fibra óptica birrefringente, unidos por *splice*. Este dispositivo é utilizado em sistemas com uma fonte óptica de banda larga e pode ser descrito como um conversor de polarização de cada componente espectral individual da luz polarizada de entrada. À sua saída, cada componente espectral aparece com um diferente estado de polarização, o que permite, depois da média sobre toda a largura de banda, que a radiação esteja despolarizada ou com um grau de polarização nulo. O objectivo da junção dos dois troços de fibra birrefringente a 45° é o de tornar o despolarizador independente do estado de polarização de entrada. Se a luz não ficar despolarizada no primeiro troço de fibra (devido, por exemplo, a um $\theta_p = 90^\circ$) fica despolarizada no segundo.

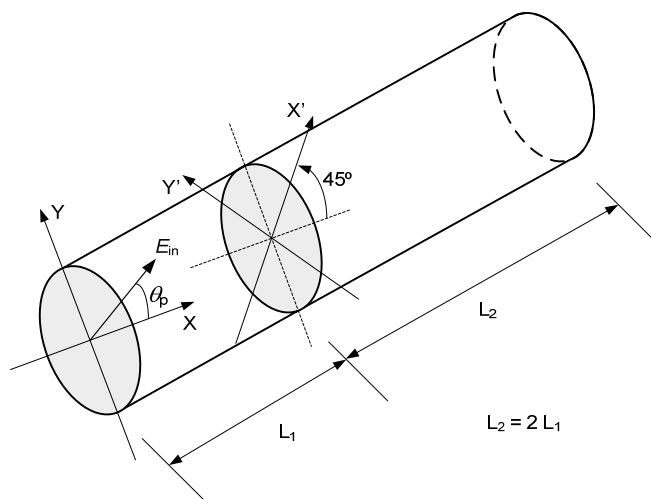


Figura 5.19 Modelo de um despolarizador de Lyot formado por dois troços de fibra óptica birrefringente

Segundo os resultados experimentais obtidos por Bohm *et al*, verifica-se que o grau de despolarização conseguido tem uma dependência crítica do ângulo com que os eixos dois troços de fibra são

efectivamente ligados, o que implica cuidados acrescidos na realização do *splice* a 45° [Bohm, 1983]. Além da largura espectral, o DOP é ainda dependente da própria forma espectral da luz emitida. É precisamente a forma espectral que impõe que $L_2 = n L_1$ (n inteiro e $\neq 1$) para que o DOP de saída seja independente do ângulo de entrada θ_p , no caso de uma distribuição tipo seno-hiperbólico [Burns, 1983a]. No caso de uma distribuição Gaussiana, como o espectro simplificado da reflexão de uma rede de Bragg, definido em 2.3, é necessário apenas garantir a condição: $L_2 \geq 2 L_1$.

São necessários vários ciclos birrefringentes completos sobre a largura de banda efectiva do sistema e, quanto mais estreita esta largura de banda, maior terá que ser o comprimento de fibra birrefringente a utilizar (considerando fibra com as mesmas características de birrefringência). No caso de interrogação de redes de Bragg com uma fonte SLD e um espectrómetro com CCD, a banda efectiva corresponde à largura espectral da luz incidente sobre um único pixel do espectrómetro, no caso 0,2 nm. Os resultados experimentais divulgados mostram a necessidade de um comprimento de fibra L_1 na ordem de 2 m (com $L_2 = 4$ m) para a despolarização de uma fonte óptica do tipo SLD (com largura de banda de 20 nm) e de 30 m (com $L_2 = 60$ m) para a despolarização da resposta de uma rede de Bragg. Com estas extensões de fibra óptica birrefringente, com comprimentos de batimento entre 1 e 4 mm, são obtidos DOP na ordem de 1 % [Bohm, 1983; Burns, 1983b; Ecke, 1997; Wang, 1999].

5.4.2 Despolarização Activa

A técnica de despolarização, ou mais concretamente de *scrambling* da polarização ¹², consiste no varrimento, rápido e aleatório, do estado de polarização de luz totalmente polarizada [Photonics, 2003; Fiberpro, 2004]. A radiação luminosa, em cada instante de tempo, apresenta um estado de polarização sempre bem definido sobre a esfera de Poincaré. No entanto, se no percurso óptico for introduzido um dispositivo de variação da birrefringência da fibra óptica, que provoque o varrimento completo dos estados de polarização consegue-se, com o cálculo de uma média efectuada durante um determinado período de tempo, que o grau de polarização obtido se aproxime de zero (Figura 5.20).

O grau de polarização conseguido com o *scrambling* depende essencialmente dos diferentes estados de polarização pelos quais a radiação é feita variar, no tempo durante o qual a média é calculada. Três exemplos destas variações do estado de polarização, para um determinado período de tempo, são mostrados na Figura 5.21.

¹² Na terminologia inglesa a expressão *polarization scrambling* é utilizada para designar o método de fazer varrer, ao longo do tempo, os estados de polarização da luz emitida.

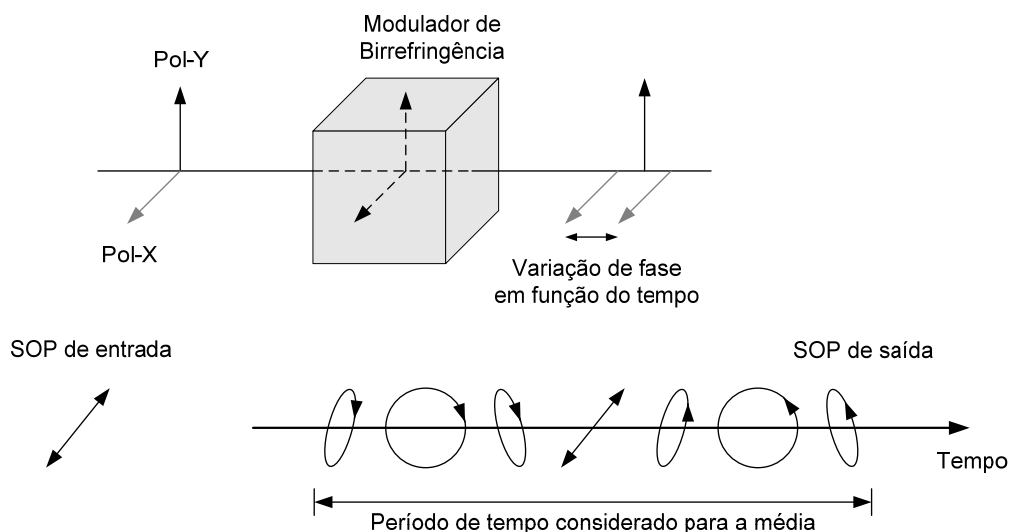


Figura 5.20 Vista conceptual do *scrambling* temporal do estado de polarização

Se no primeiro exemplo, (a), o SOP sofre uma variação pouco significativa durante o período de tempo definido, o exemplo (c) representa um *scrambling* ideal, onde toda a superfície da esfera de Poincaré é totalmente preenchida, significando que todos os estados de polarização existem durante esse período de tempo. Pelo meio, (b), encontra-se um exemplo de cobertura mais real onde, não sendo percorridos todos os SOP, permite a obtenção de um DOP suficientemente próximo de zero para a aplicação pretendida, no caso, a despolarização da radiação de resposta de sensores de Bragg.

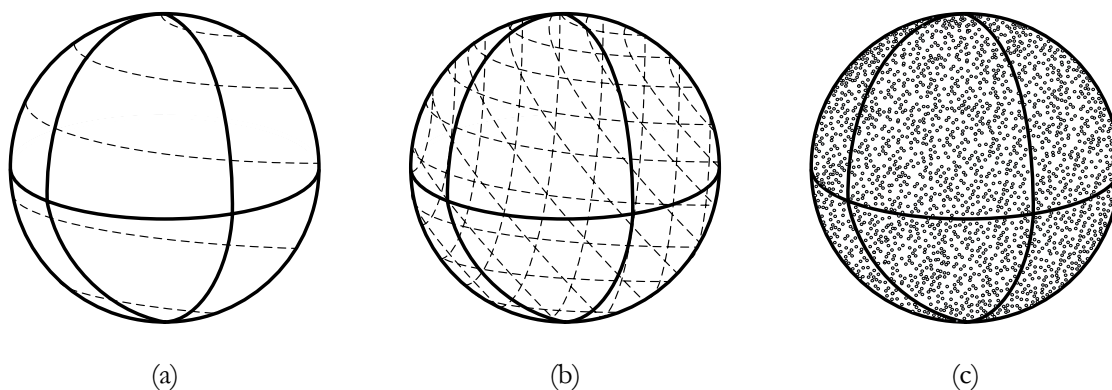


Figura 5.21 Diferentes variações do estado de polarização conseguidas durante o tempo de *scrambling*

Existe actualmente um forte investimento científico na medição, com elevada precisão, do estado de polarização de um determinado sistema óptico, sobretudo em sistemas de transmissão de dados onde um baixo DOP é crítico. Assim, para além dos actuais analisadores de polarização em fibra óptica, ou polarímetros comerciais [Photonics, 2003; Fiberpro, 2004; Exfo, 2005; Hinds, 2005], o assunto é tema de

investigação como o denotam publicações recentes sobre novos desenvolvimentos na capacidade de medição do estado de polarização [Hatano, 2003; Jaroszewicz, 2003, 2004].

Para a realização da técnica de *scrambling* existem diferentes técnicas capazes de provocar a mudança contínua de estado de polarização, nomeadamente:

- baseado em espiras de fibra óptica monomodo, bobinadas em torno de um cilindro deformável;
- baseado no alongamento variável de fibra óptica birrefringente;
- baseado em material capaz de modular o seu estado de polarização através de efeito electro-óptico (LiNbO_3 , por exemplo);
- baseado em elementos que comprimem axialmente a fibra óptica.

A primeira destas técnicas é analisada e validada experimentalmente neste trabalho.

A segunda técnica apontada baseia-se na alteração do estado de birrefringência de uma fibra óptica Hi-Bi através da variação do seu comprimento. Para isso pode ser utilizado um actuador piezoeléctrico capaz de alterar as suas dimensões rapidamente, juntamente com a fibra óptica. No sistema constituído por Ecke, *et al*, dois troços de fibra óptica birrefringente (com comprimento de batimento de 1,2 mm) são bobinados em torno de dois cilindros piezoeléctricos, alimentados por duas fontes de tensão de 80 V e com frequências de 29,58 e 29, 29 kHz, próximas da frequência de ressonância do piezoeléctrico [Ecke, 1997]. Os resultados obtidos com os ensaios experimentais permitiram confirmar o bom funcionamento do sistema desenvolvido, no qual os erros de medição não ultrapassam os 1,5 pm quando a fibra óptica é sujeita a perturbações mecânicas.

A terceira técnica é baseada na utilização de um guia de onda composto por material cristalino LiNbO_3 e permite que o estado de polarização seja modulado através da aplicação de um campo eléctrico sobre o próprio guia de onda. Embora consiga um rápido varrimento, apresenta, no entanto, alguns aspectos que tornam muito restritiva a sua aplicação, nomeadamente: elevadas perdas na passagem fibra óptica/ LiNbO_3 , e vice-versa, funcionamento muito sensível ao estado de polarização de entrada e elevado custo de aplicação devido à utilização de outro guia de onda no meio de transmissão [Photonics, 2003].

A técnica de *scrambling* através da compressão da fibra óptica é baseada num princípio de funcionamento semelhante à da técnica enumerada em primeiro lugar (descrita na secção seguinte): a variação da birrefringência de fibra óptica monomodo. As soluções comerciais actualmente no mercado verificam o seu bom desempenho [Photonics, 2003].

5.5 Despolarização Activa com Cilindro Piezoeléctrico

A técnica desenvolvida para responder à necessidade de despolarização baseia-se na modulação do grau de birrefringência provocada numa determinada extensão de fibra óptica monomodo. Kersey *et al* demonstram no seu trabalho que uma modulação de fase sinusoidal, com uma amplitude de modulação de $2\chi = 2,405$ rad, é suficiente para a despolarização completa de radiação linearmente polarizada, com uma direcção, à entrada, de 45° em relação ao eixo de birrefringência do polarizador [Kersey, 1990; Fiberpro, 2004].

No entanto, a situação descrita é apenas um caso particular. No caso geral, não há qualquer garantia do estado de polarização da radiação que chega à entrada do despolarizador. Assim, é necessário que a modulação efectuada percorra o maior número de estados de polarização possível, de forma a cobrir o mais uniformemente a superfície da esfera de Poincaré (Figura 5.21).

A solução utilizada para provocar a variação da birrefringência tem o mesmo princípio de funcionamento do apresentado na secção 5.3.3, para o dispositivo manual de varrimento dos estados de polarização. A fibra óptica monomodo, bobinada em torno de uma superfície circular, fica com as dimensões do seu núcleo alteradas de acordo com o raio de curvatura dessa superfície, alterando assim o grau de birrefringência introduzido no percurso óptico (Figura 5.22).

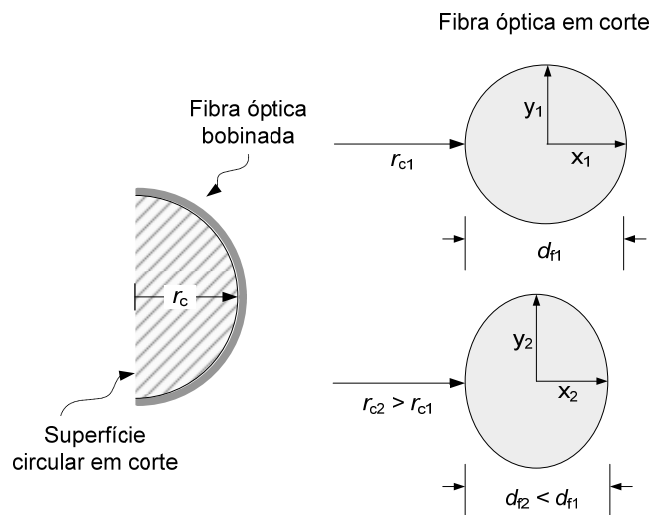


Figura 5.22 Alteração das dimensões da fibra óptica bobinada (d_f) em torno de uma superfície circular de raio r_c

Para a implementação desta técnica foi necessário escolher um cilindro capaz de deformar um troço de fibra óptica da forma descrita acima. O objectivo é a variação do estado de polarização da radiação, de

pelo menos 2π em torno da esfera de Poincaré, num tempo máximo que não interfira com a taxa de aquisição do sistema de interrogação.

De acordo com os requisitos expostos e com a informação recolhida na secção 5.3.3, foi utilizado um tubo cerâmico piezoeléctrico comercializado pela PI (Physik Instrumente), referência PT130.40, que apresenta como principais características (Figura 5.23):

- Dimensões: Comprimento = 30,0 mm;
Diâmetro interior = 18,0 mm;
Diâmetro exterior = 20,0 mm;
- Tensão máxima de alimentação: 1000 V;
- Contração máxima (radial): 5 μm ;
- Contração máxima (axial): 8 μm ;
- Capacidade eléctrica: 35 nF $\pm 20\%$;
- Frequência de ressonância: ≈ 30 kHz.



Figura 5.23 Fotografia do tubo cerâmico piezoeléctrico após a soldagem das ligações eléctricas

Ensaaios experimentais prévios verificaram a necessidade de cerca de 50 espiras para provocar a necessária variação de 2π na resposta em potência, devido ao varrimento dos estados de polarização (quando aplicada a gama completa de tensão de alimentação ao tubo piezoeléctrico, de 1000 V). No entanto, dada a relação das dimensões do comprimento do tubo, 30 mm, e o diâmetro da fibra óptica, 0,125 mm, optou-se pela bobinagem de 100 espiras. Assim, consegue-se um incremento duplo na variação da birrefringência aplicada à fibra óptica, face à utilização de apenas 50 espiras, para a mesma gama de tensão aplicada (Figura 5.24).

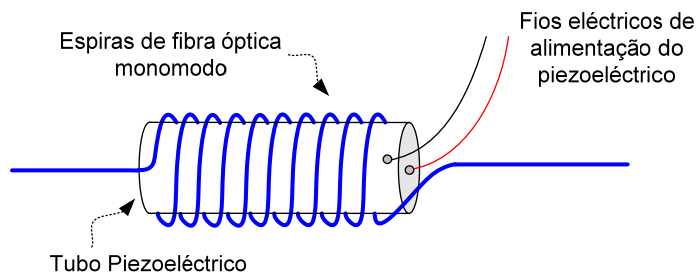


Figura 5.24 Esquema da bobinagem da fibra óptica monomodo em torno do tubo piezoelétrico

Na imagem da Figura 5.25, além do próprio tubo piezoelétrico e da bobina de 100 espiras de fibra óptica monomodo, são visíveis os suportes introduzidos nos topos do cilindro. Estes suportes, em cortiça, têm um veio metálico roscado que os atravessa longitudinalmente ao eixo do cilindro. Além de fornecerem o isolamento eléctrico necessário, dado o nível elevado de tensão aplicada, estes suportes facilitam o processo de bobinagem da fibra óptica. Ao manter um nível constante de tracção na fibra garante-se que as espiras ficam igualmente tensionadas e com uma folga reduzida para a superfície, conseguindo-se assim menos perdas na acção de despolarização.

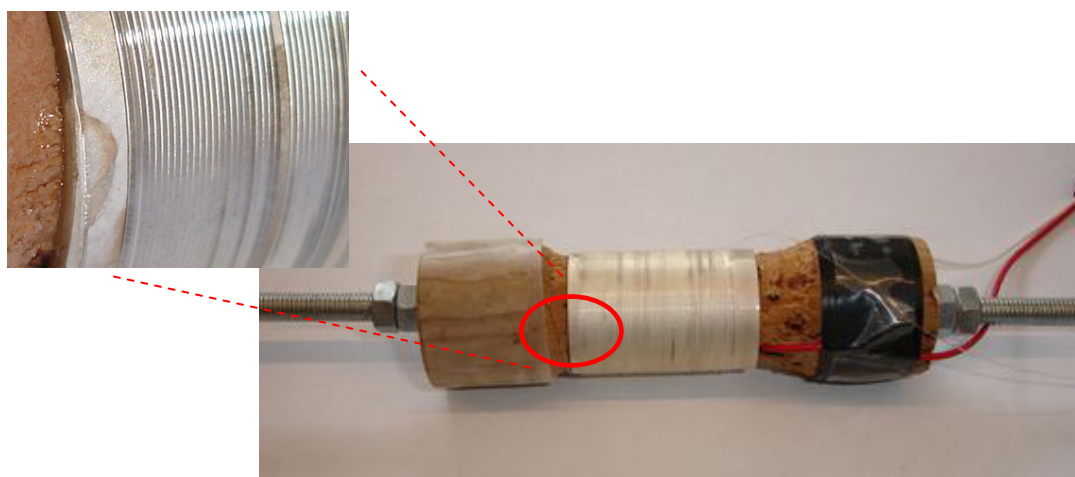


Figura 5.25 Imagem do despolarizador implementado, baseado num tubo piezoelétrico e bobina de fibra óptica monomodo

A alimentação do despolarizador desenvolvido é conseguida com um amplificador de alta tensão, controlado por um gerador de sinal externo (0 - 5 V). Este amplificador pode alimentar cargas com uma tensão a variar entre 0 e 1000 V e uma frequência até 200 Hz.

5.5.1 Parametrização do Despolarizador

Através de ensaios experimentais procedeu-se à parametrização do funcionamento do dispositivo de despolarização construído. Estes ensaios correspondem à aplicação de uma tensão de alimentação ao tubo piezoeléctrico para que este se deforme (alargando o seu diâmetro) em posições bem determinadas. O esquema de montagem utilizado nos ensaios é ilustrado na Figura 5.26.

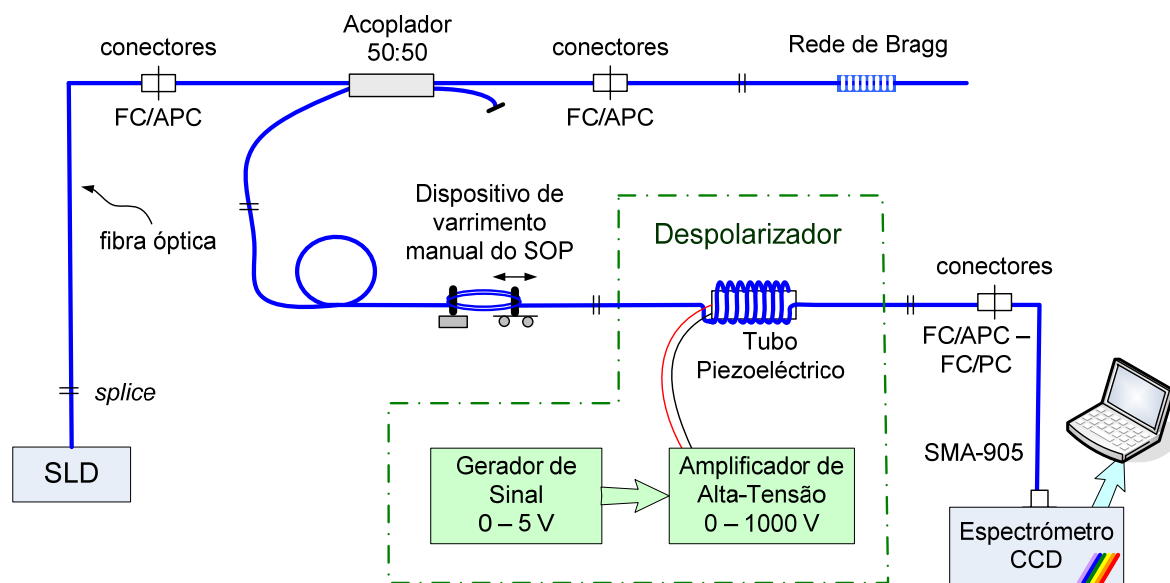


Figura 5.26 Esquema da montagem utilizada para verificar o funcionamento do despolarizador desenvolvido

Para uma avaliação completa do despolarizador é necessário garantir que não há outras variáveis intervenientes no sistema. Assim, todo o sistema de interrogação é mantido em ambiente de temperatura controlada, e também nenhum stress é aplicado à fibra óptica, nem nos troços de ligação, nem no dispositivo de varrimento manual dos estados de polarização (secção 5.3.3).

É aplicado ao tubo piezoeléctrico um ciclo de carga/descarga de tensão eléctrica, entre os 0 e os 950 V, em passos de 50 V, e registada a leitura do espectrómetro para cada posição. O gráfico da Figura 5.27 ilustra as leituras das respostas espectrais respectivas, percebendo-se uma maior diferença de variação de potência para comprimentos de onda mais elevados.

Através do algoritmo de cálculo do comprimento de onda central da resposta espectral da rede de Bragg (ADCM II), foi calculado o valor de λ_{Bi} para cada uma das leituras obtidas. O registo destes valores é feito no gráfico da Figura 5.28. Neste gráfico é verificada uma variação em comprimento de onda de ± 30

pm, em torno de um valor médio de 810,34 nm o que, e considerando que a leitura não deveria sofrer qualquer alteração dado não existir alteração da mensuranda, corresponde a um erro de $\pm 45 \mu\epsilon$.

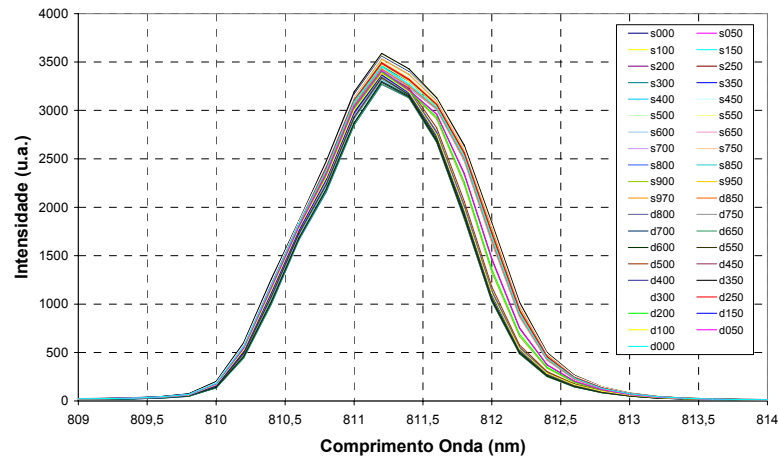


Figura 5.27 Respostas espectrais da rede de Bragg para a aplicação de um ciclo de tensão ao piezoelétrico em passos de 50 V

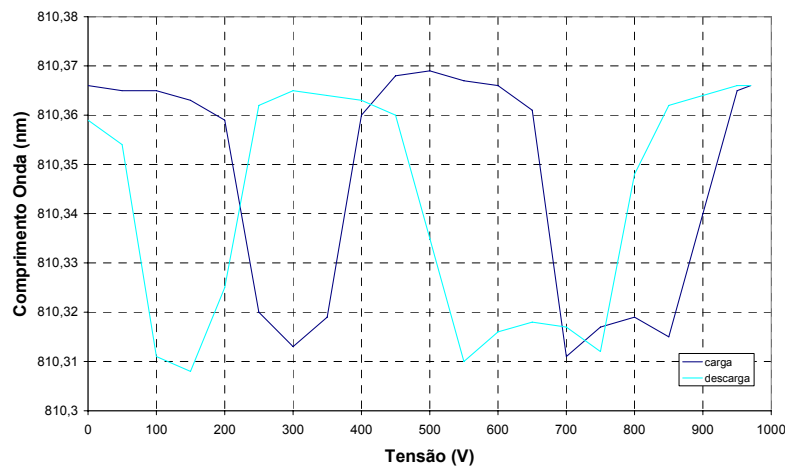


Figura 5.28 Resultado da medição dos λ_{Bi} do sensor de Bragg para um ciclo de carga/descarga, em passos de 50 V

De forma equivalente, foram também calculados os valores das potências de cada um dos sinais, correspondentes a cada valor de tensão aplicada (da forma utilizada na secção 5.3). Os valores obtidos são ilustrados no gráfico da Figura 5.29, verificando um DOP = 11 %.

De acordo com o princípio de funcionamento definido para o sistema de polarização, verifica-se uma variação do nível de potência em dois ciclos, correspondente a 4π , para a gama de tensão aplicada de

1000 V. De notar que a variação dos λ_{Bi} calculados (Figura 5.28) segue a mesma tendência do gráfico da Figura 5.29, revelando uma vez mais a correspondência entre a variação do estado de polarização e os desvios de medição do comprimento de onda de Bragg.

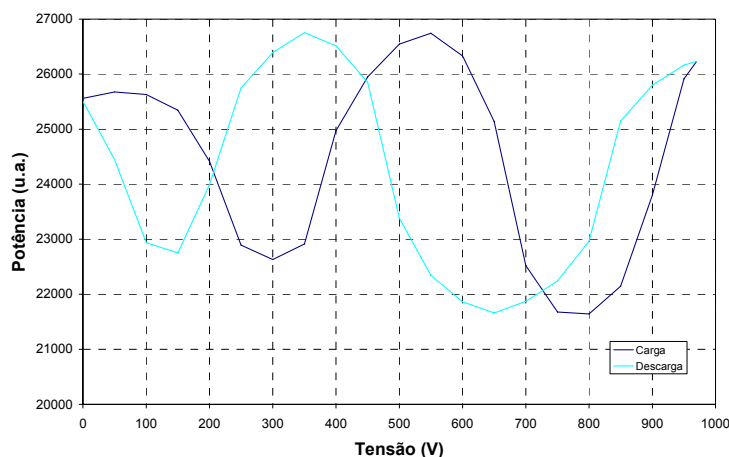


Figura 5.29 Valores de potência das respostas espectrais para um ciclo de carga/descarga, em passos de 50 V

5.5.2 Quantificação da Despolarização Introduzida

Para a quantificação do funcionamento do sistema de despolarização desenvolvido foi utilizada a montagem da Figura 5.26. O ensaio consiste em fazer variar a posição do veio móvel do dispositivo de varrimento manual do estado de polarização, registando, a leitura do espectrómetro em cada posicionamento, para as situações de despolarizador activo e inactivo. Assim, os dados registados nos gráficos seguintes correspondem a aquisições do espectro de reflexão da rede de Bragg para deslocações do veio móvel, num ciclo de carga/descarga entre os 500 μm e os 1000 μm , em passos de 50 μm .

Como já referido na secção anterior, na alimentação do tubo piezoeléctrico é utilizado um amplificador de alta tensão, com uma tensão que pode variar entre 0 e 1000 V e uma frequência até 200 Hz. No entanto, a potência disponibilizada não permite a utilização destes dois valores máximos em simultâneo. De acordo com as necessidades de alimentação dos actuadores piezoeléctricos (assunto tratado no capítulo seguinte, secção 6.3.1.2) e com a capacidade de 35 nF do tubo piezoeléctrico utilizado, o amplificador permite as seguintes alimentações máximas: 1000 V a 120 Hz ou 600 V a 200 Hz.

São de seguida apresentadas as duas situações ensaiadas e no final comparados os respectivos resultados.

5.5.2.1 Despolarizador Inactivo

A primeira situação, com o despolarizador inactivo, ou fora de serviço, corresponde à situação já apresentada na secção 5.3.2, de quantificação do grau de sensibilidade à polarização do espectrómetro. A diferença, desprezável em termos de resultado final, é a gama de deslocamento do veio móvel, que no anterior ensaio foi de 1000 μm e agora de apenas 500 μm . A Figura 5.30 representa os vários espectros da reflexão da rede Bragg para as diferentes posições do veio, correspondentes a diferentes estados de polarização.

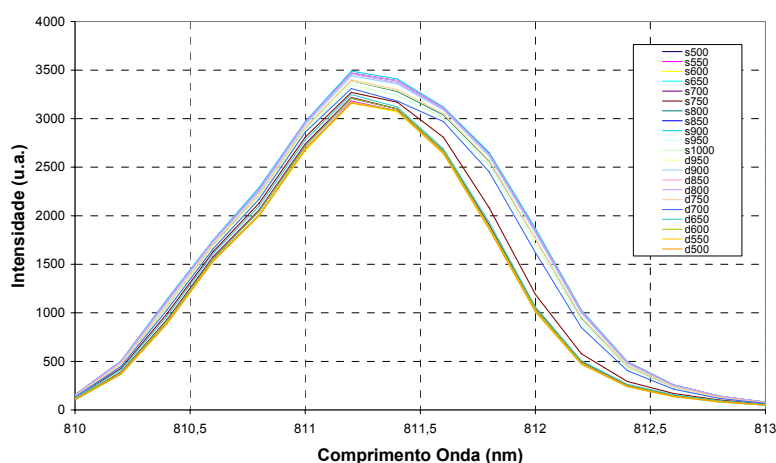


Figura 5.30 Espectros de reflexão da rede de Bragg para os diferentes estados de polarização – despolarizador inactivo

Através dos resultados do gráfico da Figura 5.30 confirma-se a situação de grande variação de intensidade espectral, principalmente para os comprimentos de onda mais elevados. Também os valores de desvios dos comprimentos de onda de Bragg, e dos níveis de potência (que permite calcular o grau de sensibilidade do espectrómetro à polarização), são idênticos aos encontrados no ensaio anterior, de ± 30 pm e $\text{DOP} = 11\%$. A natural diferença que se verifica reflecte a menor gama de deslocamento do veio móvel: os níveis de potência registados mostram uma variação próxima do ciclo completo, correspondente a 2π (Figura 5.31).

5.5.2.2 Despolarizador Activo

No ensaio relativo à situação do despolarizador em funcionamento, o tubo piezoeléctrico é alimentado por uma tensão sinusoidal com variação entre os 0 e 1000 V, e uma frequência de 100 Hz. A excursão é assim a máxima permitida, tanto pelo actuador piezoeléctrico como pelo amplificador, e a frequência de variação é também a máxima permitida pelo amplificador, para o nível de tensão considerado.

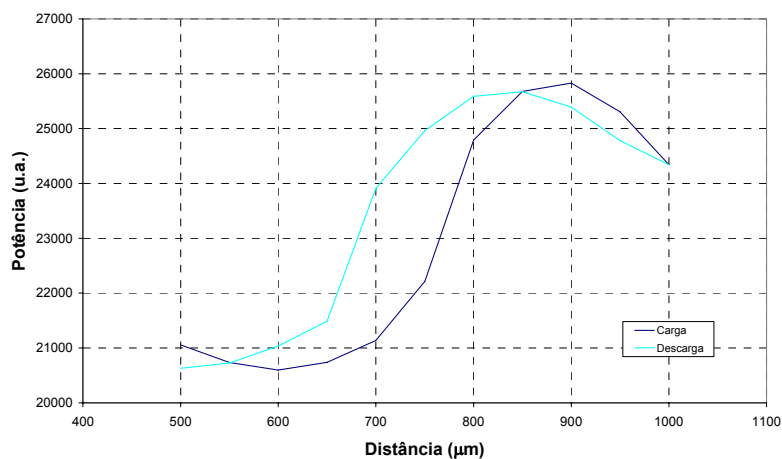


Figura 5.31 Resultado do deslocamento do veio móvel. Valores de potência dos espectros de resposta da rede de Bragg – despolarizador inactivo

O gráfico da Figura 5.32 representa os espectros recolhidos para as mesmas situações do ensaio anterior, ou seja, para as diferentes posições do dispositivo de posicionamento, entre os 500 e os 1000 μm em passos de 50 μm. Como se verifica imediatamente pela comparação visual dos gráficos, o nível de variação de intensidade espectral é neste caso muito reduzido, quase imperceptível. De facto, o cálculo do grau de polarização confirma isto mesmo: $DOP = 0,6 \%$.

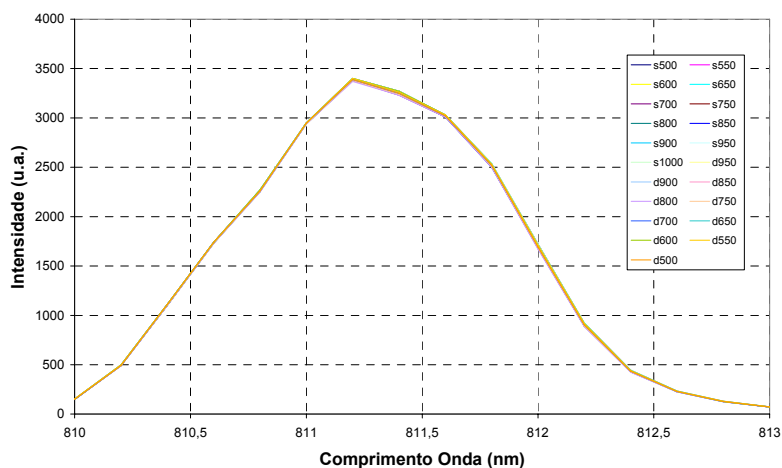


Figura 5.32 Espectros de reflexão da rede de Bragg para os diferentes estados de polarização – despolarizador activo

Na Figura 5.33 são representados os níveis de potência obtidos para cada um dos espectros mostrados na Figura 5.32, denotando visualmente a sua reduzida variação.

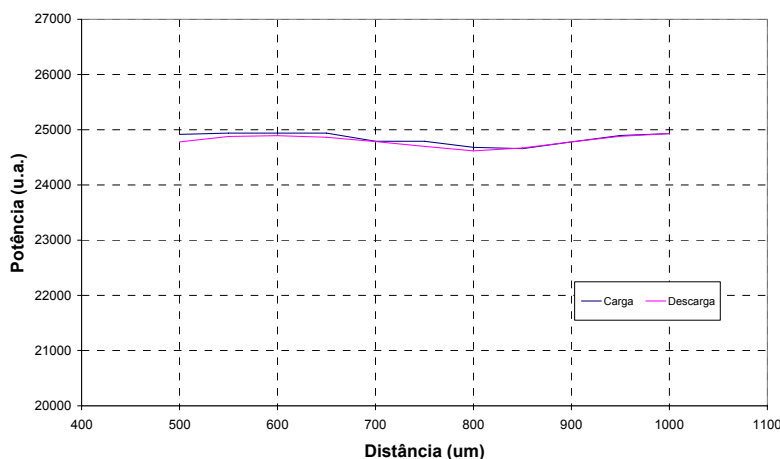


Figura 5.33 Resultado do deslocamento do veio móvel. Valores de potência dos espectros de resposta da rede de Bragg – despolarizador activo

A condição de alimentação do actuador piezoeléctrico, utilizada neste ensaio (gama de tensão de 0 a 1000 V; frequência de 100 Hz), resulta na melhor situação testada. De facto, os 1000 V de tensão eléctrica, o valor máximo de tensão fornecida pelo amplificador utilizado, ao possibilitarem uma variação dos estados de polarização de 4π em apenas 5 ms (200 Hz), permitem que durante cada período de aquisição do espectrómetro (50 ms¹³) sejam realizados 20 ciclos em torno da esfera de Poincaré. Todas as restantes condições de alimentação permitidas pelo amplificador de tensão, em termos de relação tensão/frequência, resultam em inferiores valores de variação dos estados de polarização e portanto do nível de despolarização conseguido.

Em termos de comprimento de onda de Bragg, as respostas espectrais da Figura 5.32 apresentam desvios máximos de $\pm 1,5$ pm, que corresponde a um erro de $\pm 2,4$ $\mu\epsilon$ em termos de deformação medida. Este valor, não sendo ideal, é aceitável para a aplicação em análise quando considerada a exactidão de medição de ± 2 % numa gama de 1500 $\mu\epsilon$, obtida com os ensaios de calibração apresentados no Capítulo 4.

5.6 Conclusão do Capítulo

Depois de expostos os conceitos envolvidos no fenómeno da polarização da luz e mais especificamente na definição de luz parcialmente polarizada, foram apresentadas as razões para a necessidade da despolarização da luz de retorno dos sensores de Bragg. Experimentalmente verificou-se e quantificou-se a sensibilidade do analisador de espectros utilizado, baseado numa rede de difracção de reflexão, à polarização.

¹³ Este valor, de 50 ms, é utilizado em todas as aquisições efectuadas neste trabalho.

Das duas técnicas passíveis de serem utilizadas para a despolarização, passiva (filtro de Lyot) ou activa, por varrimento no tempo dos estados de polarização (*scrambling*), foi decidido a realização de um despolarizador activo. Este tipo de despolarizador utiliza um tubo de material cerâmico piezoeléctrico, no qual é bobinada uma extensão de fibra óptica monomodo, no sentido de ser deformada radialmente e assim provocar a variação da birrefringência do seu núcleo, por onde é transmitida a radiação que se pretende medir.

Os resultados obtidos com o despolarizador construído são francamente positivos. A comparação de resultados, entre a situação anterior e posterior à actuação do despolarizador, confirma uma redução no grau de polarização, DOP, de cerca de 20 vezes (de 11 % para apenas 0,6 %). Portanto, consegue-se o decréscimo pretendido da sensibilidade do sistema de interrogação, baseado no espectrómetro passivo com tecnologia CCD, às perturbações mecânicas sofridas pela fibra óptica. A amplitude do erro obtido pode assim ser considerada desprezável no funcionamento do sistema de instrumentação.

SISTEMA DE DESMODULAÇÃO BASEADO EM FILTRO SINTONIZÁVEL COM REDE DE BRAGG

6.1 Introdução e Motivação

Para além da sua aplicação como sensores, as redes de Bragg em fibra óptica permitem ainda a realização de filtros ópticos de banda estreita sintonizáveis. Esta característica, como já referido na secção 3.3, permite a implementação de um novo tipo de desmodulação de redes de Bragg. Além das redes de Bragg, outros elementos ópticos podem ser utilizados para a realização dos filtros, nomeadamente os Filtros Fabry-Perot (FFP) e os Acustico-ópticos (AOTF).

Os filtros sintonizáveis AOTF baseiam-se na capacidade de uma onda acústica, controlada electricamente, criar no núcleo de um troço de fibra óptica, um padrão de variação do índice de refração semelhante ao verificado numa rede de Bragg. Embora apresentem a vantagem de uma maior insensibilidade à temperatura e à deformação aplicada sobre a fibra óptica, apresentam uma largura de banda relativamente elevada (~ 3 nm), nomeadamente em sistemas em que seja necessária a operação multiplexada de vários sensores dentro da largura de banda de uma fonte óptica de espectro largo. Os filtros sintonizáveis de Fabry-Perot são o tipo de filtro que maior evolução sofreu nos últimos tempos, sendo este facto confirmado pela quantidade e qualidade de filtros comerciais actualmente disponíveis no mercado [Fabry-Perot, 2005]. No entanto, estes filtros apresentam um factor que pode ser considerado demasiado limitativo em certas aplicações, nomeadamente na área das telecomunicações, que são as suas elevadas perdas de transmissão [Goh, 2003; Tay, 2004].

Em instrumentação, a motivação da utilização destes filtros sintonizáveis passa pelo desenvolvimento de um método de interrogação de redes de Bragg alternativo e de baixo custo relativamente a outros métodos. Sendo um sistema simples no seu princípio de funcionamento, é capaz de um bom desempenho. Sendo geralmente a componente óptica a originar maiores problemas de implementação,

nomeadamente ao nível do custo e da robustez, no esquema desenvolvido esta componente é reduzida ao mínimo, recorrendo-se fundamentalmente à electrónica e ao controlo digital.

Por todas as razões expostas acima, continua a justificar-se a investigação na área dos filtros sintonizáveis, principalmente dos filtros baseados em redes de Bragg em fibra óptica. Neste contexto, o sistema desenvolvido pretende incrementar sobretudo a exactidão de posicionamento e nesse sentido a medição do comprimento de onda, λ_B , da rede de Bragg que implementa o filtro sintonizável. Para isso, é utilizado um sensor de posicionamento capacitivo com uma exactidão de posição de 10 nm, o que se traduz em valores de exactidão da leitura de λ_B inferiores ao pm ou, dito de outra forma, inferior ao $\mu\epsilon$. Além das já referidas baixas perdas de transmissão inseridas no circuito óptico pelos FBG's, outra das vantagens inerentes está na possibilidade deste sistema de interrogação apresentar um elevado regime dinâmico de medição, limitado apenas pelas capacidades físicas do actuador utilizado para operar o filtro FBG.

6.2 Dispositivos de Aplicação de Deformação

Como já referido no Capítulo 2, o comprimento de onda central de uma rede de Bragg, λ_B , é alterado devido à variação de uma, ou das duas, propriedades físicas da própria rede de Bragg em fibra óptica: pela variação do índice de refração eficaz da fibra óptica, n_{ef} , ou através da modificação do período da rede de Bragg, Λ_r . A variação controlada destas propriedades pode ser conseguida de duas formas diferentes: através de indução térmica ou através da aplicação de tensão mecânica à fibra.

6.2.1 Sintonização por Indução Térmica

A sintonia de uma rede de Bragg, nomeadamente do seu λ_B , pode ser conseguida por aplicação de temperatura variável à fibra óptica. A temperatura tem influência, como já visto no Capítulo 2, quer nas dimensões da rede, pela dilatação do corpo da fibra, quer pela influência sobre o índice de refração. No entanto, a baixa sensibilidade à temperatura das fibras ópticas em sílica (5,4 pm/°C, para os 810 nm), é um factor que limita a gama de variação sintonizável, dado que mesmo para uma variação térmica de 100 °C a deformação sofrida pela fibra nunca ultrapassa os 850 $\mu\epsilon$. Além deste factor, é notório que a inércia térmica impede que os sistemas baseados nesta técnica apresentem um elevado regime dinâmico, nomeadamente quando comparados com os sistemas baseados na aplicação de deformação. No entanto, a inscrição de redes de Bragg em fibras ópticas de polímeros veio alterar recentemente o estado da arte. Estas novas fibras apresentam coeficientes de expansão térmica (α) e termo-óptico (ζ), superiores em 145 e 11 vezes, respectivamente, em relação às fibra de sílica [Liu, 2001]. Estas novas constantes permitem que a variação sofrida no comprimento de onda de Bragg seja francamente incrementada para os 18 nm para uma variação de temperatura de 50 °C (ensaios realizados na janela dos 1500 nm). Os

resultados obtidos por Liu *et al* mostram ainda que a variação sofrida não apresenta qualquer histerese, embora não seja linear. O esquema de ensaio utilizado é mostrado na Figura 6.1, onde é visível que a aplicação de temperatura à rede Bragg é conseguida através de um elemento Peltier. Estes elementos variam a temperatura do seu corpo de acordo com a alimentação fornecida, controlada neste caso por uma malha de realimentação onde a entrada deriva de um sensor de temperatura colocado junto à rede de Bragg. O sistema assim constituído, embora permita a obtenção de uma gama elevada de variação de comprimento de onda, mantém a reduzida dinâmica já referida, definida neste caso pelo elemento Peltier, que não deve ser actuado com taxas superiores a 1 °C por segundo [Noll, 2005].

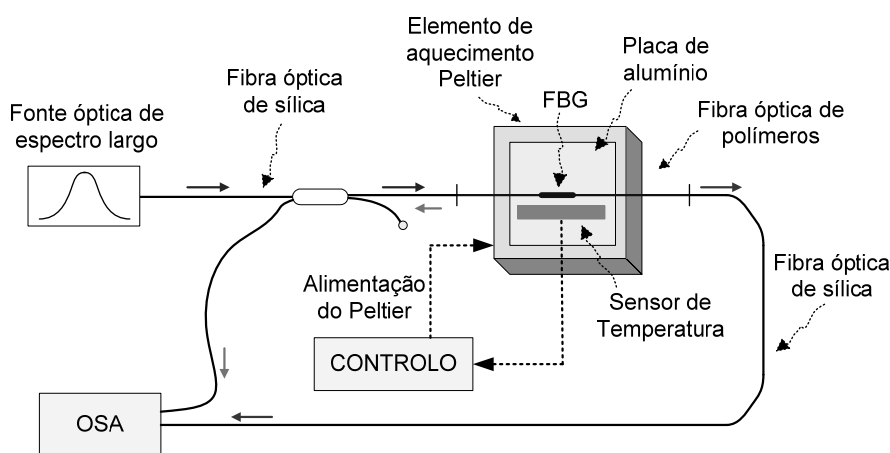


Figura 6.1 Esquema de ensaio do filtro FBG em fibra de polímeros, por variação térmica (elemento Peltier) [Liu, 2001]

6.2.2 Sintonização por Deformação Mecânica

Pelas razões apontadas no ponto anterior, os sistemas mais usados para a sintonização dos filtros FBG são baseados na aplicação de tensão à fibra óptica, e variam entre uma aplicação da força de forma linear ou de flexão, em compressão ou tracção. Qualquer um destes tipos de actuação apresenta vantagens e inconvenientes. Assim, e embora as fibras ópticas de sílica apresentem uma resistência à compressão que é 23 vezes superior à resistência apresentada para a tracção [Morey, 1994; Iocco, 1997], a instalação mecânica necessária para traccionar a fibra óptica é mais simples de implementar do que o necessário para a comprimir. De forma semelhante, a deformação da fibra óptica conseguida por torção, embora implique uma montagem mais simples, pode acrescentar algumas dificuldades relativas a fenómenos de polarização da luz, descritos no Capítulo 5 [Goh, 2003]. A aplicação de tracção linear não comporta este género de problemas, ainda que para isso seja necessário garantir alguns cuidados na implementação da montagem.

Um dos primeiros sistemas de filtros sintonizáveis a serem desenvolvidos e apresentados é baseado na aplicação de compressão à fibra óptica. Através de um processo mecânico, é utilizado um motor eléctrico para conseguir uma excursão de movimento de 32 nm [Ball, 1994; Morey, 1994]. O sistema desenvolvido por Morey *et al*, apesar de apresentar uma boa linearidade de resposta, regista um problema que inibe a sua utilização em certas aplicações de instrumentação, nomeadamente um baixo regime dinâmico, no qual o tempo de variação entre as posições extremas é muito elevado, na ordem dos segundos.

Outro método que tem vindo a ser explorado para aplicação de deformação à fibra óptica é baseado em actuadores magnéticos. Estes sistemas podem ainda ser divididos em dois grupos: os que usam materiais magnetostrictivos e os baseados numa bobina controlada em corrente.

Os materiais magnetostrictivos “gigantes”¹⁴ são materiais que apresentam variação das suas dimensões físicas quando sujeitos a campos magnéticos [Flatau, 2005]. Se a fibra óptica onde a rede Bragg está inscrita for colada ou embebida neste material, a rede deforma-se juntamente com o material. Assim, e através da aplicação de um campo magnético controlado, é possível sintonizar o comprimento de onda central da rede de Bragg. Um esquema deste tipo foi apresentado por Lin *et al*, obtendo uma gama de variação para λ_B de 1,3 nm, com a aplicação de um campo magnético de 500 mT [Lin, 1994]. O valor de deformação obtida está próximo do limite imposto pelo próprio material magnetostrictivo. Para a obtenção de valores superiores é necessário a aplicação de campos magnéticos de valor elevado (acima de 1000 mT), de difícil geração e controlo. Um outro aspecto menos positivo desta técnica reside na não linearidade de posicionamento devido à existência de histerese.

Mais recentemente, em 2002, foi apresentado por Chan *et al* um modelo de aplicação de deformação à fibra óptica através da força resultante da interferência entre dois campos magnéticos [Chan, 2002]. Um destes campos é constante e formado por um íman permanente. O outro campo magnético é formado por uma solenoide controlada em corrente. A força assim surgida, directamente proporcional à corrente de alimentação, provoca a deformação da fibra, e portanto da rede de Bragg, através da torção de uma alavanca de material plástico onde a fibra está colada ou embebida (Figura 6.2).

A variação do comprimento de onda do filtro FBG assim constituído é dada por:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B CI \quad (6.1)$$

onde I representa a corrente de alimentação da solenoide e C é uma constante que engloba a relação entre a corrente e a força magnética, as dimensões da alavanca plástica e restantes características físicas dos

¹⁴ Assim definidos por apresentarem elevados índices de deformação quando sujeitos a campos magnéticos, até valores máximos de 2000 $\mu\epsilon$

materiais que compõem a alavanca e rede de Bragg. Assim, a relação entre a variação de comprimento de onda e a corrente de controlo é linear. Os resultados obtidos por Chan *et al*, para uma corrente de alimentação a variar entre - 15 e + 16 mA, permitem verificar ainda a inexistência de histerese e de elevada repetibilidade de resultados, com um erro, relativamente à recta de aproximação, inferior a 1,4 % para os 2 nm de excursão obtida.

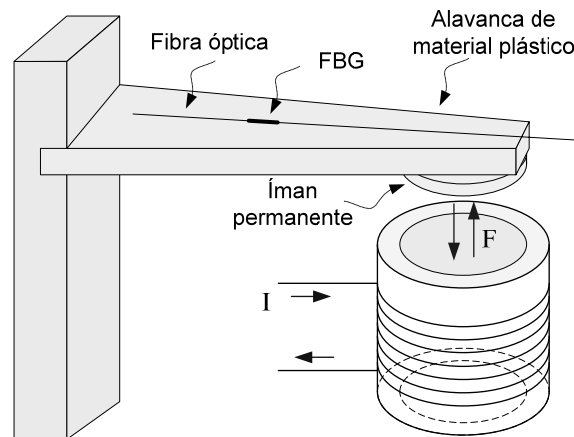


Figura 6.2 Estrutura de aplicação de deformação para sintonia de rede de Bragg por um actuador magnético linear [Chan, 2002]

6.2.3 Elementos Electrostrictivos – Piezoeléctricos

O meio mais utilizado para a aplicação de tensão à fibra óptica, e com o qual melhores resultados têm sido obtidos, é a utilização de materiais piezoeléctricos, ou electrostrictivos. Os materiais electrostrictivos são materiais dieléctricos, ou não condutores, que se deformam, ou variam as suas dimensões físicas, quando sujeitos a um campo eléctrico. Esta propriedade está, com mais ou menos intensidade, presente em todos os materiais dieléctricos. No entanto a propriedade piezoeléctrica, ou seja a capacidade de gerar uma tensão aos seus terminais quando sujeitos a uma pressão, só está presente em certos materiais, nomeadamente em alguns cristais, materiais poliméricos ou cerâmicos. Dentro deste último tipo de material encontra-se o PZT (Zirconato Titanato de Chumbo), dos mais utilizados, dadas as suas elevadas características piezoeléctricas bem como a facilidade de moldagem em diferentes formas.

Todos os materiais piezoeléctricos apresentam a dupla propriedade de conversão de energia eléctrica em energia mecânica e de conversão de energia mecânica em energia eléctrica. Estas duas propriedades possibilitam a sua aplicação como actuadores, ou como sensores, respectivamente. A propriedade necessária para a sintonização das redes de Bragg é precisamente a electrostrição, ou seja a capacidade de se deformar quando aos seus terminais é aplicada uma determinada diferença de potencial. De acordo com esta propriedade de funcionamento, os piezoeléctricos podem ser construídos de diferentes

maneiras, de forma a cumprir determinados objectivos ou a apresentar determinadas características [Oliveira, 2005; PI, 2005; Piezo, 2005]. Assim, e de uma forma geral, pode encontrar-se 3 diferentes tipos de construção para o seu funcionamento como actuadores:

- Actuadores de camada única, ou laminares;
- Actuadores de dupla camada;
- Actuadores multicamada. Com esta estrutura consegue-se obter os alongamentos mais elevados, até dezenas de μm , com forças máximas que podem chegar aos milhares de N.

Na descrição, ou especificação, dos actuadores piezoeléctricos são normalmente utilizados dois parâmetros: o Alongamento máximo ($L_{\text{máximo}}$) e a Força máxima ($F_{\text{máxima}}$). Estes são dois parâmetros que não se verificam em simultâneo. O alongamento máximo verifica-se quando aos terminais do piezoeléctrico está a ser aplicada a tensão máxima e há um movimento completamente livre, ou seja, quando não lhe é requisitado a aplicação de qualquer força. Pelo contrário, a força máxima é atingida quando não há qualquer liberdade de movimento e em simultâneo lhe está a ser aplicada a tensão máxima. Qualquer outro ponto de funcionamento é encontrado sobre a recta que une os dois pontos de máxima força e máximo alongamento para uma determinada tensão de alimentação (Figura 6.3).

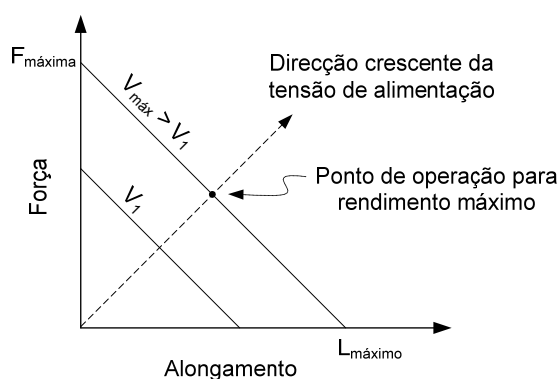


Figura 6.3 Pontos de funcionamento Força/Alongamento de um piezoeléctrico

No entanto, outros parâmetros são também muitos importantes para a selecção e utilização de um elemento piezoeléctrico, nomeadamente:

- Resolução. Uma vez que o movimento é dependente das variações iónicas e da orientação das células piezoeléctricas, a resolução depende apenas do campo eléctrico aplicado. Teoricamente, num actuador piezoeléctrico a resolução é infinita. Assim, a estabilidade da fonte de tensão é um elemento crítico, dado que qualquer variação na alimentação, mesmo na ordem do μV , provoca alteração de posição. É fundamental que o ruído gerado pela electrónica de controlo seja mantido em valores

reduzidos mas o conteúdo espectral deste ruído é também muito importante. Se o ruído tiver uma banda de frequência que coincida com a frequência de ressonância do piezoeléctrico então terá uma influência muito mais significativa na estabilidade geral do sistema.

- Histerese. É um fenómeno que ocorre na operação em malha aberta de qualquer actuador piezoeléctrico, e resulta dos efeitos de polarização cristalina e molecular do próprio material. A histerese é dependente da amplitude de tensão aplicada ao actuador piezoeléctrico, como indicado na Figura 6.4. Este comportamento é ainda dependente da tensão que estava aplicada aos terminais, no instante que se aplica nova variação. Assim, quanto menor a tensão aplicada menor o movimento, e menor o erro verificado, embora a diferença para a relação linear, verificada pela curva de histerese, chegue a atingir os 15 % para largas excursões. Este valor corresponde ao erro de linearidade que se obtém se a histerese não for compensada através de controlo em malha fechada.

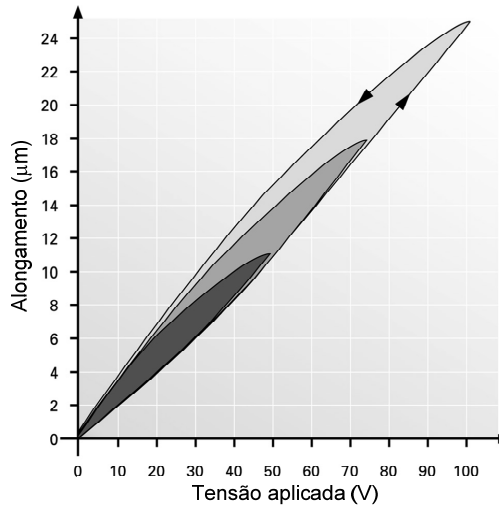


Figura 6.4 Histerese verificada na operação de um actuador piezoeléctrico [PI, 2005]

- Deslizamento. É um fenómeno causado pelas mesmas propriedades do material piezoeléctrico que causam a histerese. É a alteração do alongamento sem que exista qualquer alteração da tensão de controlo. Significa que o elemento piezoeléctrico continua a variar as suas dimensões, positiva ou negativamente, mesmo após se ter retirado a variação de tensão imposta. Manifesta-se como uma variação lenta do movimento do actuador, diminuindo logarithmicamente ao longo do tempo. A equação (6.2) descreve este efeito.

$$\Delta L(t) \approx \Delta L_{t=0,1} \left[1 + \rho \log \left(\frac{t}{0,1} \right) \right] \quad (6.2)$$

onde, t representa o tempo, $\Delta L(t)$ a variação do alongamento em função do tempo, $\Delta L_{t=0,1}$ é o alongamento ao fim de 0,1 s da aplicação do degrau de tensão e ρ é o factor de deslizamento, que é dependente das propriedades do actuador.

Na prática, o deslizamento máximo (verificado ao fim de algumas horas) implica uma variação de alongamento de 1 ou 2 %. Mais uma vez, este é um erro que influencia a utilização dos actuadores piezoeléctricos em sistemas de instrumentação. A forma de compensar este erro passa pela utilização de realimentação, ou controlo em malha fechada.

- Frequência de ressonância. Este é um factor relevante quando se pretende utilizar o actuador piezoeléctrico em regime dinâmico. É dependente de duas características do material: a rigidez do actuador, K_T e a massa efectiva, m_{ef} . Os valores definidos nas tabelas de dados, definidas pelos fabricantes, são referidos à situação do actuador fixo numa extremidade e sem qualquer carga associada, na outra. A expressão que define a frequência de ressonância, f_0 , nesta situação é dada por:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_T}{m_{ef}}} \quad (6.3)$$

Na situação mais concreta em que o actuador está associado a uma massa, M , que é necessário deslocar, a nova frequência de ressonância, f_0' , passa a ser dada por:

$$f_0' = f_0 \sqrt{\frac{m_{ef}}{m_{ef}'}} \quad (6.4)$$

onde $m_{ef}' = m_{ef} + M$ e f_0' é a frequência de ressonância do conjunto actuador e massa M .

- Envelhecimento. Este é um problema inerente aos piezoeléctricos, mais crítico no seu funcionamento como sensor. Ao longo do tempo, as propriedades piezoeléctricas vão-se alterando, provocando respostas diferentes, ou seja, acrescentando incerteza ao valor da leitura de posicionamento. No caso do funcionamento como actuador, o efeito do envelhecimento é compensado com a aplicação de um campo eléctrico mais forte. No entanto, para que essa compensação seja concretizada de uma forma válida é necessário mais uma vez a utilização de realimentação da posição do alongamento.

6.3 Implementação do Sistema

6.3.1 Requisitos e Especificação do Sistema

Um dos primeiros, e mais importantes, requisitos do sistema desenvolvido refere-se à gama de variação do filtro. Assim, foi definido à partida que o valor para esta gama de variação seria de $\pm 1500 \mu\epsilon$, de acordo com a experiência prática obtida nos projectos e diversos trabalhos de monitorização de estruturas de engenharia Civil, desenvolvidos até à altura. No entanto, e considerando apenas a possibilidade de aplicar tracção à fibra óptica, por uma questão de facilidade de construção da estrutura mecânica de suporte da montagem, este valor de deformação é convertido numa variação de:

$$\epsilon = + 3000 \mu\epsilon.$$

O comprimento das redes de Bragg utilizadas neste trabalho, 10 mm, é outro dos pontos de partida para a especificação do sistema. Desta forma, o comprimento inicial a deformar foi definido como sendo:

$$L = 15 \text{ mm.}$$

Assim, a variação de comprimento necessária para obter a deformação pretendida é de:

$$\Delta L = 45 \mu\text{m.}$$

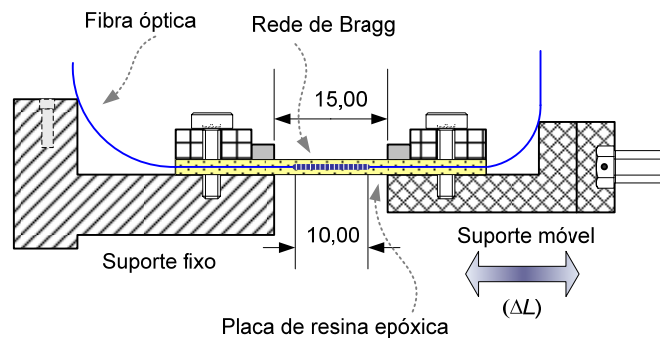


Figura 6.5 Suportes de aplicação de deformação à fibra óptica embebida em resina

O actuador piezoeléctrico utilizado na construção deste sistema terá que ser capaz de alongar, no mínimo, 45 μm , e apresentar ainda algumas das características definidas nos pontos seguintes.

Mantendo o valor de resolução utilizado no sistema desenvolvido e apresentado no Capítulo 4, de 1 $\mu\epsilon$, implica que o actuador, e respectivo sistema de medição de posição, deva ser capaz de controlar deslocamentos de 15 nm.

6.3.1.1 Força a Aplicar

É necessário que o actuador piezoeléctrico aplique uma determinada força de tracção a uma fibra óptica de 125 μm de diâmetro, em sílica, embebida numa placa de resina epóxica. Esta placa tem como objectivo aumentar a rigidez da fibra à aplicação de tensão, resistindo, sem sofrer rupturas, a deformações superiores a 1500 $\mu\epsilon$, valor considerado como o limite prático para a fibra nua (e que se torna ainda mais fragilizada após o processo de inscrição da rede de Bragg).

Nestas condições, a placa de resina foi projectada com as dimensões: 35 mm de comprimento; 5 mm de largura; 0,5 mm de espessura, ou seja, uma secção recta de 2,5 mm² (Figura 6.6).

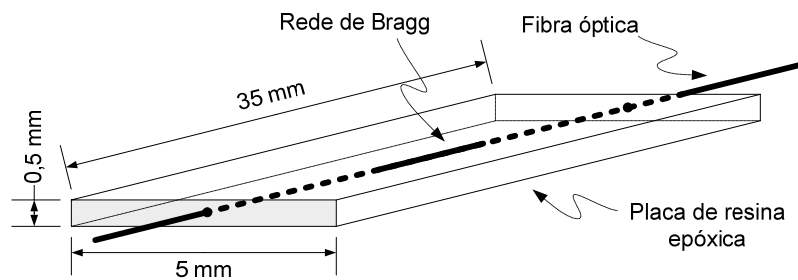


Figura 6.6 Representação da placa de resina epóxica com a fibra óptica (e respectiva rede de Bragg) embebida

Sabendo que os módulos de Young, Y , dos dois materiais, sílica e resina epóxica, são respectivamente de:

$$Y_{\text{sílica}} = 72,5 \text{ GPa}; \quad (6.5)$$

$$Y_{\text{resina}} = 3 \text{ GPa}; \quad (6.6)$$

A equação que define a relação entre o stress, σ , e a deformação para um dado material, no domínio elástico e numa direcção z , é dada por:

$$\sigma_z = Y \times \epsilon_z \quad (6.7)$$

O stress aplicado à estrutura placa/fibra, nas condições descritas, é de:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{total}} &= (Y_{\text{sílica}} + Y_{\text{resina}}) \times \epsilon = (72,5 + 3) \times 10^9 \times 3000 \times 10^{-6} \\ &= \sigma_{\text{sílica}} + \sigma_{\text{resina}} = 217,5 \times 10^6 + 9 \times 10^6 \\ &= 226,5 \times 10^6 \text{ Nm}^{-2} \end{aligned} \quad (6.8)$$

Considerando agora as dimensões das secções rectas da fibra óptica e da placa utilizadas:

$$\begin{aligned} d_{fibra} = 125\mu\text{m} \rightarrow s_{fibra} &= 12,27 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \\ s_{resina} &= 2,5 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \end{aligned} \quad (6.9)$$

Assim, a força a ser exercida pelo actuador piezoeléctrico, terá que ser igual ou superior a:

$$\begin{aligned} F_{total} &= \sigma_{silica} \times s_{fibra} + \sigma_{resina} \times s_{placa} = \\ &= 217,5 \times 10^6 \times 12,27 \times 10^{-9} + 9 \times 10^6 \times 2,5 \times 10^{-6} \\ &= 2,7 + 22,5 = 25,2 \text{ N} \end{aligned} \quad (6.10)$$

6.3.1.2 Alimentação do Actuador

A alimentação do actuador piezoeléctrico obedece também a certos requisitos, dependendo do tipo de controlo. Assim, é necessário distinguir os requisitos da alimentação para a operação estática e dinâmica.

Para a operação estática, ou quase estática, onde a frequência de operação é muito inferior à frequência de ressonância do piezoeléctrico, este comporta-se como um condensador. Neste caso, o piezoeléctrico consome uma corrente muito baixa, dado que a impedância nesta situação é muito elevada. Para um comportamento perfeitamente estático é apenas necessário fornecer uma corrente de compensação de fugas, na ordem dos μA . Para a variação de alongamento é necessário fornecer uma corrente, i , dada por [PI, 2005]:

$$i = C \frac{dV}{dt} \quad (6.11)$$

ou seja, depende da taxa de variação da tensão de alimentação e também do valor da capacidade do piezoeléctrico. O valor de C é uma característica de cada elemento e depende das suas características físicas.

Em operação dinâmica são vários os parâmetros que limitam a acção do sistema de posicionamento em termos da sua frequência máxima de operação, nomeadamente: a taxa de variação da tensão e a energia da fonte (estes dois parâmetros são críticos); os componentes mecânicos, e as respectivas forças dinâmicas criadas; o calor gerado pela operação continuada.

A equação (6.12) determina a corrente máxima a fornecer pela fonte de alimentação, $i_{m\acute{a}x}$, quando em operação sinusoidal, com uma variação de tensão pico-a-pico, V_{pp} , e uma frequência de operação f .

$$i_{m\acute{a}x} \approx f \pi C V_{pp} \quad (6.12)$$

6.3.1.3 Regime Dinâmico

Outro dos pontos importantes do sistema de posicionamento está ligado com o seu regime dinâmico, ou seja, com a maior ou menor rapidez que o actuador tem em se posicionar de acordo com o sinal de controlo. Assim, a selecção do actuador piezoeléctrico está condicionada pelo tipo de controlo seleccionado, e respectiva frequência de operação necessária.

De acordo com o fabricante PI (Physik Instrumente) [PI, 2005], o actuador piezoeléctrico consegue atingir a posição final, de acordo com a tensão aplicada, ao fim de um tempo $T = 1/(3 \times f)$, em que f é a frequência de ressonância do piezoeléctrico. Como a maioria dos actuadores multicamadas, com as características necessárias a cumprir as funções pretendidas, apresenta frequências de ressonância na ordem de 10 kHz, os tempos de reacção andam na ordem das dezenas de micro segundo, para um sistema com um mínimo de carga aplicada.

6.3.1.4 Condicionamento de Sinal

Os erros introduzidos pelo bloco de condicionamento de sinal não devem impor limitações à banda do sistema. Assim, é importante garantir que o sistema de instrumentação apresente especificações superiores aos blocos sensor e actuador.

6.3.1.5 Conversão Analógico-Digital

O bloco de conversão entre os domínios analógico e digital é fundamental para o funcionamento global do sistema de medição. Como as grandezas que se pretende medir variam de forma lenta, a maior exigência que é imposta ao conversor está relacionada com a sua resolução. Este aspecto permite optar por um conversor de elevada resolução, o que garante alguma segurança e flexibilidade na avaliação da possibilidade de se atingir um desempenho do sistema que supere as especificações. Por outro lado, o método de medição referido requer que, para além da medição da alteração das dimensões do sensor, seja determinada a posição de equilíbrio entre os dois FBG's, sensor e filtro. Por isso, o conversor A/D necessita de uma resolução elevada para que a informação acerca do ponto de equilíbrio e da variação da dimensão do sensor seja o mais fiável possível. Além disso, com o avanço das tecnologias dos conversores A/D é possível usar dispositivos de elevada resolução sem que isso represente um grande investimento. Isto, conjugado com a integração destes conversores com microcontroladores, no mesmo circuito físico, constitui uma boa alternativa para o desenvolvimento de sistemas de instrumentação óptica.

6.3.1.6 Actuador Piezoeléctrico Seleccionado

Assim, e de acordo com os requisitos e especificações, definidos nos pontos anteriores, o actuador escolhido para implementar o sistema do filtro sintonizável foi o P-843.30, da PI (Physik Instrumente). As suas principais características são:

- Gama de alongamento: 0 – 45 μm ;
- Tensão de alimentação: 0 – 100 V;
- Resolução em malha aberta: 0,9 nm;
- Força máxima abertura/fecho: 800/300 N;
- Capacidade eléctrica: 4,5 μF ;
- Frequência de ressonância: 10 kHz.

O seu esquema e dimensões (em mm) são mostrados na Figura 6.7.

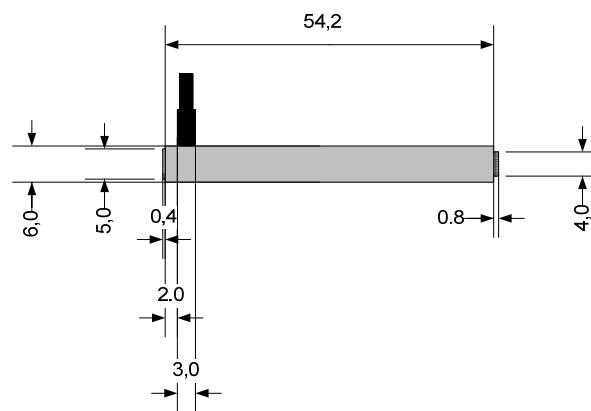


Figura 6.7 Esquema e dimensões (em mm) do actuador piezoeléctrico P-843.30, da PI (Physik Instrumente)

6.3.2 Sensor de Posicionamento

De acordo com os requisitos acima descritos e enumerados, em particular o relativo à resolução da medição, foi necessário proceder à selecção do sensor de posicionamento. Dentro das opções disponíveis, foram considerados os seguintes tipos de sensor:

- Sensor *Strain Gauge*. É um tipo de sensor que faz a medição de posição indirectamente, através da medição da deformação de uma determinada superfície. Consiste num filme resistivo que é colado à superfície na qual se pretende medir a deformação. Apresenta como vantagens o seu baixo custo, a elevada sensibilidade (resolução de 1 nm) e largura de banda (na ordem dos 5 kHz). No entanto apresenta uma característica que invalida a sua utilização na aplicação pretendida: a gama de medição que chega apenas aos 15 μm , quando a gama definida é de pelo menos 45 μm .

- Sensor LVDT (*Linear Variable Differential Transformers*). É um tipo de sensor apropriado para a medição directa de posição. O seu funcionamento baseia-se na transferência de energia magnética de um enrolamento primário para dois enrolamentos diferenciais secundários, de acordo com a posição do seu núcleo magnético, fixo a uma parte móvel. A sua resolução de medição é de 5 nm para uma largura de banda de 1 kHz. Apresenta ainda elevada estabilidade de medição ao longo do tempo bem como baixa sensibilidade às variações de temperatura. O problema deste tipo de sensor acaba por ser o seu elevado volume, necessitando de um grande espaço adicional para a sua montagem.
- Sensor Capacitivo. Esta é, no actual nível de desenvolvimento tecnológico, a solução que melhores características apresenta na metrologia de dimensões na ordem dos nm. É constituído por duas placas metálicas paralelas. Uma delas fica fixa e a outra tem uma posição que varia juntamente com o objecto que se pretende posicionar, no caso particular, a extremidade do actuador piezoeléctrico. A distância entre as duas placas é inversamente proporcional à capacidade. Portanto, a medição da capacidade do condensador assim formado permite obter o valor do posicionamento. As suas elevadas características permitem, idealmente, obter resoluções na ordem dos pico metros, com valores de repetibilidade inferiores a 0,1 nm. Outras características importantes destes sensores são as elevadas linearidade de resposta, durabilidade e resposta em frequência (limitada essencialmente pela electrónica de instrumentação).

De acordo com os pontos assinalados, o sensor escolhido para a implementação do sistema foi o sensor capacitivo D-050.00, da PI (Physik Instrumente), que apresenta uma gama de medição de 50 μm . O seu esquema e dimensões (em mm) são mostrados na Figura 6.8.

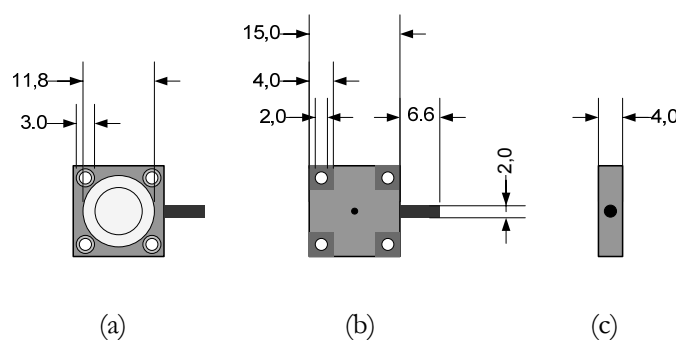


Figura 6.8 Esquema e dimensões (em mm) das placas do sensor capacitivo
(a) vista frontal (b) vista traseira (c) vista lateral

6.3.3 Plataforma de Aplicação de Deformação

De forma a criar uma plataforma de aplicação de tensão à fibra óptica onde a rede de Bragg está inscrita, foi desenvolvida uma estrutura metálica capaz de acomodar os elementos base do sistema de filtragem, nomeadamente a fibra óptica, o elemento piezoeléctrico e o sensor de posição capacitivo (Figura 6.9).

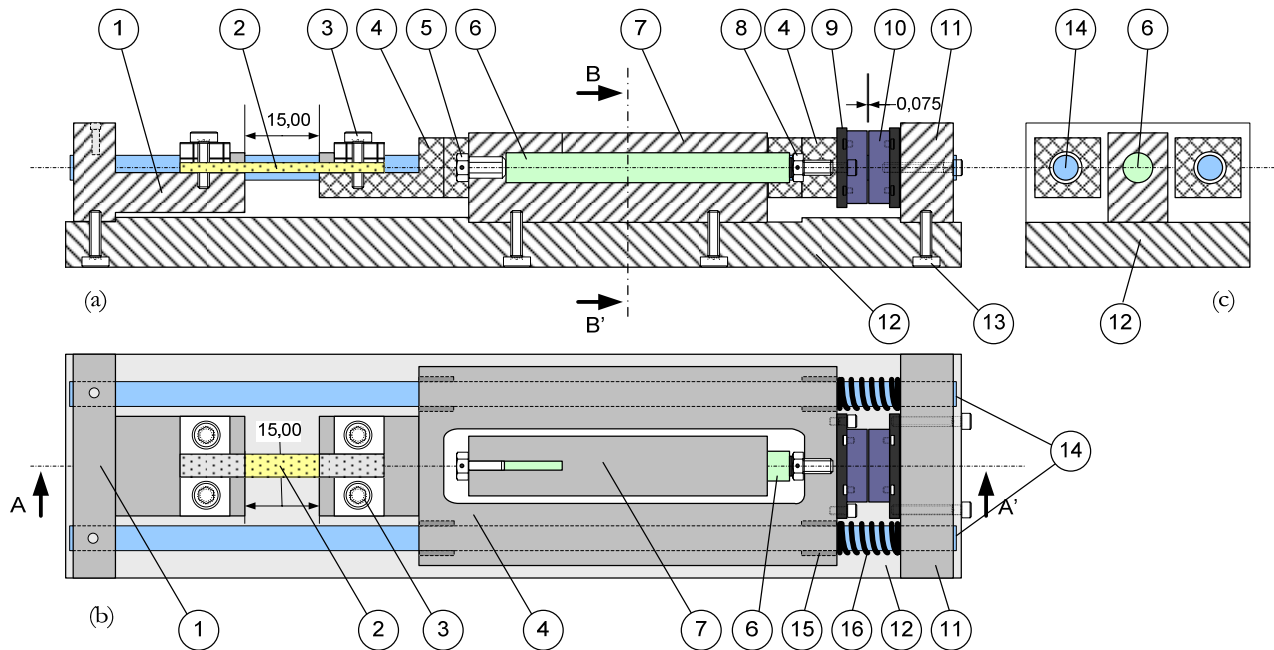


Figura 6.9 Esquema da estrutura de aplicação de tensão à fibra óptica através de um elemento piezoeléctrico.
(a) vista lateral (corte A), (b) vista superior, (c) vista de topo (corte B)

A estrutura permite que o elemento piezoeléctrico, quando é alongado devido à aplicação de tensão aos seus terminais, aplique tracção à fibra óptica apenas na direcção do eixo da fibra, não existindo assim qualquer força transversal aplicada à fibra óptica. Este aspecto é importante devido aos fenómenos de polarização da luz, nomeadamente de PMD e PDL, de acordo com o que foi referido no Capítulo 5.

Para que o seu funcionamento fosse optimizado, algumas características, ou requisitos, foram consideradas na elaboração desta estrutura:

- Minimização da força a aplicar e maximização do deslocamento, de acordo com as características do actuador piezoeléctrico;
- Garantir a centralidade de posicionamento do eixo da fibra óptica relativamente ao eixo do actuador piezoeléctrico;

- Garantir o valor do afastamento e do paralelismo entre as duas placas do sensor capacitivo;
- Minimização do coeficiente de atrito e das folgas entre os elementos móveis.

O valor de deformação máxima que esta plataforma consegue aplicar à fibra óptica é de 3330 $\mu\epsilon$, ou seja, um alongamento de 50 μm para uma distância de 15 mm.

Esta estrutura ¹⁵, construída em alumínio, apresenta como principais elementos (de acordo com a numeração apresentada na Figura 6.9):

1. Peça de alumínio, fixada à base através de dois parafusos. Nesta peça é fixada uma das extremidades da placa de resina, assim como os dois veios;
2. Placa de resina epóxica, definida em 6.3.1.1, onde a fibra óptica, e respectiva rede de Bragg, está embebida;
3. Parafuso e respectivo suporte de fixação da placa de resina;
4. Plataforma móvel, actuada pelo elemento piezoeléctrico, onde a segunda extremidade da placa de resina é apertada;
5. Parafuso de afinação (ajuste grosso) do posicionamento do actuador piezoeléctrico;
6. Actuador piezoeléctrico colocado no interior de uma peça fixa à base da estrutura. Apenas a extremidade do actuador é móvel;
7. Peça apertada à base através de dois parafusos, que envolve e fixa o actuador piezoeléctrico;
8. Parafuso de afinação (ajuste médio) do posicionamento do actuador piezoeléctrico;
9. Placas de aço onde o corpo do sensor capacitivo é apertado. Além da função de suporte, permitem, por desgaste abrasivo, o ajuste fino do posicionamento e paralelismo das duas placas. O paralelismo entre as placas do sensor é um factor crítico para a qualidade de medição [Oliveira, 2005; PI, 2005];
10. Sensor capacitivo, constituído por duas placas paralelas;
11. Peça de alumínio, fixada à base através de dois parafusos. Suporta os dois veios e a segunda placa do sensor capacitivo;
12. Base da estrutura, em alumínio;
13. Parafusos de fixação das peças 1, 7 e 11 à base da estrutura;

¹⁵ Dada a necessidade de elevado rigor no seu dimensionamento, todas as peças constituintes da estrutura foram construídas pela empresa *Tecnogial - Projectos e Tecnologia Industrial, Lda*.

14. Veios de aço de 5 mm, utilizados para a deslocação da peça móvel 4;
15. Casquilhos de Teflon, fixos à peça móvel 4, e por onde os dois veios atravessam. A sua utilização permite reduzir ao mínimo o atrito causado ao movimento devido ao alongamento do actuador piezoeléctrico, bem como a eliminação de folgas e aumento da durabilidade (relativamente à utilização de esferas ou rolamentos);
16. Molas. Elemento elástico que ajuda a restabelecer a deformação inicial, aplicando compressão à placa de resina, depois de ao actuador piezoeléctrico ser diminuída a tensão aplicada aos seus terminais.

Na Figura 6.10 é mostrada uma imagem da estrutura de aplicação de deformação ao filtro FBG depois da sua construção, com todos os elementos montados. Na Figura 6.11 são mostrados alguns pormenores de construção, nomeadamente o posicionamento dos sensores capacitivos e da fibra óptica embebida em resina epóxica.

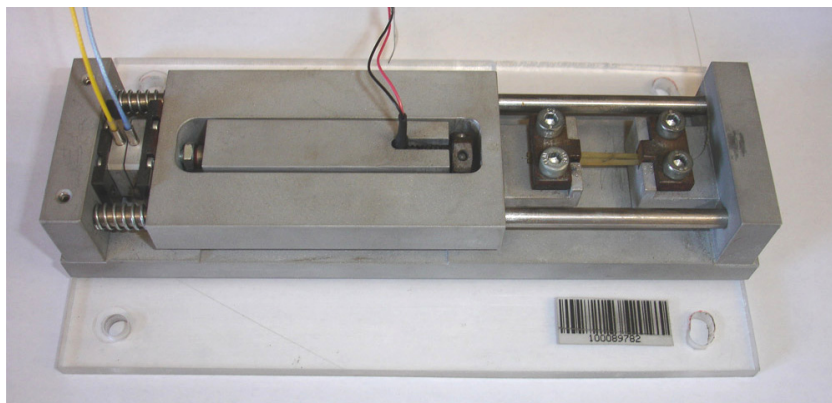
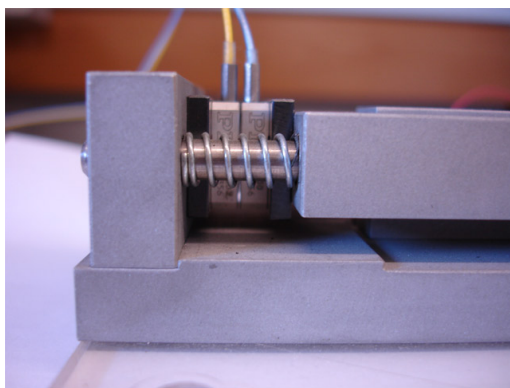
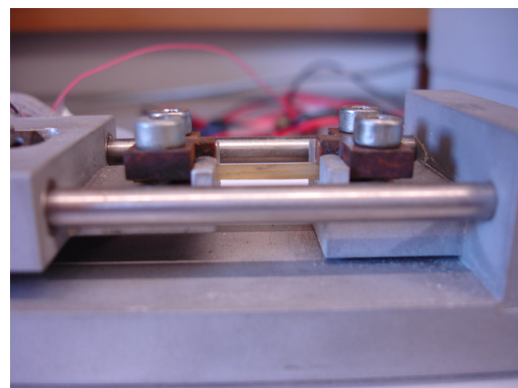


Figura 6.10 Vista geral da estrutura de aplicação de deformação ao filtro rede de Bragg



(a)



(b)

Figura 6.11 Pormenores de construção: (a) Sensor capacitivo, veio e mola
(b) Aperto do filtro FBG embebido em resina

6.3.4 Sistemas de Instrumentação: Sensorização e Controlo

Para a integração de todo o sistema de interrogação de redes de Bragg foi desenvolvido um conjunto de subsistemas electrónicos que completam as componentes óptica e mecânica do sistema de interrogação, referidas nos pontos anteriores. Neste sistema, e para o caso de apenas um único sensor e filtro FBG sintonizável (Figura 3.11), são identificáveis as seguintes necessidades de instrumentação: medição da intensidade de luz que chega ao fotodetector; medição da posição, ou afastamento, do sensor capacitivo e ajuste do nível de tensão a aplicar ao actuador piezoeléctrico, de acordo com o controlo utilizado.

Os dois primeiros pontos implicam a medição e aquisição para o sistema de processamento e controlo de dois sinais de tensão de valor reduzido, na ordem dos mV, e com elevados regimes dinâmicos. O terceiro ponto implica a regulação de um nível de tensão, no qual os aspectos mais críticos são a resolução e também o regime dinâmico.

Neste contexto, são utilizadas duas placas: uma placa de aquisição e controlo comercial, seleccionada pela sua característica de elevada resolução e uma segunda placa, desenvolvida especificamente para esta aplicação, que compreende todos os elementos de condicionamento de sinal bem como de alimentação dos vários sistemas. Estes sistemas, bem como as suas principais características são descritos nas secções seguintes.

6.3.4.1 Aquisição e Controlo

O circuito de controlo seleccionado, a placa MSC1210EVM da Texas Instruments (Figura 6.12 e Figura 6.13), é baseado essencialmente no dispositivo MSC1210Y5 que inclui um conversor analógico-digital (A/D) de alta resolução, para além de outros componentes de entre os quais se destaca o microcontrolador da família 8051.

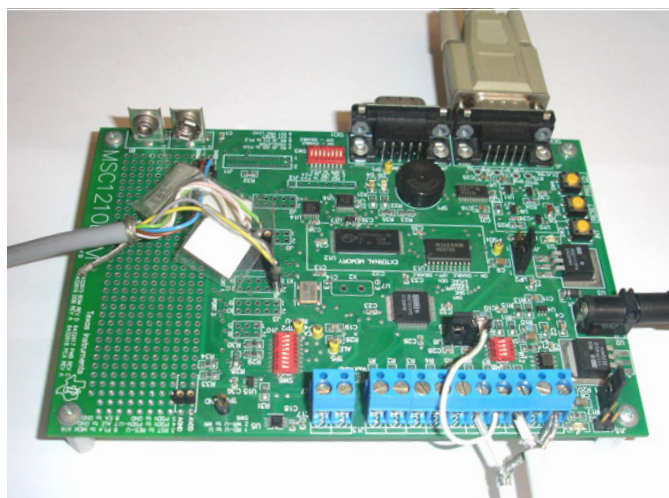


Figura 6.12 Imagem da placa de aquisição e controlo da Texas Instruments MSC1210EVM

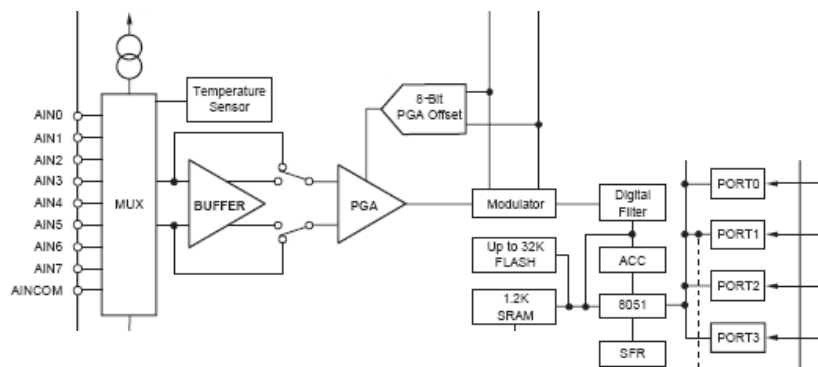


Figura 6.13 Diagrama de blocos simplificado da placa de aquisição e controlo MSC1210EVM

Sendo programável, via porta série do PC, permite que todas as funções de controlo sejam executadas pelo microcontrolador. As duas entradas analógicas, de posição e intensidade luminosa, são convertidas pelo conversor A/D interno de 24 bits do tipo sigma-delta. A topologia utilizada apresenta ainda a vantagem de permitir a filtragem de algumas componentes de ruído, o que evita a utilização de um módulo de filtragem analógico externo, no circuito de condicionamento. Assim, é realizada pelo filtro digital interno a necessária filtragem da frequência da rede, dado os baixos valores de tensão a medir.

Dentro das restantes características apresentadas por este circuito são ainda destacadas: um selector de oito entradas analógicas (a necessária passagem entre canais implica um tempo de espera não desprezável, até 3 conversões, que é dependente do tipo de filtragem seleccionada); uma impedância de entrada variável mas sempre superior a 1 GΩ e um amplificador com ganhos programáveis (entre 1 e 128).

6.3.4.2 Condicionamento de Sinal

Para a ligação dos sinais provenientes dos transdutores de posição e intensidade luminosa à placa de aquisição e controlo foi necessário o desenvolvimento de alguns blocos extra de condicionamento de sinal. Todos estes blocos de condicionamento estão agrupados num único circuito, que engloba ainda a necessária alimentação de todos os sistemas, nomeadamente a fonte de tensão regulável para alimentação do actuador piezoeléctrico (Figura 6.14).

Dadas as características capacitivas do sensor de posicionamento, foi utilizada uma ponte capacitiva com amplificador operacional para a implementação do respectivo circuito de condicionamento (Figura 6.15).

Os valores de R_1 , R_2 e C_1 são fixos, enquanto que o valor de C_{sensor} depende da posição entre as placas do sensor capacitivo. A função de transferência deste circuito é dada por:

$$v_{saída} = k_1 - k_2 d \quad (6.13)$$

em que:

$$k_1 = \frac{R_2/R_1}{1 + R_2/R_1} v_{ent} \quad (6.14)$$

$$k_2 = \frac{C_1/(\epsilon_0 A)}{1 + R_2/R_1} v_{ent} \quad (6.15)$$

onde A representa a área das placas do sensor e ϵ_0 a permissividade eléctrica do meio entre essas mesmas placas.

Pela equação (6.13) verifica-se que este circuito de condicionamento apresenta uma relação linear entre a distância de separação das placas do sensor, d , e a tensão à saída da ponte, $v_{saída}$, considerando o comportamento ideal do condensador de placas paralelas definido pelo sensor. Relativamente à mesma equação constata-se também que a tensão de saída não depende da frequência da tensão de alimentação. No entanto, é directamente dependente do valor da tensão de alimentação. Assim, é de toda a relevância que a tensão de alimentação seja o mais estável possível para que a saída não apresente flutuações.

Tendo em conta que a tensão de alimentação desta ponte de medição não é contínua, alguns cuidados acrescidos têm que ser tomados na realização de todo o circuito de condicionamento do sensor capacitivo. A Figura 6.16 mostra o diagrama de blocos do condicionamento de sinal, desde a geração da forma de onda de alimentação até à conversão A/D.

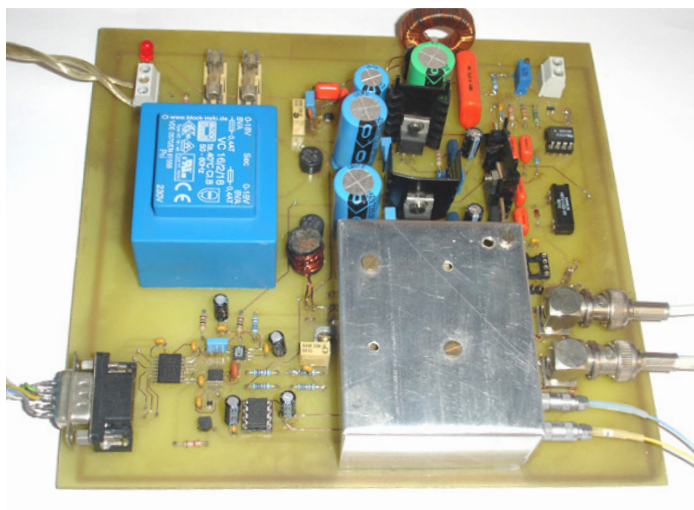


Figura 6.14 Imagem da placa de condicionamento de sinal desenvolvida

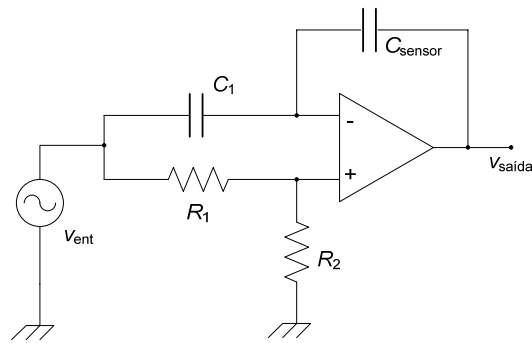


Figura 6.15 Circuito de condicionamento do sensor de posicionamento Ponte capacitiva com amplificador operacional

No condicionamento do sinal do fotodiodo é utilizada uma montagem amplificadora de transimpedância, que converte a luz incidente no fotosensor numa tensão correspondente. A tensão de saída deste circuito de condicionamento é ligada à placa de aquisição para ser digitalizada e utilizada na determinação da situação de equilíbrio entre o FBG sensor e o FBG de filtragem. De referir também os cuidados a ter na selecção de todos os componentes, quer passivos, quer activos, para que o ruído introduzido seja o menor possível.

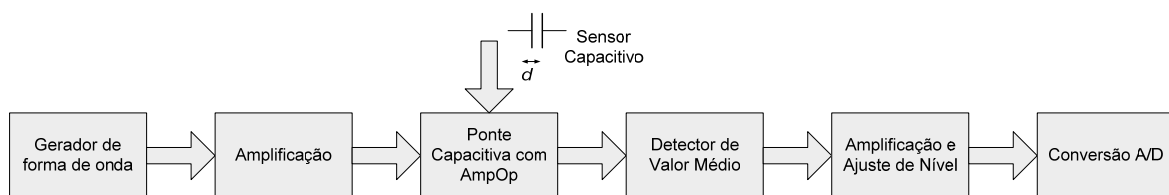


Figura 6.16 Diagrama de blocos do circuito de condicionamento para o sensor capacitivo

6.3.4.3 Fontes de Alimentação CC

Na mesma placa dos vários circuitos de condicionamento de sinal (Figura 6.14) foram instaladas todas as fontes de alimentação de corrente contínua (CC) necessárias ao funcionamento da electrónica de controlo. No total foram criadas 4 diferentes fontes de tensão: + 5 V, - 15 V, + 15 V e uma tensão variável desde os - 5 V até os + 110 V. A Figura 6.17 mostra o diagrama de blocos onde é visível a topologia utilizada para a obtenção destes diferentes níveis de tensão.

A utilização de um duplo andar de regulação, primeiro através de um regulador L200 e depois com reguladores do tipo 7xxx, justifica-se pela necessidade de se obter tensões muito estáveis e assim obter-se elevada qualidade nas medições efectuadas.

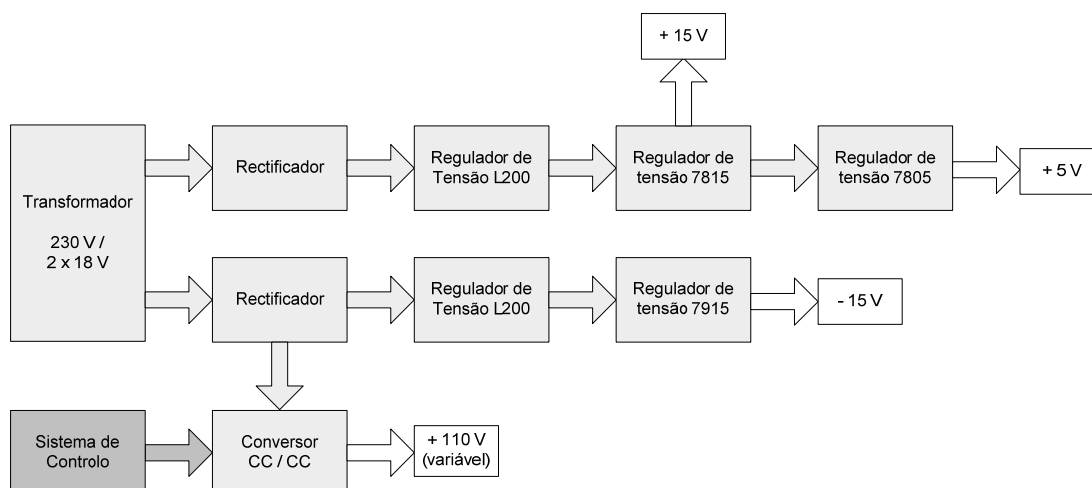


Figura 6.17 Diagrama de blocos da constituição das diferentes tensões de alimentação

Para além dos normais valores de tensão utilizadas na alimentação da electrónica, $+5\text{ V}$ e $\pm 15\text{ V}$, é também utilizada uma tensão variável de acordo com o sistema de controlo e que alimenta o actuador piezoeléctrico. O conversor CC/CC utilizado é do tipo *step-up*, que permite obter o valor de tensão de saída pretendido de $+110\text{ V}$ (Figura 6.18). A frequência de comutação deste conversor é da ordem de 100 kHz , valor escolhido de forma a ser bastante superior à frequência de ressonância do piezoeléctrico (10 kHz) e assim não afectar o seu funcionamento devido à ondulação, ou *ripple*, da tensão de saída do conversor. O controlo é realizado por um circuito integrado, MAX668, que recebe do bloco de sistema de controlo um sinal proporcional à tensão de comando e faz variar a largura dos impulsos aplicados ao interruptor (*Mosfet*) que implementa o *step-up*.

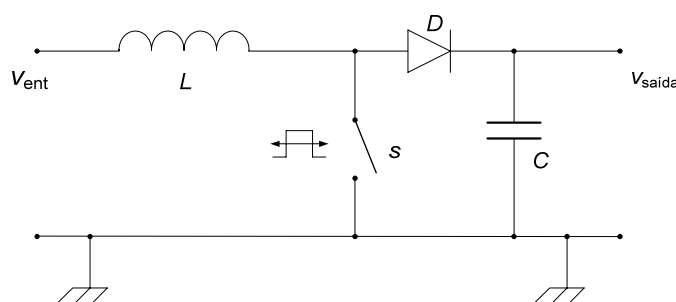


Figura 6.18 Conversor CC/CC do tipo *step-up*

6.4 Resultados Experimentais

Após a conclusão da construção da estrutura de aplicação de deformação, e no sentido da caracterização da mesma, realizaram-se alguns ensaios experimentais. Os primeiros ensaios efectuados ao sistema de

medição do posicionamento, implementado pelo sensor capacitivo, verificam a sua operação em termos de sensibilidade e estabilidade, além de proceder à sua calibração. Numa segunda fase, o sistema de actuação é avaliado em termos da sua qualidade de posicionamento. Foram efectuadas medições do ponto de equilíbrio das duas redes de Bragg, sensor e filtro, e analisados alguns aspectos do seu funcionamento. A validação do sistema de interrogação é efectuada através de ensaios de calibração, utilizando a plataforma de aplicação de deformação ao sensor de Bragg (anexo C).

6.4.1 Calibração do Sensor de Posicionamento

6.4.1.1 Método de Calibração

Dadas as características do sistema em termos de dimensões físicas, com 45 μm de excursão e uma resolução pretendida de 10 nm, recorreu-se à interferometria para a calibração do sensor de posicionamento. O interferómetro de Michelson foi a opção (Figura 6.19 e Figura 6.20). O laser utilizado, de HeNe, tem um comprimento de onda de 632,8 nm. Neste esquema, o fotodíodo é colocado na zona de interferência dos feixes dos dois braços do interferómetro. A variação das franjas está directamente relacionada com a variação de comprimento de um dos braços, obtida com a aplicação de tensão ao actuador piezoeléctrico. Na aplicação de tensão é utilizada uma fonte de alimentação regulável (Philips PM2832), que permite uma variação linear entre 0 e 60 V.

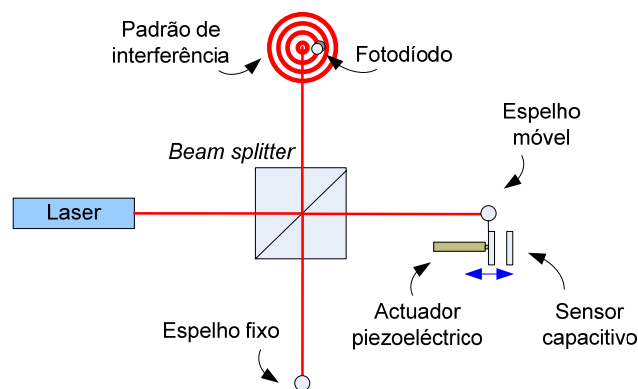


Figura 6.19 Esquema do interferómetro de Michelson para a calibração do sensor capacitivo

A variação de posição originada pelo alongamento do actuador provoca a variação da distância entre as placas do sensor capacitivo e simultaneamente uma resposta do fotodíodo, com variação de amplitude sinusoidal. Dada a necessidade de elevada resolução, é utilizada na calibração toda a gama de variação permitida pelo actuador, para uma variação de 60 V da tensão de alimentação. Nesta situação, são registados os valores de tensão de saída do fotodíodo (V_{FD}) e do sistema de condicionamento do sensor

capacitivo (V_{SC}) (Figura 6.21). Cada período do sinal verificado na leitura de V_{FD} corresponde a um deslocamento de 316,4 nm, ou seja, a metade do comprimento de onda do laser.

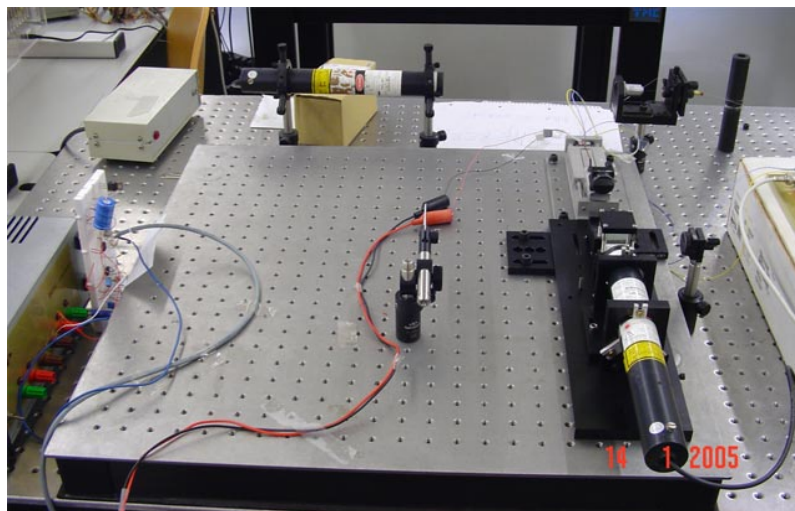


Figura 6.20 Imagem do interferômetro de Michelson utilizado na calibração do sensor capacitivo

Com este método de calibração é necessário ter particular atenção aos gradientes de temperatura da envolvente e à estabilidade mecânica da montagem. A sensibilidade verificada pelo interferômetro a estes fenómenos é muito elevada. A simples presença do operador no local dos ensaios ou o bater de uma porta provoca variações na sua resposta de várias franjas. Assim, todos os ensaios foram efectuados durante um período de baixo movimento na zona circundante ao laboratório, nomeadamente durante a noite.

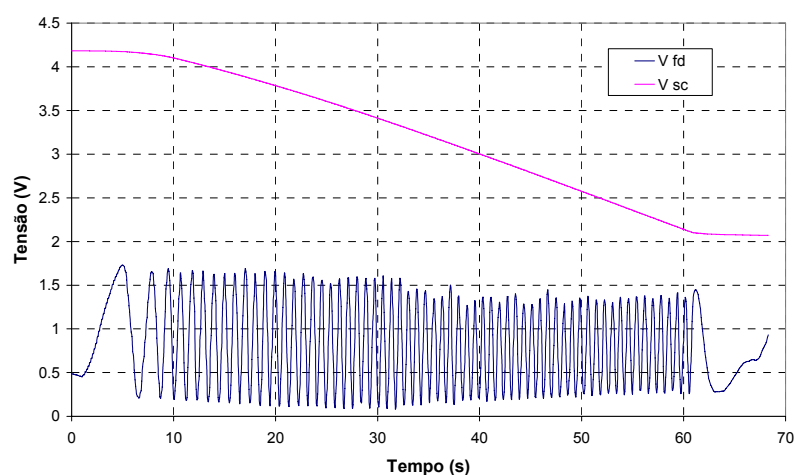


Figura 6.21 Respostas do fotodíodo (V_{FD}) e sensor capacitivo de posição (V_{SC}) durante o ensaio de calibração

6.4.1.2 Curva de Calibração do Sensor Capacitivo

Baseado no método de calibração definido no ponto anterior foram efectuados vários ensaios experimentais com o objectivo de se obter uma curva de calibração para o sensor capacitivo de posicionamento. A curva de calibração mostrada na Figura 6.22 representa a tensão de saída do circuito de condicionamento de sinal do sensor capacitivo (V_{sc}) em função do valor de posição, ou afastamento entre as duas placas, calculado através da informação do interferómetro ou, mais especificamente, da saída do fotodíodo (V_{FD}). O passo utilizado entre pontos de afastamento, ou posição, é de 3,164 μm , ou seja, correspondente a um intervalo de 10 períodos.

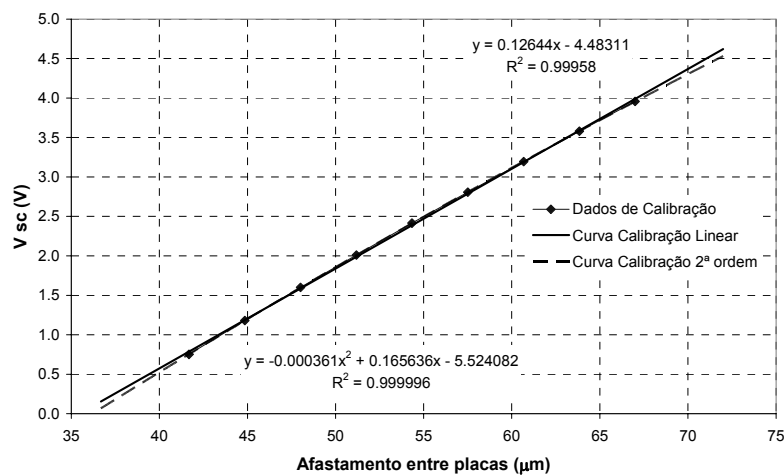


Figura 6.22 Curva de calibração do sensor capacitivo de posicionamento

De notar que o interferómetro permite apenas uma medição relativa. Não é possível, com este método, obter-se informação sobre o afastamento de partida. Este valor foi ajustado durante a fase de construção da plataforma metálica, utilizando um micrómetro digital, para os 75 μm . Assim, este valor foi considerado como sendo o valor de afastamento máximo entre placas, que se verifica quando a tensão aplicada ao actuador piezoeléctrico é de 0 V. No entanto, dado que o objectivo final deste sistema de medição é a determinação da deformação aplicada à fibra óptica, o conhecimento do valor absoluto da posição não é relevante. Para esta medição é apenas necessário conhecer o desvio relativo desde a primeira posição, considerada como deformação nula.

De forma a verificar a repetibilidade do sistema de medição foram efectuados vários ensaios idênticos com o sistema. Essa mesma repetibilidade é verificada através do gráfico da Figura 6.23, onde são mostrados os resultados experimentais obtidos com 5 ensaios.

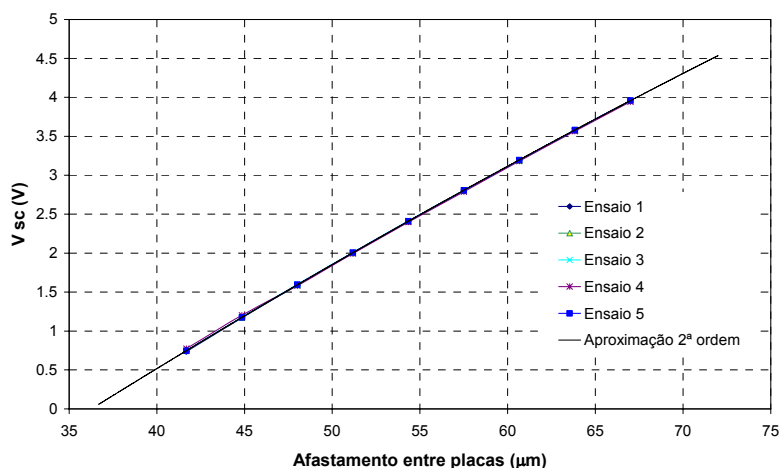


Figura 6.23 Verificação de repetibilidade do ensaio de calibração do sensor capacitivo

De acordo com o exposto em 6.3.2 e em 6.3.4.2, o sensor de posicionamento capacitivo apresenta uma resposta linear. No entanto, verifica-se através dos resultados experimentais mostrados nos gráficos das Figura 6.22 e Figura 6.23 que a relação entre a tensão de saída e o afastamento entre placas desvia-se ligeiramente da linearidade esperada. A diferença encontrada justifica-se pelo erro de paralelismo entre as duas placas que compõe o sensor capacitivo.

Os cálculos efectuados permitem verificar que, ao utilizar-se uma aproximação linear, pelo método dos mínimos quadrados, se obtém a seguinte equação:

$$y = 0,12644x - 4,48311 \quad (6.16)$$

que apresenta um coeficiente de correlação $r^2 = 0,99958$.

Ao utilizar-se uma aproximação a um polinómio do 2º grau a expressão obtida é:

$$y = -0,000361x^2 + 0,165636x - 5,524082 \quad (6.17)$$

com um $r^2 = 0,999996$.

Os desvios absolutos encontrados para as duas situações são verificados nos gráficos da Figura 6.24 (a) e (b), respectivamente para a situação de aproximação linear e aproximação a um polinómio de 2º grau. Em termos relativos, e como o coeficiente de correlação dá a entender, os desvios máximos verificados são de: 0,88 % na situação de aproximação linear e de apenas 0,13 % na situação de aproximação por polinómio de 2º grau.

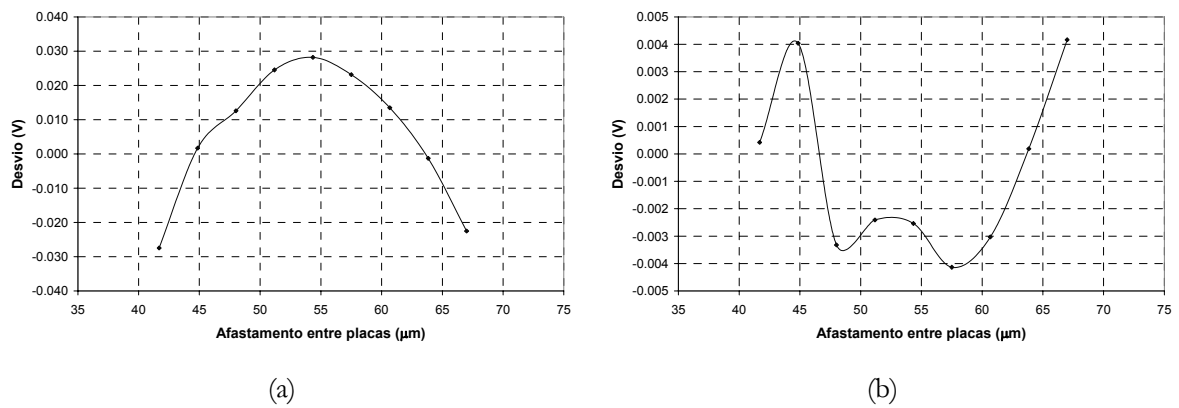


Figura 6.24 Desvios absolutos dos dados de calibração: (a) à aproximação linear; (b) à aproximação com polinómio de 2º grau

De acordo com estes resultados, a curva de calibração utilizada para a conversão da tensão de saída do sistema de medição, em posição, é a curva de aproximação ao polinómio de 2º grau, dada pela equação (6.17).

6.4.1.3 Sensibilidade e Estabilidade do Sensor Capacitivo

A sensibilidade de um sistema de medição é determinada pela derivada, ou declive, da curva de calibração do sistema. Derivando a equação (6.17) obtém-se a expressão da sensibilidade do sistema de medição:

$$y = -0,000361x + 0,165636 \quad (6.18)$$

Esta é uma outra forma de expressar a falta de linearidade da resposta do sistema devido ao paralelismo imperfeito das placas do sensor capacitivo. A Figura 6.25 representa a sensibilidade do sistema, que ronda os 1,45 mV por cada 10 nm de deslocamento.

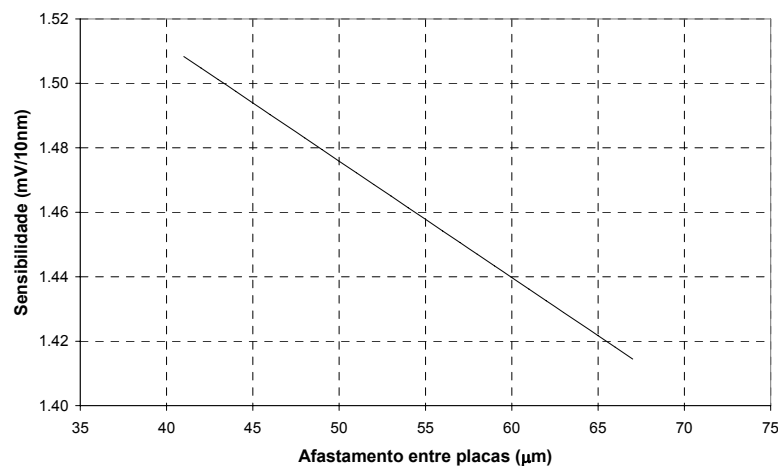


Figura 6.25 Curva de sensibilidade do sistema de medição de posicionamento

Como forma de avaliar a estabilidade de medição ao longo do tempo foram também realizados ensaios experimentais. Para o ensaio mostrado no gráfico da Figura 6.26 foi aplicada uma tensão constante de 20 V ao actuador piezoeléctrico com a fonte de alimentação regulável, Philips PM2832.

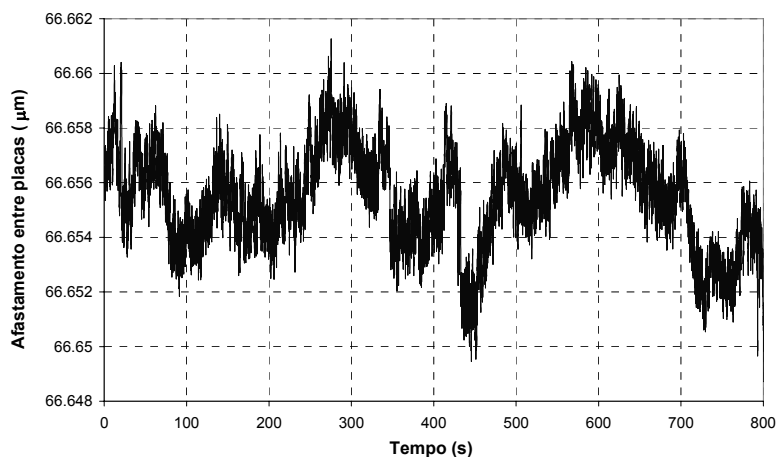


Figura 6.26 Verificação da estabilidade do sistema de medição de posicionamento

Como se pode verificar pela análise deste gráfico, a gama de variação máxima encontrada é de cerca de 10 nm, durante o período de 13 minutos de duração do ensaio. Considerando que a extensão da fibra óptica que compreende o filtro FBG é de 15 mm (L) e considerando esta variação de posição de 10 nm (ΔL), a deformação aplicada à fibra é de $0,67 \mu\epsilon$. Sendo à partida um valor de erro, ou flutuação, muito baixo, este valor poderá ainda ser reduzido se o ensaio for realizado em condições de temperatura perfeitamente controlada. Um sistema de controlo de temperatura, para além de permitir um melhor funcionamento do sistema de medição de posicionamento permite ainda manter a resposta do próprio filtro FBG estável em temperatura.

6.4.2 Medição do Ponto de Sintonia

O princípio de funcionamento deste método de interrogação de redes de Bragg, descrito em 3.3, pode ser resumido como a procura do equilíbrio entre as respostas dos dois FBG, sensor e filtro. Se se utilizar o esquema da Figura 3.10, em reflexão, o sinal que chega ao fotodíodo tem um valor máximo quando as duas redes de Bragg estão sintonizadas. No caso do esquema da Figura 3.11, em transmissão, na situação de equilíbrio, ou sintonia, o sinal do fotodíodo atinge um valor mínimo.

6.4.2.1 Resultados de Simulação

Partindo da situação de transmissão, verificou-se, através de simulação, qual a influência de diferentes picos de resposta espectral entre o sensor e o filtro, nomeadamente da reflectividade da rede de Bragg

utilizada para implementação do filtro. Nas simulações são usados os dados de uma resposta espectral real, obtido com o espectrómetro.

São apresentados os resultados obtidos com simulação para dois níveis de reflectividade. O primeiro com 55 %, valor equivalente ao da rede de Bragg utilizada no primeiro ensaio experimental. O segundo com 99 % de reflectividade.

Na Figura 6.27 são mostradas três diferentes posições do varrimento do comprimento de onda da resposta da rede de Bragg do filtro (a azul), num intervalo de 1,4 nm, em torno do valor central do λ_B da rede Bragg sensor (a vermelho). A verde é mostrado o sinal recebido pelo fotodíodo.

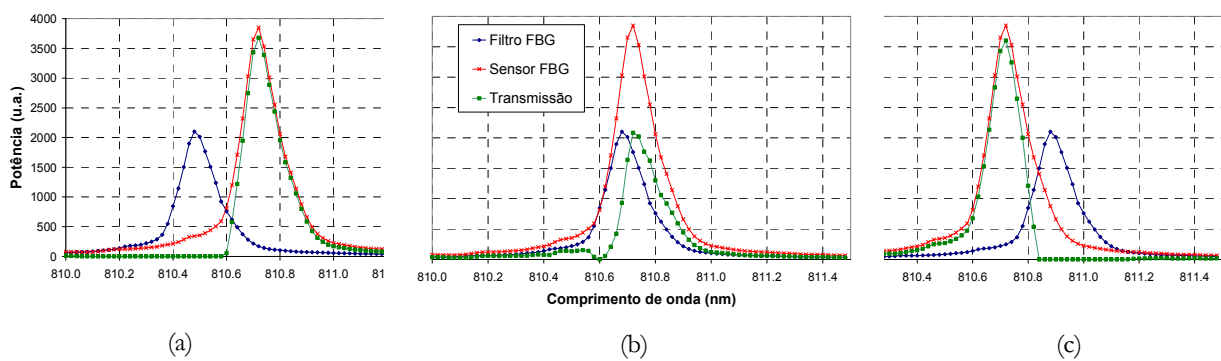


Figura 6.27 Resultados da simulação efectuada com um filtro FBG com 55 % de reflectividade

Para esta situação é mostrado, no gráfico da Figura 6.28, o nível de potência do sinal recebido pelo fotodíodo. As posições assinaladas pelas letras a, b e c, representam as situações ilustradas na Figura 6.27.

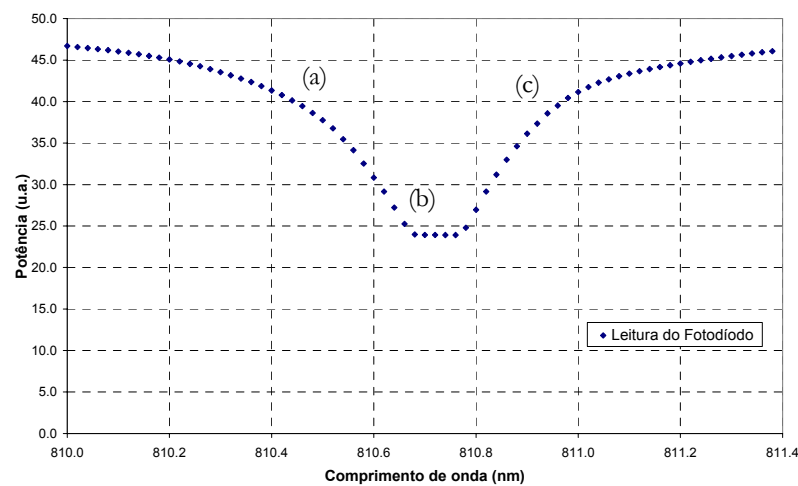


Figura 6.28 Potência do sinal que chega ao fotodíodo. Resultado da simulação efectuada com um filtro FBG com 55 % de reflectividade

Como se observa, na situação de correspondência entre os comprimentos de onda dos FBG sensor e filtro existe um valor mínimo de potência que chega ao fotodíodo. No entanto, este valor mínimo é atingido num patamar, com cerca de 0,1 nm de largura. Isto significa que, para este caso, a resolução de medição é muito baixa, dado que durante um intervalo de 0,1 nm não há qualquer variação na resposta mesmo que a deformação aplicada ao filtro FBG seja alterada.

Na simulação seguinte foi utilizado um valor de 99 % para a reflectividade do filtro FBG. Na Figura 6.29 são mostradas novamente 3 diferentes posições do varrimento em comprimento de onda do filtro FBG. A posição (b) representa um instante imediatamente anterior aos dois comprimentos de onda estarem coincidentes, provocando que a intensidade do sinal que é transmitido pelo filtro FBG seja muito reduzida.

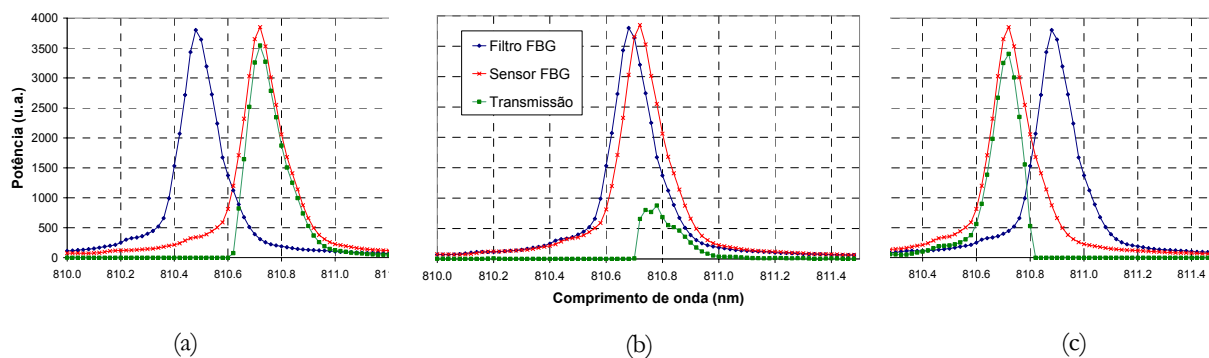


Figura 6.29 Resultados da simulação efectuada com um filtro FBG com 99 % de reflectividade

Como se observa pelo gráfico da Figura 6.30, a potência mínima atingida neste caso é praticamente nula, não se verificando o patamar de potência constante constatado no caso anterior. Assim, a resolução é muito elevada, dependendo apenas da actuação aplicada pelo piezoeléctrico.

A principal conclusão a retirar destes resultados obtidos por simulação é a necessidade das redes de Bragg utilizadas na implementação dos filtros apresentarem a maior reflectividade possível, idealmente de 100%.

6.4.2.2 Resultados Experimentais

O primeiro resultado experimental é obtido com a montagem em transmissão da Figura 3.11. Com a medição do espectro da rede de Bragg usada como filtro (Figura 6.31) verificou-se que este apresenta uma baixa reflectividade, de 55 %.

No entanto, a utilização deste FBG permite a demonstração experimental do tipo da configuração em transmissão e a confirmação da necessidade de FBG's com elevada reflectividade.

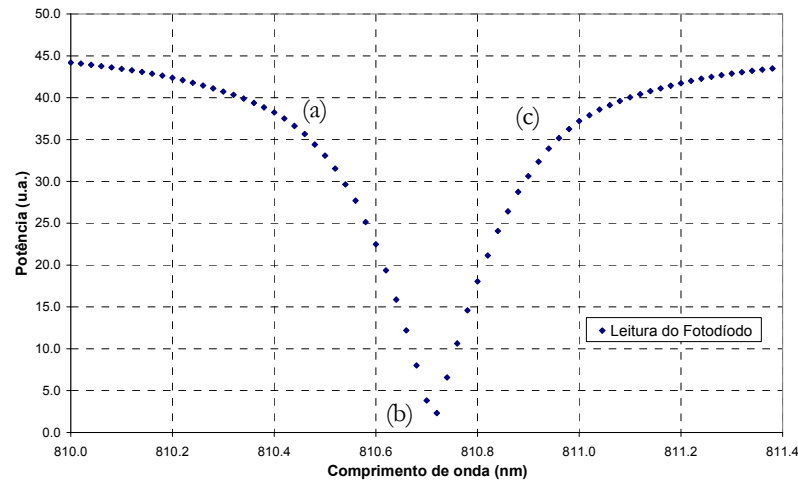


Figura 6.30 Potência do sinal que chega ao fotodiodo. Resultado da simulação efectuada com um filtro FBG com 99 % de reflectividade

O sinal obtido no fotodiodo durante um varrimento em comprimento de onda é convertido para tensão e adquirido para o computador. A Figura 6.32 representa um varrimento em torno do valor central da resposta espectral da rede de Bragg. O valor mínimo detectado corresponde à detecção do ponto de equilíbrio entre o sensor FBG e o filtro FBG. No entanto, e de acordo com os resultados obtidos com a simulação, o ponto mínimo fica disperso num patamar de valores, o que causa uma baixa resolução de medição.

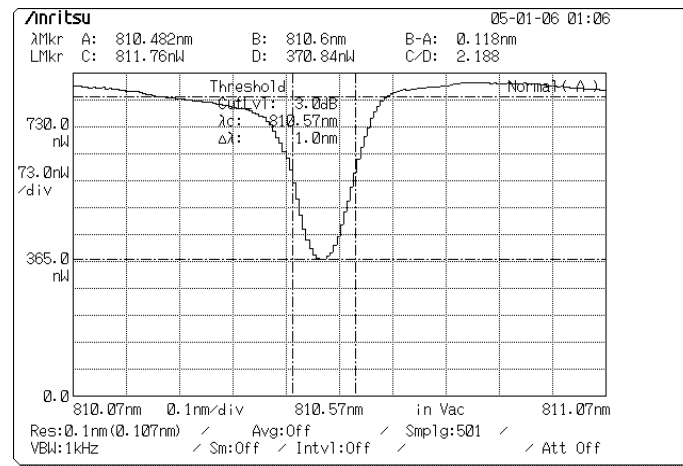


Figura 6.31 Medição do espectro em transmissão do Filtro FBG-1 - Reflectividade 55%

A utilização de um filtro FBG com uma reflectividade de 92 % (Figura 6.33) permite confirmar os melhores resultados obtidos com a utilização de redes de Bragg de elevada reflectividade na implementação dos filtros constituintes deste método de interrogação.

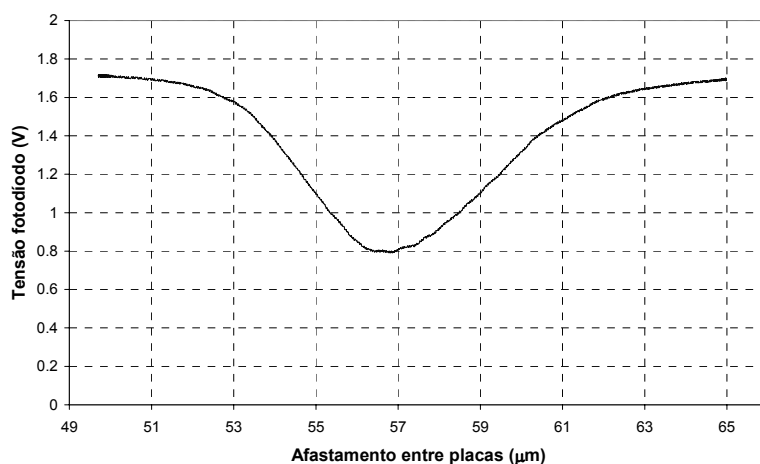


Figura 6.32 Nível de potência recebida pelo fotodiodo, configuração em transmissão

Recorrendo à configuração em reflexão da Figura 3.10 foi ensaiado este novo filtro FBG. Nesta configuração, e na situação de sintonia, o sinal recebido pelo fotodiodo atinge um máximo, ao contrário da configuração em transmissão. Na Figura 6.34 é mostrado um ciclo completo de carga/descarga de aplicação de deformação ao filtro FBG. Como se comprova pelo resultado desta figura, e também pela Figura 6.35, existe um ponto coincidente, quer na carga, quer na descarga, que corresponde à esperada sintonia. A boa definição deste ponto permite a obtenção de uma elevada resolução de medição do sistema de interrogação.

Além do ponto mais elevado de tensão, na situação de sintonia, o gráfico da Figura 6.35 permite confirmar a elevada coerência entre os resultados da medição na carga (aplicação de deformação ao filtro FBG) e a descarga, ou seja, a medição não é influenciada pelo sentido de movimento do actuador piezoeléctrico.

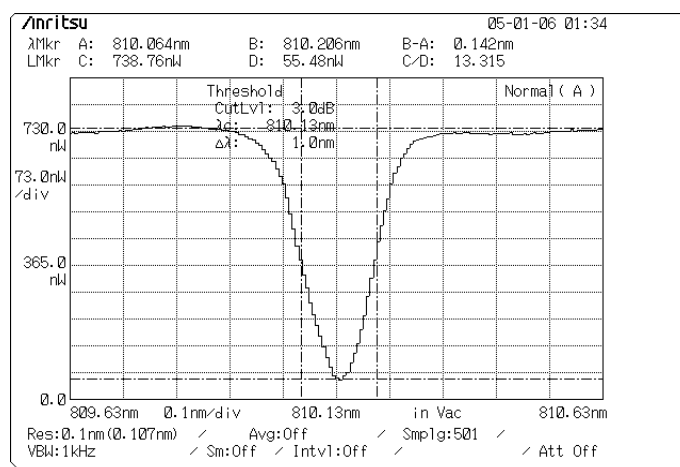


Figura 6.33 Medição do espectro em transmissão do Filtro FBG-2 - Reflectividade 92%

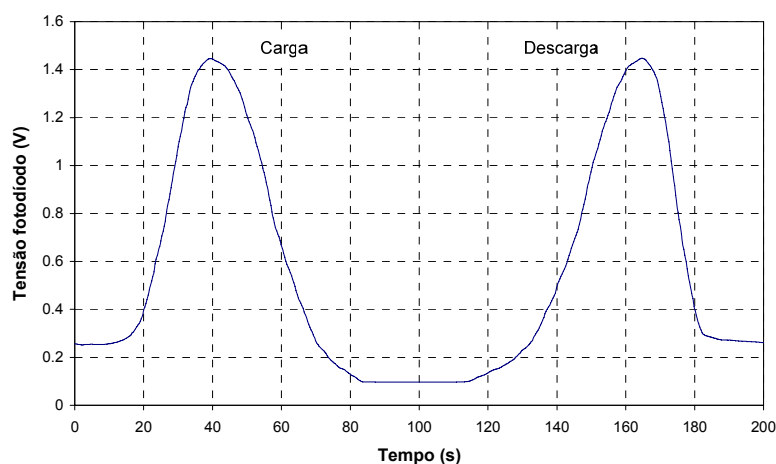


Figura 6.34 Medição do nível de potência recebida pelo fotodiodo
Configuração em reflexão

Uma diferença entre os gráficos da Figura 6.34 e da Figura 6.35 está na grandeza do eixo das abcissas. Enquanto no primeiro caso se pretende mostrar a variação do nível de potência de luz que chega ao fotodiodo com a aplicação de deformação ao filtro, ao longo do tempo (com uma taxa de aquisição de 3 amostras por segundo), no segundo caso é apresentado o valor da tensão medida pelo fotodiodo em função da deformação aplicada.

Como se denota pelo pormenor inserido no gráfico da Figura 6.35, o ponto máximo de tensão no fotodiodo é atingida para a mesma deformação aplicada ao filtro FBG, aos 420 $\mu\epsilon$, com uma resolução melhor do que 1 $\mu\epsilon$.

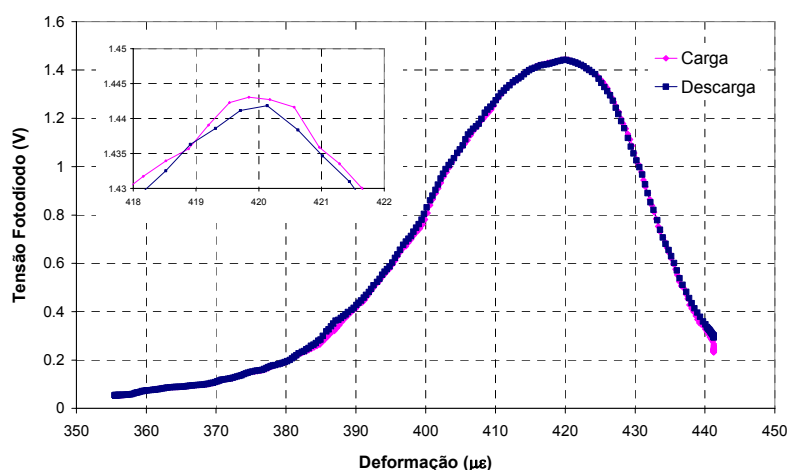


Figura 6.35 Medição do nível de potência recebida pelo fotodiodo - Configuração em
reflexão – Verificação da coerência entre carga e descarga

6.4.3 Medição de Deformação

Após a verificação da operacionalidade de todos os subsistemas que compõem o sistema de interrogação desenvolvido, foram realizados ensaios experimentais de medição de deformação. A Figura 6.36 mostra uma perspectiva do arranjo experimental utilizado na realização dos ensaios.



Figura 6.36 Vista da mesa de ensaios experimentais com o filtro FBG sintonizável

A montagem da Figura 6.37 ilustra as ligações efectuadas para os ensaios de medição da deformação. Para a aplicação de deformação ao sensor FBG é utilizada a plataforma de ensaios e calibração descrita no Anexo C. A configuração da plataforma para este ensaio utiliza uma distância entre pontos de fixação de 99 mm, que permite incrementos de deformação de $1,0 \mu\epsilon$. Este valor garante a calibração do sistema de interrogação na medição de deformação com a resolução pretendida.

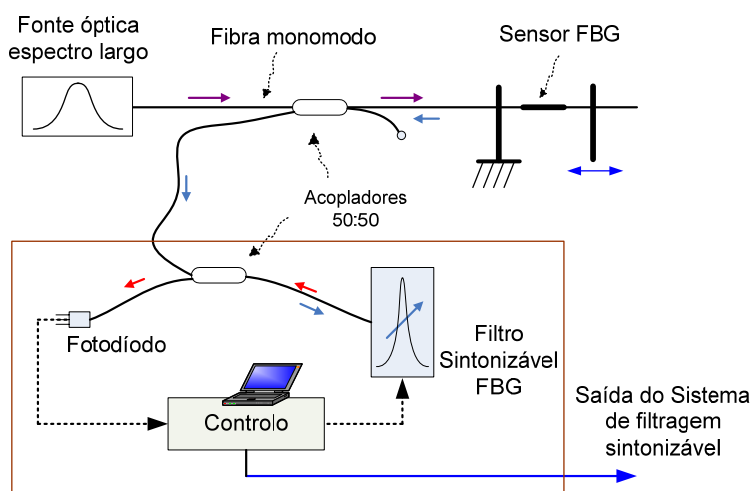


Figura 6.37 Diagrama das ligações utilizadas para o ensaio de medição de deformação

O resultado da medição da deformação aplicada ao sensor de Bragg é mostrado no gráfico da Figura 6.38.

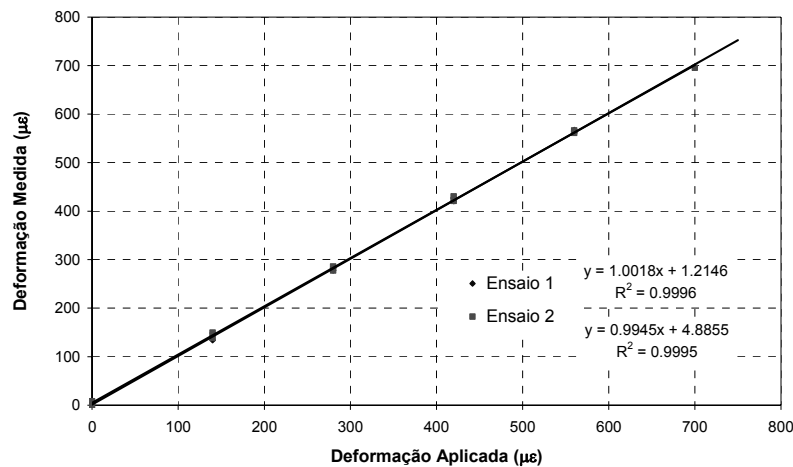


Figura 6.38 Medição da deformação aplicada a um sensor FBG.

No gráfico da Figura 6.38, *Ensaio 1* e *Ensaio 2* representam os dados obtidos com a aplicação de dois ciclos de carga e descarga ao sensor FBG. Como é visível pelas equações que definem as linhas de tendência dos dados dos ensaios (aproximação por regressão linear), o sistema de interrogação apresenta uma resposta muito próxima da linearidade ($r^2 \geq 0,9995$) com um erro absoluto igual a $\pm 5 \mu\epsilon$ que, para a excursão considerada, representa um erro relativo igual a $\pm 0,7 \%$. Uma vez que os ensaios foram efectuados sem qualquer tipo de controlo de temperatura, pode afirmar-se que os erros de medição obtidos encontram-se dentro dos valores aceitáveis para aplicações como a monitorização de estruturas de engenharia civil.

6.5 Conclusão do Capítulo

Neste capítulo é descrito o desenvolvimento de um sistema de interrogação de redes de Bragg baseado num filtro sintonizável, no qual, para além de uma segunda rede de Bragg são utilizados transdutores e actuadores electrónicos. De forma a acomodar a rede de Bragg de filtragem, bem como os restantes componentes, nomeadamente um actuador piezoeléctrico e um sensor capacitivo, foi criada uma estrutura mecânica de precisão capaz de manter todas as necessárias características de medição.

O sistema de medição de posição capacitivo é calibrado através de um interferómetro de Michelson, verificando-se que o seu comportamento aproxima-se a um polinómio de segunda ordem com um coeficiente de correlação elevado, de 0,999996. Verifica-se uma boa repetibilidade de medição, facto que confirma um nível desprezável de erros aleatórios no sistema.

No sistema de interrogação assim criado o equilíbrio, ou ponto de sintonia, entre as duas curvas espectrais do sensor e filtro de Bragg é claramente identificado, o que indica uma boa resolução de medição. Para o conseguir são necessários filtros de Bragg com elevada reflectividade, se possível com valores superiores a 90 %. Estas características, bem como a utilização de dispositivos optoelectrónicos para a actuação e sensorização, permitem a constituição de um sistema de interrogação de baixo custo e elevado desempenho.

No desenvolvimento deste sistema muitos aspectos podem ainda ser evoluídos, nomeadamente: o controlo da sintonia que permita uma elevada taxa de aquisição e também o controlo da temperatura de funcionamento, dado que o seu desempenho é fortemente influenciado por variações térmicas.

APLICAÇÕES DO MÉTODO DE DESMODULAÇÃO BASEADO EM ESPECTRÓMETRO CCD

7.1 Introdução

Além dos ensaios de calibração descritos no Capítulo 4, realizaram-se diferentes ensaios experimentais com o objectivo de avaliar o comportamento, em termos de fiabilidade e robustez, do sistema de instrumentação óptico desenvolvido, baseado num espectrómetro comercial de baixo custo e tecnologia CCD. Assim, alguns dos ensaios foram executados sob condições adversas para o equipamento, nomeadamente as encontradas em estaleiros de grandes obras de engenharia civil.

Sendo elementos intrinsecamente frágeis devido ao material que as constitui, mas também às próprias dimensões, as redes de Bragg em fibra óptica necessitam de serem previamente adaptadas a uma cabeça sensora, antes da sua aplicação para monitorização de estruturas. Durante as aplicações de monitorização de deformação e temperatura foram simultaneamente testadas diversas soluções para o encapsulamento dos sensores de Bragg.

Com um objectivo mais alargado de promover uma investigação interdisciplinar a nível científico e de engenharia, as várias aplicações de monitorização realizadas são inseridas na área das estruturas de engenharia civil. Assim, os ensaios apresentados neste capítulo foram efectuados em conjunto com diferentes instituições, nomeadamente: LABEST - Laboratório da Tecnologia do Betão e do Comportamento Estrutural, ligado à Secção de Estruturas do Departamento de Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto; o Departamento de Física da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto e a Unidade de Optoelectrónica e Sistemas Electrónicos do INESC Porto.

Nas secções seguintes são ilustrados alguns dos exemplos mais significativos, tanto a nível das aplicações como a nível dos próprios resultados obtidos, nomeadamente em comparação com outros sistemas de instrumentação, ópticos e eléctricos.

7.2 Ensaio de Dois Degraus da Bancada do Estádio do Dragão

Um dos primeiros ensaios realizados fora do ambiente laboratorial perfeitamente controlado, no que respeita às condições de temperatura e humidade, e onde todos os anteriores ensaios foram realizados, corresponde ao ensaio estrutural de um par de bancadas do Estádio do Dragão. Nas duas fotografias da Figura 7.1 é visível o posicionamento dos dois degraus numa estrutura de aplicação de deformação, colocada nas instalações do LABEST - FEUP. Embora os ensaios completos a estas estruturas tivessem compreendido diferentes fases de aplicação de deformação às estruturas, o ensaio utilizado para os testes do sistema de instrumentação óptico corresponde a um ensaio dinâmico, onde duas prensas hidráulicas controladas, fixas ao topo da estrutura metálica, pressionam o vão central de cada um dos degraus das bancadas.



(a)



(b)

Figura 7.1 Fotografias do par de bancadas do estádio do Dragão montadas na estrutura de deformação estrutural

7.2.1 Cabeça Sensora do Tipo «Clip» - Caracterização e Calibração

Para a medição de deslocamentos em superfícies de estruturas de engenharia civil é utilizado um transdutor que converte o deslocamento verificado entre dois pontos de ancoragem, localizados nas suas extremidades, em deformação de um sensor de Bragg. Este transdutor foi desenvolvido e caracterizado num trabalho conjunto com os colegas do Departamento de Engenharia Civil da FEUP [Alves, 2003; Félix, 2004].

A conversão de deslocamento em deformação é realizada por uma placa metálica de aço com efeito de mola, instalada entre duas barras de alumínio. A disposição e dimensões (em mm) deste transdutor é mostrado na Figura 7.2. Para a validação do transdutor óptico foram construídos dois protótipos similares, um deles com um único sensor de Bragg em fibra óptica e outro que utiliza 4 extensómetros resistivos, formando uma ponte de Wheatstone completa. Todos os sensores, óptico e eléctricos, são

colados à superfície metálica da mola com cola à base de acrilatos (conhecida como super-cola ou cola rápida).

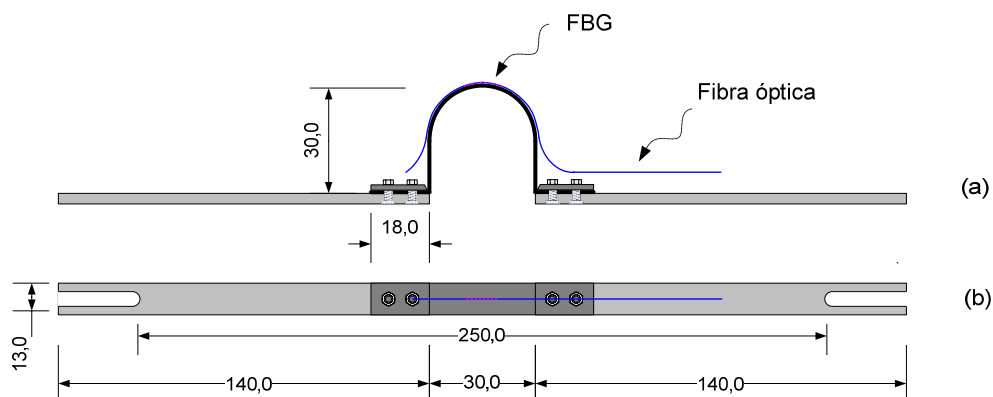


Figura 7.2 Representação esquemática do transdutor de posição com fibra óptica (dimensões em mm). (a) Vista lateral; (b) Vista superior

A calibração dos dois transdutores assim constituídos foi efectuada através de testes com um dispositivo mecânico de posicionamento com uma resolução de posição de $1\ \mu\text{m}$ (Figura 7.3). Os vários ensaios de comparação, efectuados em condições de temperatura condicionada, confirmaram a esperada linearidade da resposta, numa gama de medição alargada de $\pm 2000\ \mu\text{m}$.

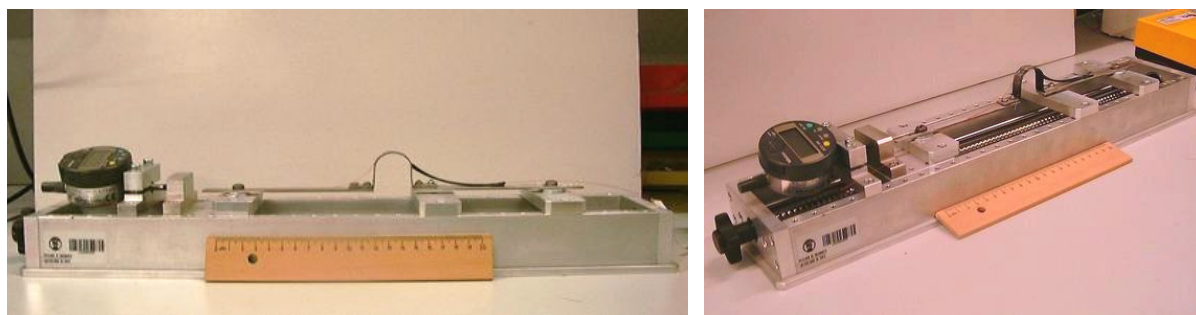


Figura 7.3 Imagens do transdutor de posição desenvolvido, montado na bancada de ensaios de calibração

Nas Figura 7.4 e Figura 7.5 são representados dois gráficos relativos ao ensaio de calibração do transdutor eléctrico, composto por 4 extensómetros resistivos colocados sobre a mola de aço com a mesma orientação do sensor de Bragg. O ensaio consiste na aplicação de um ciclo de carga/descarga com uma excursão de $\pm 2000\ \mu\text{m}$, em intervalos de $400\ \mu\text{m}$. Os valores das medições correspondem à leitura efectuada por uma ponte de Wheatstone completa, e registados por um sistema de aquisição comercial com conversor A/D de 12 bits [Datataker, 2005].

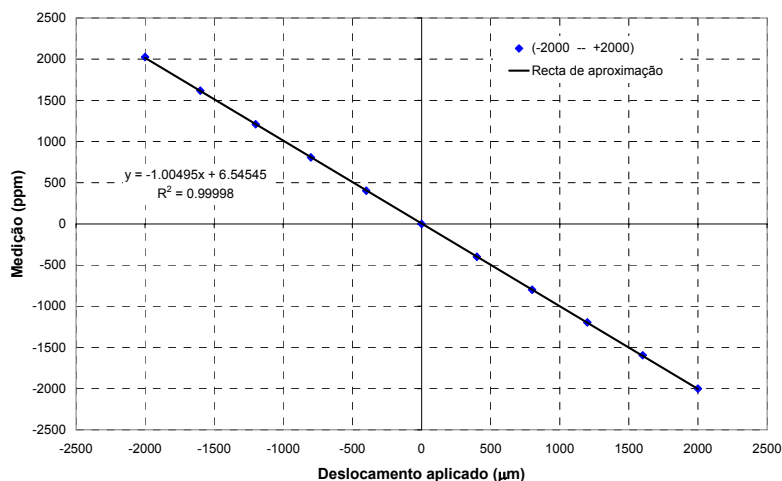


Figura 7.4 Resultado de calibração do transdutor eléctrico – excursão total (-2000 - +2000 µm)

Pela análise dos gráficos é possível verificar a elevada linearidade dos resultados, tanto pelo coeficiente de correlação encontrado, $R^2 = 0,99998$, como pelos desvios de linearidade obtidos, calculados através das diferenças entre os resultados experimentais e a recta de aproximação, que nunca ultrapassam os 10 ppm, ou seja, $\pm 0,25\%$ da excursão total.

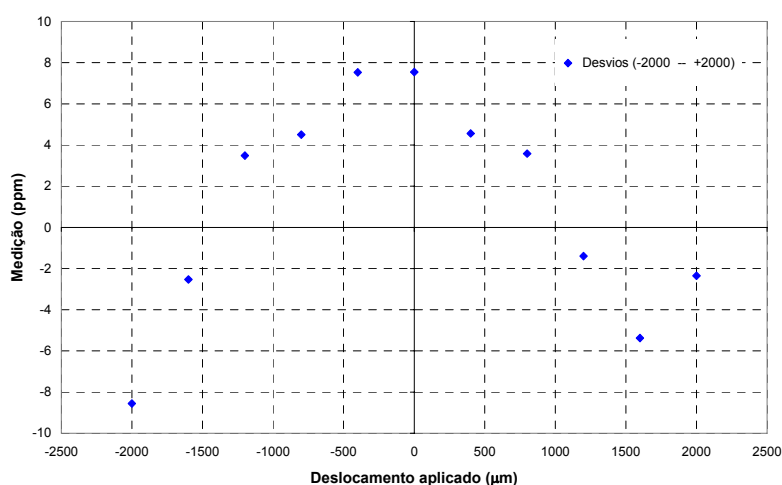


Figura 7.5 Desvios calculados entre as medições efectuadas com o transdutor eléctrico e a recta de aproximação

Os ensaios de calibração realizados com o transdutor equipado com o sensor óptico foram em tudo semelhantes aos realizados com o transdutor equipado com os sensores eléctricos. Através dos resultados obtidos verifica-se, no entanto, uma diferença de sensibilidade em torno do ponto médio de relaxação, explicada por problemas na aderência do sensor de Bragg à placa metálica em curva (Figura 7.2 e Figura 7.3). Assim, foram traçadas duas curvas de linearização sobre o mesmo gráfico, mostrado na Figura 7.6.

Uma das rectas é calculada com o conjunto de pontos obtidos para as deformações positivas e a outra recta com os pontos relativos às deformações negativas.

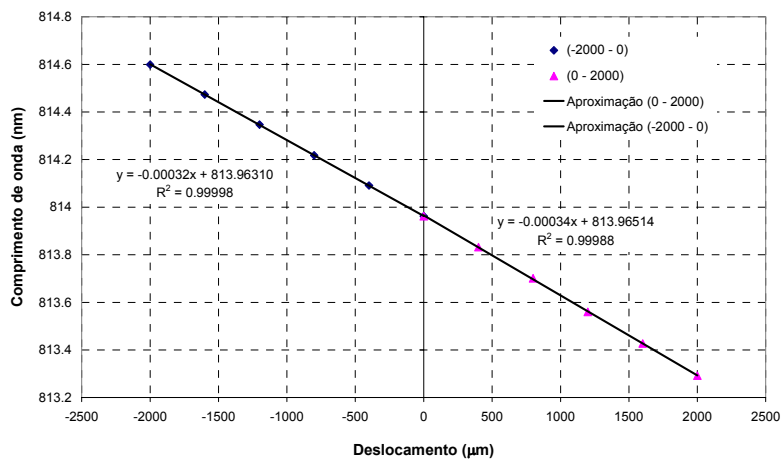


Figura 7.6 Resultados das medições do transdutor óptico com variação de posicionamento entre - 2000 e + 2000 μm

Os erros de linearidade encontrados para esta situação, calculados de forma semelhante que para o transdutor eléctrico, mas agora em relação às duas rectas, apresentam valores que variam entre ± 3 pm (Figura 7.7). Este valor, em comprimento de onda, e medido pelo sistema de interrogação desenvolvido, corresponde a um desvio máximo, em deformação, de $\pm 4,5$ $\mu\epsilon$. Considerando a variação total da deformação medida, de 2050 $\mu\epsilon$, para a excursão total aplicada, de 4000 μm , corresponde a um erro relativo de $\pm 0,25$ %.

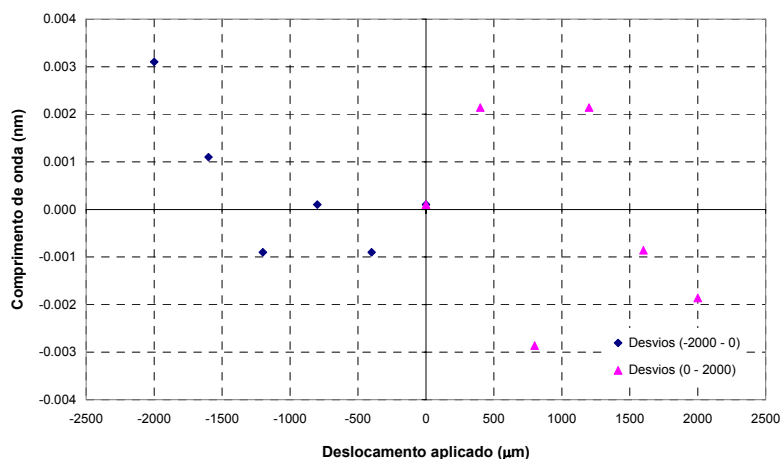


Figura 7.7 Desvios calculados entre as medições efectuadas com o transdutor óptico e as duas rectas de aproximação

Verifica-se assim a obtenção de um erro da mesma ordem de grandeza do obtido com o transdutor eléctrico. No entanto, é aqui de realçar que se está a comparar o resultado obtido com um único sensor óptico com uma ponte completa de 4 extensómetros resistivos auto compensados em temperatura.

7.2.2 Ensaio Dinâmico da Estrutura de Engenharia Civil

Dentro da análise estrutural realizada aos dois degraus da bancada do estádio, que compreendeu diferentes ensaios, foi realizado um ensaio dinâmico de aplicação de pressão sobre os tabuleiros dos degraus de forma a provocar a flexão dos mesmos. A pressão, colocada em pontos específicos da estrutura, é aplicada por duas prensas hidráulicas controladas. Os dois sensores de deslocamento, um equipado com sensores eléctricos e outro com sensor de Bragg, apresentados na secção anterior, foram instalados na face lateral da secção central traseira do degrau colocado na posição superior (Figura 7.8). Foram aparafusados directamente na superfície da estrutura como mostrado na Figura 7.8 (b), de forma a obter-se resultados comparáveis.



Figura 7.8 Fotografias de dois transdutores tipo “clip”, instalados na secção central traseira de um dos degraus da bancada

Junto à estrutura, e igualmente aos sensores, foi colocado o posto de observação e registo, constituído pelo sistema de interrogação de sensores de Bragg desenvolvido. Na Figura 7.9 pode observar-se este posto de observação, notando a dispersão sobre a mesa de todos os elementos optoelectrónicos constituintes do sistema de interrogação, confirmando que este ensaio foi realizado ainda antes de ter sido desenvolvido o protótipo mostrado na secção 4.4.



Figura 7.9 Imagem do posto de observação utilizado durante o ensaio dos degraus da bancada

Os resultados do ensaio dinâmico, registados com uma taxa de 1 aquisição por cada dois segundos, são ilustrados na Figura 7.10. Correspondem à aplicação de 9 ciclos de carga/descarga consecutivos, de 50 s cada. As leituras dos dois sensores, depois de se proceder à respectiva calibração, apresentam a medição da posição dos pontos de ancoragem dos transdutores.

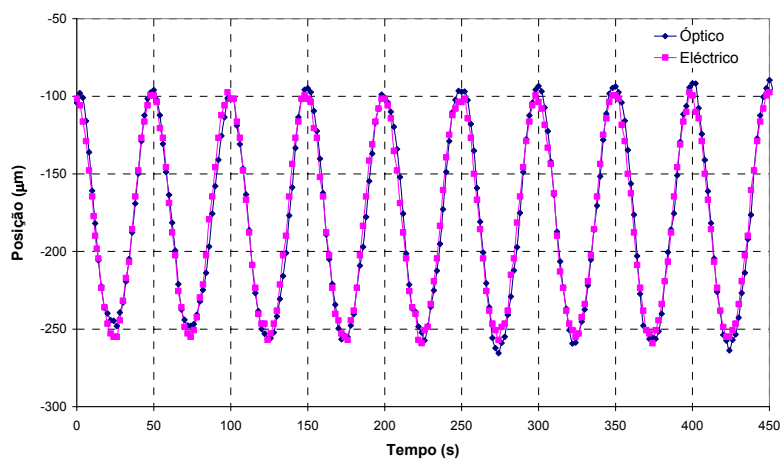


Figura 7.10 Gráfico de comparação de resultados entre os dois transdutores – ensaio de carga de um degrau da bancada

A comparação de resultados revela uma elevada correlação entre as medições obtidas com o transdutor óptico e o transdutor eléctrico. A correlação pode ser avaliada pelos desvios encontrados entre as medições dos dois transdutores (Figura 7.11). Estes desvios, compreendidos entre $\pm 12 \mu\text{m}$ representam um erro relativo inferior a $\pm 5 \%$ da excursão máxima verificada no ensaio ou de $\pm 0,6 \%$, se for considerada a excursão total dos transdutores, de $\pm 2000 \mu\text{m}$, e para a qual foram calibrados.

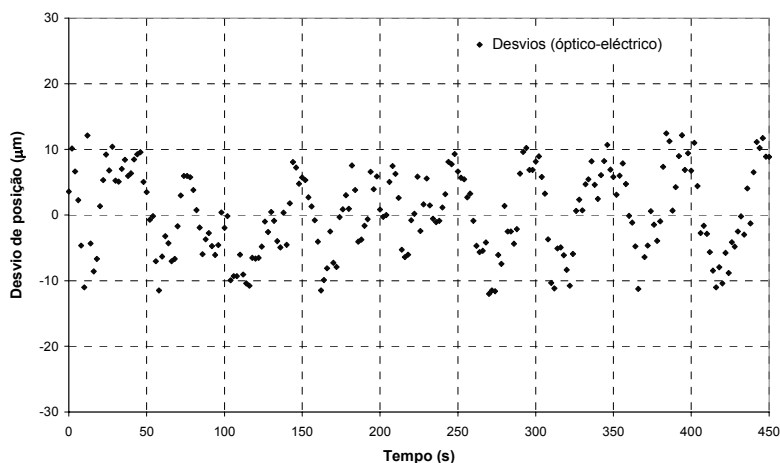


Figura 7.11 Desvios de posição entre as leituras do sensor óptico e o sensor eléctrico

7.3 Projecto de Investigação POCTI

O projecto POCTI/ECM/36047/99 “Monitorização de Estruturas com Base em Sensores de Bragg em Fibra Óptica”, financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia, teve como objectivo o estudo do comportamento de estruturas de betão, nomeadamente através da sua monitorização com sensores de Bragg em fibra óptica. O projecto integrou uma tarefa denominada “Desenvolvimento de uma unidade de interrogação e processamento de sinal” que englobou parte do trabalho desta tese de doutoramento. Para a concretização dos ensaios experimentais foi realizado um demonstrador de betão armado com a forma de um pórtico de 1,5 m de altura e 3,2 m de comprimento, no qual foram distribuídos vários sensores ópticos e eléctricos, de deformação e temperatura. A geometria e respectivas dimensões deste demonstrador são mostradas na Figura 7.12.

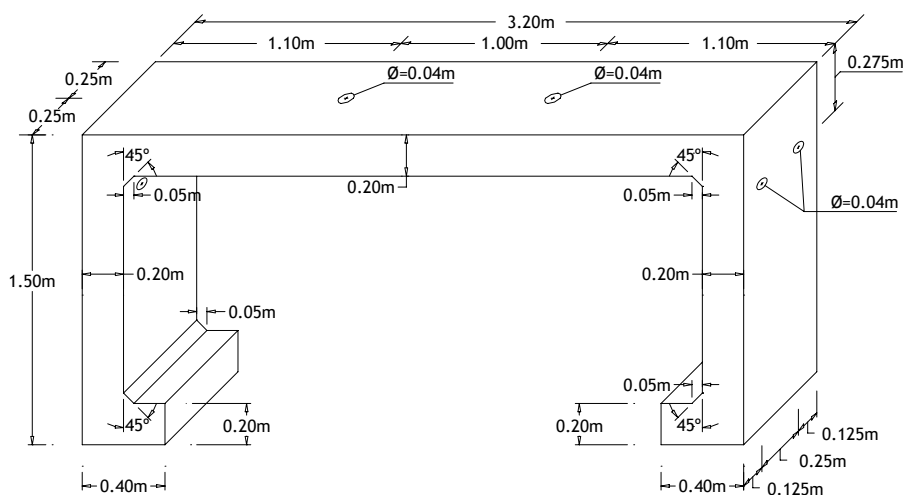


Figura 7.12 Geometria e dimensões gerais do demonstrador

Os vários sensores instalados no demonstrador estão localizados em cinco secções predefinidas, denominadas S1 a S5, como mostra a Figura 7.13. Diferentes tipos de sensores estão instalados, identificados na figura por siglas e numeração respectivas. Estas identificações representam nomeadamente: EB – extensómetro eléctrico de embeber; EC – extensómetro eléctrico de colar (na própria armadura de aço); AO, OB e OC – extensómetros ópticos, colocados de acordo com a posição transversal (A à esquerda, B ao centro e C à direita – desenho central da Figura 7.13). A numeração utilizada corresponde à localização em torno do pórtico, em rotação da esquerda para a direita.

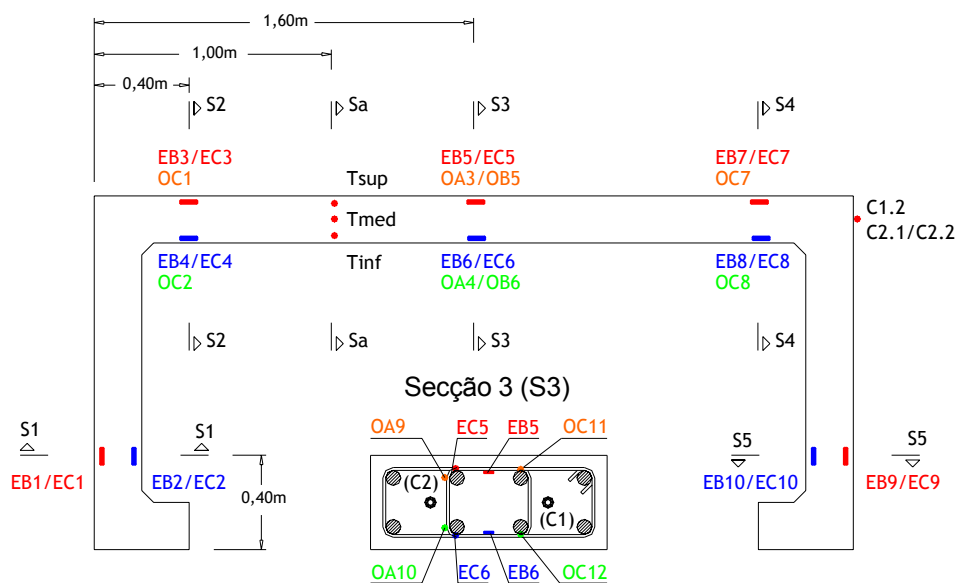


Figura 7.13 Localização das secções instrumentadas no demonstrador;
posicionamento dos sensores de deformação na secção S3

De todos os sensores utilizados para monitorização, foram instalados 4 sensores de deformação e 2 de temperatura, todos na secção central, S3 (Figura 7.13 e Figura 7.15), com o propósito de avaliar o comportamento do sistema de interrogação “alternativo”, como ficou conhecido no âmbito do projecto, nomeadamente a nível de fiabilidade e robustez. A listagem destes sensores, bem como dos respectivos comprimentos de onda de Bragg (aproximados) utilizados, é mostrada na Tabela 7.1.

Tabela 7.1 Sensores de Bragg (“alternativos”) e respectivos comprimentos de onda

Sensor	OA9	OA10	OA10(I)	OC11	OC12
λ_B (nm)	810	815	810	815	815

Os sensores OA9 e OA10 utilizam o mesmo tipo de encapsulamento, através da cabeça sensora de alumínio descrita na secção 4.3.3. No entanto, apenas o sensor OA10 utiliza duas redes de Bragg para a monitorização simultânea de deformação e temperatura. A distinção entre o sensor de deformação e temperatura é feita com a letra (T), que representa o sensor de temperatura. Na Figura 7.14 é mostrado o pormenor das duas redes de Bragg no mesmo tramo de fibra óptica, separadas por apenas 2 cm. Outro pormenor importante é a protecção utilizada para a ligação do *patchcord* conectorizado à fibra com as redes de Bragg. Esta protecção deve ser capaz de proteger a fibra óptica durante a fase de instalação na estrutura, mas principalmente durante a betonagem, que representa sempre o período mais crítico da instalação dos sensores.

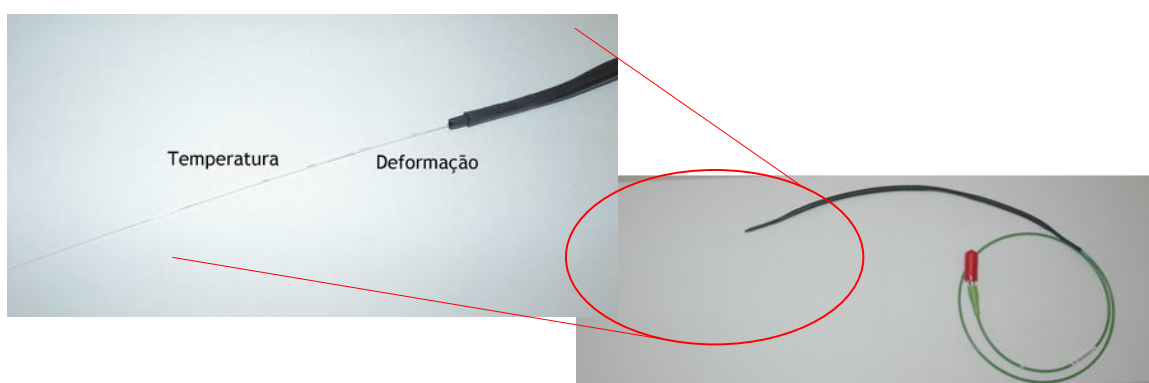


Figura 7.14 Sensores de Bragg em fibra para monitorização de deformação e temperatura

Os sensores OC11 e OC12 são dois sensores de Bragg colados directamente à armação metálica da estrutura a monitorizar.

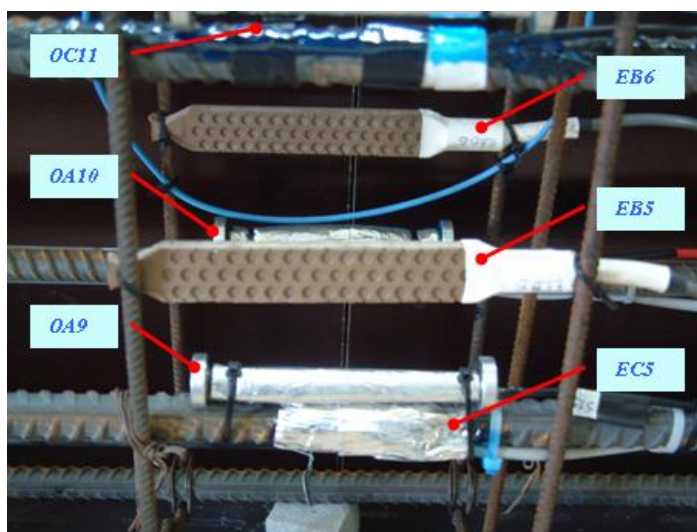


Figura 7.15 Imagem da instalação dos vários sensores na secção 3 (S3)

Para criar a superfície lisa necessária à instalação dos sensores de colar (OC11 e OC12) foram previamente retiradas as nervuras dos varões de aço com uma rebarbadora e posteriormente lixada com uma folha de lixa. A colagem da fibra foi feita com a resina epóxica utilizada na colagem dos restantes extensómetros eléctricos e ópticos de colar. Esta resina azul é visível na Figura 7.15, correspondente à localização dos sensores instalados na secção 3.

Na Figura 7.16 é visível o demonstrador, numa fase anterior à betonagem, onde todos os sensores já se encontram instalados nas respectivas secções. Ao fundo, está colocado o posto de observação (PO) utilizado para a monitorização da estrutura. É composto pelo sistema de interrogação e por um armário de protecção, dando-lhe dessa forma a robustez necessária para que a monitorização possa manter-se durante longos períodos.

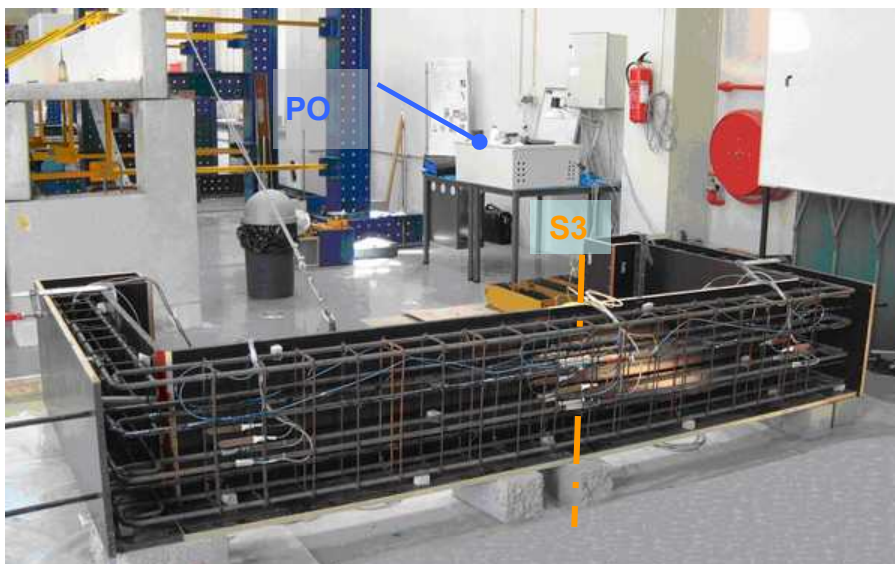


Figura 7.16 Vista geral do demonstrador, em particular da secção 3 (S3), e do posto de observação (PO) antes da betonagem

Após a betonagem (Figura 7.17) foi verificado o funcionamento de todos os sensores “ópticos alternativos”¹⁶. Na figura é também visível o pormenor da saída dos cabos (ópticos e eléctricos) do interior da estrutura.

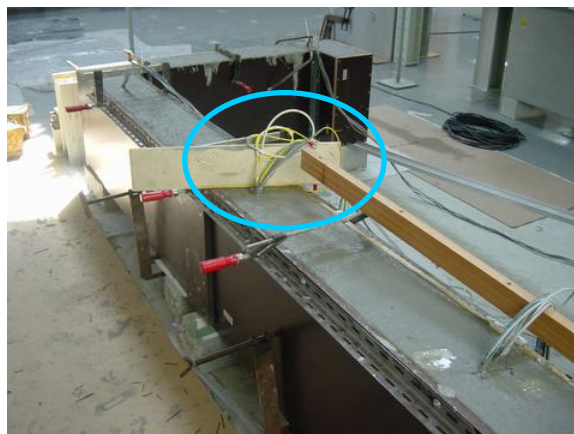
7.3.1 Aplicação de Pré-Esforço

A última fase da construção do demonstrador corresponde à aplicação de pré-esforço à estrutura de betão armado [Félix, 2004].

¹⁶ Por ser uma fase de extrema violência para os sensores, a fase que corresponde a verter o betão para o interior da cofragem é a mais crítica durante a vida útil dos sensores.



(a) Vista geral



(b) Pormenor dos cabos de ligação à secção 3

Figura 7.17 Vistas do demonstrador após a betonagem e durante o período de secagem

A aplicação de pré-esforço, além de ser monitorizada com o sistema de instrumentação óptico desenvolvido neste trabalho foi também registada pelos sensores eléctricos. Esta monitorização permitiu a avaliação do comportamento do sistema óptico por comparação dos resultados obtidos com o sistema de instrumentação eléctrica. O pré-esforço é aplicado pelo traccionamento de dois cordões que atravessam longitudinalmente toda a laje superior do pórtico (Figura 7.18). Assim, o efeito esperado é a compressão desta placa de betão, bem como dos sensores de deformação que no seu interior se encontram.

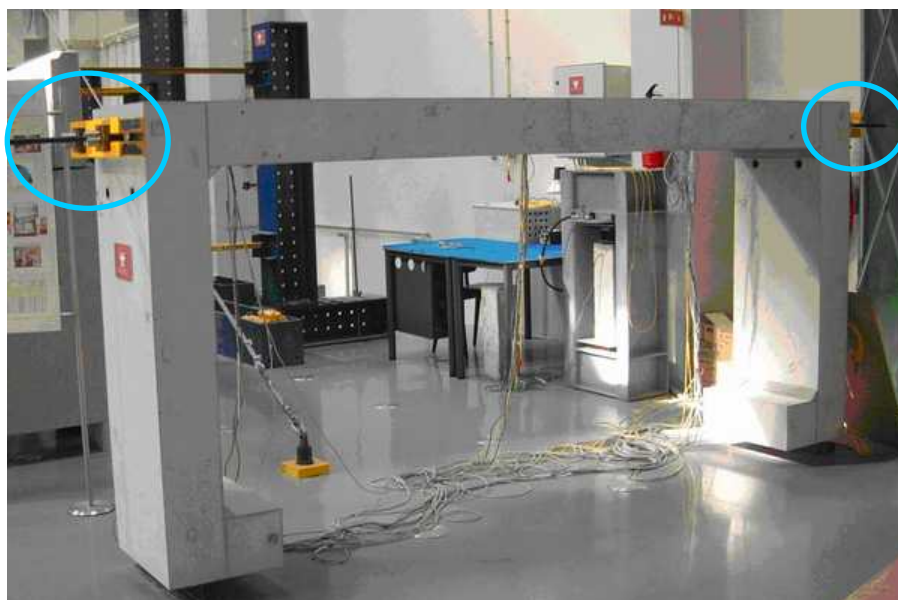


Figura 7.18 Vista do demonstrador antes da aplicação do pré-esforço. Pormenores dos cordões de aplicação do pré-esforço

Dado o sistema de interrogação desenvolvido permitir apenas a multiplexagem em comprimento de onda, e por existirem unicamente dois comprimentos de onda distintos nos quais os sensores de Bragg foram inscritos, optou-se por utilizar o sensor OA10 nesta monitorização. Desta forma foi registada a deformação na secção 3, bem como a temperatura, através de OA10(T).

A comparação dos resultados é feita directamente com o extensómetro eléctrico EC6, que se encontra colado na mesma localização do OA10 (Figura 7.13). É também apresentado o resultado obtido com o EC5 que, por estar colocado à estrutura na mesma linha transversal, mas junto à face superior, regista uma variação relativa semelhante aos EC5 e OA10, colocados junto à face inferior, embora a um nível inferior (Figura 7.19).

No gráfico da Figura 7.19 é ainda mostrado o registo de temperatura do sensor OA10(T). Verifica-se que este apresenta uma variação periódica e decrescente, também registada nos resultados de deformação¹⁷. Não havendo nenhum outro sensor de temperatura em funcionamento na altura do ensaio não é possível tirar outras conclusões sobre este efeito. No entanto, através de computação é possível fazer a compensação da variação registada nos resultados de deformação, o que para a aplicação em causa é fundamental.

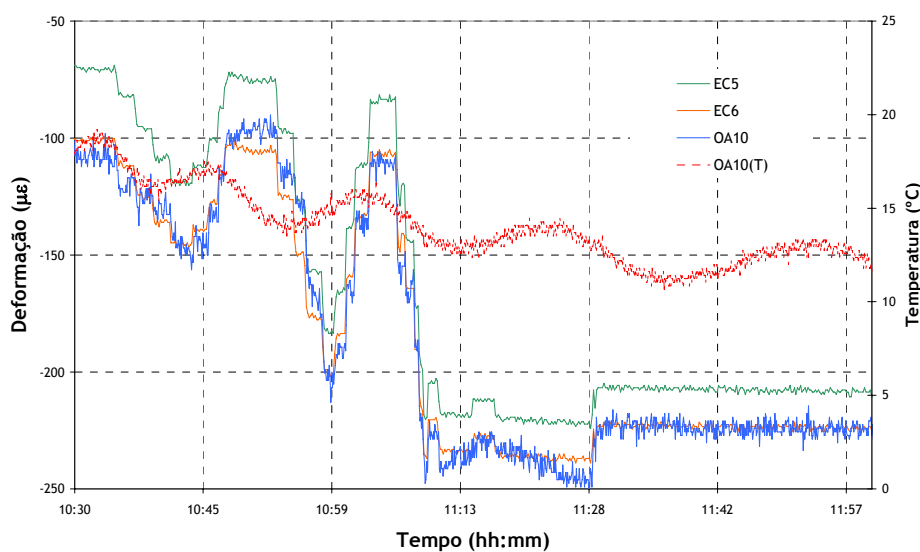


Figura 7.19 Resultado da monitorização durante a aplicação de pré-esforço ao demonstrador – comparação com os sensores eléctricos

A comparação de resultados entre os três registos de deformação obtidos confirma a boa prestação do sistema óptico ao verificar-se uma grande correlação entre o resultado do sensor OA10 com os dos dois

¹⁷ Esta variação não é notória nos resultados de deformação apresentados graficamente porque os valores mostrados são previamente compensados em temperatura.

extensómetros eléctricos. Ainda assim, verificam-se alguns desvios e um nível anormal de ruído, que podem ser explicados pela vibração provocada pelo compressor da máquina de aplicação do pré-esforço. Na altura em que este ensaio foi realizado o sistema de despolarização (apresentado no Capítulo 5) ainda não estava em funcionamento, não havendo portanto eliminação das perturbações mecânicas exercidas sobre a fibra óptica. Ainda assim, os desvios máximos verificados não ultrapassam os 30 $\mu\epsilon$, que significa um desvio relativo de 1,5 % para a excursão máxima permitida pelo sensor de 2000 $\mu\epsilon$.

7.4 Projecto SMARTE

O projecto SMARTE foi um projecto de investigação que decorreu entre Janeiro de 2003 e Dezembro de 2004, financiado pela Agência de Inovação. Os parceiros de projecto, além do Departamento de Electrotecnia, foram também o Departamento de Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Unidade de Optoelectrónica e Sistemas Electrónicos do INESC Porto e a Brisa. O projecto compreendia a monitorização de uma estrutura de engenharia civil, no caso uma ponte nova sobre o rio Sorraia, da auto-estrada A13 (Figura 7.20 e Figura 7.21). Englobou a instalação de diferentes tipos de sensores, tanto ópticos como eléctricos, para a medição de diferentes grandezas físicas, como deformação, temperatura, pressão e inclinação.

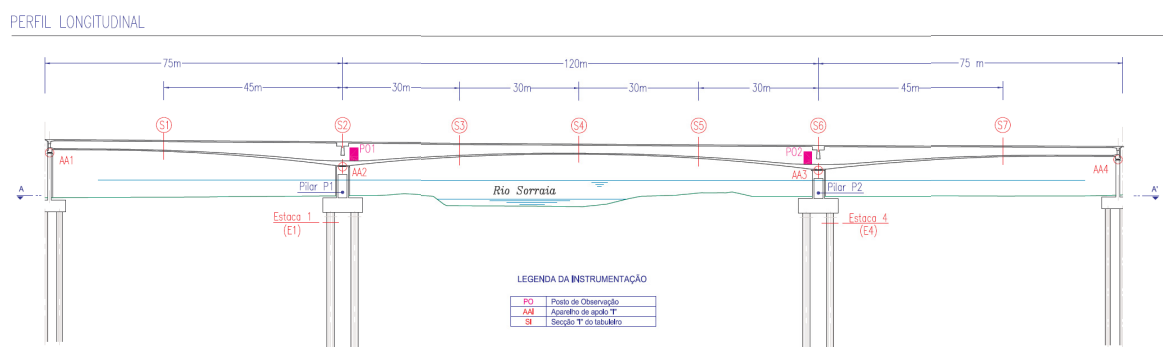


Figura 7.20 Perfil longitudinal da ponte sobre o rio Sorraia, monitorizada por sensores ópticos



Figura 7.21 Imagem da ponte e viaduto da A13, sobre o rio Sorraia

No projecto SMARTE, a monitorização através do sistema de interrogação desenvolvido durante o trabalho desta tese representava a oportunidade de explorar novos métodos de instrumentação. Assim, a monitorização efectiva da ponte está a cargo de dois outros sistemas de instrumentação, um eléctrico e um óptico, também com sensores de Bragg.

No âmbito do trabalho da tese, o objectivo passa pela validação experimental da unidade desenvolvida em ambiente extra laboratorial, nomeadamente nos aspectos da fiabilidade e robustez. Para o efeito, foram definidos pontos estratégicos para a colocação dos sensores ópticos a serem interrogados pelo sistema que, internamente ao projecto, ficou conhecido como «Óptico Alternativo – OA» dada a existência de outro sistema óptico instalado na mesma obra. Os sensores ficaram instalados em duas secções da ponte, S2 e S4, indicadas na Figura 7.20, a primeira sobre o pilar Norte (à esquerda da figura) e a segunda a meio vão do tabuleiro da ponte. A localização dos sensores instalados nestas mesmas secções é indicada nas Figura 7.22 e Figura 7.23.

7.4.1 A Cabeça Sensora

A cabeça sensora para este projecto foi projectada e desenvolvida para ser capaz de medir deformações quando embebida na estrutura de betão da ponte. Assim, e sendo conhecida a heterogeneidade do betão, foi definido como comprimento mínimo para a cabeça 50 cm. A sua construção permite que as forças aplicadas ao sensor, que o deformam, sejam apenas aplicadas nas extremidades da cabeça sensora.

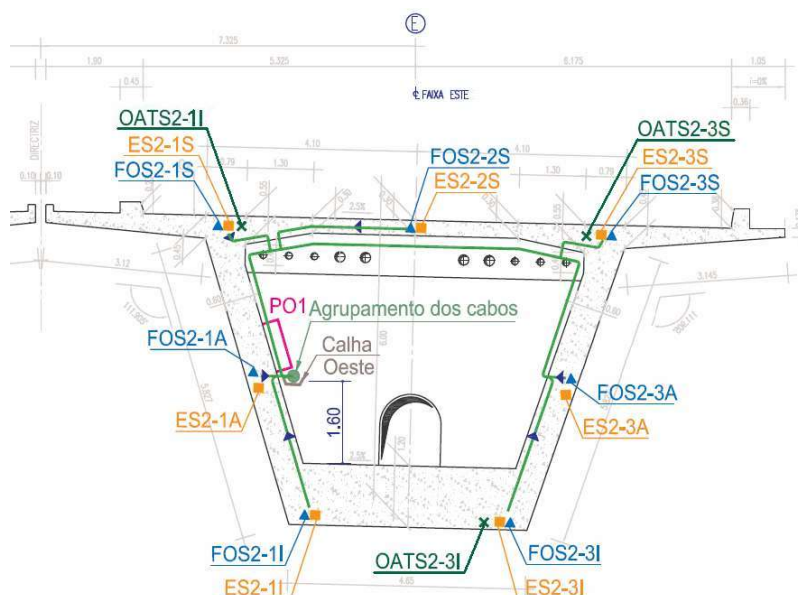


Figura 7.22 Pormenor da instalação dos vários sensores na Secção S2. OAT – Sensor de deformação Óptico Alternativo com compensação de Temperatura. ES – Sensor de deformação Eléctrico. FO – Sensor de deformação em fibra óptica

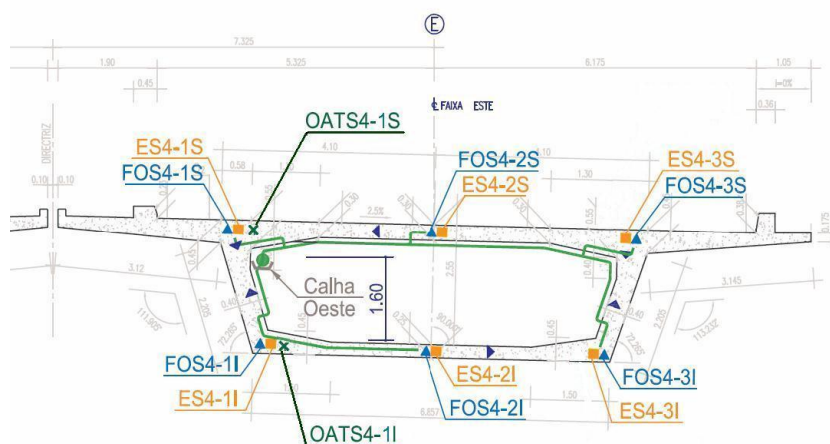


Figura 7.23 Pormenor da instalação dos vários sensores na Secção S4

Após vários ensaios experimentais, a opção recaiu numa cabeça formada por uma barra de resina epóxica com 50 cm de comprimento, onde no seu interior se encontram embebidos os vários sensores, eléctricos e ópticos, para medição de deformação e temperatura. As extremidades da barra, além de um diâmetro superior, são constituídas por fios de carbono, aglomerados pela mesma resina epóxica constituinte da secção central, que lhe confere maior rigidez. Na Figura 7.24 é ilustrada a forma como os vários sensores ficam colocados no interior da cabeça sensora, de acordo com o plano definido na Figura 7.25¹⁸.

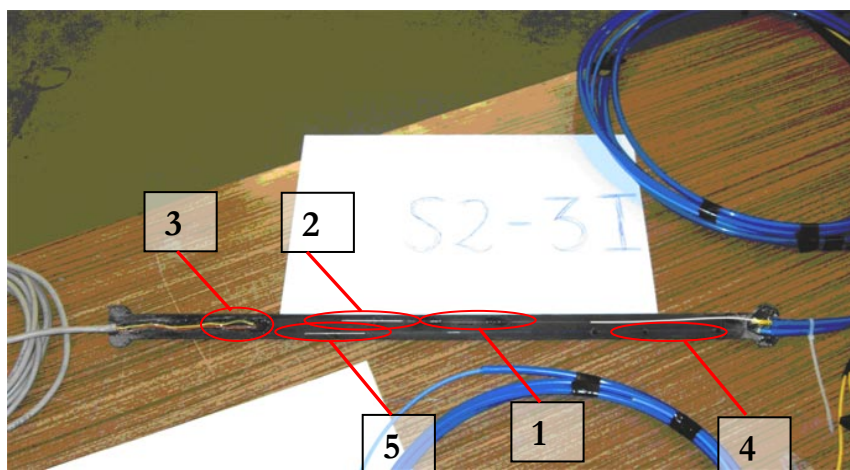


Figura 7.24 Vista geral da cabeça sensora S2-3I durante o processo construtivo

Todos os sensores são instalados diametralmente ao centro e ficam embebidos directamente na própria resina constituinte da barra quando é feita a junção das duas metades da barra. Os sensores ópticos de temperatura, em ambos os sistemas, foram implementados da mesma forma: a rede de Bragg em fibra

¹⁸ Exemplo da cabeça a instalar na secção S2, posição 3I (posições definidas nos desenhos do projecto da ponte).

óptica fica introduzida no interior de um tubo metálico capilar e depois colada em ambas as extremidades de forma a não sofrer qualquer deformação do meio envolvente.

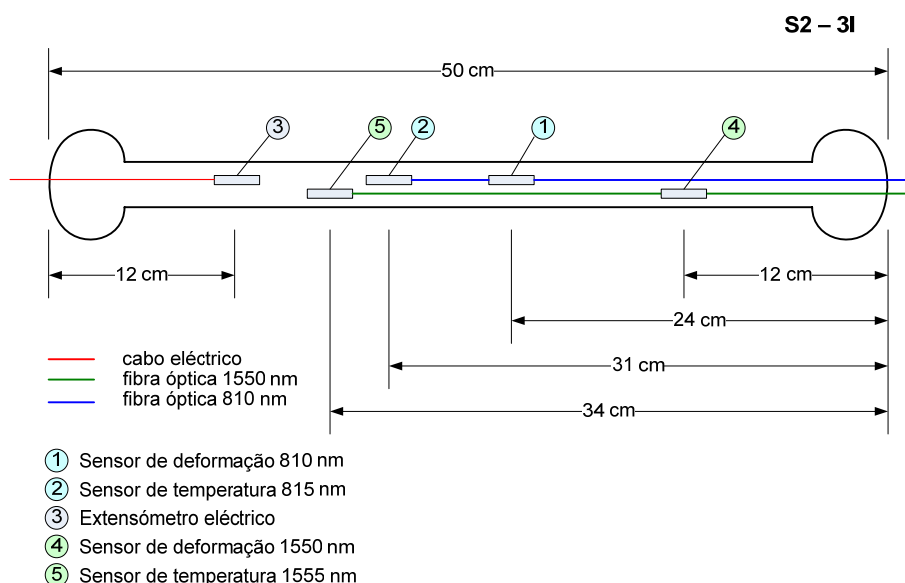


Figura 7.25 Geometria e localização dos sensores de deformação e temperatura na cabeça sensora S2-3I

O aspecto final da cabeça sensora depois de terminada e antes de ser aplicada em obra é ilustrada na Figura 7.26. A zona central da cabeça (entre extremidades) é envolvida em filme de *teflon* de forma a reduzir ao mínimo o atrito entre a cabeça sensora e o betão onde esta fica embebida. Assim, toda a força exercida sobre a cabeça sensora é apenas aplicada nas suas extremidades.



Figura 7.26 Imagem de uma cabeça sensora antes de instalada em obra

7.4.2 Ensaios Experimentais de Calibração

Antes da instalação dos sensores na própria estrutura a monitorizar foram realizados ensaios conjuntos de calibração das cabeças sensoras, que permitiram avaliar e comparar o funcionamento dos vários sensores instalados nas cabeças sensoras. Os ensaios efectuados são de tracção: mantendo o sensor

suspenso por uma das extremidades, são aplicadas massas calibradas de 5 kg na outra extremidade até um máximo de 90 kg. Desta forma, o sensor é traccionado em patamares e em ciclos de carga/descarga.

O gráfico da Figura 7.27 ilustra as respostas de três sensores de deformação a dois ciclos de carga/descarga aplicados à mesma cabeça sensora. A taxa de aquisição utilizada é de 1 amostra por cada 2 segundos.

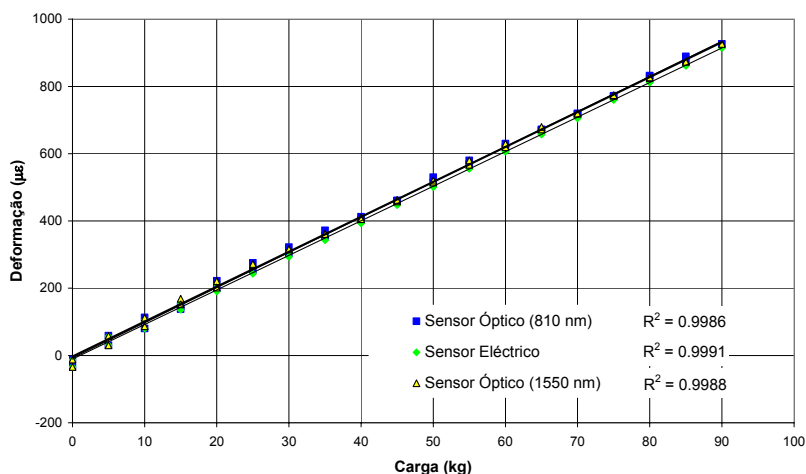


Figura 7.27 Ensaio de calibração de OATS4-1I. Aplicação de 2 ciclos de carga/descarga

Através do gráfico da Figura 7.27 verifica-se a boa correlação dos dados obtidos com os três sensores instalados internamente. Os erros de linearidade verificados para qualquer um dos sistemas de instrumentação é semelhante e $\approx \pm 2\%$.

No entanto, foram verificadas neste ensaio, bem como na generalidade dos resultados de calibração de todos os sensores, ligeiras diferenças de sensibilidade entre os três sistemas utilizados. Estas diferenças são explicadas pelo posicionamento dos sensores, nomeadamente a sua orientação, no seio da cabeça sensora. Esta é, aliás, uma das razões para a necessidade de ensaios individuais de calibração para todos os sensores de todas as cabeças sensoras.

7.4.2.1 Avaliação do Sensor de Temperatura

Além da calibração dos sensores de deformação foram efectuadas avaliações do funcionamento dos sensores de Bragg em aplicações de medição de temperatura. Assim, algumas cabeças sensoras foram instaladas em prismas de betão com o objectivo de se estudar o comportamento dos sensores em ambiente controlado.

Um dos ensaios compreende a recolha de dados durante a betonagem e período de secagem do betão durante um período de aproximadamente 24 horas. A avaliação do comportamento do sensor óptico neste ensaio foi realizada através da comparação dos resultados obtidos com os resultados de um sensor de temperatura PT100 (Figura 7.28). A designação LABEST define a cabeça sensora onde o sensor óptico está embebido e CONV representa um sensor eléctrico de deformação comercial (EREE) e simultaneamente a posição do sensor de temperatura PT100 instalado.

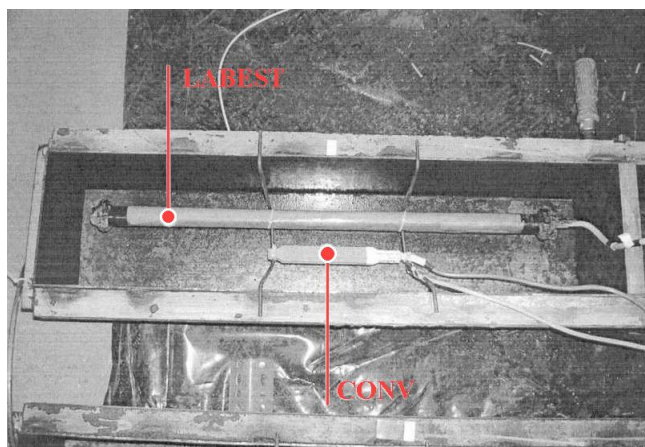


Figura 7.28 Imagem da cofragem do prisma com os sensores posicionados, antes da betonagem

Depois de acertada a referência de temperatura foi construído o gráfico ilustrado na Figura 7.29.

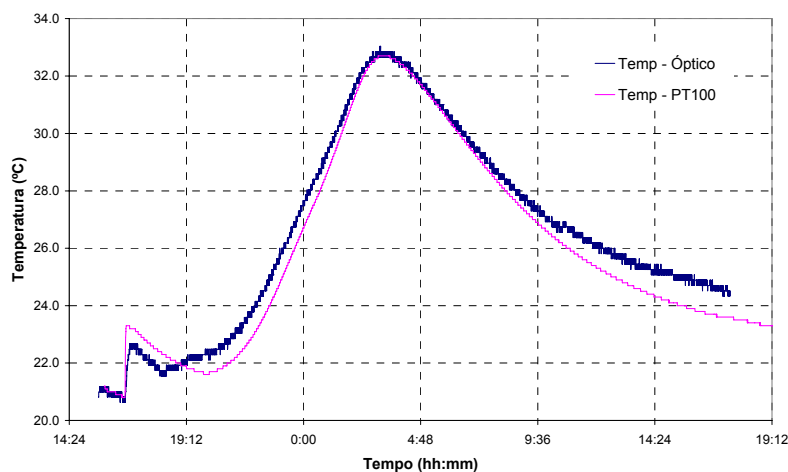


Figura 7.29 Gráfico de comparação de resultados da medição de temperatura entre um sensor de Bragg e um PT100, durante a fase de betonagem de um prisma

Utilizando a constante de conversão de comprimento de onda em temperatura definida no Capítulo 2, em que $1 \text{ pm} \equiv 0,19 \text{ }^{\circ}\text{C}$, verifica-se que a variação de temperatura observada pelos dois sensores

apresenta a mesma amplitude. As diferenças nas curvas de resposta são explicadas pelo diferente posicionamento no interior do prisma, mais ou menos próximo das suas extremidades, e pelas dimensões relativas dos sensores face às do próprio prisma (Figura 7.28).

Este ensaio revela o bom comportamento do sensor óptico em funcionamento como sensor de temperatura, mostrando ainda as suas características de estabilidade de medição ao longo do tempo, com um nível de ruído desprezável.

7.4.3 Aplicação em Obra

Como já referido, o objecto de estudo do projecto é uma ponte de duas faixas da nova auto-estrada A13 sobre o rio Sorraia. Apresenta um comprimento total de 270 m, divididos em três secções, entre as quais uma secção central de 120 m. Os pilares são de betão armado com 7,5 m de altura (Figura 7.20). Na ponte foram instalados dez sensores de Bragg com o único objectivo de avaliar o comportamento do sistema de interrogação desenvolvido. Este sistema é designado dentro do projecto SMARTE por «Sistema Óptico Alternativo» ou por «810 nm», de acordo com o seu comprimento de onda de trabalho. Os dez sensores foram distribuídos e instalados em duas diferentes secções da ponte, secção S2 e S4 (Figura 7.22 e Figura 7.23).

A instalação de um sistema de monitorização numa obra desta dimensão é uma tarefa complexa, que requer um elevado grau de organização.

Um dos primeiros problemas surgidos durante a instalação está relacionado com o método de construção da ponte, que levantou dificuldades com a forma como os cabos ópticos de ligação dos sensores ao sistema de interrogação seriam passados do interior do betão para o exterior. Assim, os cabos de ligação ao sensor, com um comprimento suficiente para apenas chegar à superfície do betão, ficaram enrolados no interior de caixas de saída durante a betonagem (Figura 7.31 (a)). Após a operação de betonagem (Figura 7.31 (b)) as caixas são novamente abertas, e refeitas as ligações até ao sistema de interrogação, através de cabos ópticos com conectores FC/PC. Assim, uma das características deste tipo de instalações, e que foi registado durante toda a execução do trabalho, está relacionada com o alto nível de planeamento necessário, nomeadamente com o empreiteiro responsável pela construção da obra. São ainda necessários grandes cuidados com o tratamento de todos os elementos de instrumentação, nomeadamente sensores, cabos de ligação ópticos e aparelhagem de medição, dada a severidade do ambiente vivido nos estaleiros destas grandes obras.

A fase de instalação de um dos sensores na secção S2 está ilustrada nas duas fotografias da Figura 7.30.

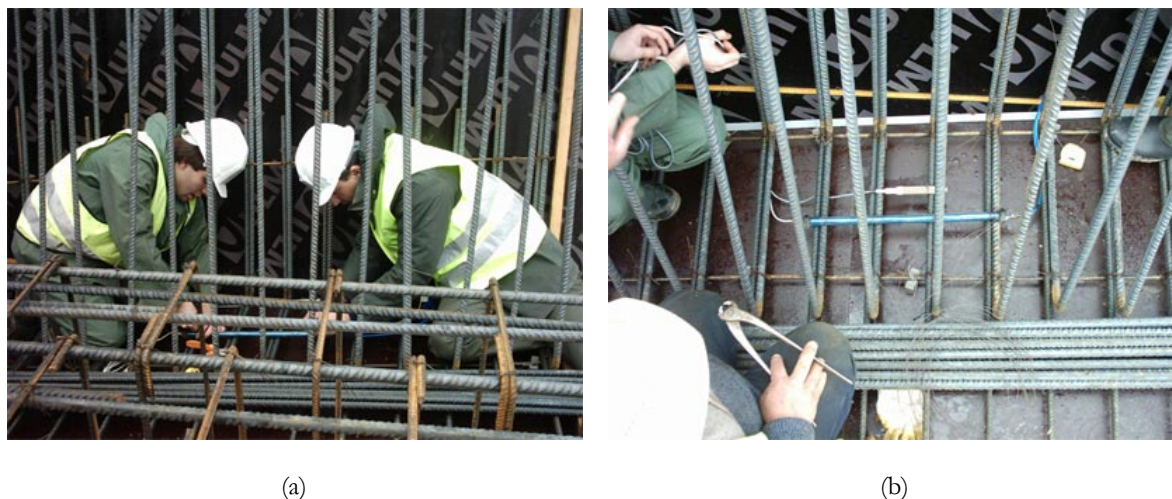


Figura 7.30 Imagens da instalação de sensores na laje de fundo da ponte, secção S2

O sistema de interrogação está instalado no interior do caixão da ponte. A Figura 7.32 (b) ilustra o aspecto geral do interior da secção S2, onde os Postos de Observação (PO) dos três sistemas de monitorização estão instalados. Cada um dos outros dois sistemas de instrumentação, um eléctrico baseado em extensómetros resistivos e PT100, e outro óptico baseado no sistema de interrogação comercial da Micron Optics [MicronOptics, 2005], fazem a monitorização de 52 sensores embebidos no betão e de 4 no seu exterior (estes, relativos à monitorização de humidade e temperatura).

Na Figura 7.32 (a) é mostrado o aspecto da mesma secção S2 durante a fase da sua construção, onde são notórias as dificuldades do ambiente de trabalho, e onde os sensores e respectivos cabos de ligação óptica têm que sobreviver.



Figura 7.31 Imagens das caixas de ligação aos sensores embebidos: (a) antes da betonagem; (b) depois da betonagem



Figura 7.32 Imagens da secção S2: (a) durante a fase de construção; (b) no seu interior depois de terminada a construção, com o Posto de Observação (PO) instalado

As duas fotografias da Figura 7.33 ilustram o posto de observação instalado, composto pelo sistema de interrogação resguardado por um armário metálico, que lhe confere a necessária rigidez e segurança. Neste armário foi instalada uma ventoinha de refrigeração com o objectivo de tornar o ambiente no seu interior seco e limpo, não permitindo também que a temperatura atinja valores muito elevados. Está instalado na parede interior do caixão da ponte, a cerca de 2,5 m de altura do chão (Figura 7.32 (b)).

7.4.4 Resultados do Ensaio de Carga

A fase final da construção da ponte, imediatamente anterior à sua abertura, compreendeu a realização de uma série de ensaios de carga, de verificação da robustez da estrutura. Estes ensaios foram compostos por diferentes fases, corresponde ao posicionamento de 10 camiões de 4 eixos, cada um dos quais a pesar 25 toneladas, sobre o tabuleiro da ponte.



Figura 7.33 Duas diferentes vistas do Posto de Observação (PO) instalado em obra

Todos os sensores, eléctricos e ópticos, foram colocados a adquirir os sinais de temperatura e deformação sentidos pela ponte durante o ensaio que decorreu durante um período de três horas. No caso do sistema “Óptico Alternativo” apenas 2 sensores puderam ser monitorizados (um de deformação outro de temperatura) dado só existirem dois comprimentos de onda distintos e o sistema estar preparado para a multiplexagem em divisão de comprimento de onda (WDM). Os ensaios efectuados foram divididos em 4 diferentes situações:

1. A primeira parte consistiu em ensaios quase-estáticos, onde os 10 camiões carregados foram deslocados durante aproximadamente duas horas para posições predeterminadas sobre o tabuleiro;
2. Na segunda parte, já de ensaios dinâmicos, foram feitas duas passagens lentas, à velocidade mínima permitida pelos camiões, sobre todo o comprimento do tabuleiro. Uma primeira passagem num sentido e uma segunda no sentido oposto;
3. A terceira parte consistiu em três passagens rápidas dos camiões a 80 km/h;
4. A quarta e última parte consistiu na “prova de ressalto”, em que os camiões são feitos passar por cima de uma lomba colocada transversalmente a meio vão, para que estes saltem e provoquem a vibração da ponte. Esta fase foi subdividida em 4 sub-partes: a primeira e segunda partes com a passagem de apenas um camião isolado; a terceira parte com a passagem de 3 camiões seguidos e a última parte com a passagem de 5 camiões seguidos.

Na Figura 7.34 é ilustrado por duas fotografias a deslocação e posicionamento dos 10 camiões carregados sobre o tabuleiro da ponte.



(a)



(b)

Figura 7.34 Imagens da fase de posicionamento “quase-estático” dos camiões sobre o tabuleiro da ponte

O gráfico da Figura 7.35 representa a aquisição de deformação e temperatura com o sistema de interrogação desenvolvido, durante aproximadamente as 3 horas em que decorreu o ensaio. Os sensores utilizados, escolhidos por serem aqueles que estavam colocados na zona onde era expectável uma maior deformação, foram os da secção S4, laje inferior, a meio do vão da ponte (Figura 7.23). As variações de resposta no gráfico de deformação representam as movimentações dos 10 camiões para se colocarem sobre o tabuleiro da ponte, em posições preestabelecidas. Como também se pode verificar pelo mesmo gráfico, a deformação apresenta uma tendência de subida, devida à variação de temperatura verificada na altura. Mais tarde este efeito é compensado através de computação, utilizando os dados adquiridos pelo sensor de temperatura.

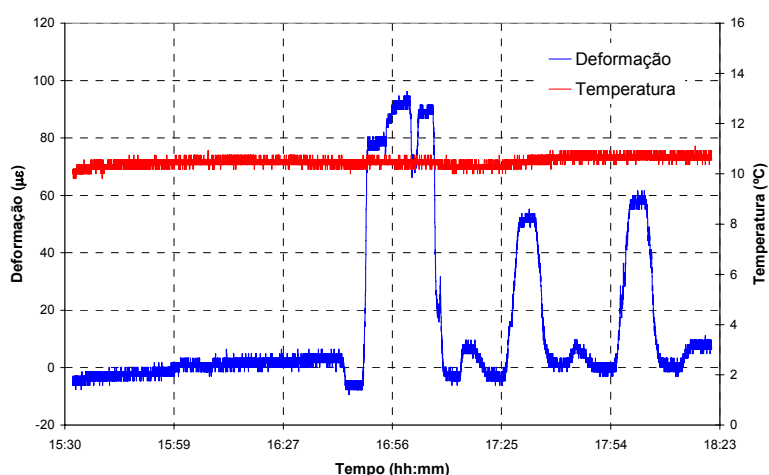


Figura 7.35 Resultado gráfico da deformação e temperatura, adquiridos ao longo de aproximadamente três horas

7.4.4.1 Situação 1

O resultado ilustrado no gráfico da Figura 7.36 representa a comparação dos resultados obtidos pelos três sensores de deformação instalados na mesma cabeça sensora da secção S4, a meio do vão da ponte, na situação de posicionamento “quase-estático”. Assim, a Figura 7.36 corresponde a uma expansão de escala da zona central do gráfico da Figura 7.35, depois das necessárias compensações de temperatura dos sensores ópticos (o extensómetro eléctrico utilizado é auto-compensado em temperatura [Félix, 2004]).

As diferentes taxas de aquisição utilizadas, devido às diferentes características dos sistemas de monitorização e também ao diferente número de sensores monitorizados em simultâneo, reflectem-se nos resultados gráficos. No caso do sistema de interrogação em estudo (810 nm) a taxa de aquisição utilizada é sempre a mesma ao longo de todo o ensaio, de 1 aquisição por segundo. No caso do sistema eléctrico (DEC-FEUP) a taxa é também sempre a mesma, mas de apenas 0,1 aq/s. No caso do sistema óptico da Mícron Optics (INESC Porto) (1550 nm) é de 1 aq/min no caso do gráficos relativos aos

ensaios quase-estáticos, dinâmico – passagens lentas e dinâmico – passagens rápidas (Figura 7.36 à Figura 7.38), e de 50 aq/s no caso do ensaio dinâmico – passagens com ressalto (Figura 7.42). A aquisição com uma taxa tão baixa (1 aq/min) pelo sistema óptico (1550 nm) ficou-se a dever ao tipo de multiplexagem usada, através de um *switch* óptico (multiplexagem espacial – SDM), que não permitiu um varrimento mais rápido dos vários canais utilizados.

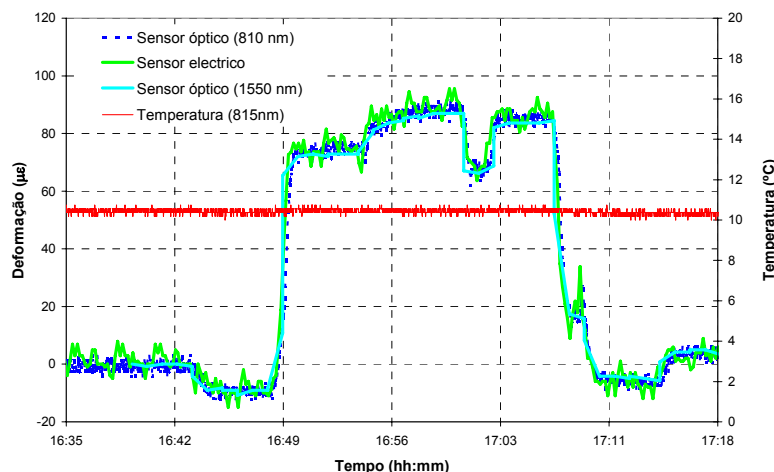


Figura 7.36 Resultados gráficos de deformação: posições quase estáticas. Comparação entre os três sistemas de monitorização

Através dos resultados adquiridos e da respectiva análise comparativa entre os três sistemas de monitorização é possível confirmar e validar a correcta operação do sistema de interrogação desenvolvido, quando utilizado sob condições bastante mais exigentes do que ambiente laboratorial. Os resultados demonstram uma boa correlação entre os três sistemas. As diferenças verificadas são devidas essencialmente às diferenças entre as taxas de aquisição utilizadas pelos três sistemas e também pelo maior nível de ruído verificado no caso dos sinais eléctricos.

7.4.4.2 Situação 2

O gráfico da Figura 7.37 é relativo aos dados recolhidos durante duas passagens a velocidade reduzida de um camião carregado, primeiro num sentido e depois no sentido oposto. Com os dados recolhidos pelo sistema de interrogação óptico (810 nm), mesmo com os baixos níveis de deformação verificados ($\approx 30 \mu\epsilon$), são nítidos os dois períodos registados com as passagens. Primeiro há um abaixamento do nível de deformação, passando a valores negativos, o que denota uma compressão do sensor. Mesmo não sendo possível a comparação directa com os resultados dos outros sensores, devido a baixa taxa de aquisição utilizada pelos mesmos, mas tendo em conta a colocação do sensor e o posicionamento dos pilares na estrutura da ponte, este resultado corresponde ao esperado e verificado em situações semelhantes [Félix, 2004]. O mesmo sucede durante a saída do camião do tabuleiro. Os níveis máximos de deformação,

obtidos pelos três sensores de deformação, são semelhantes, denotando a correlação de funcionamento esperada. A informação do sensor de temperatura durante o período de duração deste ensaio (cerca de 30 min) evidencia uma grande estabilidade de medição, em torno dos 10 °C, com um desvio de $\pm 0,2$ °C.

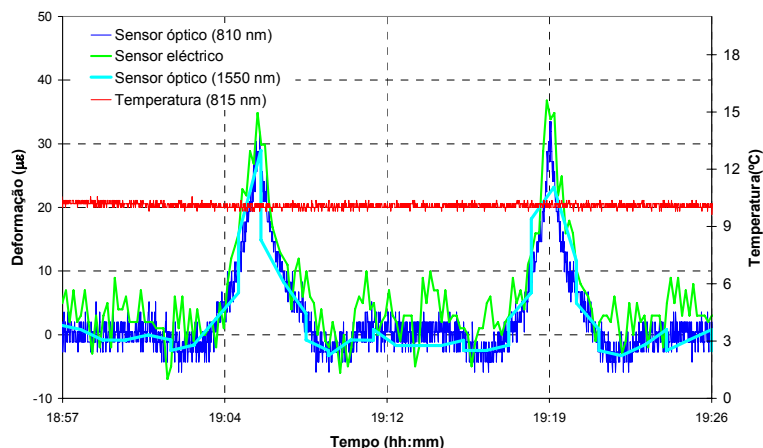


Figura 7.37 Resultados gráficos de deformação: ensaio dinâmico – passagens lentas.
Comparação entre os três sistemas de monitorização

7.4.4.3 Situação 3

A aquisição dos dados relativos ao ensaio dinâmico, com passagens de pares de camiões sobre o tabuleiro da ponte a 80 km/h, é mostrada na Figura 7.38. Devido às baixas taxas de aquisição utilizadas e/ou permitidas pelos vários sistemas de monitorização, assim foi possível observar, com maior ou menor pormenor, a deformação da estrutura da ponte no ponto pretendido. No gráfico pode verificar-se que, de entre os três sistemas de monitorização, apenas o sistema óptico em estudo (810 nm) sentiu e registou a primeira passagem rápida (próximo das 19:40).

Quanto ao registo da segunda e terceira passagem, observa-se que o sistema óptico (810 nm) conseguiu a sua identificação e discriminação. O mesmo não acontece com o sistema eléctrico, em que a segunda passagem não está discriminada visto cair dentro do nível de ruído de medição deste sistema. O sistema óptico (1550 nm), e dada a baixa taxa de aquisição utilizada, de apenas 1 aquisição por minuto, não regista qualquer deformação da estrutura neste período de ensaios.

7.4.4.4 Situação 4

A Figura 7.39 mostra o gráfico relativo aos dados de temperatura e deformação recolhidos com o sistema de monitorização óptico (810 nm) e ainda com o sistema eléctrico e óptico (1550 nm). Mais uma vez, a taxa de aquisição utilizada neste sistema foi de 1 aquisição por segundo para o sistema óptico desenvolvido neste trabalho, e de 0,1 aq/s para o eléctrico.

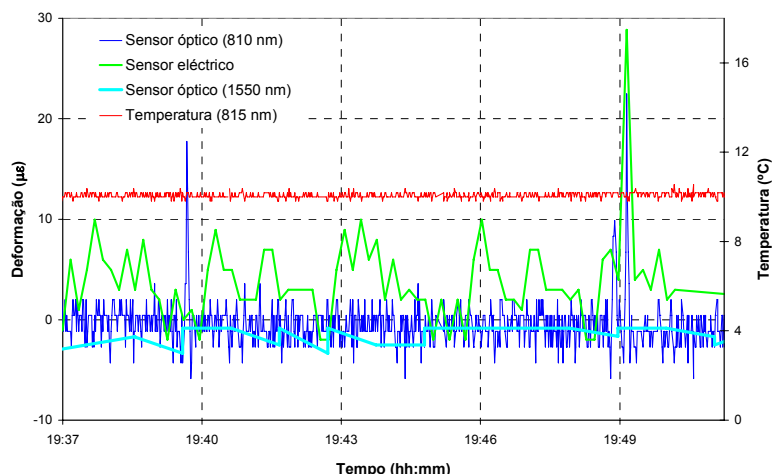


Figura 7.38 Resultados gráficos de deformação: ensaio dinâmico – passagens rápidas.
Comparação entre os três sistemas de monitorização

No entanto, a taxa de aquisição do sistema óptico da Mícron Optics (1550 nm), que deixou de utilizar o *switch* óptico e passou a adquirir apenas o sinal dos sensores instalados na secção S4, passou dos anteriores 1 aq/min para a sua taxa de aquisição máxima, de 50 aq/s.

Em relação à temperatura, e devido à hora de realização do ensaio, ao anoitecer, é notório um ligeiro abaixamento do valor da temperatura, na ordem de 0,5 °C, não sendo ainda assim um decréscimo muito significativo. Quanto à deformação, é possível verificar a existência de quatro picos, que correspondem a perturbações na estrutura devido à passagem dos camiões, nas situações descritas atrás, ponto 4.



Figura 7.39 Resultados gráficos de deformação: ensaio dinâmico – passagens com ressalto.
Comparação entre os três sistemas de monitorização

De forma a permitir uma análise de resultados mais pormenorizada, são apresentados nas Figura 7.40, Figura 7.41 e Figura 7.42, os dados relativos às primeira e segunda passagens, terceira passagem e quarta passagem, respectivamente, dos vários camiões. Nestes gráficos, pode observar-se que as amplitudes da deformação sentida pelos sensores ópticos (810 nm e 1550 nm) são equivalentes. No entanto, o efeito de vibração sofrido pela ponte e verificado pelo sensor óptico (1550 nm), não é observável com o sensor óptico (810 nm). Este facto fica a dever-se à elevada frequência de vibração da estrutura, que é superior à taxa de aquisição utilizada pelo sistema de monitorização óptico desenvolvido. Com uma taxa de aquisição ainda inferior, de apenas 1 aquisição em cada 10 segundos, o sistema eléctrico limita-se, neste ensaio, à visualização de um certo contorno ou envelope da deformação sentida pela estrutura com a passagem dos camiões.

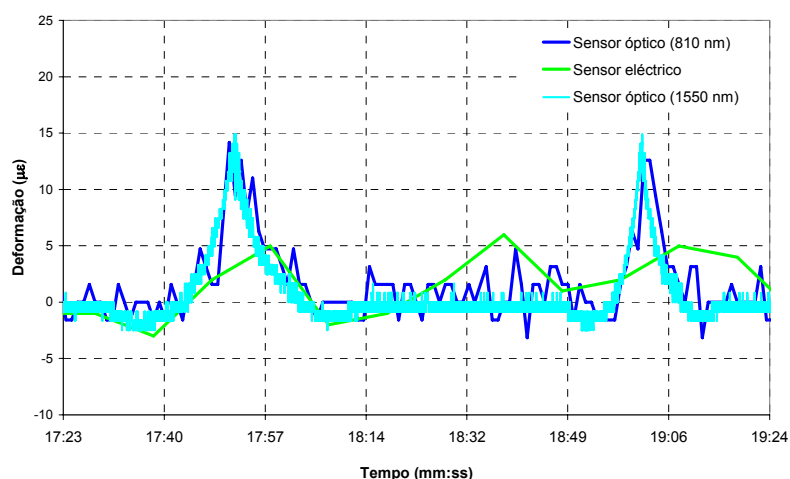


Figura 7.40 Resultados gráficos de deformação: ensaio dinâmico – primeira e segunda passagens com ressalto. Comparação entre os três sistemas de monitorização

No gráfico da Figura 7.41 foi realçado ainda mais o efeito da vibração registado pelo sistema óptico (1550 nm), capaz de uma aquisição de 50 aq/s. Aqui, são notórios os impactos, e respectivas vibrações, dos camiões sobre o tabuleiro da ponte.

Por fim, os resultados da quarta e última passagem (Figura 7.42) voltam a confirmar os bons resultados deste ensaio de monitorização. Há uma total correlação dos resultados obtidos com os dois sistemas de instrumentação ópticos. Mais uma vez se verifica que as diferenças se restringem ao natural erro de exactidão, superior para o caso do sistema de em estudo (810 nm).

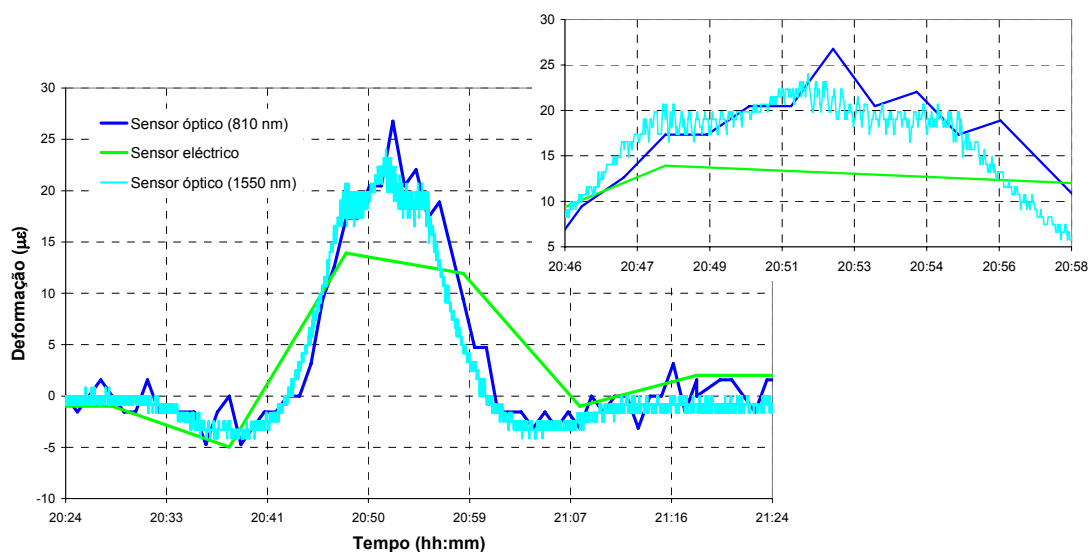


Figura 7.41 Resultados gráficos de deformação: ensaio dinâmico – terceira passagem com ressalto. Comparação entre os três sistemas de monitorização

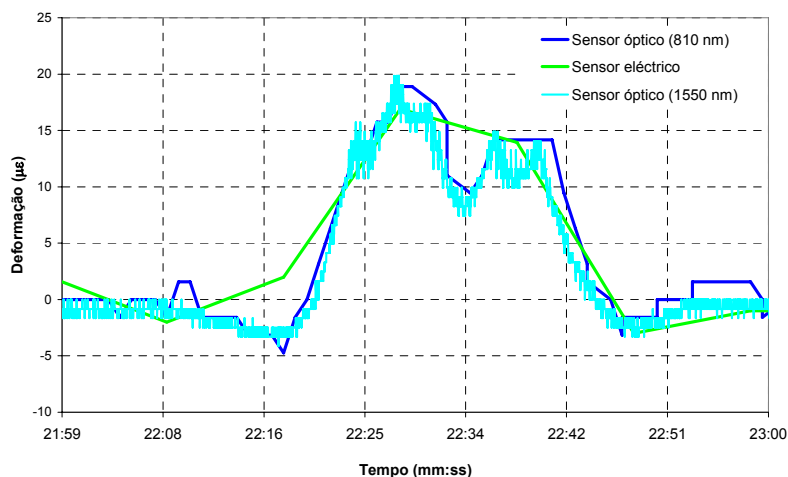


Figura 7.42 Resultados gráficos de deformação: ensaio dinâmico – quarta passagem com ressalto. Comparação entre os três sistemas de monitorização

7.5 Conclusão do Capítulo

Os ensaios experimentais descritos neste capítulo revelam e confirmam as boas características apresentadas pelo sistema de desmodulação baseado em espectrómetro de tecnologia CCD para aplicações de monitorização de estruturas de engenharia civil. Foram confirmados os resultados de medição obtidos através de calibração laboratorial, nos quais apresentou um erro de linearidade nunca superior a 2 %, com taxas de aquisição de 1 amostra por segundo.

O funcionamento do sistema de desmodulação em ambientes adversos a aparelhagem de instrumentação ficou confirmado. A monitorização de uma ponte de auto-estrada, em conjunto com dois outros sistemas de instrumentação, um eléctrico e outro óptico, atestou que o sistema desenvolvido está preparado para a sua utilização em aplicações reais de monitorização, com bons resultados.

A imunidade ao ruído electromagnético dos sensores de Bragg é também demonstrada, nomeadamente pela comparação de resultados com o sistema de aquisição eléctrico. Os ensaios mostram um nível de ruído inferior no sistema óptico, chegando a ser perceptíveis deformações da estrutura não detectadas pelo sistema eléctrico.

CONCLUSÕES FINAIS E PERSPECTIVAS DE TRABALHO FUTURO

A evolução tecnológica em torno da instrumentação óptica de estruturas tem-se mantido nos últimos tempos num elevado nível, de acordo com a vontade de se colmatar o pouco que estes sistemas ainda têm de atraso relativamente aos sistemas mais clássicos, baseados em extensometria eléctrica. Com qualidades reconhecidas, os sensores de rede de Bragg em fibra óptica conseguem suplantar em muitos aspectos os seus pares eléctricos, nomeadamente na imunidade à radiação electromagnética e na capacidade de serem integrados num único troço de fibra óptica. Com este trabalho pretendeu-se dar uma contribuição no sentido de melhorar as condições de aplicabilidade deste tipo de tecnologia, através da optimização de dois diferentes tipos de sistemas de interrogação.

8.1 Conclusões

Nesta tese, e depois de analisar e classificar diferentes tipos de sensores ópticos, é abordado com maior rigor o sensor baseado em redes de difracção de Bragg. Dadas as suas características, relatadas no capítulo 2, este tipo de sensor é apropriado a aplicações de monitorização de estruturas, permitindo ainda medições de várias grandezas físicas directas como a deformação e temperatura, indirectas como a posição, aceleração, pressão, etc., ou ainda de níveis de concentração de vários gases ou compostos, como o oxigénio e salinidade.

Os diferentes tipos de métodos de interrogação foram também estudados, verificando-se que embora muitas abordagens diferentes tenham surgido para interrogação dos sensores de Bragg, apenas algumas surgem como verdadeiras alternativas quando está em causa a sua efectiva utilização em ambientes que não o laboratorial. Características como a portabilidade, a robustez, a fiabilidade e o custo do sistema, estabelecem a aplicabilidade de certas técnicas.

A primeira opção para desenvolvimento de um sistema de interrogação recaiu no método de análise espectral passiva da resposta espectral do sensor de Bragg. Estando os primeiros sistemas baseados neste

método limitados pelo espectrómetro utilizado, volumoso, pesado e acima de tudo muito dispendioso, a contribuição para o desenvolvimento desta técnica passou pela adaptação de um espectrómetro comercial de baixo custo baseado em tecnologia CCD. Apresenta como vantagens o baixo custo e o facto de não ter componentes móveis, ou seja, é perfeitamente passivo, característica que lhe confere elevadas robustez e tempo de vida. Mais capacitado para aplicações de análises químicas, este tipo de espectrómetro apresenta à partida uma resolução de medição insuficiente para as medições a efectuar na monitorização de estruturas.

Assim, foi necessário desenvolver um método de incremento da resolução de medição. Através do processamento de sinal exercido sobre os dados recolhidos pelo espectrómetro e enviados para um computador portátil, foi possível incrementar a resolução a valores superiores à da informação fornecida por cada pixel do *array* de CCD. Dos métodos desenvolvidos e testados, foi apresentada uma evolução do algoritmo de cálculo do centro de massa. Este algoritmo é capaz de uma resolução ao sub-pixel que permite a obtenção de uma resolução de medição na ordem de 1 pm, ou seja, um incremento de cerca de 200 vezes face à resolução física permitida pelo analisador de espectros CCD. A evolução fundamental consiste em reduzir a níveis desprezáveis as discontinuidades, em termos de linearidade de resposta, verificadas com a utilização dos três primeiros algoritmos implementados. Isto mesmo é verificado através dos resultados obtidos com os ensaios de calibração efectuados e apresentados na secção 4.3, onde são obtidos valores de erros de linearidade de medição, para uma gama total de 1000 $\mu\epsilon$, inferiores a 2 %, mesmo quando não é utilizado qualquer tipo de condicionamento de temperatura durante o ensaio.

Durante o decorrer do trabalho foi verificada a sensibilidade do analisador de espectros CCD à polarização, nomeadamente da luz reflectida pelas redes de Bragg. Assim, foi desenvolvido um método de despolarização da luz capaz de tornar o sistema de medição imune às perturbações ou variações mecânicas, nomeadamente as exercidas sobre as fibras ópticas de ligação entre o sensor e o espectrómetro. É portanto um elemento essencial à utilização do sistema de interrogação em ambientes e aplicações de monitorização onde exista um nível elevado de vibrações entre os sensores e o posto de observação.

De forma a concretizar e validar o sistema desenvolvido foi construído um protótipo com características de boa robustez e portabilidade. Com este protótipo foram realizados ensaios em ambiente extra laboratorial, num estaleiro de uma grande obra de estruturas de engenharia civil, o que representa sempre uma dura prova de resistência à aparelhagem de instrumentação. Os resultados obtidos nestes ensaios, e respectiva análise comparativa com os resultados de outros dois sistemas de instrumentação comerciais, um eléctrico e outro óptico, permitem afirmar que foi conseguido atingir um ponto de desenvolvimento muito próximo a uma efectiva aplicação.

O segundo sistema de interrogação a ser desenvolvido é baseado na detecção do valor de medição do sensor através da sintonia do comprimento de onda de uma segunda rede de Bragg a funcionar como filtro. Para o efeito foi desenvolvida uma estrutura metálica onde uma rede de Bragg é traccionada através de um elemento piezoeléctrico, capaz de se alongar $45\text{ }\mu\text{m}$, o que provoca uma deformação máxima na fibra de $3000\text{ }\mu\text{ε}$.

Um sistema de medição de posição através de um sensor capacitivo foi também desenvolvido. Este sistema, com resolução de medição na ordem dos 10 nm , é necessário para garantir a posição e deformação aplicada à rede de Bragg de filtragem, oferecendo bons resultados de medição. É um sistema simples, trazendo para o domínio da electrónica a medida de posicionamento, tradicionalmente efectuada por sistemas ópticos em trabalhos já descritos na literatura. Os resultados obtidos com os ensaios de calibração permitem afirmar que com alguma optimização a nível de controlo o sistema poderá também ser utilizado em sistemas de monitorização de estruturas.

8.2 Trabalho Futuro

Sendo uma área que se iniciou há cerca de década e meia, a instrumentação óptica por sensores de Bragg continua a manter-se como uma tecnologia imergente e com muitos aspectos a explorar. Ao longo da tese foram vários os momentos em que a necessidade de estudar assuntos novos causou mesmo desvios na própria orientação do trabalho. Assim, e restringindo as perspectivas de trabalho apenas à área científica da própria tese, nomeadamente da instrumentação e optoelectrónica, são aqui deixadas algumas perspectivas de desenvolvimento deste trabalho.

1. Desenvolvimento de um espectrómetro com melhor resolução do que o utilizado neste trabalho. A elevada gama de comprimento de onda do espectrómetro utilizado, dos 600 aos 1000 nm , deixa desperdiçado muito do espectro de leitura, dado que a fonte óptica utilizada tem uma largura espectral a meia altura de apenas 20 nm (e que na melhor das hipóteses poderá chegar aos 100 nm). Este é um factor negativo que impede o incremento da resolução de medição.
2. Conversão do comprimento de onda de trabalho do espectrómetro dos 800 nm para a gama de comprimentos de onda utilizada pelas telecomunicações, em torno dos 1550 nm . Esta conversão, que não envolve qualquer alteração no princípio de medição aplicado, compreende duas vantagens relevantes para o sistema de interrogação: a sensibilidade das redes de Bragg à deformação é dependente do comprimento de onda, aumentando proporcionalmente ao comprimento de onda; os custos de aplicação poderão ainda ser mais reduzidos dado que os preços do equipamento óptico para este comprimento de onda são inferiores.

3. Tornar o sistema de medição insensível às variações térmicas através do encapsulamento de todo o sistema num meio de temperatura regulada. As vantagens deste desenvolvimento iriam reflectir-se numa maior estabilidade de medição do sistema, através da diminuição do ruído de leitura do espectrómetro. No caso do segundo sistema de interrogação, de filtragem activa, o facto de utilizar uma rede de Bragg como elemento de filtragem torna-o extremamente sensível às variações de temperatura, necessitando sempre de uma compensação de temperatura.
4. Aplicar à fonte óptica uma forma de varrimento do seu pico de intensidade máxima. De forma semelhante à introduzida no *dither* da filtragem activa, o objectivo é o incremento da informação introduzida no sistema pela variação de uma grandeza influente, neste caso a intensidade da fonte óptica, conseguindo assim maior resolução de medição.
5. Utilização de fibras ópticas de polímeros, que apresentam características de deformação muito superiores às fibras de sílica, no sistema de filtragem activa. As redes de Bragg nestas fibras conseguem gamas de variação do comprimento de onda central na ordem de 74 nm, muito superiores à conseguida pelas fibras de sílica, até os 2 nm [Liu, 2001].
6. Remodelar a estrutura mecânica do sistema de filtragem activa para permitir a aplicação de compressão à fibra óptica, e não apenas tracção, aumentando assim a excursão em deformação, passível de ser aplicada à fibra óptica.
7. Desenvolver um sistema de controlo de sintonia, para o sistema de filtragem activa, com elevadas características de resolução e gama dinâmica.
8. Desenvolver uma fonte de alta tensão para alimentação do tubo piezoeléctrico utilizado no sistema de despolarização. Simultaneamente, encontrar a melhor relação em termos de valor, frequência e forma de onda da tensão de alimentação.

REFERÊNCIAS

- [Abe, 2001] Abe, I., J. L. Fabris, B. W. Diesel, M. C. Fugihara, H. J. Kalinowski e C. L. Barbosa (2001). "Bragg gratings written in high birefringence optical fibers for transversal strain sensors". Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada, São Lourenço, Brasil. Acedido em 2005 Agosto, de <http://www.cpgei.cefetpr.br/~loop/publicacoes.html>.
- [Abe, 2003] Abe, I., O. Frazão, R. N. Nogueira, H. J. Kalinowsky, J. L. Pinto e J. L. Santos (2003). "Three-parameter simultaneous measurement using superimposed Bragg Gratings in high-birefringence optical fibers". 16th International Conference on Optical Fiber Sensors, Nara, Japan. 96-99.
- [Aikio, 2001] Aikio, M. (2001). "Hyperspectral prism-grating-prism imaging spectrograph". Degree of Doctor of Technology. Department of Electrical Engineering, University of Oulu.
- [Albert, 1996] Albert, J., K. O. Hill, D. C. Johnson, F. Bilodeau e M. J. Rooks (1996). "Moire phase masks for automatic pure apodisation of fibre Bragg gratings". *Electronics Letters* **32** (24): 2260.
- [Allington-Smith, 2002] Allington-Smith, J. (2002). Spectroscopy. *Optics in Astrophysics*. R. F. a. F. C. Foy. France, Springer. **2**: 155-179.
- [Allison, 2002] Allison, S. G., R. L. Fox, M. E. Froggatt e B. A. Childers (2002). "Novel piezoelectric actuators for tuning an optical fiber Bragg grating". *Optical Engineering* **41** (10): 2448-2455.
- [Alves, 2003] Alves, J., C. Félix, J. L. Santos, A. Carvalho e A. Lage (2003). "The Development and Application of a Fiber Bragg Sensor Interrogation System Using a Commercial CCD Spectrometer". EuroSensors XVII - The 17th European Conference on Solid-State Transducers, Guimarães, IEEE. 212-215.
- [Andover, 2005] Andover. (2005). "Edge Filter (Long wave (Short wave))." Acedido em Agosto, 2005, de http://www.andcorp.com/Web_store/Edge_Filters/ir_long_pass.html.
- [Anritsu, 2000] Anritsu. (2000, 2000Dez). "MS9780A - Optical Spectrum Analyzer." Acedido em Maio16, 2005, de http://www.us.anritsu.com/downloads/files/MS9780A_E1101.pdf.
- [Answers.com, 2005] Answers.com. (2005). "Polarization." Acedido em Junho01, 2005, de <http://www.answers.com/topic/polarization-1>.
- [Arguel, 1995] Arguel, P. (1995). "Conception et technologie de diodes laser GaAlAs/GaAs emettant par la surface au moyen de reflecteurs de Bragg distribues". Grau de Doutorado. Laboratoire et d'Architecture des Systèmes du C. N. R. S., Université Paul Sabatier de Toulouse.
- [Asseh, 1997] Asseh, A., H. Storoy, B. E. Sahlgren, S. Sandgren e R. A. H. Stubbe (1997). "A writing technique for long fiber Bragg gratings with complex reflectivity profiles". *Journal of Lightwave Technology* **15** (8): 1419-1423.
- [Audet, 2003] Audet, F. (2003). "Polarization Mode Dispersion Simplified." *Application Note* Acedido em Jun09, 2005, de <http://www.exfo.com>.
- [Avantes, 2005] Avantes. (2005, February 03). "Spectrometers." Acedido em Setembro 17, 2005, de <http://www.avantes.com/>.
- [Bai-Ou, 2000a] Bai-Ou, G., T. Hwa-Yaw, H. Siu-Lau, C. Weng-Heng e D. Xiao-Yi (2000a). "Simultaneous strain and temperature measurement using a single fibre Bragg grating". *Electronics Letters* **36** (12): 1018.

- [Bai-Ou, 2000b] Bai-Ou, G., T. Hwa-Yaw, T. Xiao-Ming e D. Xiao-Yi (2000b). "Simultaneous strain and temperature measurement using a superstructure fiber Bragg grating". Photonics Technology Letters, IEEE **12** (6): 675.
- [Ball, 1994] Ball, G. A. e W. W. Morey (1994). "Compression-tuned single-frequency Bragg grating fiber laser". Optics Letters **19** (23): 1979.
- [Bang, 2005] Bang, H.-J., S.-M. Jun e C.-G. Kim (2005). "Stabilized interrogation and multiplexing techniques for fibre Bragg grating vibration sensors". Measurement Science and Technology **16**: 813-820.
- [Bao, 2002] Bao, X., C. Huang, X. Zeng, A. Arcand e P. Sullivan (2002). "Simultaneous strain and temperature monitoring of the composite cure with a Brillouin-scattering-based distributed sensor". Optical Engineering **41** (7): 1496-1501.
- [Bennion, 1996] Bennion, I., J. A. R. Williams, L. Zhang, K. Sugden e N. J. Doran (1996). "UV-written in-fibre Bragg gratings". Optical and Quantum Electronics **28**: 93-135.
- [Bhatia, 1997] Bhatia, V., D. K. Campbell, Daniel Sherr e R. O. Claus (1997). "Simultaneous strain and temperature sensing using long-period gratings". Smart Structures and Materials 1997: Smart Sensing, Processing, and Instrumentation, R. O. Claus, SPIE. **3042**: 78-88.
- [Bohm, 1983] Bohm, K., K. Petermann e E. Weidel (1983). "Performance of Lyot Depolarizers with Birefringent Single-Mode Fibers". Journal of Lightwave Technology **1** (1): 71-74.
- [Borland, 2005] Borland. (2005). "Delphi." Acedido em Setembro 22, 2005, de <http://www.borland.com/us/products/delphi/index.html>.
- [Boulet, 2001] Boulet, C., D. J. Webb, M. Douay e P. Niay (2001). "Simultaneous Interrogation of Fiber Bragg Grating Sensors Using an Acoustooptic Tunable Filter". Photonics Technology Letters, IEEE **13** (11): 1215-1217.
- [Burns, 1983a] Burns, W. K. (1983a). "Degree of Polarization in the Lyot Depolarizer". Journal of Lightwave Technology **1** (3): 475-479.
- [Burns, 1983b] Burns, W. K., R. P. Moeller e C.-L. Chen (1983b). "Depolarization in a Single-Mode Optical Fiber". Journal of Lightwave Technology **1** (1): 44-50.
- [Byron, 1995] Byron, I. C. e H. N. Rourke (1995). "Fabrication of chirped fibre gratings by novel stretch and write technique". Electronics Letters **31** (1): 60.
- [Byron, 1993] Byron, K. C., K. Sugden, T. Bricheno e I. Bennion (1993). "Fabrication of chirped Bragg gratings in photosensitive fibre". Electronics Letters **29** (18): 1659.
- [Cao, 2004] Cao, W., C. Denker, H. Wang, J. Ma, M. Qu, J. Wang e P. R. Goode (2004). "Characteristic Evaluation of a Near-Infrared Fabry-Perot Filter for the InfraRed Imaging Magnetograph (IRIM)". Proceedings of SPIE **5171**: 307-315.
- [Caponi, 1983] Caponi, R. e C. D. Bernardi (1983). "A precise, versatile set-up for holographic grating generation". CSELT Parporti tecnici **XI** (6): 413-417.
- [Cavaleiro, 1999] Cavaleiro, P. M., F. M. Araujo, L. A. Ferreira, J. L. Santos e F. Farahi (1999). "Simultaneous measurement of strain and temperature using Bragg gratings written in germanosilicate and boron-codoped germanosilicate fibers". Photonics Technology Letters, IEEE **11** (12): 1635.
- [Chan, 2002] Chan, C. C., J. M. Gong, C. Z. Shi, Y. L. Hoo, M. Zhang e W. Jin (2002). "Magneto-Mechanical Tuning of Fiber Bragg Grating Filter". Microwave and Optical Technology Letters **33** (2): 73-74.

- [Chehura, 2003] Chehura, E., C.-C. Ye, S. W. James e R. P. Tatam (2003). "Characterization of the response of fibre Bragg grating sensors written in different types of high birefringent fibres subject to transverse load". 16th International Conference on Optical Fiber Sensors, Nara, Japan. 240-243.
- [Cheng, 2002] Cheng, L. K., J. J. M. G. Schaarsberg e B. W. Oostdijk (2002). "Multi-Channel FBG Sensor System for Static and Dynamic Measurement up to 10 kHz". First European Workshop on Structural Health Monitoring, Paris, France. SHM 2002-166.
- [Christiansen, 2001] Christiansen, M. B., S. Chen, C. Baldwin, J. Niemczuk, J. Kiddy, P. Chen, H. Kopola, M. Aikio, P. Suopajarvi e S. G. Buckley (2001). "Digital spatial wavelength domain multiplexing (DSWDM) using a prism-grating-prism (PGP) and a CMOS imager: implementation and initial testing". SPIE's 8th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, Newport Beach, California, USA, E. Udd e D. Inaudi, Proceedings of SPIE. **4328**: 88-95.
- [Cortès, 1998] Cortès, P. Y., F. Ouellette e S. LaRoche (1998). "Intrinsic apodisation of Bragg gratings written using UV-pulse interferometry". *Electronics Letters* **34** (4): 396.
- [Datataker, 2005] Datataker. (2005). "Powerful Data Logger and Flexible Data Acquisition and Data Logging Systems." Acedido em Agosto, 2005, de <http://www.datataker.com/>.
- [Davis, 1994] Davis, M. A. e A. D. Kersey (1994). "All-fibre Bragg grating strain-sensor demodulation technique using a wavelength division coupler". *Electronics Letters* **30** (1): 75.
- [Davis, 1995] Davis, M. A. e A. D. Kersey (1995). "Matched-filter interrogation technique for fibre Bragg grating arrays". *Electronics Letters* **31** (10): 822-823.
- [Davis, 1997] Davis, M. A. e A. D. Kersey (1997). "Simultaneous measurement of temperature and strain using fibre Bragg gratings and Brillouin scattering". *Optoelectronics, IEE Proceedings-* **144** (3): 151.
- [Douay, 1997] Douay, M., W. X. Xie, T. Taunay, P. Bernage, P. Niay, P. Cordier, B. Poumellec, L. Dong, J. F. Bayon, H. Poignant e E. Delevaque (1997). "Densification involved in the UV-based photosensitivity of silica glasses and optical fibers". *Lightwave Technology, Journal of* **15** (8): 1329.
- [Dyer, 1994] Dyer, P. E., R. J. Farley e R. Giedl (1994). "Study and analysis of submicron-period grating formation on polymers ablated using a KrF laser irradiated phase mask". *Applied Physics Letters* **64** (25): 3389-3391.
- [Ecke, 1997] Ecke, W., J. Schauer, K. Usbeck e R. Willsch (1997). "Improvement of the stability of fiber grating interrogation systems, using active and passive polarization scrambling devices". 12th International Conference on Optical Fiber Sensors, O. S. o. America, OSA Technical Digest Series. **16**: 484-487.
- [Ecke, 2003] Ecke, W. e R. Willsch (2003). "Field trial experience with fiber Bragg grating health monitoring systems and optochemical sensor concepts basing on polychromator signal processing". 16th International Conference on Optical Fiber Sensors, Nara, Japan. 500-505.
- [Erdogan, 1997] Erdogan, T. (1997). "Fiber Grating Spectra". *Journal of Lightwave Technology* **15** (8): 1277-1294.
- [Exfo, 2005] Exfo. (2005). "PMD Measurements." Acedido em Junho, 2005, de <http://www.exfo.com>.
- [Ezbiri, 1998] Ezbiri, A., S. E. Kanellopoulos e V. A. Handerek (1998). "High resolution instrumentation system for fiber-Bragg grating aerospace sensors". *Optics Communications* (150): 43-48.
- [Fabry-Perot, 2005] Fabry-Perot, M. (2005). "Widely Tunable Fiber Fabry-Perot Filter." Acedido em Agosto, 2005, de http://www.micronoptics.com/tele_components_over.htm.
- [Félix, 2004] Félix, C. M. S. (2004). "Monitorização e Análise do Comportamento de Obras de Arte". Tese de Doutoramento. Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto.

- [Ferreira, 1999] Ferreira, L. A. (1999). "Interrogação de Sensores de Bragg em Fibra Óptica". Tese de Doutoramento. Faculdade de Ciências, Universidade do Porto.
- [Ferreira, 2001] Ferreira, L. A. (2001). Tese de Doutoramento. Faculdade de Ciências, Universidade do Porto.
- [Ferreira, 2000] Ferreira, L. A., F. M. Araújo, J. L. Santos e F. Farahi (2000). "Simultaneous measurement of strain and temperature using interferometrically interrogated fiber Bragg grating sensors". Optical Engineering **39** (8): 2226-2234.
- [Fiberpro, 2004] Fiberpro. (2004). "Polarization Scrambler User's Guide." Acedido em Fevereiro, 2004, de <http://www.fiberpro.com>.
- [Flatau, 2005] Flatau, A. (2005). "Magnetostriuctive Transducers, Actuators, and Sensors." Acedido em Agosto, 2005, de <http://www.public.iastate.edu/~terfenol/homepage.html>.
- [Frazão, 2002] Frazão, O., R. Romero, G. Rego, P. V. S. Marques, H. M. Salgado e J. L. Santos (2002). "Sampled fibre Bragg grating sensors for simultaneous strain and temperature measurement". Electronics Letters **38** (14): 693-695.
- [Frazão, 2003] Frazão, O., R. Romero e J. L. Santos (2003). "Simultaneous Measurement of Temperature and Strain using a Ring Fibre Bragg Grating Sensor". 16th International Conference on Optical Fiber Sensors, Nara, Japan. 84-87.
- [Fukuchi, 2002] Fukuchi, K., S. Kojima, Y. Hishida e S. Ishi (2002). "Optical Water-Level Sensors using Fiber Bragg Grating Technology". Hitachi Cable Review (21): 23-28.
- [Goh, 2003] Goh, C. S., M. R. Mokhtar, S. A. Butler, S. Y. Set, K. Kikuchi e M. Ibsen (2003). "Wavelength tuning of fiber Bragg gratings over 90 nm using a simple tuning package". Photonics Technology Letters, IEEE **15** (4): 557.
- [Hamamatsu, 2005] Hamamatsu. (2005). "Mini-spectrometer TG series." Acedido em Setembro, 2005, de <http://www.sales.hamamatsu.com/>.
- [Hatano, 2003] Hatano, T., T. Takagi, K. Ikeda e H. Matsuura (2003). "Development of a High-Precision DOP Measuring Instrument". Furukawa Review (23): 39-43.
- [Hecht, 1991] Hecht, E. (1991). "Óptica". Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian.
- [Hill, 1978] Hill, K. O., Y. Fujii, D. C. Johnson e B. S. Kawasaki (1978). "Photosensitivity in optical waveguides: application to reflection filter fabrication". Applied Physics Letters **32** (10): 647-649.
- [Hill, 1993] Hill, K. O., B. Malo, F. Bilodeau, D. C. Johnson e J. Albert (1993). "Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask". Applied Physics Letters **62** (10): 1035-1037.
- [Hill, 1990] Hill, K. O., B. Malo, K. A. Vineberg, F. Bilodeau, D. C. Johnson e I. Skinner (1990). "Efficient mode conversion in telecommunication fibre using externally written gratings". Electronics Letters **26** (16): 1270.
- [Hill, 1997] Hill, K. O. e G. Meltz (1997). "Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview". Lightwave Technology, Journal of **15** (8): 1263-1276.
- [Hinds, 2005] Hinds, I. (2005). "Polarimeters: Fiber Optic Measurement." Acedido em Junho, 2005, de <http://www.hindsinstruments.com/DUALPEMStokesPolarimeter>.
- [Horiba, 2005] Horiba, J. Y. (2005). "Optical Spectroscopy." Acedido em Setembro, 2005, de <http://www.jobinyvon.com/>.

- [Hu, 1997] Hu, Y., S. Chen, L. Zhang e I. Bennion (1997). "Multiplexing Bragg gratings using combined wavelength and spatial division techniques with digital resolution enhancement". Electronics Letters **33** (23): 1973-1975.
- [Ibsen, 2005] Ibsen, P. (2005). "FBG Phase masks." Acedido em Agosto, 2005, de <http://www.ibsenphotonics.com>.
- [IEC, 2004] IEC. (2004). "Polarization Mode Dispersion." Web ProForum Tutorials Acedido em Jun09, 2005, de http://www.iec.org/online/tutorials/polar_mode.
- [Intelmac, 2005] Intelmac. (2005). "In-Line Optical Fiber Depolarizers." Acedido em Agosto, 2005, de www.intelmac.com.
- [Iocco, 1997] Iocco, A., H. G. Limberger e R. P. Salathe (1997). "Bragg grating fast tunable filter". Electronics Letters **33** (25): 2147.
- [Iocco, 1999] Iocco, A., H. G. Limberger, R. P. Salathe, L. A. Everall, K. E. Chisholm, J. A. R. Williams e I. Bennion (1999). "Bragg grating fast tunable filter for wavelength division multiplexing". Lightwave Technology, Journal of **17** (7): 1217.
- [Jackson, 1993] Jackson, D. A., A. B. Lobo Ribeiro, L. Reekie e J. L. Archambault (1993). "Simple Multiplexing Scheme for a Fiber-Optic Grating Sensor Network". Optics Letters **18** (14): 1192-1194.
- [James, 1996] James, S. W., M. L. Dockney e R. P. Tatam (1996). "Simultaneous independent temperature and strain measurement using in-fibre Bragg grating sensors". Electronics Letters **32** (12): 1133.
- [Jaroszewicz, 2003] Jaroszewicz, L. R. e P. Marc (2003). "Inline Fiber-Optic Polarization Analyzers for Sensor Application". IEEE Sensors Journal **3** (1): 71-79.
- [Jaroszewicz, 2004] Jaroszewicz, L. R. e P. Marc (2004). "Fiber-Optic Interferometric Polarization Analyzer: New Approach to Polarization Analysis". IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement **53** (2): 259-265.
- [Jin, 1997] Jin, X., J. S. Sirkis e J.-K. Chung (1997). "Optical fiber sensor for simultaneous measurement of strain and temperature". *Smart Structures and Materials 1997: Smart Sensing, Processing, and Instrumentation*, R. O. Claus, SPIE. **3042**: 120-127.
- [Jones, 2000] Jones, R. V. (2000). Descriptions of Polarized Light. On Classical Electromagnetic Fields, Division of Engineering and Applied Sciences: 50-57.
- [Jorge, 2000] Jorge, P. A. S., L. A. Ferreira e J. L. Santos (2000). "Analysis of the flyback effects on the serrodyne interferometric demodulation of fiber optic Bragg grating sensors". Optical Engineering **39** (5): 1399-1404.
- [Kashyap, 1999] Kashyap, R. (1999). "Fiber Bragg Gratings". San Diego, CA, Estados Unidos da América, Academic Press.
- [Kashyap, 1996] Kashyap, R., A. Swanton e D. J. Armes (1996). "Simple technique for apodising chirped and unchirped fibre Bragg gratings". Electronics Letters **32** (13): 1226.
- [Kersey, 1994] Kersey, A. D. (1994). "Monitoring Structural Performance with Optical TDR Techniques". *Symposium and Workshop on Time Domain Reflectometry in Environmental, Infrastructure and Mining Applications*, Evanston, Illinois, USA, USBM special publication SP 19-94. 434-442.
- [Kersey, 1992] Kersey, A. D., T. A. Berkoff e W. W. Morey (1992). "High-resolution fibre-grating based strain sensor with interferometric wavelength-shift detection". Electronics Letters **28** (3): 236.
- [Kersey, 1993] Kersey, A. D., T. A. Berkoff e W. W. Morey (1993). "Multiplexed fiber Bragg grating strain-sensor system with a fiber Fabry-Perot wavelength filter". Optics Letters **18** (16): 1370-1372.

- [Kersey, 1997] Kersey, A. D., M. A. Davis, H. J. Patrick, M. Leblanc, K. P. Koo, C. G. Askins, M. A. Putnam e E. J. Fiebele (1997). "Fiber Grating sensors". Journal of Lightwave Technology **15** (8): 1442-1463.
- [Kersey, 1990] Kersey, A. D., M. J. Marrone e A. Dandridge (1990). "Analysis of Input-Polarization-Induced Phase Noise in Interferometric Fiber-optic Sensors and Its Reduction using Polarization Scrambling". Journal of Lightwave Technology **8** (6): 838-845.
- [Klein, 1986] Klein, M. V. e T. E. Furtak (1986). "Optics". New York, USA, John Wiley & Sons, Inc.
- [Lemaire, 1993] Lemaire, P. J., R. M. Atkins, V. Mizrahi e W. A. Reed (1993). "High pressure H₂ loading as a technique for achieving ultrahigh UV photosensitivity and thermal sensitivity in GeO₂ doped optical fibres". Electronics Letters **29** (13): 1191.
- [Lerner, 1988] Lerner, J. M. e A. Thevenon. (1988). "The Optics of Spectroscopy - A TUTORIAL." Acedido em Setembro, 2005, de <http://www.jobinyvon.com/usadivisions/Oos/index.htm>.
- [Li-Jun, 2005] Li-Jun, S., S. Xiao-Juan, L. Lu, L. Zhong-Hao e Z. Guo-Sheng (2005). "Theory of passively mode-locked lasers with self-frequency shift and saturable absorber response". Chinese Physics **14**: 1174-1180.
- [Lin, 1994] Lin, X.-Z., Y. Zhang, H.-L. An e H.-D. Liu (1994). "Electrically tunable singlemode fibre Bragg reflective filter". Electronics Letters **30** (11): 887-888.
- [Liu, 2001] Liu, H. Y., G. D. Peng e P. L. Chu (2001). "Thermal tuning of polymer optical fiber Bragg gratings". Photonics Technology Letters, IEEE **13** (8): 824.
- [Liu, 1997a] Liu, T., G. F. Fernando, Y.-J. Rao, D. A. Jackson, L. Zhang e I. Bennion (1997a). "Simultaneous strain and temperature measurement in composites using a multiplexed fiber Bragg grating sensor and an extrinsic Fabry-Perot sensor". *Smart Structures and Materials 1997: Smart Sensing, Processing, and Instrumentation*, R. O. Claus, SPIE. **3042**: 203-212.
- [Liu, 1997b] Liu, T., M. Q. Wu, G. F. Fernando, Y.-J. Rao e D. A. Jackson (1997b). "Multiplexed extrinc Fabry-Perot sensor system for in-situ strain and impact damage detection in composites". *Smart Structures and Materials 1997: Smart Sensing, Processing, and Instrumentation*, R. O. Claus, SPIE. **3042**: 293-303.
- [Measures, 2001] Measures, R. (2001). "Structural Monitoring with Fiber Optic Technology". London, UK, Academic Press.
- [Meltz, 1989] Meltz, G., W. W. Morey e W. H. Glenn (1989). "Formation of Bragg gratings in optical fibers by transverse holographic method". Optics Letters **14** (15): 823-825.
- [MicronOptics, 2005] MicronOptics. (2005). "Sensing & Telecom." Acedido em Setembro, 2005, de <http://www.micronoptics.com/index.html>.
- [Morey, 1994] Morey, W. W. (1994). "Wide range wavelength tuning of fiber Bragg gratings". **2**: 146.
- [Mrad, 2002] Mrad, N. (2002). "Encyclopedia of Smart Materials, Volumes 1-2", John Wiley & Sons.
- [Murphy, 2002] Murphy, D. F., D. A. Flavin, R. McBride e J. D. C. Jones (2002). "Spatially scanned interferometric interrogation of fiber Bragg grating sensors based on Hilbert transform processing". *Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest, 2002*. **1**: 379-382.
- [Murphy, 2001] Murphy, D. F., D. A. Flavin, R. McBride e J. D. C. Jones (2001). "Interferometric Interrogation of In-Fiber Bragg Grating Sensors Without Mechanical Path Length Scanning". IEEE Journal of Lighthwave Technology **19** (7): 1004-1009.
- [Myers, 2004] Myers, S. T. (2004). *Polarization in Interferometry*. Socorro, National Radio Astronomy Observatory.

- [Nasu, 2002] Nasu, Y. e S. Yamashita (2002). "Fabrication of long superstructure fiber Bragg gratings (SSFBG's) using a novel scanning phase-mask technique". Jpn. Journal Applied Physics **41**: 4790-4793.
- [Nave, 2005] Nave, C. R. (2005). "HyperPhysics." Acedido em Junho 01, 2005, de <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hph.html>.
- [Noll, 2005] Noll, S. J. (2005). "Peltier Device Information Directory." Acedido em Agosto, 2005, de <http://www.peltier-info.com>.
- [OceanOptics, 2005] OceanOptics. (2005, Setembro 17). "Spectrometers." Acedido em Setembro 17, 2005, de <http://www.oceanoptics.com/products/spectrometers.asp>.
- [Oh, 2003] Oh, S., W. T. Han, U. C. Paek e Y. Chung (2003). "Discrimination of Temperature and Strain with a Single FBG Based on the Birefringence Effect". 16th International Conference on Optical Fiber Sensors, Nara, Japan. 50-53.
- [Oliveira, 2005] Oliveira, V. (2005). "Micro-Actuação de Elevada Precisão para um Sistema de Interrogação de Sensores de Fibra Óptica baseados em Redes de Bragg". MSc. Departamento de Engenharia Electrotécnica e Computadores, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- [Optivec, 2004] Optivec. (2004, September 26). "Libraries of Vector, Matrix, and Complex Math Functions for PC Compilers." Acedido em Setembro 21, 2005, de <http://www.optivec.com/>.
- [Ouellette, 1994] Ouellette, F., J. F. Cliche e S. Gagnon (1994). "All-fiber devices for chromatic dispersion compensation based on chirped distributed resonant coupling". Lightwave Technology, Journal of **12** (10): 1728.
- [Paddison, 1998] Paddison, C. J., J. M. Dawes, D. J. W. Brown, M. J. Withford, R. Trickett e P. A. Krug (1998). "Multiple fibre gratings fabricated using frequency-doubled copper vapour lasers". Electronics Letters **34** (25): 2407-2408.
- [Patrick, 1996] Patrick, H. J., G. M. Williams, A. D. Kersey, J. R. Pedrazzani e A. M. Vengsarkar (1996). "Hybrid fiber Bragg grating/long period fiber grating sensor for strain/temperature discrimination". Photonics Technology Letters, IEEE **8** (9): 1223.
- [Phoenix, 2005] Phoenix, P. (2005). "Fiber Optic depolarizers." Acedido em Agosto, 2005, de www.phoenixphotonics.com/.
- [Photonics, 2003] Photonics, G. (2003). "Scrambling to Reduce Polarization Related Impairments." Acedido em Abril, 2004, de www.generalphotonics.com.
- [PI, 2005] PI. (2005). "Tutorial: Piezoelectrics in Positioning." Acedido em Agosto, 2005, de http://www.physikinstrumente.com/en/products/piezo_tutorial.php.
- [Piezo, 2005] Piezo. (2005). "Introduction to Piezo Transducers." Acedido em Agosto, 2005, de <http://www.piezo.com/tech2intropiezotrans.html>.
- [Rao, 1997] Rao, Y. J., D. A. Jackson, L. Zhang e I. Bennion (1997). "Extended dynamic range detection system for in-fibre Bragg grating strain sensors based on two cascaded interferometric wavelength scanners". Measurement Science and Technology **8**: 1043-1049.
- [Ribeiro, 1996] Ribeiro, A. B. L., L. A. Ferreira, M. Tsvetkov e J. L. Santos (1996). "All-fibre interrogation technique for fibre Bragg sensors using a biconical fibre filter". Electronics Letters **32** (4): 382-383.
- [Riesenberg, 2001] Riesenberg, R. (2001). "Micro-Mechanical Slit Positioning System as a Transmissive Spatial Light Modulator". Spatial Light Modulators: Technology and Applications, U. Efron, SPIE. **4457**: 197-203.

- [Ryu, 2002] Ryu, C.-Y. e C.-S. Hong (2002). "Development of fiber Bragg grating sensor system using wavelength-swept fiber laser". Smart Materials and Structures **11**: 468-473.
- [Schott, 2005] Schott. (2005). "Infrared Schott Glass Filters." Acedido em Agosto, 2005, de <http://www.2filter.com/prices/products/bw093.html>.
- [SDL, 2004] SDL. (2004, October 02). "SDL Component Suite 8.2 - CalcPolyFit." Acedido em Setembro 21, 2005, de <http://www.lohninger.com/helpsuite/calcpolyfit.htm>.
- [Silvanesan, 2002] Silvanesan, P., J. S. Sirkis, Y. Murata e S. G. Buckley (2002). "Optimal wavelength pair selection and accuracy analysis of dual fiber grating sensors for simultaneous measuring strain and temperature". Optical Engineering **41** (10): 2456-2463.
- [Simpson, 2003] Simpson, A. G., K. Zhou, L. Zhang e I. Bennion (2003). "Wide bandwidth, high resolution spectral interrogation using a BFBG-CCD array for optical sensing applications". 16th International Conference on Optical Fiber Sensors, Nara, Japan. 534-537.
- [Simpson, 2004] Simpson, A. G., K. Zhou, L. Zhang, L. Everall e I. Bennion (2004). "Optical sensor interrogation with a blazed fiber Bragg grating and a charge-coupled device linear array". Applied Optics **43** (1): 33-40.
- [Song, 1997] Song, M., B. Lee, S. B. Lee e S. S. Choi (1997). "Interferometric temperature-insensitive strain measurement with different-diameter fiber Bragg gratings". Optics Letters **22** (11): 790-792.
- [Sony, 2005] Sony. (2005). "ILX511 - 2048-pixel CCD Linear Image Sensor." Acedido em Setembro 17, 2005, de <http://www.oceanoptics.com/technical/ilx511.pdf>.
- [Spammer, 2000] Spammer, S. J. e P. L. Fuhr (2000). "Temperature insensitive fiber optic accelerometer using a chirped Bragg grating". Optical Engineering **39** (8): 2177-2181.
- [Spillman, 2002] Spillman, W. B. J., Q. Chen, S. Mikailoff, J. Greene e R. O. Claus (2002). "Temperature and source fluctuation insensitive demodulation technique for Bragg grating sensors". Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest. **1**: 187-190.
- [StellarNet, 2005] StellarNet. (2005, 2005). "Home of Revolutionary Spectrometer Instrumentation." Acedido em Setembro 17, 2005, de <http://www.stellarnet-inc.com/>.
- [StokerYale, 2005] StokerYale. (2005). "Lasiris Phase masks." Acedido em Agosto, 2005, de <http://www.stockeryale.com>.
- [Sun, 2002] Sun, T., S. Pal, J. Mandal e K. T. V. Grattan (2002). Fibre Bragg grating fabrication using fluoride excimer laser for sensing and communication applications. Oxon, UK, Central Laser Facility - Rutherford Appleton Laboratory: 147149.
- [Superlum, 2005] Superlum. (2005). "Superluminescent Diodes & Modules - Broadband Light Sources." Acedido em Setembro 17, 2005, de <http://www.superlumdiodes.com/>.
- [Tay, 2004] Tay, C. M., K. M. Tan, S. C. Tjin, C. C. Chan, N. Q. Ngo e X. Y. Dong (2004). "A high-resolution tunable fiber Bragg grating filter". Microwave and Optical Technology Letters **42** (2): 89.
- [Tennyson, 2001] Tennyson, R. C., A. A. Mufti, S. Rizkalla, G. Tadros e B. Benmokrane (2001). "Structural health monitoring of innovative bridges in Canada with fiber optic sensors". Smart Materials and Structures **10**: 560-573.
- [TNO, 2005] TNO, T. (2005). "High-speed Fiber Bragg Grating sensor system." Acedido em Setembro, 2005, de <http://www.tpd.tno.nl/smartsite260.html>.
- [Toshiba, 1997] Toshiba. (1997). "Toshiba CCD Linear Image Sensor - TCD1201D." Acedido em Setembro 24, 2005, de <http://www.stellarnet-inc.com/techspec.htm>.

- [Udd, 2002] Udd, E., K. Black, W. Schulz, S. Kreger, M. Kunzler e D. Heider (2002). "In-situ evaluation of composite structural performance in presence of high stress/strain gradients using multi-axis fiber grating strain sensors". *Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest*. **1**: 59-62.
- [Udd, 2000] Udd, E., W. L. Schulz, J. M. Seim, A. Trego, E. Haugse e P. E. Johnson (2000). "Use of transversely loaded fiber optic grating strain sensors for aerospace applications". *SPIE Proceedings*. **3994**: 96.
- [Valente, 2002] Valente, L. C. G., A. M. B. Braga, A. S. Ribeiro, R. D. Regazzi, W. Ecke, C. Chojetzki e R. Willsch (2002). "Time and wavelength multiplexing of fiber Bragg grating sensors using a commercial OTDR". *Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest, IEEE*. **1**: 151-154.
- [Volanthen, 1997] Volanthen, M., H. Geiger e J. P. Dakin (1997). "Distributed Fibre Grating Sensor for Smart Structures Application". *Optical Techniques for Smart Structures and Structural Monitoring (Digest No. 1997/033), IEE Colloquium on, London, UK, IEE*. 4/1-4/6.
- [Volanthen, 1996] Volanthen, M., H. Geiger, M. G. Xu e J. P. Dakin (1996). "Simultaneous monitoring of multiple fibre gratings with a single acousto-optic tunable filter". *Electronics Letters* **32** (13): 1228-1229.
- [Wagreich, 1996] Wagreich, R. B., W. A. Atia, H. Singh e J. S. Sirkis (1996). "Effects of diametric load on fibre Bragg gratings fabricated in low birefringence fibre". *Electronics Letters* **32** (13): 1223-1224.
- [Wang, 1999] Wang, J. S., J. R. Costelloe e R. H. Stolen (1999). "Reduction of the Degree of Polarization of a Laser Diode with a Fiber Lyot Depolarizer". *IEEE Photonics Technology Letters* **11** (11): 1449-1451.
- [Wei-Chong, 1999] Wei-Chong, D., T. Xiao-Ming e T. Hwa-Yaw (1999). "Fiber Bragg grating cavity sensor for simultaneous measurement of strain and temperature". *Photonics Technology Letters, IEEE* **11** (1): 105.
- [Weis, 1994] Weis, R. S., A. D. Kersey e T. A. Berkoff (1994). "A four-element fiber grating sensor array with phase-sensitive detection". *Photonics Technology Letters, IEEE* **6** (12): 1469.
- [Weisstein, 2005] Weisstein, E. (2005). "Eric Weisstein's World of Science." Acedido em Junho 01, 2005, de <http://scienceworld.wolfram.com/physics/>.
- [Willsch, 2003] Willsch, M., N. M. Theune, T. Bosseleemann, W. Ecke, I. Latka e B. Hofer (2003). "Distributed Dynamic Strain Measurement in Power Generators Using a Novel Fast FBG Interrogation System". 16th International Conference on Optical Fiber Sensors, Nara, Japan. 294-297.
- [Willsch, 2002] Willsch, R., W. Ecke e H. Bartelt (2002). "Optical fiber grating sensor networks and their application in electric power facilities, aerospace and geotechnical engineering". *Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest, Portland, OR, USA*. **1**: 49-54.
- [Won, 2003] Won, P. C., J. Leng, Y. Lai e J. A. R. Williams (2003). "Determination of Localized Temperature Changes using a Chirped Fibre Bragg Gratings". 16th International Conference on Optical Fiber Sensors, Nara, Japan. 244-247.
- [Xu, 1994] Xu, M. G., J. L. Archambault, L. Reekie e J. P. Dakin (1994). "Discrimination between strain and temperature effects using dual-wavelength fibre grating sensors". *Electronics Letters* **30** (13): 1085.
- [Xu, 1995] Xu, M. G., L. Dong, L. Reekie, J. A. Tucknott e J. L. Cruz (1995). "Temperature-independent strain sensor using a chirped Bragg in a tapered optical fiber". *Electronics Letters* **31** (10): 823-825.
- [Xu, 1993] Xu, M. G., H. Geiger, J. L. Archambault, L. Reekie e J. P. Dakin (1993). "Novel interrogating system for fibre Bragg grating sensors using an acousto-optic tunable filter". *Electronics Letters* **29** (17): 1510.
- [Xu, 1996] Xu, M. G., H. Geiger e J. P. Dakin (1996). "Modeling and performance analysis of a fiber Bragg grating interrogation system using an acousto-optic tunable filter". *Lightwave Technology, Journal of* **14** (3): 391.

- [Yamate, 2003] Yamate, T., R. J. Schroeder, R. T. Ramos e E. Udd (2003). "Separation method of dual peaks produced by birefringence using polarization control". 16th International Conference on Optical Fiber Sensors, Nara, Japan. 64-67.
- [Yariv, 1973] Yariv, A. (1973). "Coupled-mode theory for guided-wave optics". Quantum Electronics, IEEE Journal of **9** (9): 919-933.
- [Yu, 2003] Yu, A. W., S. W. Wilson, D. Bowler, P. J. S. Heim e S. A. Merritt (2003). Methods and devices for high power, depolarized superluminescent diodes. FreshPatents. U. S. P. P. A. Service. EUA. Patente nº 60/472,743.
- [Zhang, 1999] Zhang, L., Y. Liu, I. Bennion, D. Coutts e C. Webb (1999). "High reflectivity single- and multiple-grating fabrication of Bragg and long-period structures using 255 nm UV light from a frequency-double copper vapour laser". International Conference on Bragg Gratings, Photosensitivity, and Poling in Glass Waveguides, Stuart, USA. 66-68.
- [Zhao, 2002] Zhao, Y. e Y. Liao (2002). "Discrimination methods and demodulation techniques for fiber Bragg grating sensors". Optics and Laser in Engineering (41): 1-18.

INSCRIÇÃO DAS REDES DE BRAGG

A.1 Máscara de Fase

A técnica de inscrição por máscara de fase foi a utilizada para a inscrição de todas as redes de difracção de Bragg utilizadas em todas as aplicações descritas nesta trabalho.

Para a sua produção foram utilizadas duas máscaras de fase do mesmo fabricante, a Ibsen Photonics [Ibsen, 2005], especialmente realizadas para a inscrição de redes de Bragg em fibra, Figura A.1.

As suas principais características são as seguintes:

- Período da rede de difracção das máscaras: 556 nm e 560 nm;
- Relação *chirp*: não existente;
- Dimensões da rede: 10 mm x 10 mm;
- Dimensões da base de sílica: 30 mm x 25 mm;
- Optimizada para um comprimento de onda de iluminação de 244 nm;
- Supressão típica para a ordem zero: 1-2 % (garantida: <4 %);
- Exactidão e uniformidade do período da rede: $\pm 0,01$ nm;

As várias características relacionadas com as dimensões e material das máscaras (o que implicou a definição da própria marca seleccionada) foram impostas pelo sistema de inscrição utilizado, existente nos laboratórios de optoelectrónica da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. O laser que compõe este sistema é um laser de excímeros KrF, com um comprimento de onda de 244 nm.

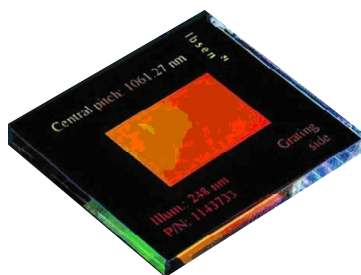


Figura A.1 Imagem da máscara de fase Ibsen para inscrição de redes de Bragg em fibra

Durante o período de três anos que decorreu o trabalho experimental várias redes foram produzidas. As redes obtidas não são todas iguais devido a vários factores, entre os quais:

- Diferentes condições da fibra óptica, devido a diferentes tempos de exposição ao hidrogénio (anexo A.2), e também à tensão a que fica sujeita durante o processo de inscrição;
- Diferenças no *set-up* utilizado, em termos de potência de radiação e frequência de disparo do laser e também no alinhamento e configuração do percurso óptico, desde a saída do laser até à fibra óptica.

Estas diferenças são notórias a vários níveis, como o comprimento de onda central da rede de Bragg, a sua largura a meia altura, a maior ou menor presença de lóbulos laterais e também, ou sobretudo, na reflectividade conseguida com cada uma. As figuras seguintes são disso mesmo demonstrativas, em que para duas redes produzidas com a mesma máscara de fase mas em duas alturas distintas, na rede de Bragg da Figura A.2 é encontrada uma reflectividade de apenas 3 % enquanto na rede de Bragg da Figura A.3 a reflectividade é de 99,6 %. Este último valor foi a maior reflectividade encontrada numa rede de Bragg produzida durante este trabalho.

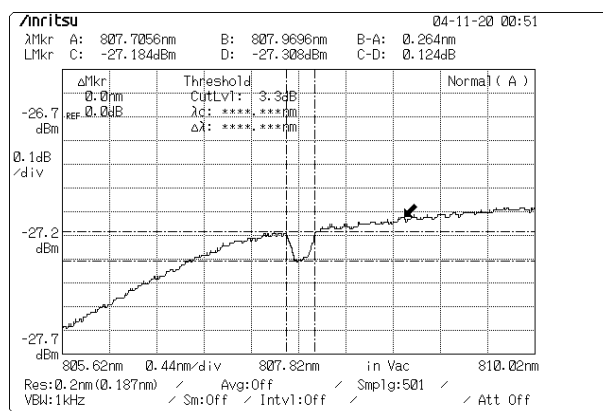


Figura A.2 Reflexão de uma rede de Bragg produzida: reflectividade calculada de 3 % e $\lambda_B = 807,08 \text{ nm}$

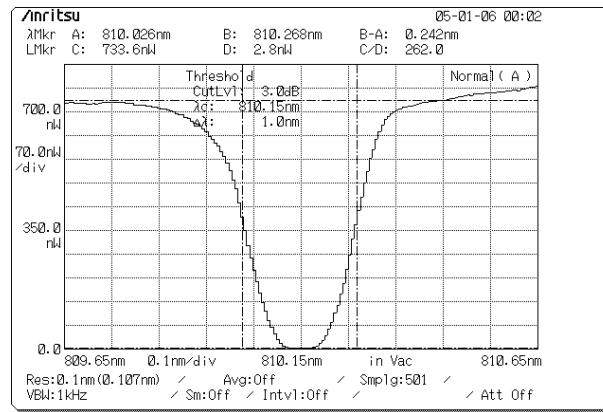


Figura A.3 Reflexão de uma rede de Bragg produzida: reflectividade calculada de 99,6 % e $\lambda_B = 810,15 \text{ nm}$

A.2 Hidrogenação

O recurso a fibras ópticas vulgares, utilizadas em telecomunicações e com baixas concentrações de Germânio, na inscrição de redes de difracção de Bragg, leva à utilização de técnicas para o aumento da fotosensibilidade das mesmas. O processo utilizado foi o da hidrogenação, referido na secção 2.2.2. Neste processo, a fibra óptica é previamente introduzida numa câmara fechada com hidrogénio, ficando sujeita a uma pressão de 150 atm à temperatura ambiente (a câmara encontra-se numas instalações abertas, no exterior do edifício principal da FCUP), durante um período de tempo nunca inferior a uma semana (em algumas situações ultrapassou as duas semanas).

Sendo o fenómeno da fotosensibilidade um assunto ainda pouco explicado, onde existe ainda um grande desconhecimento, não foi, no entanto, efectuado qualquer estudo de avaliação sobre o fenómeno durante o decorrer deste trabalho. Este é um campo a ser explorado no futuro.

CARACTERÍSTICAS DO EQUIPAMENTO ÓPTICO UTILIZADO

B.1 Espectrómetro StellarNet EPP-2000

O espectrómetro utilizado na realização dos trabalhos desta tese foi adquirido à empresa StellarNet, Inc. [StellarNet, 2005], empresa sediada em Oldsmar, Florida, Estados Unidos da América.

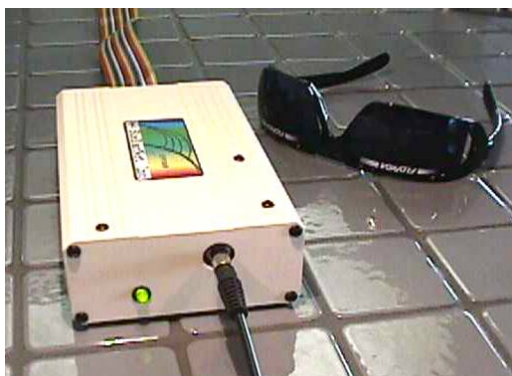


Figura B.1 Imagem do espectrómetro StellarNet EPP-2000

A referência deste espectrómetro é EPP-2000 NIR2 e apresenta como principais características, fornecidas pelo fabricante:

- Gama de medição: 600 – 1000 nm;
- Rede de difracção: Plana-holográfica – 1200 linhas/mm;
- Ranhura de entrada: 25 μm ;
- Resolução óptica: 1,2 nm (correspondente a 6 pixeis);
- Resolução física (dispersão): 0,2 nm;

- Conector óptico de entrada: SMA-905, fêmea;
- Array linear de CCD: Sony ILX511 [Sony, 2005] ou Toshiba TCD1201D [Toshiba, 1997]
2048 *pixels*;
Dimensão do *pixel* – 14 μ m x 200 μ m (largura x altura);
Intervalo entre *pixels* adjacentes: 14 μ m;
- Conversor Analógico-Digital: 12 *bits* (4096 níveis)

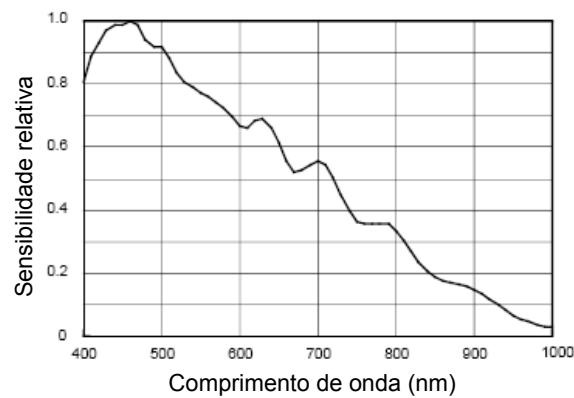


Figura B.2 Curva de sensibilidade aos comprimentos de onda do *array* de CCD's Sony ILX511

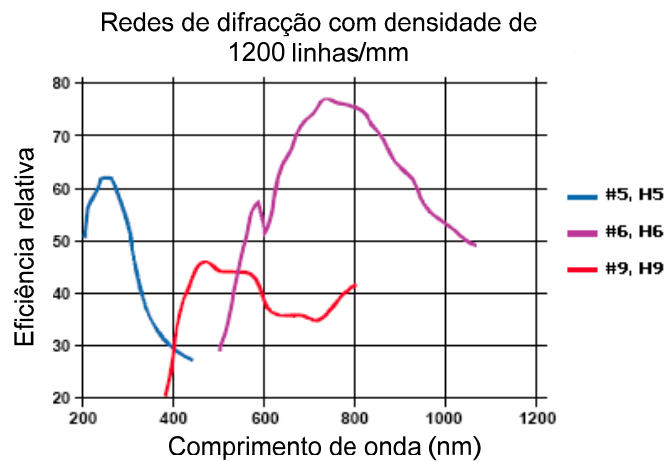


Figura B.3 Curva de eficiência da rede de difração utilizada (H6) [Hamamatsu, 2005]

B.2 Fonte Óptica – SLD-381-MP2-DIL-SM

A fonte de luz utilizada no sistema de interrogação desenvolvido é uma fonte óptica de tecnologia Díodo Super Luminescente (SLD) da empresa SuperlumDiodes, Ltd. [Superlum, 2005], sediada em Moscovo, Rússia.

A Figura B.4 (a) ilustra um SLD em caixa do tipo DIL (semelhante à utilizada neste trabalho), na qual está englobado um sistema de aquecimento para regulação de temperatura. Na Figura B.4 (b) está representado o respectivo suporte de montagem.

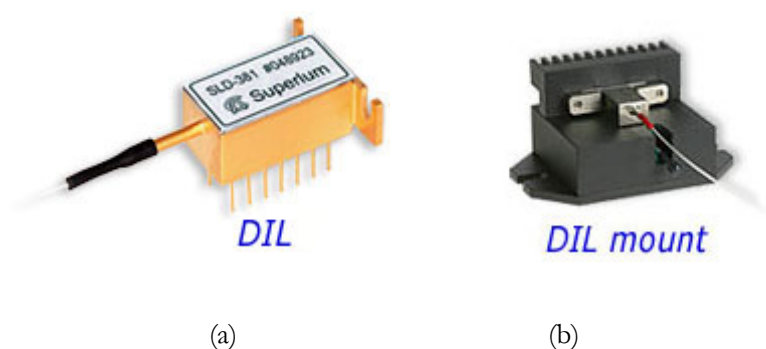


Figura B.4 (a) Imagem de uma fonte óptica SLD com caixa do tipo DIL; (b) Suporte de montagem para o SLD tipo DIL

Esta fonte óptica apresenta um espectro largo, com comprimento de onda central de 809,2 nm e uma largura a meia altura de 21,0 nm. A potência de saída máxima, para uma corrente de alimentação máxima de 140 mA é de 1 mW. A Figura B.5 ilustra o espectro de saída característico deste tipo de fonte.

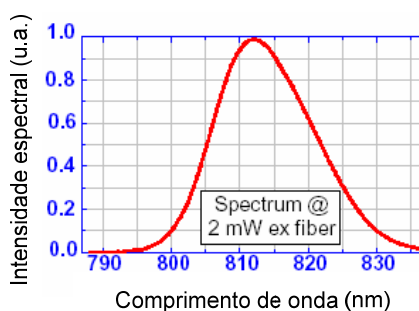


Figura B.5 Espectro de saída característico de um SLD-381-HP (2 mW)

Existem actualmente SLD's com superiores características de largura a meia altura e de potência de saída. Um exemplo é o novo SLD-47-HP da SuperlumDiodes, do qual é apresentado o registo espectral na Figura B.6.

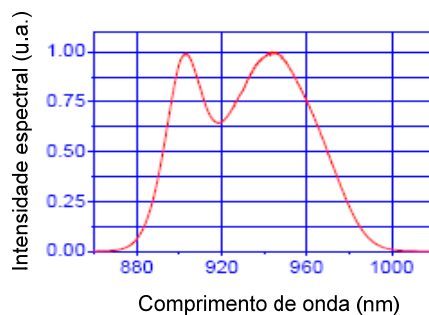


Figura B.6 Espectro de saída característico de um SLD-47-HP (10 mW)

Outro dos elementos necessários para a utilização deste tipo de fonte óptica é a sua fonte de alimentação, com corrente e temperatura controlada. Foi utilizada a *Driver Pilot-2*, também fornecida pela SuperlumDiodes, Figura B.7.



Figura B.7 Fonte de alimentação do SLD com controlo da temperatura e corrente de funcionamento – PILOT-2

PLATAFORMA DE ENSAIOS E CALIBRAÇÃO

Para cumprir o objectivo de caracterização de sensores de deformação foi necessária a realização de uma estrutura que permitisse a aplicação de deformação à fibra óptica onde se encontra inscrita a rede de difracção de Bragg. A Figura C.1 ilustra o modelo dessa estrutura.

É constituída por uma primeira base, fixa, e por uma segunda base, móvel, implementada numa primeira fase através de um parafuso micrométrico, e mais tarde por uma mesa de posicionamento controlada (Figura C.2). O ajuste deste mecanismo permite o deslocamento controlado, na direcção do eixo da fibra óptica, e nos dois sentidos. O parafuso utilizado na primeira fase tinha uma resolução de 20 μm , conseguindo-se uma resolução máxima de 0,1 μm com a mesa de deslocamento. Ambas as bases estão fixas à mesa óptica através de parafusos e de suportes auxiliares. A fixação da fibra óptica às duas bases foi efectuada através de cola de cianoacrilato (super-cola ou cola-rápida).

A distância utilizada entre os pontos de fixação da fibra é de $L = 256 \text{ mm}$ (em repouso $\equiv$ referência zero). A colagem é feita precisamente nos extremos das bases de forma a garantir a distância L , dado que não é possível controlar o espalhamento da cola sobre uma superfície lisa como era o caso das bases utilizadas.

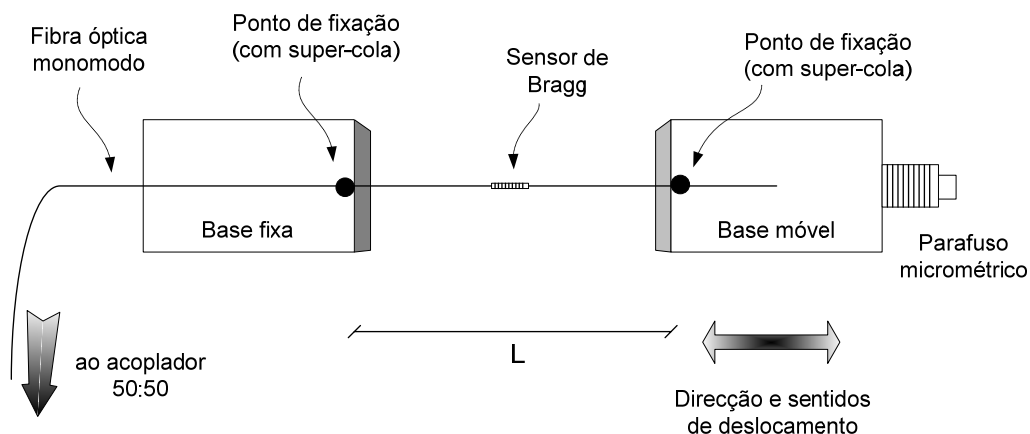


Figura C.1 Esquema de aplicação de deformação à fibra óptica em plataforma de ensaio

A deformação aplicada à fibra, e portanto ao sensor de Bragg, corresponde a uma variação de alongamento relativamente ao comprimento total inicial:

$$Deformação(\varepsilon) = \frac{\Delta L}{L} \quad (8.1)$$

A resolução máxima permitida pela mesa de posicionamento, nestas condições, é então de:

$$\varepsilon = \frac{0,1 \cdot 10^{-6}}{0,256} = 0,39 \mu\varepsilon \quad (8.2)$$

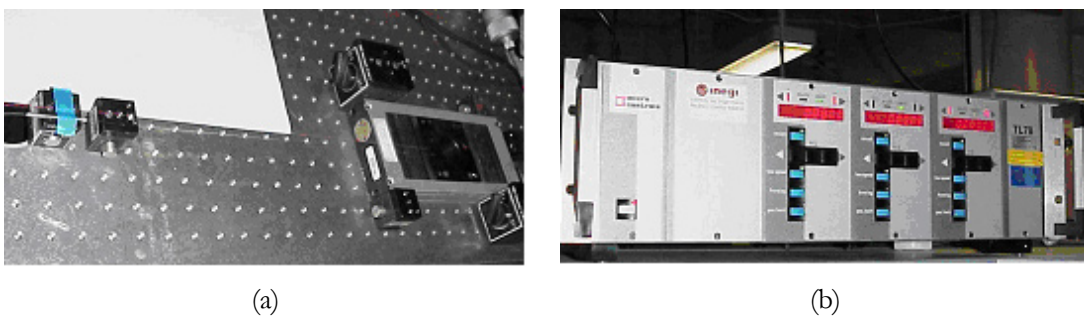


Figura C.2 Imagens da estrutura de aplicação de deformação (a) mesa de deslocamento e suporte fixo; (b) controlador de posição da mesa (Micro-Control TL78)

O gráfico da Figura C.3 mostra três curvas espectrais da resposta obtida, com o mesmo sensor para três diferentes deformações aplicadas, indicadas na forma de posição de afastamento da base móvel. Na escala das ordenadas está representada a intensidade espectral, em unidades arbitrárias, e em abcissas a gama de variação do comprimento de onda.

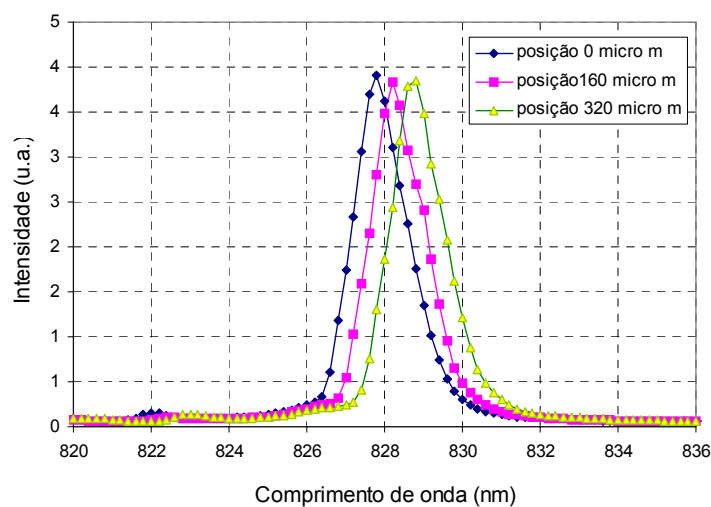


Figura C.3 Gráfico representativo das respostas obtidas com o EPP2000 para três deformações distintas aplicadas ao sensor

DIAGRAMA DE FLUXO DO ALGORITMO UTILIZADO NO SOFTWARE DESENVOLVIDO

Todo o *software* desenvolvido no âmbito do trabalho desta tese foi previamente testado em Matlab ou Excel/VBA por questões de facilidade de implementação. No entanto, toda a implementação dos processos de análise de resultados e comunicação com o espectrómetro foi realizada em linguagem *Delphi* [Borland, 2005]. Assim, os diagramas de fluxo apresentados para descrever o funcionamento dos algoritmos apresentam, em certos aspectos, pormenores de implementação próximos da linguagem de programação.

Este diagrama de fluxo mostra o processo de aquisição de variáveis e respectiva análise para determinação do valor central da curva de resposta dos n sensores multiplexados pelo sistema. A chamada da função Det_PM corresponde ao cálculo de λ_B para uma determinada resposta específica. Neste diagrama não é feita qualquer referência à componente de comunicação e acesso aos dados do espectrómetro.

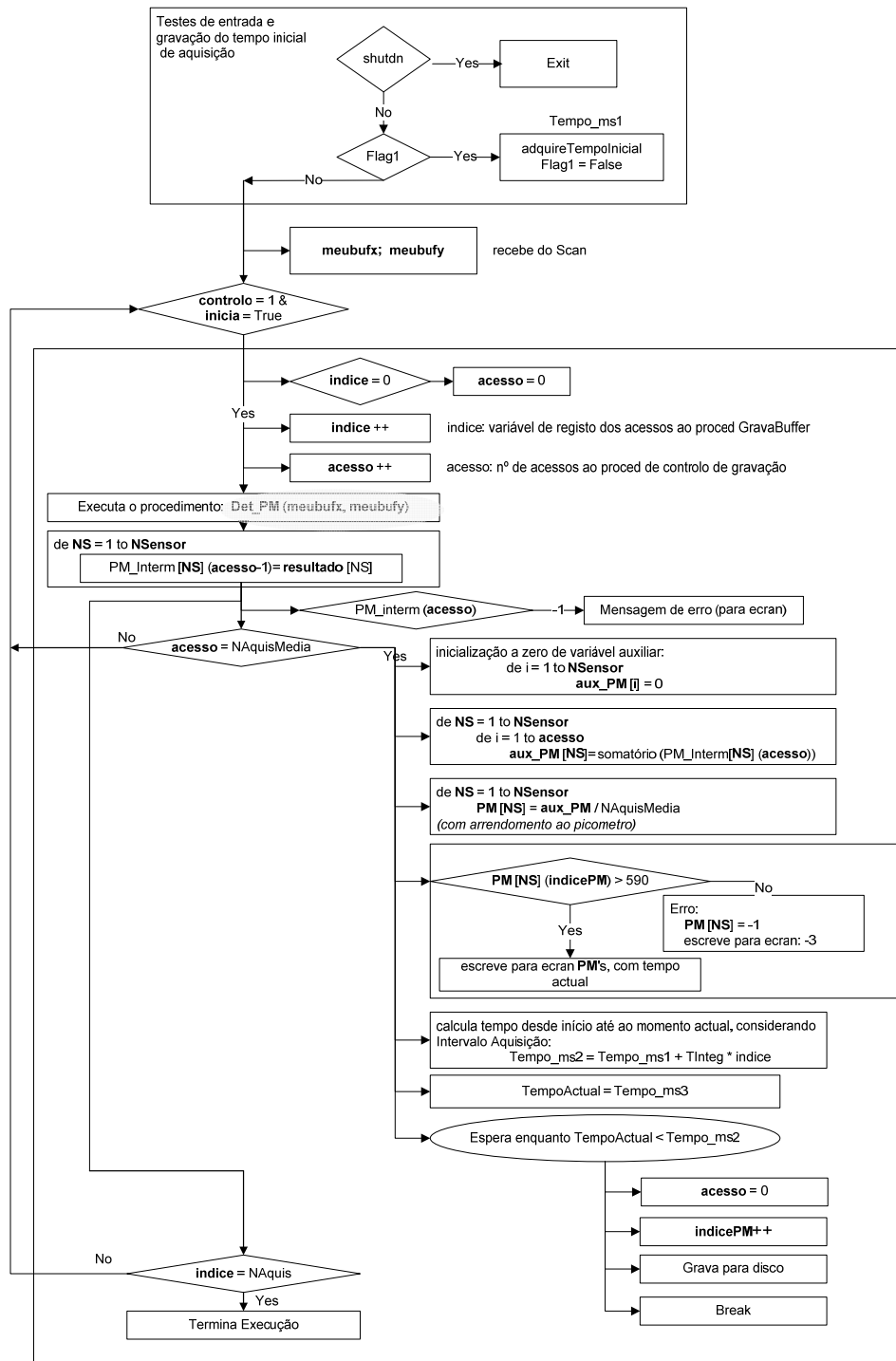


Figura D.1 Diagrama de fluxo da aplicação desenvolvida em *Delphi* para comunicação com o espectrómetro e determinação de λ_B