



**FEUP** FACULDADE DE ENGENHARIA  
UNIVERSIDADE DO PORTO

# MONITORIZAÇÃO DE ESTRUTURAS DE ENGENHARIA CIVIL APOIADA EM SOLUÇÕES DE FIBRA ÓPTICA

*Carlos Filipe Guedes Rodrigues*

Orientador

Professor Doutor Joaquim Azevedo Figueiras (DEC/FEUP)

Co-orientadores

Doutor Engenheiro Carlos Manuel da Silva Félix (NewMENSUS, Lda.)

Professor Doutor Armindo Luís Vilar Soares Lage (DEEC/FEUP)

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto  
para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil.

Setembro de 2011



# Resumo

Sobretudo ao longo da última década, múltiplos esforços, académicos e industriais, têm sido encetados com vista à entrada dos sensores em fibra óptica na monitorização estrutural. Para o sucesso desta tecnologia, muito tem contribuído um conjunto de vantagens que apresenta quando confrontada com as tecnologias convencionais. Realça-se a sua elevada precisão, estabilidade, imunidade a interferências electromagnéticas, capacidade de multiplexagem e flexibilidade. No entanto, face ao estado da arte actual, o desenvolvimento de soluções mais fiáveis, robustas e competitivas para medição de um conjunto mais amplo de grandezas torna-se premente para a expansão desta tecnologia na engenharia civil. Neste contexto, a presente dissertação tem como objectivo o desenvolvimento, teste e exploração de novas soluções baseadas em sensores de fibra óptica para a monitorização das estruturas da engenharia civil.

Esta dissertação começa por introduzir os conceitos mais relevantes relacionados com a tecnologia da fibra óptica. Apresentam-se, em detalhe, as principais tecnologias ópticas utilizadas para medição de grandezas estruturalmente significativas e procede-se ao levantamento e especificação dos principais componentes que constituem um sistema de medição para monitorização estrutural.

Aborda-se, de seguida, a medição de extensões em estruturas metálicas com recurso a sensores de Bragg. Descrevem-se as soluções adoptadas, baseadas na colagem superficial destes sensores ópticos e desenvolvem-se técnicas específicas vocacionadas para a sua instalação expedita nas estruturas da engenharia civil. Avalia-se o seu desempenho num conjunto de ensaios laboratoriais complementados pela análise numérica. Apresenta-se ainda um caso prático cobrindo a sua aplicação na monitorização estrutural durante os trabalhos de reabilitação da Ponte Eiffel, em Viana do Castelo.

A medição de extensões médias com base em transdutores de deformação com base longa de medida passa a ser o foco central dos dois capítulos subsequentes. Primeiro, avalia-se e compara-se, de forma directa, num conjunto de ensaios laboratoriais e numa instalação em campo, um conjunto de sete soluções alternativas. Procede-se à análise crítica destas diferentes tecnologias enquadrando as suas principais características com os requisitos efectivos da engenharia civil. Desenvolvem-se, em seguida, novos transdutores para embeber no betão baseados em sensores de Bragg que se sujeitam a vários testes

laboratoriais procurando avaliar o seu desempenho no betão fendilhado. Ilustra-se a eficiência da monitorização estrutural baseada em sensores de deformação recorrendo ao caso da Ponte Ricciolo, na Suíça.

Passa-se para a medição de flechas com recurso a sensores de Bragg, apresentando-se um novo transdutor em fibra óptica desenvolvido para esse efeito baseado no princípio dos níveis líquidos. Destacam-se os aspectos essenciais deste transdutor com especial ênfase para o seu princípio de funcionamento e para a sua arquitectura interna inovadora. Realiza-se um conjunto de testes laboratoriais que visam a avaliação do desempenho deste transdutor. Comprova-se a resposta linear do transdutor, a sua elevada resolução em termos de deslocamento vertical e avalia-se a eficiência da compensação intrínseca dos efeitos da temperatura.

Agregam-se os desenvolvimentos anteriores com a apresentação do sistema avançado de monitorização estrutural de base óptica da Ponte da Lezíria, sobre o Rio Tejo, no Carregado. Descreve-se a monitorização em apreço e discutem-se os principais aspectos relacionados com a concepção, com a arquitectura da rede de sensores e com a instalação deste sistema de monitorização. Deixam-se recomendações complementares tendo por objectivo a implementação prática de sistemas de monitorização baseados em sensores de Bragg em pontes. Expõem-se as potencialidades do sistema em funcionamento e avalia-se o desempenho do sistema óptico, incidindo sobre a análise dos resultados mais importantes relativos à monitorização do comportamento da Ponte da Lezíria em serviço.

Por último, são expostas as principais conclusões do trabalho, sumariados os principais contributos e abertas perspectivas de trabalhos futuros.

# Abstract

Especially on the last decade, multiple research and industrial efforts have been made in view of introducing fiber optic sensors in the structural monitoring. A set of advantages over conventional electric sensors has contributed to the success of the optic technology. Its high precision, high stability, immunity to electromagnetic interference, multiplexing capabilities and versatility have been stressed. However, taking into account the current state of the art, the development of more reliable, robust and cost-effective solutions is mandatory to expand this novel technology to the field of civil engineering. In this context, this dissertation aims at developing, testing and exploring new solutions based on fiber optic sensors for the monitoring of civil engineering structures.

The thesis begins by the introduction of relevant concepts related to fiber optic sensing technology. The key technologies used for measuring significant structural parameters are presented in detail. The main components of the structural monitoring measurement system are identified and presented.

Afterwards, the measurement of strains in steel structures with fiber Bragg grating sensors is introduced. The solutions adopted based on superficial bonding of strain sensors are presented and specific techniques aimed at their expeditious installation in civil engineering structures are described. Their performance was assessed through a set of experimental tests supported by the numerical analysis. A case study is presented covering the strain sensors exploitation in the structural monitoring during the rehabilitation works of the Eiffel Bridge.

The measurement of average strains based on long-gauge deformation transducers is the focus of the two subsequent chapters. First, the performance of seven commercially available alternative solutions were tested and directly compared both in laboratory and in field conditions. The results are presented and discussed, aiming at the assessment of the main characteristics of each technology, and taking into account the principal requirements of in-field civil engineering applications. Later, new transducers to be embedded into concrete based on fiber Bragg grating sensors were developed. These transducers were subjected to a set of laboratory tests to evaluate their performance in cracked concrete. The efficiency of a monitoring method based on long-gauge sensors is illustrated through an application to the Ricciolo Bridge, in Switzerland.

The development of a novel displacement transducer to measure bridge deflections based on noncontact measurement technique supported by the liquid leveling principle is then introduced. The essential aspects of this transducer are pointed out with a special emphasis on the innovative operating principle and on its internal architecture. A set of experimental tests were carried out in order to assess the performance of this transducer. The linear response, high resolution, and intrinsic compensation of the temperature effects were proved.

A field application of the developed transducers is presented invoking the advanced optical based structural monitoring system of the Lezíria Bridge, over Tagus River, in Carregado. The system conception, the adopted sensors network architecture, and the practical installation of a monitoring system based on fiber Bragg grating sensors are discussed. Recommendations are given in order to further implementation of monitoring systems based on Bragg sensors in bridges. The operation mode and the performance of the optical based structural monitoring system used for the permanent surveillance of the Lezíria Bridge are described and appraised.

Finally, the main conclusions concerning the developed work and the principal contributions are presented, as well as news ideas for further developments are sketched.

# Résumé

Surtout au cours de la dernière décennie, de nombreux efforts, académiques et industriels, ont été initiés en vue de l'entrée des capteurs à fibres optiques dans la surveillance structurelle. Un ensemble d'avantages qu'il présente face aux technologies conventionnelles a contribué pour que cette technologie soit un succès. On remarquera sa précision, sa stabilité, son immunité aux interférences électromagnétiques, ainsi que sa capacité de multiplexage et sa flexibilité qui doivent être soulignées. Toutefois, face l'état de l'art, le développement de solutions plus fiables, robustes et concurrentielles pour la mesure d'un plus large ensemble de grandeurs devient urgent pour l'expansion de cette technologie dans le génie civil. Dans ce contexte, la présente thèse a pour objet le développement, l'expérimentation et l'exploration de nouvelles solutions basées sur les capteurs à fibre optique pour la surveillance d'ouvrages de génie civil.

Cette thèse commence par introduire les concepts les plus pertinents liés à la technologie de la fibre optique. Sont présentées, en détail, les principales technologies optiques utilisées pour la mesure de grandeurs structurellement significatives, et l'on procède au relevé et à la description des principaux composants qui constituent un système de mesure pour la surveillance structurelle.

Ensuite, est abordée la mesure d'extensions de structure métallique recourant aux capteurs de Bragg. Les solutions adoptées sont décrites, basées sur le collage superficiel de ces capteurs optiques, et des techniques spécifiques sont développées, choisies pour leur rapide et efficace installation dans les structures de génie civil. Leur performance est évaluée par le biais d'un ensemble d'essais en laboratoire et de l'analyse numérique. Enfin, un cas pratique est présenté, couvrant son application dans le contrôle de la réhabilitation structurelle du Pont Eiffel.

La mesure d'extensions moyennes basé sur des capteurs de déformation avec longue base de mesure est le sujet central des deux chapitres suivants. D'abord, on évalue et on compare, de forme directe, au travers d'un ensemble de tests en laboratoire et d'une installation sur site, un ensemble de sept solutions alternatives. On procède à l'analyse critique de ces différentes technologies en faisant coïncider leurs principales caractéristiques avec les conditions effectives du génie civil. On développe ensuite de nouveaux transducteurs à sceller dans le béton basés sur des réseaux de Bragg, qui sont

soumis à plusieurs tests en laboratoire de manière à évaluer leur performance dans le béton fissuré. On met en avant l'efficacité de la surveillance structurelle basée sur des capteurs de déformation, en utilisant le cas de la Pont Riccilo, en Suisse.

On passe ensuite à la mesure de déplacements verticaux en utilisant des capteurs de Bragg, en présentant un nouveau transducteur en fibre optique développé pour cet effet, et basé sur la principe des niveaux liquides. On remarque les aspects essentiels de ce transducteur en mettant l'accent sur leur principe de fonctionnement et sur leur architecture interne innovante. On réalise un ensemble d'essais en laboratoire qui visent l'évaluation de leur performance. La réponse linéaire du transducteur et sa haute résolution en termes de déplacement vertical se vérifient, et on évalue l'efficacité de la compensation intrinsèque des effets de la température.

On agrège les développements précédents à la présentation du système avancé de surveillance d'ouvrage à fibre optique du Pont de Lezíria. On décrit le monitoring et on discute les principaux aspects de la conception du système, avec l'architecture du réseau de capteurs et avec l'installation pratique de ce système. On laisse des recommandations complémentaires ayant pour objectif la mise en oeuvre pratique de systèmes de surveillance basés sur des capteurs de Bragg, dans les ponts. On expose les potentialités du système en fonctionnement, et on évalue la performance du système optique en mettant l'accent sur l'analyse des résultats les plus importants liés à la surveillance du Pont de Lezíria en service.

Pour terminer, les principales conclusions de ce travail sont présentées, résumant les principales contributions et les perspectives de travaux futurs.

# Agradecimentos

No derradeiro momento em que esta dissertação se concretiza e fazendo uma retrospectiva dos últimos quatro anos, foram muitas as experiências, dificuldades e conquistas pessoais ultrapassadas. Houve também pessoas que se destacaram e sem o apoio das quais reconheço que este trabalho não teria sido possível. Gostaria por isso de deixar registado o meu mais sincero agradecimento:

- ao Professor Joaquim Figueiras, meu Orientador, pela sua sábia e experiente orientação e pela inesgotável disponibilidade e interesse. Das muitas reuniões informais que fomos tendo, guardo valiosos ensinamentos e, sem dúvida, os momentos de maior inspiração deste trabalho;
- ao Professor Carlos Félix, meu Co-Orientador e Coordenador na empresa NewMENSUS, pela introdução no mundo da instrumentação, pela partilha da sua experiência na mesma área e pelo seu sempre presente apoio logístico;
- ao Professor Armindo Lage, meu Co-Orientador, por todo o apoio e valiosos contributos na área da óptica e electrotecnia. A sua visão distinta da Engenharia Civil foi profundamente enriquecedora;
- ao Doutor Daniele Inaudi, que me acolheu na SMARTEC, pela recepção num núcleo empresarial, pelo interesse no meu trabalho e por ter reunido todas as condições para a condução dos ensaios laboratoriais aí realizados. À restante equipa da SMARTEC agradeço o acolhimento, o interesse revelado e a partilha de experiências;
- à equipa de técnicos do LABEST – Laboratório da Tecnologia do Betão e do Comportamento Estrutural da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto por todo o suporte na vasta componente experimental deste trabalho. À Paula Silva, pela disponibilidade permanente. Ao Cláudio Ferraz, pelo apoio técnico nos muitos ensaios laboratoriais realizados. Ao Rogério Pinheiro, pelo árduo apoio na Ponte da Lezíria. Ao Sr. Monteiro, pelo contributo na preparação de vários esquemas de ensaio e pelo suporte prestado no desenvolvimento dos primeiros protótipos.

- à equipa de colaboradores da NewMENSUS. Ao Remy Faria, pela dedicação e pelo apoio que prestou em vários trabalhos finais na Ponte da Lezíria. Ao Amândio Pinto, pelo contributo sobretudo na instrumentação da Ponte Eiffel;
- aos colegas que comigo se foram cruzando que, na mesma luta, foram partilhando a sua experiência e amizade. Ao Américo Dimande, ao Elói Figueiredo, ao Leonel Ramos, ao Lino Maia e ao Miguel Azenha que entretanto já concluíram o seu doutoramento. À Helena Figueiras, à Denise Ferreira e ao Zé Santos, desejando-lhe o maior sucesso para o fim que se avizinha. Ao Hélder Sousa, pela experiência que tivemos juntos na Ponte da Lezíria. Ao Filipe Cavadas, pela assiduidade e pelo trabalho desenvolvido em conjunto na Ponte Eiffel;
- aos colegas mais velhos, Mário Pimentel e Carlos Sousa, pela introdução e pelo suporte no desenvolvimento dos modelos numéricos, assim como no esclarecimento de muitas questões relacionadas com o *software* TNO Diana;
- de forma institucional, à Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) e à empresa NewMENSUS, Lda. que, no âmbito da Bolsa de Doutoramento em Empresa com a referência SFRH/BDE/15645/2006, suportaram financeiramente este trabalho.

A minha gratidão para todos aqueles que não estão aqui individualizados mas que com a sua amizade, crítica ou simples inspiração contribuíram, dia a dia, para que esta fosse uma sempre agradável e enriquecedora experiência.

Um agradecimento e dedicatória muito especial aos meus pais que de forma incondicional e com eterno amor me apoiaram, guiaram e estimularam em todas as fases da vida. A eles acabo por dedicar este trabalho.

A todos, endereço o meu muito obrigado!

Este trabalho, no âmbito da Bolsa de Doutoramento em Empresa - SFRH/BDE/15645/2006, teve apoio financeiro proveniente de:



# Índice de Texto

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Considerações iniciais . . . . .	1
1.2	Inspecções visuais . . . . .	3
1.3	Monitorização estrutural . . . . .	5
1.3.1	Introdução . . . . .	5
1.3.2	O conceito de monitorização da integridade estrutural . . . . .	7
1.4	Sistemas de Monitorização . . . . .	9
1.5	Monitorização baseada em sensores em fibra óptica . . . . .	11
1.5.1	Revisão bibliográfica . . . . .	13
1.6	Motivação . . . . .	17
1.7	Objectivos . . . . .	18
1.8	Estrutura da dissertação . . . . .	19
<b>2</b>	<b>Tecnologia dos Sensores em Fibra Óptica</b>	<b>21</b>
2.1	Introdução . . . . .	21
2.2	Fibra óptica . . . . .	22
2.2.1	Propagação da luz . . . . .	24
2.2.2	Propriedades físicas e mecânicas . . . . .	25
2.3	Tecnologias dos sensores em fibra óptica . . . . .	26
2.3.1	Classificação . . . . .	26
2.3.1.1	Natureza do elemento sensor . . . . .	27
2.3.1.2	Base de medida . . . . .	28
2.3.1.3	Princípio de medição . . . . .	29
2.3.2	Sensores intensiométricos . . . . .	29
2.3.3	Sensores de Bragg . . . . .	32
2.3.3.1	Princípio de funcionamento . . . . .	32
2.3.3.2	Técnica de fabrico . . . . .	33
2.3.3.3	Sensibilidade à deformação e à temperatura . . . . .	34
2.3.3.4	Compensação da temperatura . . . . .	36
2.3.4	Sensores interferométricos . . . . .	38
2.3.4.1	Princípio de funcionamento . . . . .	38
2.3.4.2	Interferómetro de Michelson . . . . .	39
2.3.4.3	Interferómetro de Mach-Zehnder . . . . .	40
2.3.4.4	Interferómetro de Fabry-Perot . . . . .	40
2.3.4.5	Sensibilidade . . . . .	41
2.3.5	Sensores distribuídos baseados no espalhamento de Raman e Brillouin . . . . .	43

2.3.5.1	Sensores de Raman . . . . .	44
2.3.5.2	Sensores de Brillouin . . . . .	46
2.4	Multiplexagem . . . . .	49
2.4.1	Multiplexagem temporal . . . . .	50
2.4.2	Multiplexagem em comprimento de onda . . . . .	51
2.4.3	Multiplexagem espacial . . . . .	51
2.4.4	Multiplexagem híbrida . . . . .	53
2.5	Arquitectura das redes de sensores . . . . .	53
2.5.1	Redes em série . . . . .	54
2.5.2	Redes em estrela . . . . .	55
2.5.3	Redes em árvore . . . . .	56
2.5.4	Redes híbridas . . . . .	56
2.5.5	Comparação das arquitecturas de rede . . . . .	57
2.6	Componentes de uma rede de sensores em fibra óptica . . . . .	57
2.6.1	Sensores e transdutores . . . . .	58
2.6.2	Unidade de leitura . . . . .	59
2.6.2.1	Fontes de luz . . . . .	59
2.6.2.2	Fotodetectores . . . . .	62
2.6.3	Fibra óptica . . . . .	62
2.6.4	Cabo óptico . . . . .	63
2.6.5	Emendas . . . . .	65
2.6.5.1	Perdas de luz localizadas na emenda . . . . .	66
2.6.5.2	Conectores . . . . .	67
2.6.5.3	Fusões . . . . .	70
2.6.5.4	Conectores <i>versus</i> fusões . . . . .	73
2.6.6	Comutadores . . . . .	73
2.6.7	Acopladores . . . . .	75
2.7	Considerações finais . . . . .	75
<b>3</b>	<b>Medição de Extensões com Sensores de Bragg</b>	<b>77</b>
3.1	Introdução . . . . .	77
3.2	Sensores de Bragg para medição da extensão . . . . .	80
3.2.1	Princípio de funcionamento . . . . .	80
3.2.2	Enquadramento e requisitos . . . . .	81
3.2.3	Tipos de encapsulamento . . . . .	82
3.2.4	Sensores de Bragg de colar . . . . .	84
3.3	Transmissão de extensões da estrutura para o sensor . . . . .	86
3.3.1	Mecanismo de transmissão da extensão até ao sensor . . . . .	86
3.3.1.1	Modelação numérica . . . . .	88
3.3.1.2	Resultados . . . . .	90
3.4	Técnicas de instalação . . . . .	93
3.5	Avaliação do desempenho de sensores de Bragg através de ensaios laboratoriais . . . . .	98
3.5.1	Provet 1: Varão com 20 sensores de Bragg (tipo I) . . . . .	98
3.5.1.1	Erro de medição . . . . .	99
3.5.1.2	Sensibilidade à extensão . . . . .	102
3.5.1.3	Resposta dinâmica . . . . .	103

3.5.1.4	Histerese e fadiga . . . . .	105
3.5.1.5	Sensibilidade à temperatura . . . . .	105
3.5.2	Provete 2: Viga com sensores de Bragg (tipo II) . . . . .	108
3.5.2.1	Sensibilidade à extensão . . . . .	108
3.5.2.2	Sensibilidade à temperatura . . . . .	109
3.6	Aplicação prática na reabilitação da Ponte Eiffel . . . . .	110
3.6.1	Enquadramento geral . . . . .	110
3.6.2	A Ponte Eiffel . . . . .	111
3.6.3	Solução estrutural original . . . . .	112
3.6.4	Reabilitação estrutural . . . . .	113
3.6.5	Monitorização durante a reabilitação estrutural . . . . .	115
3.6.5.1	Monitorização no início dos trabalhos de reabilitação (Fase I) . . . . .	116
3.6.5.2	Monitorização durante a substituição das cordas superiores (Fase II) . . . . .	118
3.6.5.3	Monitorização durante um ensaio de carga (Fase III) . . . . .	120
3.6.5.4	Monitorização durante a reparação do pavimento rodoviário (Fase IV) . . . . .	123
3.7	Considerações finais . . . . .	125
<b>4</b>	<b>Transdutores de Deformação: Comparação e Aplicações</b>	<b>129</b>
4.1	Introdução . . . . .	129
4.2	Sensores de deformação de base longa de medida . . . . .	131
4.2.1	Deformação média . . . . .	132
4.2.2	Deformação média no betão fendilhado . . . . .	133
4.3	Monitorização estrutural com base em sensores de deformação . . . . .	135
4.4	Avaliação e comparação de soluções comerciais . . . . .	139
4.4.1	Introdução . . . . .	139
4.4.2	Soluções analisadas . . . . .	139
4.4.2.1	Sistema SOFO . . . . .	140
4.4.2.2	Sistema MuST . . . . .	142
4.4.2.3	Sistema FOD . . . . .	144
4.4.2.4	Sistema SMARTape e SMARTprofile . . . . .	145
4.4.2.5	Sistema VW-JM . . . . .	147
4.4.3	Avaliação do desempenho e resultados . . . . .	148
4.4.3.1	Exactidão . . . . .	149
4.4.3.2	Precisão . . . . .	152
4.4.3.3	Sensibilidade à temperatura das unidades de leitura . . . . .	154
4.4.3.4	Sensibilidade à temperatura . . . . .	155
4.5	Aplicação durante a construção da Ponte Ricciolo . . . . .	159
4.5.1	A Ponte Ricciolo . . . . .	160
4.5.2	Plano de instrumentação . . . . .	160
4.5.3	Resultados durante a fase construtiva . . . . .	161
4.6	Considerações finais . . . . .	163
<b>5</b>	<b>Transdutores de Deformação para Embeber no Betão</b>	<b>169</b>
5.1	Introdução . . . . .	169

5.2	Transdutores de deformação de embeber no betão . . . . .	171
5.2.1	Sensores de embeber <i>versus</i> sensores superficiais . . . . .	171
5.2.2	Estado da arte e requisitos . . . . .	172
5.3	Concepção de novos transdutores de embeber com sensores de Bragg . . .	174
5.3.1	Transdutor N . . . . .	174
5.3.2	Transdutor L . . . . .	175
5.3.3	Materiais . . . . .	176
5.3.4	Preparação dos protótipos . . . . .	177
5.4	Avaliação dos transdutores desenvolvidos . . . . .	178
5.4.1	Ensaio de calibração sob tracção uniaxial . . . . .	178
5.4.1.1	Resultados . . . . .	179
5.4.2	Prisma submetido a ciclos de compressão . . . . .	181
5.4.2.1	Materiais . . . . .	181
5.4.2.2	Instrumentação . . . . .	182
5.4.2.3	Resultados . . . . .	183
5.4.2.4	Análise numérica . . . . .	185
5.4.3	Ensaio de aderência em flexão . . . . .	187
5.4.3.1	Instrumentação . . . . .	189
5.4.3.2	Resultados . . . . .	189
5.4.4	Viga fendilhada submetida a flexão circular . . . . .	191
5.4.4.1	Materiais . . . . .	193
5.4.4.2	Instrumentação . . . . .	193
5.4.4.3	Resultados . . . . .	197
	Ensaio monotónico: . . . . .	197
	Ensaio cíclico: . . . . .	201
5.4.5	Modelo numérico . . . . .	203
5.4.5.1	Resultados . . . . .	205
5.5	Instalação e aplicações . . . . .	208
5.6	Considerações finais . . . . .	210
<b>6</b>	<b>Desenvolvimento de um Transdutor para Medição de Flechas</b>	<b>213</b>
6.1	Estado da arte da medição de flechas em pontes . . . . .	213
6.2	Método dos níveis líquidos . . . . .	216
6.2.1	Princípio de aplicação . . . . .	216
6.2.2	Fontes de erro . . . . .	219
6.3	Concepção do Transdutor . . . . .	220
6.3.1	Princípio de Funcionamento . . . . .	220
6.3.2	Arquitectura . . . . .	221
6.3.3	Processamento dos sensores de Bragg . . . . .	223
6.4	Construção de protótipos . . . . .	225
6.5	Caracterização e resultados . . . . .	226
6.5.1	Erro de medição . . . . .	227
6.5.2	Precisão . . . . .	231
6.5.3	Resolução . . . . .	231
6.5.4	Compensação dos efeitos da temperatura . . . . .	231
6.5.5	Estabilidade . . . . .	233
6.6	Instalação e aplicações . . . . .	234

6.7	Considerações finais . . . . .	236
<b>7</b>	<b>Sistemas de Monitorização em Fibra Óptica - A Ponte da Lezíria</b>	<b>239</b>
7.1	Introdução . . . . .	239
7.2	A Ponte da Lezíria . . . . .	240
7.2.1	Descrição da estrutura . . . . .	242
7.3	Sistema de monitorização estrutural . . . . .	246
7.3.1	Aspectos Gerais . . . . .	246
7.3.2	Grandezas medidas e sensores utilizados . . . . .	247
7.3.3	Arquitectura da rede de sensores . . . . .	250
7.3.4	Instalação da rede de sensores . . . . .	252
7.4	Integração, pré-processamento e organização de dados . . . . .	256
7.4.1	Configuração e controlo do sistema de aquisição . . . . .	256
7.4.2	Indexação dos sensores . . . . .	257
7.4.3	Validação dos dados . . . . .	259
7.4.4	Conversão de unidades . . . . .	260
	Temperaturas . . . . .	260
	Deformações . . . . .	260
	Flechas . . . . .	261
7.4.5	Base de dados . . . . .	261
7.4.6	Interface de visualização e exploração remota . . . . .	262
7.5	Modos de Funcionamento . . . . .	263
7.6	Resultados . . . . .	264
7.6.1	Resultados da monitorização permanente . . . . .	265
7.6.1.1	Evolução das temperaturas . . . . .	265
	Efeitos sazonais: . . . . .	265
	Efeitos diários: . . . . .	268
7.6.1.2	Evolução das flechas . . . . .	269
	Efeitos sazonais: . . . . .	269
	Efeitos diários: . . . . .	271
	Correlação das flechas com as variações de temperatura: . . . . .	271
	Registos de referência: . . . . .	272
7.6.1.3	Evolução das extensões . . . . .	274
	Efeitos sazonais: . . . . .	274
	Efeitos diários: . . . . .	274
	Curvaturas: . . . . .	276
7.6.2	Resultados de campanhas de monitorização de curta duração . . . . .	278
7.6.2.1	Acções do tráfego rodoviário . . . . .	278
7.6.2.2	Traçado de linhas de influência . . . . .	279
7.6.2.3	Correlação das linhas de influência dos diferentes vãos . . . . .	281
7.7	Implementação de um sistema de alarmes de vigilância e alerta . . . . .	283
7.7.1	Modelo estatístico representativo do comportamento da estrutura . . . . .	284
7.7.2	Limites de vigilância e alerta . . . . .	286
7.7.3	Resultados . . . . .	287
7.8	Considerações finais . . . . .	288
<b>8</b>	<b>Considerações Finais</b>	<b>293</b>

---

8.1	Enquadramento final . . . . .	293
8.2	Conclusões . . . . .	295
8.3	Sugestões para desenvolvimentos futuros . . . . .	306
8.4	Publicações . . . . .	308
	Patentes: . . . . .	308
	Artigos em revistas indexadas JCR: . . . . .	308
	Artigos em revistas não indexadas: . . . . .	309
	Artigos em congressos internacionais: . . . . .	309
	Artigos em congressos nacionais: . . . . .	310
	<b>Bibliografia</b>	<b>311</b>

# Índice de Figuras

1.1	Acidentes recentes envolvendo importantes infra-estruturas: a) colapso da Ponte Hintze Ribeiro, Entre-os-Rios (2001): 59 mortos; b) colapso da Ponte I-35W sobre o rio Mississippi (2007): 13 mortos, 145 feridos. . . . .	2
1.2	Natureza da manutenção estrutural e reposição dos níveis de segurança (Santa e Bergmeister, 2000). . . . .	2
1.3	Inspecções visuais: a) inspecção à superestrutura; b) inspecção subaquática. . . . .	4
1.4	Ensaio de carga de uma treliça metálica para serventia de uma ponte ferroviária na Índia no século XIX (Mufti, 2001). . . . .	6
1.5	Vistas gerais de ensaios de recepção recentes: a) Ponte da Lezíria (Rodrigues et al., 2007); b) Ponte Eiffel (Cavadas et al., 2008). . . . .	6
1.6	Instrumentações realizadas pelo LNEC nas décadas de 50 e 60: a) instalação de extensómetros de embeber na Barragem da Bouçã, 1955; b) sistema de medição de deslocamentos por meio de dispositivos ópticos aplicado na Ponte 25 de Abril (LNEC, 2011). . . . .	7
1.7	Paralelismo entre a monitorização estrutural e o tratamento médico com vista à detecção antecipada de anomalias e à sua eficiente reparação. . . . .	8
1.8	Esquema geral de um sistema de monitorização. . . . .	10
2.1	Representação esquemática da estrutura principal da fibra óptica: núcleo ( <i>core</i> ); bainha ( <i>cladding</i> ), revestimento primário ( <i>buffer coating</i> ) e revestimento secundário. . . . .	22
2.2	Propagação da luz na fibra óptica por ocorrência de reflexão interna total. . . . .	23
2.3	Modos de propagação da luz no interior de: a) fibra monomodo; b) fibra multimodo com transição em patamar; c) fibra multimodo com gradiente suavizado. . . . .	25
2.4	Princípio geral dos sensores em fibra óptica. . . . .	26
2.5	Classificação de sensores em fibra óptica quanto à sua natureza: a) sensor intrínseco; b) sensor extrínseco. . . . .	27
2.6	Classificação de sensores em fibra óptica quanto à base de medida: a) sensor pontual; b) sensor de base longa de medida; c) sensor quasi-distribuído; d) sensor distribuído. . . . .	28
2.7	Configuração interna de sensores intensiométricos: a) configuração sensível à pressão; b) configuração sensível ao deslocamento longitudinal (Oshima, 2003) . . . . .	30
2.8	Princípio de funcionamento de uma técnica de referenciação de um sensor de intensidade baseada na componente diferencial da intensidade de luz através de duas fibras distintas. . . . .	31

2.9	Representação esquemática do princípio de funcionamento de uma rede de Bragg: a) Rede de Bragg (FBG); b) espectro de luz à entrada da fibra; c) espectro de luz transmitida à saída da fibra; d) espectro da luz reflectida.	33
2.10	Processo de gravação da rede de Bragg por foto-indução por exposição da fibra a uma radiação ultravioleta através de uma máscara de fase . . . . .	34
2.11	Variação do comprimento de onda em reflexão em sensores de Bragg em função da aplicação de: a) uma variação de extensão uniforme; b) uma variação de temperatura. . . . .	35
2.12	Configuração esquemática de um sensor de temperatura baseado num sensor de Bragg. . . . .	37
2.13	Diferentes configurações de sensores interferométricos em fibra óptica: a) interferómetro de Michelson; b) interferómetro de Mach-Zender; c) interferómetro de Fabry-Perot. . . . .	39
2.14	Interferómetro de Fabry-Perot em fibra óptica: a) intrínseco; b) extrínseco.	40
2.15	Função de transferência de interferómetros de duas ondas (interferómetros de Michelson e Mach-Zehnder). . . . .	42
2.16	Função de transferência de interferómetros de ondas múltiplas (interferómetro de Fabry-Perot). . . . .	43
2.17	Componentes de Rayleigh, Brillouin e Raman no espectro de luz espalhado (Inaudi e Glisic, 2007). . . . .	44
2.18	Relação entre as componentes de Stokes e Anti-Stokes e a energia de vibração das moléculas da fibra óptica. . . . .	45
2.19	Relação entre as componentes de Stokes e Anti-Stokes e a energia de acústica presente na fibra óptica. . . . .	46
2.20	Representação esquemática do princípio do BOTDR baseado na estimulação do espalhamento de Brillouin (Yin, 2002). . . . .	48
2.21	Ganho no espalhamento de Brillouin: a) representação esquemática da combinação do espectro das duas fontes de luz; b) ganho de Brillouin em função das características da luz utilizada na excitação do efeito de Brillouin. . . . .	48
2.22	Resultado da aplicação do BOTDR num sensor distribuído de Brillouin. .	49
2.23	Esquema de multiplexagem temporal (TDM): a) em série; b) em paralelo.	50
2.24	Esquema de multiplexagem em comprimento de onda (WDM): a) em série; b) em paralelo. . . . .	52
2.25	Esquema de multiplexagem espacial (SDM). . . . .	52
2.26	Esquema de multiplexagem híbrida. . . . .	53
2.27	Arquitectura esquemática de uma rede de sensores em série. . . . .	54
2.28	Arquitectura esquemática de uma rede de sensores em estrela. . . . .	55
2.29	Arquitectura esquemática de uma rede de sensores em árvore. . . . .	56
2.30	Arquitectura esquemática de uma rede de sensores híbrida combinando troços em série, em estrela e em árvore. . . . .	57
2.31	Principais componentes ópticos de uma rede de sensores. . . . .	58
2.32	Rede de Bragg isolada apenas conectorizada em ambas as extremidades. .	58

2.33	Transdutores em fibra óptica: a) para medir extensões, contendo transdutores para embeber, colar e soldar comercializados pela FiberSensing; b) para medir deformações médias, para embeber ou aplicação externa, comercializados pela SMARTEC; c) para medir temperatura, com diferentes encapsulamentos, materiais e aplicações, da FiberSensing; d) para medição de pressão em líquidos (piezómetros), comercializados pela FOS&S e pela IFOS; e) para medição de pressão em solos (células de pressão), comercializados pela FOS&S e pela Welltech; f) para medição aceleração e vibrações (acelerómetros), comercializados pela FiberSensing e pela IFOS; g) para medição de rotações, comercializados pela FiberSensing e pela IFOS. . . . .	60
2.34	Equipamentos de leitura para interrogação de sensores ópticos: a) si425-250 da Micron Optics; b) sm130-500 da Micron Optics ; c) SpectralEye portátil da FOS&S; d) FS2200 da FiberSensing. . . . .	61
2.35	Vistas gerais de fontes de luz e fotodetectores para fibra óptica. . . . .	61
2.36	Rolo comercial de fibra óptica. . . . .	63
2.37	Cordões ( <i>patchcords</i> ) em fibra óptica: a) solução padronizada com conectores em ambas as extremidades; b) diferentes tipos de protecção secundária aplicáveis aos cordões (protecção para laboratório em plástico com 0.9 mm de diâmetro (A), protecção para utilização interior, em PVC com 3 mm de diâmetro (B) e protecção para instalações exteriores, armada com camisa em aço inox e revestimento em PVC com 3 mm de diâmetro (C)). . . . .	64
2.38	Exemplos de cabos multifibra resultantes do agrupamento individualizado de cordões. . . . .	64
2.39	Deficiências na emenda de fibras ópticas geralmente conducentes à introdução de perdas ópticas anormais. . . . .	66
2.40	Conectores para emenda de fibras ópticas: a) vista do conector e respectivo ferrule onde se encontra centrada a fibra óptica; adaptador para alinhamento dos ferrules. . . . .	67
2.41	Diferentes tipos de conectores usados na montagem de redes ópticas (itrademarket - connectors: , 2011). . . . .	68
2.42	Emenda por intermédio de conectores FC/APC e respectivo adaptador de interconexão. . . . .	68
2.43	Vista ao microscópio da superfície dos conectores ópticos: a) conector contaminado com poeiras; b) conector contaminado com sujidade; c) conector com impressão digital; d) conector limpo (Hayes, 2006). . . . .	69
2.44	Limpeza de conectores ópticos: a) limpeza com toalhetes de papel embebidos em isopropanol; b) cassete de limpeza; c) limpeza de adaptadores ópticos por intermédio de um cotonete; d) limpeza de adaptadores ópticos spray de ar seco; e) inspecção da superfície dos conectores através de um microscópio óptico. . . . .	70
2.45	Processo de emenda de fibras ópticas por fusão: a) equipamento de fusão; b) disposição da fibra óptica no equipamento para fusão. . . . .	71
2.46	Ferramentas utilizadas na preparação da fibra para realização da fusão: a) diferentes tipos de descarnadores; b) máquina de corte (clivador) portátil para um corte preciso da fibra óptica. . . . .	71

2.47	Emenda de uma fibra óptica por fusão: a) descarga do arco eléctrico no interior da máquina de fusão; b) vista ao microscópio da zona de emenda da fibra óptica por fusão. . . . .	72
2.48	Exemplos de comutadores ópticos utilizados para varrimentos sucessivos de múltiplos canais ópticos: a) representação esquemática do seu funcionamento; b) dois modelos comerciais. . . . .	74
2.49	Acopladores ópticos para divisão de luz: a) princípio de funcionamento de um acoplador 1:2; b) exemplos de acopladores comerciais. . . . .	75
3.1	Sensores convencionais empregues na medição de extensões: a) extensómetro de resistência eléctrica; b) extensómetro de cordas vibrantes. . . . .	79
3.2	Integração de diferentes tipologias de sensores de Bragg para medição de extensão: a) sensor de colar; b) sensor de soldar; c) sensor de embeber; d) sensor fixado mecanicamente. . . . .	82
3.3	Configurações de sensores de Bragg para medição de extensões: a) solução de colar; b) solução de soldar; c) solução de embeber (FiberSensing, 2010a). . . . .	82
3.4	Sensores FBG para medição de deformação através de colagem superficial: a) tipo I ( <i>bare type</i> ); b) tipo II ( <i>mini polyimide</i> ); c) tipo III ( <i>long polyimide</i> ). . . . .	84
3.5	Diferentes configurações de protecção dos sensores de Bragg: a) sem <i>re-coating</i> ; b) com <i>recoating</i> de acrilato; c) com <i>recoating</i> de poliamida. . . . .	85
3.6	Sensor de Bragg colado na estrutura: a) diferentes interfaces na envolvente do sensor; b) distorção associada à transmissão de tensões de corte. . . . .	86
3.7	Perfil de extensões ao longo da zona de colagem: a) geometria da colagem; b) perfil longitudinal de extensões. . . . .	87
3.8	Vistas gerais do modelo de elemento finitos desenvolvido para análise da transmissão de extensões até ao sensor. . . . .	89
3.9	Representação esquemática das principais características geométricas do modelo de cálculo desenvolvido. . . . .	89
3.10	Perspectivas com os campos de deslocamentos obtidos a partir do modelo numérico: a) meio envolvente; b) fibra óptica. . . . .	90
3.11	Perspectivas com os campos de extensões obtidos a partir do modelo numérico: a) meio envolvente; b) fibra óptica. . . . .	90
3.12	Percentagem da extensão estrutural representada pelo sensor de Bragg em função do comprimento de colagem ( $E_a = 2.0$ GPa). . . . .	91
3.13	Percentagem da extensão estrutural representada pelo sensor de Bragg em função da espessura do adesivo ( $E_a = 2.0$ GPa). . . . .	92
3.14	Percentagem da extensão estrutural representada pelo sensor de Bragg em função do módulo de elasticidade do adesivo ( $e_a = 0.5$ mm). . . . .	92
3.15	Técnica de instalação dos sensores FBG num elemento metálico: a) preparação das superfícies; b) emprego de isopropanol em toalhetes; c) limpeza da superfície com isopropanol. . . . .	94
3.16	Técnica de instalação dos sensores FBG num elemento metálico: a) polimento com lixa de água combinada com uma solução condicionadora; b) tratamento químico com gaze impregnada com uma solução alcalina; c) marcações para alinhamento do sensor. . . . .	95
3.17	Técnica de instalação dos sensores FBG num elemento metálico: a) fixação das cabragens com fita-cola; b) pré-fixação do sensor com recurso a fita-cola; c) aplicação do adesivo. . . . .	95

3.18	Técnica de instalação dos sensores FBG num elemento metálico: a) aplicação de pressão para retirar adesivo em excesso; b) camada de protecção de resina epóxi sobre fita de <i>teflon</i> ; c) protecção química e mecânica final.	96
3.19	Representação esquemática do Provete 1 utilizado para avaliação de 20 sensores de Bragg (dimensões em mm).	98
3.20	Configuração esquemática do <i>array</i> de sensores instalado no Provete 1 constituído por 10 sensores de Bragg com <i>recoating</i> de poliamida (dimensões em mm).	99
3.21	Vistas gerais dos ensaios de caracterização mecânica visando a avaliação do comportamento dos sensores instalados no Provete 1: a) provete; b) prensa de carga.	100
3.22	Ciclo de carga e descarga: a) força; b) extensão imposta.	101
3.23	Ensaio 1: Extensões medidas durante o ensaio: a) sobreposição dos registos obtidos no <i>array 1</i> ; a) sobreposição dos registos obtidos no <i>array 2</i> .	101
3.24	Correlação entre a extensão medida e a extensão imposta: a) <i>Array 1</i> ; <i>Array 2</i>	101
3.25	Correlação entre a variação do comprimento de onda normalizado e a extensão imposta: a) <i>Array 1</i> ; b) <i>Array 2</i>	103
3.26	Ensaio dinâmico: a) ensaio dinâmico 1 (fp=0.1 Hz); b) FFT ensaio dinâmico 1; c) ensaio dinâmico 2 (fp=1.0 Hz); d) FFT ensaio dinâmico 2; e) ensaio dinâmico 3 (fp=4.0 Hz); f) FFT ensaio dinâmico 3.	104
3.27	Ensaio de fadiga: Avaliação da resposta em termos de fadiga: a) resposta média do <i>array 1</i> ; b) resposta média do <i>array 2</i> .	105
3.28	Ensaio no interior de uma câmara climática para avaliação dos efeitos da temperatura: a) vista geral da câmara ( <i>walk-in</i> ) e do equipamento de leitura; b) provete ensaiado, entre outros sensores, no interior da câmara.	106
3.29	Evolução da temperatura e da humidade durante o ensaio.	106
3.30	Correlação entre a variação do comprimento de onda normalizado e a temperatura: a) <i>Array 1</i> ; b) <i>Array 2</i> .	106
3.31	Configuração esquemática do Provete 2.	108
3.32	Vistas gerais dos ensaios de caracterização mecânica do comportamento dos sensores instalados no Provete 2: a) provete instrumentado; b) esquema de carga.	109
3.33	Resultado dos ensaios laboratoriais realizados com vista à avaliação dos sensores perante uma deformação imposta.	109
3.34	Resultado dos ensaios laboratoriais realizados com vista à avaliação dos sensores perante variações de temperatura.	110
3.35	Vista actual da Ponte Eiffel, mantendo a traça original, 130 anos após a sua inauguração.	112
3.36	Pormenores da estrutura da Ponte Eiffel: a) vista geral das duas treliças; b) tabuleiro inferior; c) tabuleiro superior (antes da reabilitação).	112
3.37	Sinais de corrosão avançada instalada nas cordas junto do tabuleiro superior da ponte.	114
3.38	Vistas dos principais trabalhos levados a cabo durante a reabilitação: a) remoção do tabuleiro misto aço-betão; b) estrutura temporária para aplicação de força durante a substituição das banzos das cordas superiores; c) instalação dos novos módulos metálicos.	114
3.39	Vistas gerais da instalação dos sensores de Bragg na Ponte Eiffel.	116

3.40	Visualização em tempo real dos resultados das campanhas de monitorização.	116
3.41	Instrumentação da Fase I: a) alçado com a posição relativa das diferentes secções instrumentadas; b) secção C.S.T10.M-V. com disposição e nomenclatura dos sensores; c) secção C.I.T10.M-V. com disposição e nomenclatura dos sensores. . . . .	117
3.42	Resultados da Fase I da monitorização estrutural cobrindo a passagem de vários veículos ferroviários correntes: a) extensões observadas no banzo da corda superior (sensor 1 na secção C.S.T10.M-V.); b) perfis de extensões observadas durante a passagem de um comboio de mercadorias (v) na secção C.S.T10.M-V. (ver Figura 3.41 relativa à nomenclatura dos sensores).	118
3.43	Instrumentação Fase II com disposição e nomenclatura dos sensores. . . . .	119
3.44	Resultados da Fase II da monitorização estrutural durante a substituição do banzo da corda superior com aplicação do sistema de forças activo: a) extensões na secção C.S.T10.S1.; b) extensões na secção C.S.T10.S2. (ver Figura 3.43 relativa à nomenclatura dos sensores). . . . .	119
3.45	Veículos em marcha lenta durante o ensaio de carga: a) locomotiva ferroviária (121 ton.); b) camiões rodoviários a par (2×30.2 ton.). . . . .	120
3.46	Instrumentação Fase III: a) alçado com a posição relativa das diferentes secções instrumentadas; b) secção C.S.T6.M-V. com disposição e nomenclatura dos sensores; c) secção C.I.T6.M-V. com disposição e nomenclatura dos sensores. . . . .	120
3.47	Resultados da Fase III da monitorização estrutural durante a realização do ensaio de carga: a) extensões na corda inferior (C.I.T6.M-V) durante a passagem da locomotiva; b) extensões na corda superior (C.S.T6.M-V) durante a passagem da locomotiva; c) extensões na corda inferior (C.I.T6.M-V) durante a passagem dos camiões a par; d) extensões na corda superior (C.S.T6.M-V) durante a passagem dos camiões a par (ver Figura 3.46 relativa à nomenclatura dos sensores). . . . .	121
3.48	Perspectiva geral de um tramo do modelo numérico ( <i>software</i> : SAP2000) (Cavadas, 2008). . . . .	122
3.49	Comparação das linhas de influência obtidas a partir do modelo numérico e calculadas a partir das extensões medidas na corda superior (C.S.T6.M-V): a) linhas de influência do esforço axial durante a passagem da locomotiva ferroviária; b) linhas de influência do momento flector durante a passagem da locomotiva ferroviária; c) linhas de influência do esforço axial durante a passagem dos camiões a par; d) linhas de influência do momento flector durante a passagem dos camiões a par. . . . .	122
3.50	Instrumentação Fase IV com disposição e nomenclatura dos sensores. . . . .	123
3.51	Resultados da Fase IV da monitorização estrutural: a) registo de extensões no sensor C.7, na camada de desgaste, durante 5 min. de tráfego corrente; b) diagrama de extensões na chapa de aço e na camada de desgaste durante a passagem de um autocarro de referência; c) linhas de influência de extensões na camada de revestimentos; d) linhas de influência de extensões na chapa de aço (ver Figura 3.46) relativa à nomenclatura dos sensores). . . . .	124
4.1	Classificação relativa dos sensores de deformação baseada na respectiva base de medida. . . . .	132

4.2	Representação esquemática da envolvente de um sensor de deformação no interior do betão. . . . .	133
4.3	Representação esquemática das grandezas medidas por dois transdutores ladeando uma fenda: a) configuração em repouso; b) configuração deformada. . . . .	134
4.4	Representação esquemática da estratégia de monitorização baseada em sensores de deformação de base longa de medida (Glisic e Inaudi, 2007). . . . .	136
4.5	Disposições possíveis de sensores paralelos para avaliação de efeitos de flexão bi-direccional (Glisic e Inaudi, 2007). . . . .	137
4.6	Distribuição de sensores e esforços na avaliação de um elemento sujeito a flexão (Glisic e Inaudi, 2007). . . . .	137
4.7	Representação esquemática da estratégia de monitorização baseada em sensores de deformação de base longa de medida (Glisic e Inaudi, 2007). . . . .	138
4.8	Representação esquemática da estratégia de monitorização baseada em sensores de deformação de base longa de medida (Glisic e Inaudi, 2007). . . . .	138
4.9	Sistema SOFO: a) transdutor de deformação; b) unidade de leitura SOFO VI. . . . .	140
4.10	Arquitectura interna do transdutor de deformação SOFO. . . . .	141
4.11	Arquitectura interna da unidade de leitura SOFO IV (Inaudi, 2000). . . . .	142
4.12	Sistema MuST: a) transdutor de deformação; b) unidade de leitura MuST light . . . . .	143
4.13	Arquitectura interno do transdutor de deformação MuST. . . . .	143
4.14	Sistema FOD: a) transdutor de deformação FOD; b) unidade de leitura UMI-4. . . . .	144
4.15	Representação esquemática do princípio de funcionamento do transdutor FOD. . . . .	145
4.16	Transdutor SMARTape: a) secção transversal (dimensões em mm); b) vista geral. . . . .	146
4.17	Transdutor SMARTprofile: a) secção transversal (dimensões em mm); b) vista geral. . . . .	146
4.18	Unidade de leitura DiTeSt baseada no espalhamento de Brillouin estimulado. . . . .	147
4.19	Sistema VW-JM: a) transdutor VW-JM; b) unidade de leitura AVW200. . . . .	148
4.20	Configuração do esquema utilizado para realização de testes laboratoriais. . . . .	149
4.21	Pormenores do esquema utilizado para realização de testes laboratoriais: a) vista geral; b) parafuso micrométrico para imposição de deslocamentos; c) vista de topo do comparador utilizado como equipamento de referência; d) vista de lateral do comparador e respectiva ancoragem móvel. . . . .	150
4.22	Resultado do teste para avaliação da exactidão do sistema constituído pelo transdutor SOFO combinado com a unidade de leitura MuST correspondente a um interferómetro de Michelson desmodulado no domínio espectral . . . . .	151
4.23	Comparação dos erros de medição associados a cada sistema avaliado: a) erro associado ao declive da recta de ajuste; b) erro quadrático médio . . . . .	151
4.24	Resultado do teste para avaliação da repetibilidade do sistema constituído pelo transdutor SOFO combinado com a unidade de leitura MuST correspondente a um interferómetro de Michelson desmodulado no domínio espectral . . . . .	153

4.25	Comparação da repetibilidade associada a cada sistema avaliado: a) repetibilidade (desvio-padrão de 100 medições consecutivas); b) amplitude da nuvem de pontos . . . . .	153
4.26	Execução do ensaio para avaliação da sensibilidade à temperatura das unidades de leitura: a) unidade DiTeSt no interior de câmara frigorífica à temperatura de 0 °C; b) unidades SOFO VI e MuST light à temperatura ambiente (22 °C) após retirada a da câmara. . . . .	154
4.27	Comparação do erro de medição associado à sensibilidade à temperatura de cada unidade de leitura avaliada. . . . .	155
4.28	Vistas gerais da instalação dos vários transdutores de deformação, em paralelo, numa secção transversal da Ponte Ricciolo, na Suíça. . . . .	156
4.29	Correlação entre a temperatura na Ponte Ricciolo e a extensão total registada com o sistema SOFO beneficiando de total insensibilidade a variações de temperatura por parte do sensor. . . . .	157
4.30	Correlação entre a temperatura na Ponte Ricciolo e a extensão residual registada com o sistema constituído pelo transdutor MuST combinado com a unidade de leitura MuST <i>light</i> , baseado num sensor de Bragg. . . . .	158
4.31	Comparação das sensibilidades à temperatura associadas a cada sistema avaliado obtidas a partir da monitorização da Ponte Ricciolo. . . . .	158
4.32	Vistas gerais da Ponte Ricciolo, servindo a Auto-estrada A2, na Suíça: a) vista exterior do tabuleiro curvo; b) vista do interior do caixão. . . . .	160
4.33	Plano de instrumentação adoptado durante a construção da Ponte Ricciolo: a) representação esquemática em planta; b) representação esquemática em corte transversal na secção-tipo (Glisic et al., 2008, 2010). . . . .	160
4.34	Instalação dos sensores de deformação na Ponte Ricciolo durante a sua construção: a) sensores paralelos embebidos no betão (secção C); b) cruz de sensores externos junto da secção de apoio (secção E) (Glisic et al., 2008, 2010). . . . .	161
4.35	Resultados da monitorização estrutural levada a cabo na Ponte Ricciolo durante a sua construção: a) curvaturas verticais médias nas secções C e E; b) curvaturas horizontais médias nas secções C e E. . . . .	162
4.36	Resultados da monitorização estrutural levada a cabo na Ponte Ricciolo durante a sua construção: a) extensão de corte média devida ao esforço transversal vertical nas secções A e E; b) extensão de corte média devida à torção nas secções A e E. . . . .	162
4.37	Deformadas obtidas a partir dos resultados da monitorização estrutural levada a cabo na Ponte Ricciolo durante a sua construção: a) deslocamentos verticais do eixo da ponte; b) deslocamentos horizontais do eixo da ponte. . . . .	163
5.1	Macro-estrutura do betão onde são visíveis os diferentes constituintes: a) processo de amassadura; b) corte interior de um provete de betão. . . . .	170
5.2	Sensores de deformação instalados em elementos de betão: a) instalação externa à superfície; b) instalação interna embebida no betão (Méndez e Graver, 2007). . . . .	171
5.3	Configuração esquemática dos transdutores de deformação desenvolvidos: <b>transdutor N</b> (nervurado). . . . .	174
5.4	Perspectiva geral do transdutor N - varão nervurado com rosca de profundidade variável. . . . .	175

5.5	Configuração esquemática dos transdutores de deformação desenvolvidos: <b>transdutor L</b> (liso). . . . .	176
5.6	Perspectiva geral do transdutor L - varão liso revestido com película não-aderente. . . . .	176
5.7	Várias etapas da instalação dos sensores de Bragg no corpo dos transdutores: a) marcação da posição do sensor; b) preparação mecânica e o tratamento da superfície metálica; c) pré-fixação do sensor de Bragg com fita-cola; d) aplicação do adesivo epóxi; e) isolamento do sensor com fita de teflon; f) aplicação de pressão durante o processo de cura do adesivo durante 24 horas. . . . .	178
5.8	Diferentes perspectivas do esquema de ensaio adoptado para calibração dos transdutores de deformação através da aplicação de uma carga cíclica de tracção uniaxial. . . . .	179
5.9	Ensaio de calibração: a) evolução da força; b) evolução da extensão de referência (ExtR). . . . .	180
5.10	Calibração dos transdutores dada pela correlação entre a extensão de referência, ExtR, e a variação do comprimento de onda normalizado de cada um dos sensores de Bragg: a) Ext1; b) Ext2. . . . .	180
5.11	Erros de medição associados ao processo de calibração: a) representação das extensões medidas por cada um dos sensores (Ext1, Ext2 e ExtR); b) respectivos desvios em relação à extensão de referência (ExtR). . . . .	181
5.12	Geometria e armadura do provete de betão $250 \times 250 \times 700 \text{ mm}^3$ : a) vista em corte por plano vertical; b) vista em corte por plano horizontal (nota: dimensões em mm). . . . .	182
5.13	Vista geral da armadura e instrumentação interna adoptada no prisma de betão. . . . .	183
5.14	Vistas gerais do ensaio de compressão realizado sobre o prisma de betão armado instrumentado com dois transdutores de deformação. . . . .	183
5.15	Ciclos de compressão: a) evolução da força; b) evolução da extensão de referência (CVint). . . . .	184
5.16	Correlações entre a extensão de referência, CVint, e a extensão medida em cada um dos sensores de Bragg: a) transdutor n.1; b) transdutor n.2. . . . .	184
5.17	Erros de medição: a) representação das extensões medidas em cada um dos sensores; b) respectivos desvios em relação à extensão de referência (CVint). . . . .	185
5.18	Modelo de elementos finitos: a) geometria e malha de elementos finitos de volume; b) malha deformada. . . . .	186
5.19	Resultados numéricos: a) mapa de tensões verticais; b) mapa de extensões verticais. . . . .	186
5.20	Vistas gerais do ensaio de aderência em flexão com um transdutor do tipo N. . . . .	187
5.21	Representação esquemática das condições do ensaio de aderência. . . . .	188
5.22	Vista geral da disposição de armaduras e da montagem do provete com o transdutor para betonagem. . . . .	188
5.23	Sensor de Bragg instalado no transdutor tipo N presente no ensaio de aderência em flexão. . . . .	189
5.24	Resultados do ensaio de aderência à flexão: a) primeiro ciclo de carga correspondente a uma força imposta de 13.5 kN; b) último ciclo de carga correspondente a um deslocamento imposto de 5 mm. . . . .	190

5.25	Geometria e disposição de armaduras nas duas vigas ensaiadas. . . . .	192
5.26	Cortes transversais representativos da geometria e da disposição de armaduras nas duas vigas ensaiadas (ver posição dos cortes na Figura 5.25). . . . .	192
5.27	Vistas gerais da disposição de armadura na viga. . . . .	192
5.28	Representação esquemática do esquema de ensaio utilizado para carregamento da viga. . . . .	193
5.29	Betonagem do par de vigas. . . . .	194
5.30	Posição da instrumentação interna adoptada e respectiva nomenclatura. . . . .	194
5.31	Posição da instrumentação externa adoptada e respectiva nomenclatura. . . . .	195
5.32	Vistas gerais da instrumentação interna. . . . .	196
5.33	Vistas gerais da instrumentação externa. . . . .	196
5.34	Evolução do padrão de fendilhação experimental: a) $\delta_v \approx 0.3$ mm; b) $\delta_v \approx 0.7$ mm; c) $\delta_v \approx 1.0$ mm; d) $\delta_v \approx 2.0$ mm; e) $\delta_v = 3.0$ mm. . . . .	198
5.35	Ensaio monotónico (ver Figura 5.31 com nomenclatura dos sensores): a) evolução da força; b) evolução das flechas. . . . .	199
5.36	Ensaio monotónico (ver Figura 5.31 com nomenclatura dos sensores): a) evolução da abertura de fendas; b) evolução da curvatura média. . . . .	199
5.37	Ensaio monotónico (ver Figuras 5.30 e 5.31 com nomenclatura dos sensores): a) evolução das extensões medidas; b) evolução da deformação média. . . . .	200
5.38	Ensaio monotónico (ver Figura 5.30.a) com nomenclatura dos sensores): a) extensão medida pelo conjunto de sensores (viga 1); b) pormenor relativo ao início da fendilhação (viga 1); c) extensão medida pelo conjunto de sensores (viga 2); d) pormenor relativo ao início da fendilhação (viga 2). . . . .	201
5.39	Ensaio cíclico (ver Figura 5.31(a) com nomenclatura dos sensores): a) evolução da força; b) evolução das flechas. . . . .	202
5.40	Ensaio cíclico (ver Figura 5.31(a) com nomenclatura dos sensores): a) evolução da abertura de fendas; b) evolução da curvatura média. . . . .	202
5.41	Ensaio cíclico (ver Figuras 5.30 e 5.31 com nomenclatura dos sensores): a) evolução das extensões medidas; b) evolução da deformação média. . . . .	202
5.42	Ensaio cíclico (ver Figura 5.30 com nomenclatura dos sensores): a) extensão medida pelo conjunto de transdutores; b) pormenor relativo aos ciclos de carga. . . . .	203
5.43	Modelo numérico: a) malha de elementos finitos; b) armadura ordinária; c) transdutores internos. . . . .	204
5.44	Modelos do comportamento do betão fendilhado: a) diagrama de retenção de tensões de tracção no betão; b) diagrama de amolecimento linear. . . . .	205
5.45	Resultados do modelo numérico: a) malha deformada; b) tensões principais de compressão no betão. . . . .	205
5.46	Evolução do padrão de fendilhação obtido por via numérica: a) $\delta_v = 0.3$ mm; b) $\delta_v = 1.0$ mm; c) $\delta_v = 2.0$ mm; d) $\delta_v = 3.0$ mm; e) $\delta_v = 4.0$ mm. . . . .	206
5.47	Diagramas carga/deslocamento vertical nos pontos de aplicação da carga (flecha): confrontação numérico <i>vs.</i> experimental. . . . .	207
5.48	Diagramas de extensões nos transdutores: a) diagrama de extensões num transdutor com aderência; b) diagrama de extensões num transdutor sem aderência. . . . .	207
5.49	Variação do erro de medição em função do comprimento do transdutor não-aderente. . . . .	208

5.50	Instalação dos transdutores de deformação: a) integração do transdutor no meio da malha de armaduras; b) betonagem cuidada na proximidade do transdutor. . . . .	209
5.51	Instalação das caixas de acesso aos cabos dos transdutores: a) transdutor N e caixa circular de acondicionamento integrada no próprio transdutor; b) transdutor L e caixa rectangular de acondicionamento instalada na proximidade do transdutor. . . . .	209
5.52	Utilização das caixas de acesso para realização das ligações: a) acesso aos cabos ópticos após a betonagem; b) acondicionamento das emendas de fibra junto à caixa de acesso. . . . .	210
6.1	Técnicas e equipamentos utilizados para medição de flechas: a) LVDT ligado ao terreno com fio suspenso da estrutura (Rodrigues et al., 2007); b) Estação total robotizada (Roberts et al., 2006); c) Antena de GPS fixa à estrutura (Psimoulis e Stiros, 2007) . . . . .	214
6.2	Princípio dos vasos comunicantes aplicado ao nivelamento hidrostático. . .	217
6.3	Representação esquemática da aplicação de níveis líquidos na determinação da flecha de uma ponte. . . . .	218
6.4	Esquema das pressões instaladas num corpo cilíndrico parcialmente imerso num fluido. . . . .	221
6.5	Arquitectura e constituição interna do transdutor para medição de flechas desenvolvido. . . . .	222
6.6	Diagramas de esforços instalados na célula de carga. . . . .	224
6.7	Distribuição de esforços na célula de carga obtidos a partir de um modelo de elementos finitos de volume. . . . .	224
6.8	Configuração dos protótipos do transdutor desenvolvido. . . . .	226
6.9	Pormenor da célula de carga, sensores e condições de apoio. . . . .	226
6.10	Ensaio de calibração realizado na prensa MTS com controlo de deslocamento: a) sensor activo no prato móvel da prensa; b) sensor de referência imune a deslocamentos verticais num pórtico anexo. . . . .	227
6.11	Ensaio laboratorial com imposição de patamares de deslocamento vertical. . . . .	228
6.12	Correlações registadas entre os resultados da instrumentação de referência e os resultados obtidos com o transdutor desenvolvido. . . . .	229
6.13	Erro observado no ensaio laboratorial com imposição de deslocamento vertical. . . . .	229
6.14	Ensaio laboratorial com imposição de ciclos de deslocamento vertical. . .	230
6.15	Correlação entre o deslocamento imposto e o deslocamento medido com o transdutor óptico durante ciclos de deslocamento. . . . .	230
6.16	Erro observado no ensaio laboratorial com imposição de ciclos de deslocamento vertical. . . . .	231
6.17	Ensaio de caracterização térmica com instalação dos transdutores no interior de uma câmara climática. . . . .	232
6.18	Variação da temperatura durante o ensaio de caracterização térmica. . . .	232
6.19	Efeito da temperatura e respectiva compensação. . . . .	233
6.20	Erro associado à auto-compensação e à compensação otimizada com recurso a sensor adicional de temperatura. . . . .	233
6.21	Avaliação da estabilidade do transdutor durante 72 horas sob temperatura e humidade constante. . . . .	234

6.22	Instalação do sistema de níveis líquidos na Ponte da Lezíria: a) diferentes perspectivas de transdutores activos instalado em secções de meio-vão no interior do tabuleiro em caixão; b) reservatório e transdutor de referência; c) disposição na secção transversal do transdutor e respectivo circuito hidráulico na laje de fundo coberto com argamassa. . . . .	235
7.1	Vistas gerais da Ponte da Lezíria e dos respectivos viadutos de acesso: a) panorama geral com identificação das estruturas; b) Viaduto Norte (1472.85 m); c) Ponte da Lezíria (970 m); d) Viaduto Sul (9229.925 m). . . . .	241
7.2	Traçado em planta da Ponte da Lezíria. . . . .	243
7.3	Alçado da Ponte da Lezíria. . . . .	243
7.4	Secção transversal tipo do tabuleiro da Ponte da Lezíria. . . . .	244
7.5	Secção transversal tipo dos pilares da Ponte da Lezíria. . . . .	244
7.6	Vistas gerais da construção da Ponte da Lezíria: a) construção dos pilares; b) construção do tabuleiro por avanços sucessivos. . . . .	245
7.7	Vistas gerais da Ponte da Lezíria. . . . .	246
7.8	Vistas interiores do tabuleiro em caixão da Ponte da Lezíria. . . . .	246
7.9	Localização esquemática, em corte transversal, da instrumentação óptica para medição de extensões no betão, flechas estruturais e temperaturas. . . . .	247
7.10	Transdutores de base óptica adoptados na Ponte da Lezíria: a) transdutor de flechas (Capítulo 5); b) sensor de temperatura (FiberSensing); c) transdutor de deformação-tipo N (Capítulo 6). . . . .	248
7.11	Localização esquemática em alçado das secções onde se procede à medição de extensões no betão (no total de 15 secções). . . . .	249
7.12	Localização esquemática em alçado das secções onde se procede à medição de flechas (no total de 8 secções activas mais 3 secções de referência). . . . .	249
7.13	Localização esquemática em alçado das secções onde se procede à medição de temperaturas (no total de 5 secções). . . . .	250
7.14	Distribuição da rede de sensores ópticos ao longo da Ponte da Lezíria. . . . .	251
7.15	Arquitectura e configuração esquemática da rede de sensores ópticos e respectivos equipamentos instalados na Ponte da Lezíria. . . . .	251
7.16	Composição interna do Posto de Observação Óptico (POO). . . . .	252
7.17	Alguns pormenores representativos da instalação dos transdutores de deformação no tabuleiro da ponte: a) e b) integração dos transdutores de deformação na respectiva malha de armaduras antes da betonagem; c) posição relativa dos vários transdutores numa secção transversal de meio-vão após betonagem; d) emenda das fibras ópticas na caixa de acesso junto ao transdutor de deformação. . . . .	253
7.18	Instalação do sistema de níveis líquidos na Ponte da Lezíria: a) diferentes perspectivas de transdutores activos instalados a meio-vão; b) reservatório e transdutor de referência em cima de um pilar; c) disposição, numa secção de meio-vão, do transdutor e do respectivo circuito hidráulico coberto com argamassa na laje inferior. . . . .	254
7.19	Esquema de ligação dos diferentes sensores distribuídos na secção transversal através de caixas de derivação. . . . .	255
7.20	Montagem das caixas de derivação para interligação dos diferentes sensores formando uma rede global: a) realização de emendas por fusão; b) teste da integridade da rede por intermédio de um OTDR; c) interior de uma caixa de junção com emendas conectorizadas e por fusão. . . . .	256

7.21	Aplicação informática para controlo do sistema de interrogação óptico. . . . .	256
7.22	Representação esquemática do critério utilizado para indexação dos sensores com base no comprimento de onda. . . . .	258
7.23	Estrutura geral do sistema de comunicação e da integração da base de dados. . . . .	262
7.24	Níveis de navegação na aplicação web: a) página inicial (nível 0); b) selecção da grandeza física (nível 1); c) selecção da estrutura (nível 2); d) selecção da secção transversal (nível 3); e) selecção do sensor (nível 4); f) visualização gráfica da evolução dos sensores seleccionados (nível 5). . . . .	263
7.25	Evolução das temperaturas nas lajes superiores e inferiores do caixão ao longo do período de monitorização 2009-2011: a) secção P1; b) secção P1-P2; c) secção P7; d) secção P7-PTS. . . . .	266
7.26	Evolução da temperatura ambiente medida nas secções P2 e P7, no interior do caixão, ao longo do período de monitorização 2009-2011. . . . .	267
7.27	Evolução das variações da temperatura isolando as componentes uniforme e diferencial ao longo do período de monitorização 2009-2011: a) secção P1; b) secção P1-P2. . . . .	267
7.28	Evolução das temperaturas ao longo de um período representativo de 3 dias: a) secção P1; b) secção P1-P2; c) secção P7; d) secção P7-PTS. . . . .	268
7.29	Evolução das variações da temperatura isolando as componentes uniforme e diferencial ao longo de um período representativo de 3 dias: a) secção P1; b) secção P1-P2. . . . .	269
7.30	Evolução das flechas a meio-vão ao longo do período de monitorização 2009-2011: a) secção PTN-P1; b) secção P1-P2; c) secção P2-P3; d) secção P3-P4. . . . .	270
7.31	Evolução das flechas ao longo de um período representativo de 3 dias: a) secção PTN-P1; b) P1-P2; c) P2-P3; d) P3-P4. . . . .	271
7.32	Correlação entre as flechas e a variação de temperatura para as 6:00h durante o período de um mês: a) flecha <i>vs.</i> variação uniforme da temperatura; b) flecha <i>vs.</i> variação diferencial da temperatura (vão P2-P3). . . . .	272
7.33	Evolução do nível aparente de líquido medido na secção de referência P2 ao longo do período de monitorização 2009-2011. . . . .	273
7.34	Evolução do deslocamento vertical relativo medido na secção do apoio PTN ao longo do período de monitorização 2009-2011. . . . .	273
7.35	Evolução das extensões a meio-vão ao longo do período de monitorização 2009-2011: a) secção PTN-P1; b) secção P1-P2; c) secção P2-P3; d) secção P3-P4. . . . .	275
7.36	Evolução das extensões ao longo de um período representativo de 3 dias nas secções de meio-vão. . . . .	276
7.37	Evolução das curvaturas a meio-vão ao longo do período de monitorização 2009-2011: a) secção PTN-P1; b) secção P1-P2. . . . .	277
7.38	Pormenor com a evolução das curvaturas a meio-vão ao longo de 3 dias: a) secção PTN-P1; b) secção P1-P2. . . . .	277
7.39	Observação da passagem de veículos associados aos efeitos do tráfego rodoviário no vão PTN-P1 durante um hora de observação. . . . .	278
7.40	Observação da passagem de veículos associados aos efeitos do tráfego rodoviário no vão P1-P2 durante um hora de observação. . . . .	278
7.41	Histogramas de efeitos caracterizando a resposta da estrutura perante o tráfego rodoviário corrente: a) secção PTN3-P1; b) secção P1-P2. . . . .	279

---

7.42	Caracterização do tráfego rodoviário: a) histogramas de velocidades; b) sentidos de circulação. . . . .	280
7.43	Traçado de linhas de influência das extensões nas 8 secções de meio-vão: a) passagem de veículo sentido N-S; b) passagem de veículo sentido S-N. (nota: trata-se da passagem de veículos distintos seleccionados ao acaso). . . . .	280
7.44	Correlação entre os valores de pico observados em cada vão relativos a dois dias distintos de observação (01/07/2009 e 19/07/2010): a) PTN-P1 vs. P1-P2; b) PTN-P1 vs. P2-P3; c) PTN-P1 vs. P3-P4; d) P1-P2 vs. P2-P3; e) P1-P2 vs. P3-P4; f) P2-P3 vs. P3-P4. . . . .	282
7.45	Pictograma com representação esquemática de alarmes de vigilância (amarelo) e alerta (vermelho). . . . .	284
7.46	Representação do modelo estatístico desenvolvido indicando as respectivas variáveis de entrada e de saída. . . . .	285
7.47	Representação dos limites obtidos a partir do modelo estatístico correspondentes às zonas de vigilância e alerta relativas a um ano de observação: a) flecha P1-P2; b) flecha P2-P3. . . . .	287
7.48	Pormenor com limites de vigilância e alerta para um período de 15 dias: a) flecha P1-P2; b) flecha P2-P3. . . . .	288

# Índice de Tabelas

1.1	Grandezas frequentemente medidas na monitorização estrutural. . . . .	10
1.2	Principais vantagens e desvantagens dos sensores em fibra óptica. . . . .	12
2.1	Propriedades físicas e mecânicas da fibra óptica. . . . .	25
2.2	Modulação da luz e respectivos princípios físicos . . . . .	30
2.3	Valores de referência relativamente à sensibilidade dos sensores de Bragg. . . . .	35
2.4	Resumo das principais características das arquitecturas base das redes de sensores. . . . .	57
2.5	Principais características da fibra óptica Corning SMF-28 . . . . .	63
2.6	Principais características dos conectores FC/APC. . . . .	68
2.7	Comparação entre emendas por fusão e emendas por intermédio de conectores. . . . .	73
3.1	Propriedades dos diferentes tipos de <i>recoating</i> . . . . .	85
3.2	Propriedades mecânicas dos diferentes interfaces modelados. . . . .	89
3.3	Comprimentos de onda de referência dos sensores de Bragg agrupados pelos dois <i>arrays</i> (T=20 °C). . . . .	99
3.4	Propriedades médias dos dois adesivos utilizados nos testes laboratoriais. . . . .	100
3.5	Quantificação dos desvios. . . . .	102
3.6	Quantificação experimental das sensibilidades à deformação. . . . .	103
3.7	Quantificação experimental das sensibilidades à temperatura. . . . .	107
3.8	Fases da monitorização estrutural levada a cabo na Ponte Eiffel. . . . .	115
4.1	Sistemas baseados em transdutores de deformação de base longa de medida analisados. . . . .	139
4.2	Resumos dos principais resultados alcançados durante a avaliação de diferentes sistemas baseados em sensores de deformação de base longa de medida. . . . .	165
4.3	Principais características dos diferentes sistemas baseados em sensores de deformação de base longa de medida. . . . .	166
5.1	Designação do aço inox ferrítico constituinte dos transdutores. . . . .	177
5.2	Composição química essencial do aço AISI 420. . . . .	177
5.3	Principais propriedades mecânicas do aço AISI 420. . . . .	177
5.4	Propriedades médias dos diferentes materiais envolvidos no modelo. . . . .	205
6.1	Resumo das principais características do transdutor . . . . .	237
7.1	Enquadramento geral da Ponte da Lezíria e respectivos viadutos de acesso. . . . .	241

7.2	Modos de funcionamento do sistema de monitorização óptico da Ponte da Lezíria. . . . .	264
8.1	Comparação do desempenho dos transdutores de deformação de base longa de medida (1/2). . . . .	298
8.2	Comparação do desempenho dos transdutores de deformação de base longa de medida (2/2). . . . .	299
8.3	Resumos das principais características do transdutor . . . . .	302

# Capítulo 1

## Introdução

Dedica-se esta dissertação à monitorização estrutural baseada em sensores em fibra óptica. Neste breve capítulo introdutório, apresenta-se o conceito em torno do qual se desenvolve esta dissertação. Referem-se as motivações mais relevantes, procurando justificar e enquadrar a escolha do tema. Dá-se particular ênfase à exposição dos principais objetivos a atingir. Culmina-se com a exposição da estrutura da dissertação, introduzindo sumariamente os capítulos subsequentes.

### 1.1 Considerações iniciais

As infra-estruturas, estejam elas associadas a sistemas sanitários, energia, transportes ou comunicação, assumem um papel imprescindível nas sociedades actuais. O desenvolvimento, a competitividade e a robustez de uma região reflecte intransigentemente a qualidade da respectiva rede de infra-estruturas. Neste aspecto, a sociedade tem-se tornado cada vez mais exigente. Os níveis de eficiência, operacionalidade, conforto, segurança e durabilidade exigidos a estas infra-estruturas têm sido constantemente incrementados. Compete à engenharia criar soluções para responder e desafiar sucessivamente esses limites.

Ao longo deste documento, será dada particular atenção à componente estrutural das infra-estruturas. Esta é uma componente fulcral de qualquer ponte, barragem, túnel, ou mesmo de qualquer edifício. A sua segurança é um dos temas mais mediáticos da engenharia civil. Os prejuízos resultantes da sua falha são avultados e muitas vezes incalculáveis, conforme testemunham os acidentes recentes ilustrados na Figura 1.1. O seu impacto ganha contornos humanos, económicos, sociais, culturais, estéticos e ecológicos (Glisic e Inaudi, 2007).

As estruturas de engenharia civil estão longe de ser eternas e inalteráveis. Ao longo da sua vida útil, vão envelhecendo, os seus materiais vão sendo atacados por agentes

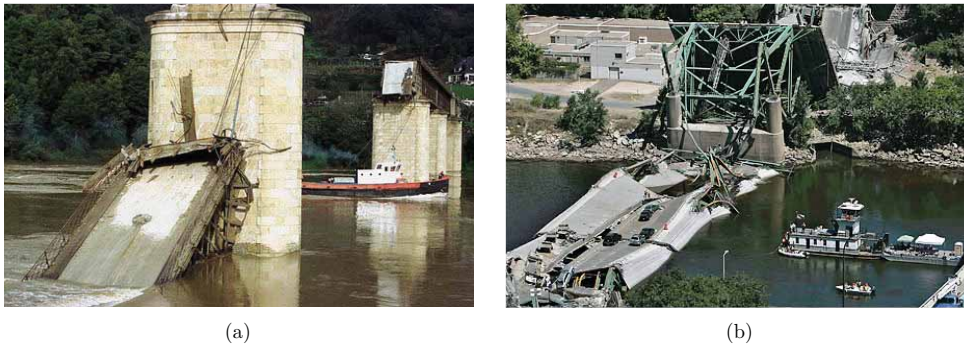


FIGURA 1.1: Acidentes recentes envolvendo importantes infra-estruturas: a) colapso da Ponte Hintze Ribeiro, Entre-os-Rios (2001): 59 mortos; b) colapso da Ponte I-35W sobre o rio Mississippi (2007): 13 mortos, 145 feridos.

químicos e físicos, começam a revelar danos e avarias, vão sofrendo acidentes, vão sendo solicitadas por cargas cada vez mais severas. Como se mostra na Figura 1.2, este envelhecimento traduz-se numa redução progressiva do respectivo desempenho estrutural (Santa e Bergmeister, 2000). Exige-se a sua manutenção regular e, não raras vezes, mesmo o seu reforço de forma a manter níveis de operacionalidade, segurança e conforto adequados às exigências vigentes. Tal como indicado na figura, estas intervenções podem ter um carácter preventivo, ou podem ser essenciais para manter a estrutura dentro dos níveis exigidos de segurança.

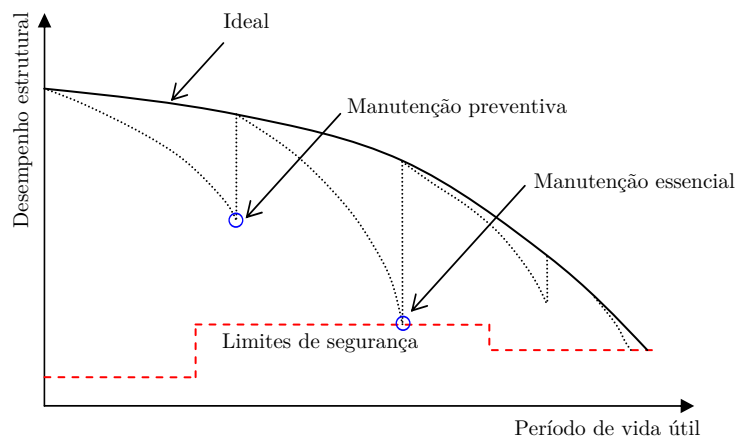


FIGURA 1.2: Natureza da manutenção estrutural e reposição dos níveis de segurança (Santa e Bergmeister, 2000).

Hoje em dia, nos países desenvolvidos, onde o parque construído é cada vez mais extenso e começa a ficar perigosamente envelhecido, a manutenção estrutural é já uma questão premente. Por exemplo, analisando o caso das pontes nos Estados Unidos da América, em 2001, o custo estimado para reabilitar todas as pontes com problemas era superior a 90 mil milhões de dólares (Measures, 2001). Apesar dos esforços encetados nos últimos anos pelo governo americano, dados oficiais recentes referem que ainda assim cerca de 70 000 pontes, representando aproximadamente 10% do parque construído, continuam

a revelar deficiências estruturais e necessitam de ser urgentemente reabilitadas ou substituídas (FHWA, 2010). No Canadá, em 2003, estavam, de forma idêntica, identificadas mais 30 000 pontes em condições deficientes (Mufti, 2003).

A realidade Europeia não é muito diferente. Por exemplo, em França, os custos associados à inspecção e conservação de pontes excedem os cem milhões de euros anuais. Na Alemanha, são gastos cerca de quinhentos milhões de euros igualmente na conservação e manutenção das pontes existentes. O orçamento anual sueco para a conservação é da mesma ordem de grandeza do orçamento para a construção de novas pontes, atingindo cerca de noventa milhões de euros. Na Suíça, o orçamento anual para a conservação de pontes ronda os cento e quarenta milhões de euros (Hearn et al., 2005; Cruz, 2006a). A tendência generalizada é a de que, nos países mais desenvolvidos, no imediato, os custos de conservação excedam em larga medida os orçamentos destinados à construção de novas infra-estruturas (BRIME, 2001; Kitada, 2006).

Aprofundando a realidade portuguesa, o parque de obras de arte é também vasto e centenário. Segundo os dados disponíveis, a REFER tem neste momento sob sua alçada 2 379 pontes, muitas delas com mais de 50 anos de serviço ou até mesmo centenárias (Campos, 2009). É ainda mais extenso o parque de obras do EP-Estradas de Portugal que neste momento ultrapassa as 5 724 pontes (Horta e Lopes, 2009). Em 2006, o montante aplicado na manutenção de obras de arte ascendia a 75 milhões de euros, representando cerca de 10% do plano de investimentos desse ano (EP, 2006). Estima-se que, mesmo assim, mais de 5% destas obras necessitem de trabalhos de reparação urgentes (Horta e Lopes, 2009). Também a BRISA é responsável por um total que ultrapassa as 1 500 obras de arte, incluindo pontes, viadutos, passagens superiores, inferiores e túneis, nas quais despende cerca de 2.4 milhões de euros anuais em conservações e reparações (Santiago, 2005).

Para uma gestão mais eficiente do parque construído, a permanente recolha de informação específica sobre o estado efectivo das estruturas revela ser fundamental. Só assim pode ser racionalmente avaliada a condição das obras, traçado o seu diagnóstico e projectadas, em consonância, as intervenções necessárias. Exige-se então a recolha criteriosa de informação. Quanto melhor e mais vasta for a informação recolhida *in situ* e quanto mais eficazes forem os métodos de diagnóstico aplicados, mais eficientemente, comportando menores custos e conduzindo a melhores desempenhos, poderão ser planeadas as intervenções necessárias (Farhey, 2005).

## 1.2 Inspeções visuais

Numa óptica tradicional que vai proliferando até aos dias de hoje, a avaliação da integridade estrutural tem sido realizada, na grande maioria dos casos, através de inspeções periódicas (Cruz, 2006b). Estas inspeções podem seguir procedimentos e frequências

muito dependentes da legislação local, do dono de obra e da sua disponibilidade técnica e financeira (Poças, 2009). No entanto são normalmente baseadas em inspeções visuais assumindo diferentes procedimentos em função de se tratar de inspeções de inventário, rotina, principais, especiais ou subaquáticas (Cruz, 2006a). Um grupo de técnicos especializados, com uma determinada periodicidade, desloca-se ao local, percorre a estrutura e procura, nos pontos considerados mais críticos, indícios visíveis de anomalias e danos, tal como se ilustra na Figura 1.3. Face às patologias detectadas é então atribuída uma classificação à estrutura que, em função do resultado, pode ser alvo de intervenção ou interdição imediata, ser submetida a ensaios complementares, ficar sob vigilância mais apertada ou, se nada de relevante tiver sido detectado, manter-se em pleno serviço até à próxima inspeção de rotina, por exemplo, dois anos depois.



FIGURA 1.3: Inspeções visuais: a) inspeção à superestrutura; b) inspeção subaquática.

Apesar de hoje em dia existir uma experiência sedimentada na interpretação dos resultados das inspeções, têm sido apontadas várias falhas relacionadas com a sua capacidade em detectar precocemente danos estruturais (Moore et al., 2001; Phares et al., 2001; Chang et al., 2003). O facto de se basearem em processos puramente empíricos justifica muitas dessas falhas, pelo que muitas anomalias não são visualmente detectadas e muitas das anomalias detectadas estão já associadas a estados avançados de degradação cuja reparação acarreta esforços agravados. Pelo mesmo motivo, tornam-se variáveis e subjectivas na medida em que o resultado pode ser intrinsecamente condicionado pela sensibilidade do técnico que processa a inspeção. Como consequência, as inspeções visuais têm conduzido à mobilização de recursos onde não são necessários, assim como, pelo contrário, podem descartar perigosamente intervenções essenciais em elementos críticos.

Foca-se ainda outro aspecto que, com o drástico aumento da dimensão do parque de obras e com o seu rápido envelhecimento, começa a pesar contra as inspeções periódicas regulares. O esforço colocado na avaliação sistemática de toda a rede de infra-estruturas começa a ser economicamente pesado. Exigem-se demasiados recursos, traduzidos em termos de técnicos, meios logísticos, cortes de serviços e tempo para avaliação de todas as estruturas. Apesar dos esforços no desenvolvimento de técnicas de gestão mais eficientes

(por exemplo, Mendonça et al. (2009)), estima-se que os encargos inerentes às inspeções continuem a aumentar e se vão agravando à medida que mais vasto e mais envelhecido vai ficando o parque construído.

Tendo por base o panorama apresentado, a monitorização estrutural veio criar novas perspectivas na avaliação da integridade das estruturas e conseqüentemente na eficiência da sua manutenção (Housner et al., 1997). Sistemas de monitorização bem concebidos e correctamente instalados têm demonstrado capacidade para executar autonomamente diagnósticos relativamente ao estado de integridade da obra, alertando atempadamente para a necessidade de intervir na estrutura. A implementação de planos de monitorização estrutural veio, por isso, potenciar significativamente a eficiência da manutenção das infra-estruturas, interferindo positivamente no prolongamento da sua vida útil, na redução dos custos de manutenção e na sua utilização em condições de segurança eficientemente controladas e optimizadas. A sua importância na engenharia civil é desta forma premente, sendo actualmente objecto de estudo à escala mundial.

## 1.3 Monitorização estrutural

### 1.3.1 Introdução

Desde sempre a avaliação experimental do comportamento das estruturas tem constituído um sustentado pilar para o desenvolvimento da engenharia estrutural (Bastos, 1997; Félix, 2004). Os métodos experimentais baseados na observação estão associados às primeiras abordagens sobre a análise e dimensionamento estrutural. Daí poderiam resultar formulações empíricas que servissem de base para o dimensionamento de estruturas semelhantes. Destacam-se, neste domínio, os trabalhos pioneiros de Leonardo da Vinci (1452-1519) e de Galileu (1564-1642) com ensaios de tracção e flexão de diferentes peças de ferro, madeira e vidro.

Mesmo com o surgimento das principais formulações analíticas, não pode ser ultrapassada a credibilidade da observação na análise estrutural e na avaliação da segurança das principais estruturas, tal como representa a ilustração da Figura 1.4 referente a um ensaio de carga numa ponte do século XIX (Mufti, 2001). Neste âmbito, a realização de testes de carga era uma prática corrente na aceitação da generalidade das pontes construídas até ao início do século XX. Recorria-se a combinações de carga, com a passagem de veículos carregados, e avaliava-se a resposta global da estrutura. Se a ponte não colapsasse e se não revelasse sinais de deformações exageradas, era admitida a sua abertura ao tráfego corrente (Mufti, 2001). Pese embora o actual domínio dos modelos numéricos mais avançados, e já sem a predominância do passado, a realização de ensaios de carga continua a anteceder a aceitação das pontes mais importantes (p. ex. Sousa

et al. (2005); Costa et al. (2006b); Rodrigues et al. (2007); Cavadas et al. (2008) (ver Figura 1.5)).

Também nas pontes problemáticas, por exemplo acidentadas ou degradadas, destaca-se o papel dos ensaios de carga e da monitorização estrutural em condições de serviço controladas (DeWolf et al., 2002; Spyarakos et al., 2004; Farhey, 2005; Ermopoulos e Spyarakos, 2006; DelGrego et al., 2008). Vários procedimentos têm, neste âmbito, sido desenvolvidos com vista à quantificação da segurança estrutural a partir de resultados experimentais (Frangopol et al., 2001; Bhattacharya et al., 2005; Frangopol et al., 2008; Liu et al., 2009).

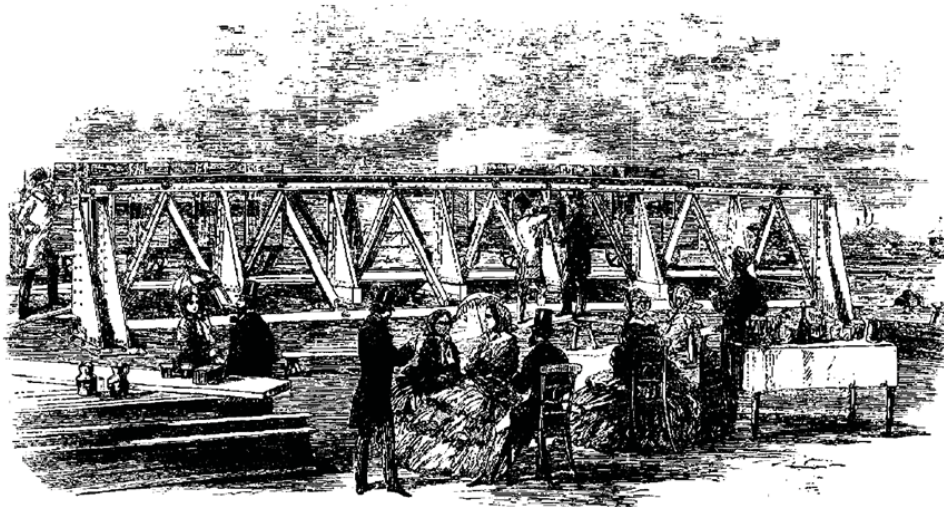


FIGURA 1.4: Ensaio de carga de uma treliça metálica para serventia de uma ponte ferroviária na Índia no século XIX (Mufti, 2001).



FIGURA 1.5: Vistas gerais de ensaios de recepção recentes: a) Ponte da Lezíria (Rodrigues et al., 2007); b) Ponte Eiffel (Cavadas et al., 2008).

Na primeira metade do século XX, com o desenvolvimento de técnicas de instrumentação avançada, a observação ganhou uma nova faceta relacionada com o controlo do comportamento de estruturas de grandes dimensões, de onde se destacam as pontes e as barragens. Os sensores começaram a sair dos laboratórios e começaram a ser transpostos

para a avaliação permanente da evolução do comportamento das estruturas reais. Tendo em conta a natureza permanente da monitorização, exigindo elevados padrões de estabilidade, bem como, as condições de instalação e funcionamento francamente gravosas verificadas em obra, tornou-se necessário criar novas técnicas de medição e adaptaram-se os sensores e equipamentos para responder aos novos requisitos.

A nível internacional, refere-se o trabalho pioneiro de Roy Carlson (1900-1990) e de André Coyne (1891-1960) na observação de barragens na primeira metade do século XX (ASCE, 2000). Em Portugal, não pode deixar de ser referido, pelo seu pioneirismo mas também pelo seu relevo internacional, o trabalho do LNEC que ao longo de mais de setenta anos tem instrumentado algumas das estruturas mais importantes do país, conforme ilustram as imagens da Figura 1.6 (Marecos, 1986; Fernandes e Santos, 2001; Fernandes, 2009).



FIGURA 1.6: Instrumentações realizadas pelo LNEC nas décadas de 50 e 60: a) instalação de extensómetros de embeber na Barragem da Bouçã, 1955; b) sistema de medição de deslocamentos por meio de dispositivos ópticos aplicado na Ponte 25 de Abril (LNEC, 2011).

As primeiras campanhas experimentais recorriam a equipamentos mecânicos, não automáticos, que exigiam a intervenção de técnicos especializados que, percorrendo os pontos de medição, iam anotando os respectivos valores em fichas de leitura. Hoje em dia a realidade é bastante diferente. Tem-se assistido, ao longo das últimas duas décadas, a uma enérgica evolução dos sistemas de observação estrutural. A evolução tecnológica veio criar novas condições para o desenvolvimento da monitorização. Continuamente aparecem sistemas de medição mais autónomos, automáticos e fiáveis. O acesso remoto, aliado à capacidade de cálculo computacional, vieram também revolucionar as técnicas e os modelos utilizados na análise dos dados da monitorização. Surge assim espaço para um novo conceito: a monitorização da integridade estrutural.

### 1.3.2 O conceito de monitorização da integridade estrutural

O conceito de monitorização da integridade estrutural traduz a definição mais completa que prolifera na bibliografia internacional sob a designação de *Structural Health Monitoring (SHM)*. Recorrendo à medição de diferentes grandezas representativas do

comportamento da estrutura e do seu meio envolvente, a monitorização da integridade estrutural procura, aplicando técnicas de análise específicas, detectar e alertar sobre a presença de danos e/ou anomalias no sistema estrutural (Housner et al., 1997; Aktan et al., 2000; Farrar e Worden, 2007).

Procurando clarificar o conceito, a Figura 1.7 apresenta uma analogia entre o que se pretende da monitorização estrutural e a abordagem de um médico perante um paciente (Glisic e Inaudi, 2007). Do mesmo modo que o médico procura o tratamento para o seu paciente analisando os seus sintomas e queixas, na monitorização estrutural procura-se medir e analisar aspectos representativos do comportamento da estrutura de forma a detectar danos, ou seja sintomas, visando a sua reparação precoce.

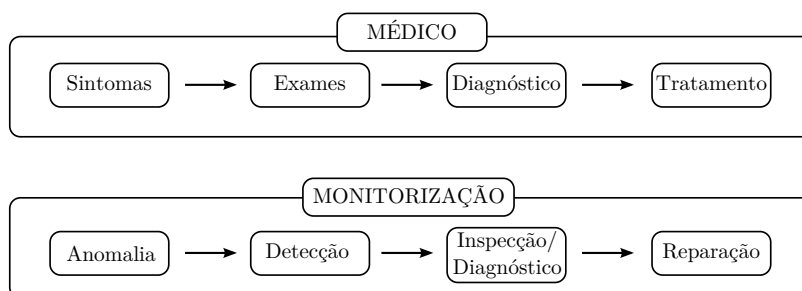


FIGURA 1.7: Paralelismo entre a monitorização estrutural e o tratamento médico com vista à detecção antecipada de anomalias e à sua eficiente reparação.

Na monitorização da integridade estrutural, combina-se um conjunto de técnicas experimentais com modelos numéricos adequados (Chang et al., 2003; Van der Auweraer e Peeters, 2003; Worden e Dulieu-Barton, 2004). Sobre a rede de sensores e equipamentos associados recai a responsabilidade de medir as grandezas mecânicas, físicas e químicas que melhor reflectem o desempenho da estrutura. Compete às técnicas de modelação analisar esses dados experimentais de forma a detectar danos na estrutura, quantificá-los e, se possível, indicar a sua localização.

Com a monitorização da integridade estrutural passou a ser possível dispor, em qualquer momento, de informação actualizada relativamente ao comportamento efectivo da estrutura e à sua condição. São, por isso, vastas as potencialidades da monitorização estrutural pelo que se destaca (Ko e Ni, 2005):

- i) verificação dos pressupostos de cálculo com potencial benefício na melhoria dos critérios de análise e no dimensionamento de estruturas semelhantes no futuro;
- ii) detecção atempada de eventuais deficiências estruturais, danos ou acidentes permitindo incrementar de uma forma geral os níveis de segurança;
- iii) planeamento sustentado de intervenções, tais como trabalhos de reabilitação e de reforço estrutural, em função das necessidades efectivas da estrutura;

- iv) avaliação da eficácia das intervenções de manutenção e reforço realizadas ao longo da vida útil da estrutura;
- v) avaliação da condição estrutural em tempo-real imediatamente após acidentes ou solicitações extraordinárias;
- vi) quantificação das acções reais intervenientes na estrutura, tais como caracterização do tráfego e quantificação das acções do vento e sismo;
- vii) avaliação do desempenho de novos materiais e/ou novos sistemas estruturais.

Fazendo um esforço em divulgar as técnicas que rodeiam a monitorização estrutural têm sido redigidos alguns manuais em torno do tema. A maioria destes documentos tem sido fomentada pelas próprias agências governamentais ou por associações técnicas que sentem necessidade de juntar diferentes valências. Destacam-se as seguintes publicações, onde são compilados os principais conceitos, técnicas e métodos de referência:

- MUFTI, A. – **Guidelines for structural health monitoring**. ISIS Canada, 2001.
- BERGMEISTER, K.; AKTAN, A.; BUCHER, C.; DORFMANN, L.; FEHLING, E.; FREY, R. P.; GEIER, R.; HUTH, O.; INAUDI, D.; MAIER, J. E.; SANTA, U.; SCHWESINGER, P.; SLOWIK, V.; WENZEL, H. – **Monitoring and safety evaluation of existing concrete structures**. fib Task Group 5.1, 2003.
- AKTAN, A. E.; CATBA, F. N.; GRIMMELSMAN, K. A.; PERVIZPOUR, M. – **Development of a model health monitoring guide for major bridges**. Drexel Intelligent Infrastructure and Transportation Safety Intitute, 2002.
- CITYU, EMPA, OU, UMINHO, USTUTT – **Evaluation of monitoring instrumentation and techniques**. Sustainable Bridges, 2004.

## 1.4 Sistemas de Monitorização

O desenvolvimento de sistemas de monitorização estrutural tem sido objecto de estudo de uma grande variedade de autores, grupos e indústrias (Aktan et al., 1998; Measures, 2001; Inaudi, 2002; Glisic e Inaudi, 2007). Exige-se a combinação do conhecimento da engenharia civil em relação ao comportamento das estruturas com as valências tecnológicas da electrotecnia, da mecânica, da física, entre outras áreas dispersas do conhecimento. Os avanços tecnológicos têm permitido um melhoramento contínuo do desempenho da monitorização estrutural, fomentando a sua proliferação e aumentando a confiança nela depositada (Chang et al., 2003; Elgamal et al., 2004; Ko e Ni, 2005).

Hoje em dia, pretende-se que o sistema de monitorização seja capaz de proceder ao acompanhamento das principais componentes da resposta da estrutura e das acções que lhe dão origem, de uma forma totalmente autónoma e automática. Este deve ainda disponibilizar, remotamente, a respectiva informação, permitindo às entidades técnicas competentes ter acesso, em tempo real, ao diagnóstico permanente da integridade da estrutura (Mufti, 2001).

Respondendo aos requisitos anteriormente indicados, representa-se de forma esquemática, na Figura 1.8, a configuração base de um sistema de monitorização estrutural (Félix, 2004). Neste esquema estão identificados um conjunto de subsistemas, de onde se destaca a rede de sensores, o sistema de aquisição de dados, o sistema de comunicação, o controlo da aquisição e tratamento de dados, os modelos de avaliação e detecção de dano e o sistema de gestão e decisão.

#### REDE DE SENSORES

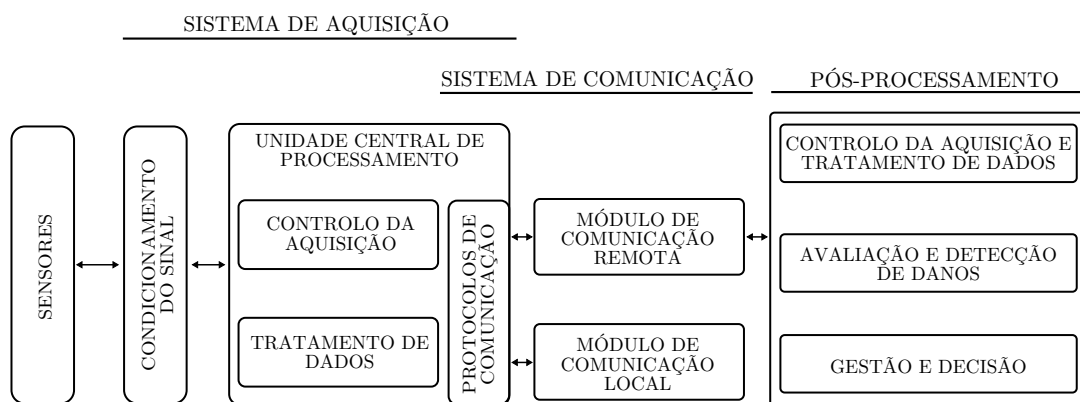


FIGURA 1.8: Esquema geral de um sistema de monitorização.

Compete à rede de sensores, distribuída ao longo da estrutura e na sua envolvente, medir as grandezas mecânicas, físicas e químicas consideradas mais representativas para a percepção do parâmetro estrutural em estudo. A selecção destas grandezas é em muito dependente do tipo de estrutura e do objectivo primário da monitorização. A título meramente indicativo, resume-se, no entanto, na Tabela 1.1 as grandezas monitorizadas com maior incidência na engenharia civil.

TABELA 1.1: Grandezas frequentemente medidas na monitorização estrutural.

<b>Mecânicas</b>	Deslocamento, rotação, força, pressão, abertura de fendas, abertura de juntas, extensão, deformação, tensão, aceleração
<b>Físicas</b>	Temperatura, humidade relativa, pluviosidade, radiação solar, vento
<b>Químicas</b>	pH, penetração de cloretos, penetração de sulfatos, penetração da carbonatação, corrosão das armaduras, corrosão do aço

O sistema de aquisição é, através de um conjunto de equipamentos específicos, responsável por alimentar os sensores, condicionar o respectivo sinal em informação digital e armazenar o conjunto de dados localmente. Na monitorização remota, os dados são depois enviados, através de um sistema de comunicação, para uma base de dados onde são guardados num servidor central. Segue-se a aplicação de algoritmos computacionais visando a transformação dos dados brutos em indicadores representativos do comportamento da estrutura, da sua condição e da sua segurança. Para as entidades responsáveis, torna-se imprescindível o acesso a esta informação, seja através de *software*, relatórios periódicos ou sistemas de alertas, de forma a decidir oportunamente qualquer intervenção.

O rápido crescimento a que se assistiu ao longo das duas últimas décadas no que diz respeito à tecnologia que rodeia os sensores, sistemas de aquisição, sistemas de comunicação e nas técnicas de processamento de dados veio exponenciar as potencialidades da monitorização estrutural. Um conjunto amplo de sensores, sistemas de aquisição e demais equipamentos começa a estar disponível no mercado respondendo especificamente às exigências da engenharia civil (Grivas e Garlock, 2003; Wong, 2004; Lynch et al., 2004; Spencer et al., 2004; Ko e Ni, 2005; Yun et al., 2008).

## 1.5 Monitorização baseada em sensores em fibra óptica

A instrumentação estrutural foi dominada durante muitos anos pelos sensores de natureza eléctrica. A título de referência destaca-se a importância dos extensómetros de resistência eléctrica, dos extensómetros de cordas vibrantes, das células de carga extensométricas, dos LVDT, dos PT100, etc. utilizados na medição das mais diversas grandezas estruturais (Aktan et al., 2002; Félix, 2004). A evolução tecnológica tem apontado para soluções cada vez mais fiáveis, robustas e económicas

Ao longo das últimas três décadas, várias tecnologias e propriedades ópticas têm sido abordadas para avaliação de diferentes grandezas com recurso à medição de variações nas propriedades da luz transportada nas fibras ópticas, tais como, a sua intensidade, frequência, comprimento de onda, fase ou polaridade (Li et al., 2004; Culshaw e Kersey, 2008). Os sensores baseados em fibra óptica têm então demonstrado excelentes atributos para a medição de parâmetros mecânicos, físicos e químicos (Tennyson et al., 2000; Ansari, 2005; Glisic e Inaudi, 2007).

A monitorização estrutural tem-se apropriado dos sensores em fibra óptica cuja exploração se tem acentuado ao longo da última década. Para o sucesso da instrumentação baseada em fibra óptica, muito tem contribuído um conjunto de vantagens que a destacam quando confrontada com as tecnologias convencionais (Graver et al., 2004). Na

Tabela 1.2 destacam-se as principais vantagens, bem como, algumas das limitações geralmente associadas aos sensores em fibra óptica (Udd, 1995a,b; Tennyson, 2001; Measures, 2001).

TABELA 1.2: Principais vantagens e desvantagens dos sensores em fibra óptica.

<b>Vantagens:</b>
- Imunidade a interferências electromagnéticas (EMI) e frequências rádio (RFI);
- Adequada para utilização em ambientes explosivos;
- Isolamento eléctrico;
- Imune a corrosão;
- Tolerante a altas temperaturas (-200 a 800 °C);
- Dimensões reduzidas;
- Elevada sensibilidade;
- Apresenta sensibilidade a diversas grandezas físicas;
- Estabilidade ao longo do tempo;
- Permite transmissão do sinal ao longo de grandes distâncias face à reduzida atenuação;
- Esquemas de multiplexagem permitem criar redes de sensores mais eficientes;
- Matéria-prima muito abundante.
<b>Desvantagens:</b>
- Custo geralmente elevado de todos os componentes;
- Fragilidade das fibras;
- Dificuldade de conexão das fibras ópticas.

Do ponto de vista metrológico, sublinha-se a sua elevada estabilidade, precisão e resolução. Do ponto de vista da durabilidade, distingue-se o facto de serem constituídos por um material não corrosível e quimicamente estável. Para aplicações em campo, torna-se relevante o facto de apresentarem total imunidade a interferências electromagnéticas, o que resulta na prática na total ausência de ruído eléctrico, bem como o facto de permitirem a transmissão do sinal ao longo de grandes distâncias sem qualquer degradação ou interferência.

Neste contexto, os benefícios inerentes à tecnologia óptica são em muitos casos, por si só, capazes de justificar a sua utilização na monitorização estrutural. Começa-se, mesmo, a verificar que as soluções ópticas são, em muitos casos, economicamente vantajosas, permitindo uma grande flexibilidade na arquitectura da rede de sensores devido às possibilidades de multiplexagem em série e em paralelo. Mais ainda, em algumas aplicações particulares, como no caso dos ambientes explosivos e centrais nucleares, os sensores em fibra óptica revelam ser a única solução viável (Glisic e Inaudi, 2007).

Pese embora na tabela anterior o custo dos componentes ópticos estar ainda identificado como uma desvantagem desta tecnologia, tem-se observado que estes mesmos custos, nomeadamente o custo dos sensores, dos equipamentos de aquisição, das conexões e das próprias fibras, tem diminuído significativamente nos últimos anos. Tal tendência

deve-se não só à evolução da própria tecnologia, mas também à sua entrada massiva nas redes de telecomunicação concomitantemente com a crescente concorrência industrial (Artundo et al., 2011).

### 1.5.1 Revisão bibliográfica

Neste ponto, apresenta-se um breve compêndio das publicações mais relevantes em torno da monitorização estrutural baseada em sensores de fibra óptica. Referem-se aqui as publicações estritamente de carácter geral. Ao longo desta tese, a grande maioria dos trabalhos aqui referenciados, assim como outros entretanto introduzidos, vão voltar a ser abordados, destacando oportunamente e com maior grau de detalhe os resultados e conclusões mais relevantes.

Neste âmbito, a tecnologia em torno dos sensores em fibra óptica tem sido um dos assuntos de maior actualidade no que diz respeito às novas tecnologias de sensores. Ao longo das duas últimas décadas, tendo em conta o interesse geral da comunidade técnica e dada a especificidade do tema, envolvendo conceitos teóricos de física e óptica aplicada, têm sido publicados diversos livros introdutórios dedicados aos sensores em fibra óptica. Sem se pretender ser exaustivo destacam-se, neste contexto, alguns dos livros mais relevantes:

- GRATTAN, K. T. V.; MEGGITT, B. T. – **Optical fiber sensor technology**. Kluwer Academic Publishers, 1998.
- KROHN, D. A. – **Fiber optic sensors: fundamentals and applications (3rd ed.)**. ISA, 2000.
- LÓPEZ-HIGUERA, J. M. – **Handbook of optical fibre sensing technology**. Wiley, 2002.
- GUPTA, B. D. – **Fiber optic sensors: Principles and applications**. New India Publishing, 2006.
- YIN, S.; RUFFIN, P. B.; YU, F. T. S. – **Fiber optic sensors (2nd ed.)**. CRC Press, 2008.
- UDD, E.; SPILLMAN, W. B. – **Fiber optic sensors: an introduction for engineers and scientists (2nd ed.)**. Wiley-Interscience, 2011.

Pelo mesmo motivo de interesse, vários artigos de revisão incidindo sobre a tecnologia dos sensores em fibra óptica têm sido difundidos em revistas de referência internacional. Também aqui se destacam alguns dos artigos de revisão mais representativos:

- GIALLORENZI, T. G.; BUCARO, J. A.; DANDRIDGE, A.; SIEGEL, G. H.; COLE, J. H.; RASHLEIGH, S. C.; PRIEST, R. G. – **Optical fiber sensor technology**. IEEE Journal of Quantum Electronics. QE-18:4 (1982), p. 626–665.
- UDD, E. – **An overview of fiber-optic sensors**. Review of Scientific Instruments. 66:8 (1995), p. 4015–4030.
- KERSEY, A. D. – **A review of recent developments in fiber optic sensor technology**. Optical Fiber Technology. 2:3 (1996), p. 291–317.
- GRATAN, K. T. V.; SUN, T. – **Fiber optic sensor technology: an overview**. Sensors and Actuators, A: Physical. 82:1 (2000), p. 40–61.
- MRAD, N. – **Optical fiber sensor technology: introduction and evaluation and application**. In: Schwartz, M. M. (Ed.), Encyclopedia of smart materials. New York: J. Wiley, 2002.
- LEE, B. – **Review of the present status of optical fiber sensors**. Optical Fiber Technology. 9:2 (2003), p. 57–79.
- CULSHAW, B.; KERSEY, A. – **Fiber-optic sensing: A historical perspective**. Journal of Lightwave Technology. 26:9–12 (2008), p. 1064–1078.

Numa vertente mais técnica, um outro conjunto de publicações tem sido orientado para a aplicação de sensores de fibra óptica na monitorização estrutural. No domínio da monitorização das estruturas de engenharia civil, destacam-se os livros publicados por Measures (2001) e por Glisic e Inaudi (2007) que, para além de introduzirem a tecnologia dos sensores, se debruçam na introdução de um conjunto de metodologias para a sua integração na avaliação do comportamento das estruturas:

- MEASURES, R. M. – **Structural monitoring with fiber optic technology**. London: Academic Press, 2001.
- GLISIC, B.; INAUDI, D. – **Fibre optic methods for structural health monitoring**. Chichester: John Wiley and Sons, Inc., 2007.

Sobre a instalação, exploração e reparação de sensores ópticos na engenharia civil, refere-se ainda o trabalho de Tennyson (2001) que se integra num conjunto de manuais publicados pelo ISIS Canada em torno do tema:

- TENNYSON, R. C. – **Installation, use and repair of fibre optic sensors**. Manitoba: ISIS Canada, 2001.

Mais gerais são as publicações pioneiras de Ansari e Sture (1993), Udd (1995a), Culshaw (1996) e Ansari (1998) cobrindo a aplicação de sensores de fibra óptica na engenharia civil, mecânica e aeronáutica:

- ANSARI, F.; STURE, S. – **Application of fiber optic sensors in engineering mechanics**. New York: American Society of Civil Engineering, 1993.
- UDD, E. – **Fiber optic smart structures**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1995.
- CULSHAW, B. – **Smart structures and materials**. Boston: Artech House, 1996.
- ANSARI, F. – **Fiber optic sensors for construction materials and bridges**. Lancaster: Technomic Publishing Co., 1998.

Um conjunto extenso de artigos de revisão em revistas internacionais pode também ser identificado no que concerne à aplicação de sensores em fibra óptica na monitorização estrutural. Os sensores ópticos baseados em redes de Bragg, em interferómetros de Fabry-Perot, de Michelson e de Mach-Zender, assim como os sensores distribuídos baseados no espalhamento de Brillouin e Raman revelam ser os de maior aplicabilidade face aos interesses da engenharia estrutural. Pelo seu enfoque nas estruturas de engenharia civil destacam-se as seguintes publicações: e (Deng e Cai, 2007)

- MERZBACHER, C. I.; KERSEY, A. D.; FRIEBELE, E. J. – **Fiber optic sensors in concrete structures: a review**. *Smart Materials and Structures*. 5:2 (1996), p. 196–208.
- ANSARI, F. – **State-of-the-art in the applications of fiber-optic sensors to cementitious composites**. *Cement and Concrete Composites*. 19:1 SPEC. ISS. (1997), p. 3–19.
- CASAS, J. R.; CRUZ, P. J. S. – **Fiber optic sensors for bridge monitoring**. *Journal of Bridge Engineering*. 8:6 (2003), p. 362–373.
- GRAVER, T.; INAUDI, D.; DOORNINK, J. – **Growing market acceptance for fiber optic solutions in civil structures**. In: *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. Vol. 5589, pp. 44–55. 2004.
- LI, H. N.; LI, D. S.; SONG, G. B. – **Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering**. *Engineering Structures*. 26:11 (2004), p. 1647–1657.
- DENG, L.; CAI, C. S. – **Applications of fiber optic sensors in civil engineering**. *Structural Engineering and Mechanics*. 25:5 (2007), p. 577–596.

Difundindo a aplicação de sensores em fibra óptica realizada por diferentes academias, associações e empresas, são também vários os registos que reportam o sucesso da utilização das mais diversas tecnologias ópticas na monitorização de pontes (p. ex. Mufti et al. (1997); Maaskant et al. (1997); Fuhr et al. (1999); Todd et al. (1999); Udd et al. (2000); Chan et al. (2006); Li et al. (2009); Inaudi et al. (2009); Inaudi (2010)), barragens (p. ex. Kronenberg et al. (1997); Glisic et al. (1999)), túneis (p. ex. Inaudi e Casanova (2000); Glisic et al. (2000)), edifícios (p. ex. Whelan et al. (2002); Iwaki et al. (2001); Kwon et al. (2002); Glisic et al. (2005); Inaudi et al. (2010a)), oleodutos (p. ex. Tennyson (2002); Tapanes (1999); Fernandex et al. (1996); Kersey (2000)), entre outras estruturas (p. ex. Seim et al. (1999); Kister et al. (2007b); Inaudi e Church (2011)). Têm sido medidas grandezas estruturais, tais como, extensões, deformações, deslocamentos, rotações, vibrações, forças, pressão, assim como, aspectos ambientais tais como temperaturas e humidade.

Um conjunto vasto de testes laboratoriais tem também sido alvo de publicação suportando as mais diversas conclusões em torno do desempenho dos sensores em fibra óptica. Destacam-se os estudos experimentais em torno da avaliação da sensibilidade e calibração de diferentes sensores (p.ex. Kurashima et al. (1997); Saouma et al. (1998); Zhang et al. (2003); Moyo et al. (2005)), para avaliação dos efeitos da temperatura (p.ex. Zhang et al. (2003); Moyo et al. (2005); Frovel et al. (2009)), assim como os testes de durabilidade e fadiga (p.ex. Kister et al. (2007a); Lee et al. (2002); Gheorghiu et al. (2005); Ang et al. (2008); Herszberg et al. (2007)). Algumas publicações têm ainda abordado a comparação do desempenho de diferentes tecnologias ópticas com sensores convencionais de natureza eléctrica (p.ex. Tahir et al. (2005)).

Referem-se ainda algumas teses de doutoramento em engenharia civil realizadas em torno deste tema:

- CHU, D. – **Development of innovative optical fiber sensors suitable for civil engineering applications**. Tese de doutoramento, University of California, 1999.
- INAUDI, D. – **Fiber optic sensor network for the monitoring of civil engineering structures**. Tese de doutoramento, École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), 1997.
- VURPILLOT, S. – **Analyse automatisée des systèmes de mesure de déformation pour auscultation des structures**. Tese de doutoramento, École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), 1999.
- GLISIC, B. – **Fibre optic sensors and behaviour in concrete at early age**. Tese de doutoramento, École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), 2000.
- FÉLIX, C. – **Monitorização e análise do comportamento de obras de arte**. Tese de doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2004.

- DOORNINK, J. D. – **Monitoring of structural condition of fracture-critical bridges using fiber optic technology**. Tese de doutoramento, Iowa State University, 2006.

## 1.6 Motivação

A aplicação de sensores em fibra óptica na monitorização estrutural é ainda um tema emergente conforme comprova a mais recente evolução de publicações sobre este assunto. É objectivo de toda a comunidade encontrar soluções mais fiáveis, robustas e competitivas para medição de um conjunto mais amplo de grandezas relevantes do ponto de vista estrutural. O desenvolvimento e aplicação de soluções em fibra óptica na monitorização estrutural é portanto um tema a perseguir e melhorar ao longo deste trabalho.

Face ao esforço mundial colocado em torno deste tema, a viabilidade técnica dos sistemas de monitorização baseados em fibra óptica passou a ser uma realidade fundamentada. O decréscimo dos custos dos componentes ópticos a que se tem assistido nos últimos anos veio também suportar a sua viabilidade económica. A adequação da tecnologia óptica às exigências da engenharia civil necessita, no entanto, de ser melhorada para uma aplicação mais expedita, versátil e eficiente.

As características intrínsecas dos vários tipos de sensores em fibra óptica realçam a estabilidade, fiabilidade e capacidade de multiplexagem destes sensores. Considera-se porém que a avaliação dos sensores existentes e o desenvolvimento de novos transdutores, mais robustos e de custo reduzido, é essencial para uma aceitação mais alargada das novas tecnologias pela indústria da construção. Torna-se premente a adequação dos atributos dos sensores em fibra óptica de forma a melhor ajustar os requisitos específicos da monitorização das estruturas de engenharia civil, sendo fundamental a combinação de conhecimentos técnicos relativos à tecnologia dos sensores em fibra óptica com valências em torno da engenharia estrutural.

A integração dos sensores ópticos nas estruturas carece ainda de desenvolvimentos com vista à sua plena exploração. Exige-se o desenvolvimento de novas arquitecturas de redes de sensores. A identificação das soluções e processos de instalação mais adequados é igualmente vital para se sistematizar processos de instalação mais robustos e duradouros. São notórias as condições adversas das instalações em obra, assim como é evidente a fragilidade natural da fibra óptica para ser integrada nesses meios.

Tendo conhecimento das potencialidades e limitações dos sensores em fibra óptica, justifica-se o desenvolvimento de novos métodos de análise da condição estrutural, tirando melhor partido das valências únicas dos sensores ópticos. É necessário identificar os principais indicadores da condição estrutural tendo em conta os meios disponíveis para a sua medição. Justifica-se a optimização dos métodos analíticos existentes e o

desenvolvimento de novos métodos de análise plenamente centrados nas potencialidades da instrumentação óptica.

## 1.7 Objectivos

A presente tese centra-se no desenvolvimento, teste e exploração de soluções baseadas em sensores de fibra óptica para a monitorização estrutural. Neste âmbito e tendo por base a contextualização que se apresentou ao longo dos pontos anteriores, estabelecem-se os seguintes objectivos:

1. A avaliação do estado da arte das tecnologias em fibra óptica visando a sua aplicação na monitorização estrutural. Pretende-se identificar as técnicas, as metodologias, os equipamentos e os dispositivos mais apropriados para esse fim. Neste âmbito, destaca-se a avaliação crítica das soluções disponíveis no mercado para medição das grandezas estruturalmente mais representativas.
2. O desenvolvimento e implementação de novas soluções, baseadas em sensores de fibra óptica, com características de robustez e de durabilidade ajustadas aos principais requisitos colocados pela engenharia civil. Serão investigadas soluções inovadoras para monitorização de componentes estruturais considerados críticos para a segurança e durabilidade global das estruturas. Procuram-se soluções mais fiáveis, robustas e economicamente mais competitivas do que as disponíveis no mercado.
3. A integração de diferentes sensores em redes capazes de proceder de forma combinada à avaliação do comportamento das estruturas. Procura-se tirar partido das vantagens e valências da fibra óptica estabelecendo novos procedimentos e adequando as práticas correntes, associadas aos sensores eléctricos, de forma a melhor rentabilizar esta tecnologia. Explorando as valências das tecnologias ópticas, procura-se incrementar também o desempenho e a fiabilidade dos sistemas de monitorização.
4. A compilação de um conjunto de técnicas, procedimentos e especificações que possam ser encaradas como um manual de boas práticas no que concerne à instalação e exploração de sensores em fibra óptica nas obras de engenharia civil. A experiência adquirida num conjunto de instalações práticas e os ensinamentos daí retirados deverão ser compilados para referência futura.
5. Por último, a exploração de um sistema de monitorização aplicado a um caso real. A integração e o processamento automático dos dados torna-se um ponto essencial para a gestão adequada de um processo de monitorização contínua. Procura-se uma análise inteligente e contínua da informação proveniente da monitorização estrutural recorrendo a metodologias de análise que permitam a avaliação do desempenho da estrutura.

## 1.8 Estrutura da dissertação

A presente dissertação engloba um total de oito capítulos, compilando de forma encaixada um conjunto de temas distintos em torno do âmbito comum proposto para este trabalho. Procura-se que cada capítulo apresente um conteúdo bem definido, introduzindo, desenvolvendo e tecendo conclusões relativamente a um tema específico. Alguns destes capítulos, oportunamente identificados, baseiam-se em trabalhos entretanto publicados pelo autor em congressos e revistas de referência na área em estudo.

Depois deste capítulo introdutório, onde se contextualizou a monitorização estrutural, apresenta-se, no **Capítulo 2**, um levantamento dos principais componentes que constituem um sistema de medição baseado em fibra óptica para monitorização estrutural. Compila-se, de forma sucinta, um conjunto de princípios e aspectos gerais associados à tecnologia óptica. Apresentam-se, com maior grau de detalhe, as principais tecnologias que irão ser exploradas ao longo deste trabalho, focando a sua integração na monitorização estrutural.

No **Capítulo 3**, aborda-se a medição de extensões em elementos estruturais com recurso a sensores de Bragg. Apresentam-se os princípios gerais associados à medição desta importante grandeza estrutural. Descrevem-se as soluções adoptadas, baseadas na colagem superficial de sensores de Bragg. Elaboram-se técnicas específicas vocacionadas para a instalação destes sensores nas estruturas da engenharia civil. Avalia-se o seu desempenho através de um conjunto vasto de ensaios laboratoriais. Termina-se este capítulo com a apresentação de um caso prático, onde se avalia o desempenho e a mais-valia associada à medição de extensões com sensores ópticos focado na reabilitação estrutural da Ponte Eiffel, em Viana do Castelo.

A monitorização do comportamento global das estruturas com base em transdutores de deformação com base longa de medida é o objecto de estudo do **Capítulo 4**. Apresentam-se metodologias para avaliação do comportamento estrutural, concedendo especial destaque para as pontes. Realiza-se uma campanha experimental para avaliar e comparar um conjunto considerável de soluções comerciais em fibra óptica, terminando-se com uma análise crítica onde são apontadas as principais vantagens e limitações das diferentes soluções analisadas. Fecha-se esse capítulo com a apresentação dos resultados de uma monitorização real, levada a cabo durante a construção da Ponte Ricciolo, revelando a viabilidade de uma estratégia de monitorização global baseada em sensores de deformação.

Face ao panorama encontrado no capítulo anterior, relativamente às soluções comerciais existentes para medição de deformações médias, tomou-se a iniciativa de desenvolver novos transdutores de deformação especificamente para embeber no betão baseados em sensores de Bragg. No **Capítulo 5**, apresenta-se o desenvolvimento e teste destas novas soluções, que se pretendem mais fiáveis, robustas e económicas. Valida-se as soluções

desenvolvidas numa série de testes laboratoriais controlados. Interpretam-se os resultados experimentais à luz de um modelo numérico com recurso a uma análise não-linear reflectindo a fendilhação do betão. Enquadra-se a forma prática de proceder à instalação destes transdutores visando a monitorização de estruturas reais.

No **Capítulo 6** passa-se para a medição de flechas em obras de arte de engenharia civil com recurso a sensores de Bragg. Apresenta-se um transdutor desenvolvido para esse efeito baseado no método dos níveis líquidos. Destacam-se os aspectos inovadores deste transdutor com especial ênfase para o seu princípio de funcionamento e para a sua arquitectura interna que permite uma elevada resolução com compensação intrínseca dos efeitos da temperatura. Analisa-se um conjunto de testes que avaliam o desempenho deste transdutor realizados a partir dos primeiros protótipos. Termina-se com uma breve referência à instalação deste sistema num projecto-piloto numa ponte real.

O **Capítulo 7** centra-se depois na apresentação do sistema avançado de monitorização estrutural de base óptica da Ponte da Lezíria, sobre o Rio Tejo no Carregado. Contempla-se a monitorização contínua e automática de flechas a meio de cada um dos vãos, de extensões e curvaturas em secções críticas, bem como de temperaturas representativas para a estrutura. Descrevem-se os principais aspectos relacionados com a concepção do sistema e a arquitectura da rede de sensores adoptada. Deixam-se recomendações tendo por objectivo a implementação prática de um sistema de monitorização baseados em sensores de Bragg. Expõe-se as potencialidades do sistema em funcionamento, focando os resultados mais importantes recolhidos desde a abertura da ponte ao tráfego rodoviário.

Finalmente, no **Capítulo 8**, resumem-se de forma totalmente integrada as principais conclusões deste trabalho. Realçam-se os principais resultados alcançados e os objectivos atingidos. Especificam-se os principais contributos. Deixa-se ainda espaço para algumas recomendações relativamente a desenvolvimentos futuros.

## Capítulo 2

# Tecnologia dos Sensores em Fibra Óptica

Ao longo deste capítulo, apresentam-se as principais tecnologias ópticas que irão ser exploradas ao longo deste trabalho. Compila-se, de forma sucinta, um conjunto de princípios e aspectos gerais associados às fibras ópticas, focando a sua integração e aplicação na monitorização estrutural. Faz-se um levantamento dos principais componentes que constituem um sistema de medição baseado em fibra óptica para monitorização estrutural.

### 2.1 Introdução

A descoberta da fibra óptica veio revolucionar o mundo das telecomunicações. Uma pequena fibra de vidro tornou-se capaz de transmitir mais informação e a maior velocidade do que todas as tecnologias eléctricas existentes até à data. Rapidamente a comunidade científica e a indústria ficaram cientes das potencialidades desta tecnologia. Uniram-se esforços na produção de fibras ópticas com melhor desempenho e desenvolveram-se novas fontes de luz e novos fotodetectores que rapidamente contribuíram para a proliferação da fibra óptica na indústria das comunicações.

Apesar da primeira utilidade da fibra óptica estar particularmente relacionada com a transmissão de dados, cedo se vieram a descobrir também as suas potencialidades como elemento sensor. Butter e Hocker (1978) apresentaram aquele que pode ser considerado o primeiro sensor em fibra óptica. Mediram variações no trajecto percorrido pela luz no interior de uma fibra e conseguiram, assim, quantificar a sua deformação. A partir daí múltiplas tecnologias relacionadas com os sensores em fibra óptica, baseadas na exploração de diferentes propriedades das fibras e da luz, têm sido descobertas e exploradas.

Contudo, todos os sensores em fibra óptica são baseados numa premissa comum. Recorrem ao impacto que determinadas grandezas externas têm sobre as propriedades ópticas da fibra e à respectiva consequência que se traduz na alteração das características da luz que se propaga no seu interior. A caracterização das propriedades da luz na fibra óptica, ou mais correntemente a detecção das suas variações, tem sido desta forma explorada para avaliar alterações no meio envolvente da fibra.

Ao longo deste capítulo dá-se a conhecer a tecnologia por detrás dos sensores em fibra óptica. Apresentam-se, de forma breve, os princípios gerais da propagação da luz e analisam-se as condições para a sua transmissão através das fibras ópticas. Descrevem-se as principais tecnologias dos sensores com aplicação na monitorização com particular enfoque para os sensores intensiométricos, para as redes de Bragg, para as configurações interferométricas de Fabry-Perot, Michelson e Mach-Zender, bem como para os sensores distribuídos fundamentados no espalhamento de Brillouin e Raman. Tirando partido da capacidade de multiplexagem dos sensores em fibra óptica, apresentam-se as arquitecturas das redes de sensores mais importantes e faz-se uma análise crítica de cada uma delas. Termina-se este capítulo com a identificação e especificação dos principais componentes presentes numa rede de sensores em fibra óptica vocacionada para a monitorização estrutural.

## 2.2 Fibra óptica

A fibra óptica é uma estrutura capilar, geralmente em vidro, que se distingue pelo facto de permitir a transmissão de sinais de luz ao longo de distâncias, que podem chegar a vários quilómetros, com um nível de atenuação muito diminuto. Esta capacidade advém da estrutura interna da fibra, constituída por várias camadas transparentes conforme se esquematiza na Figura 2.1.

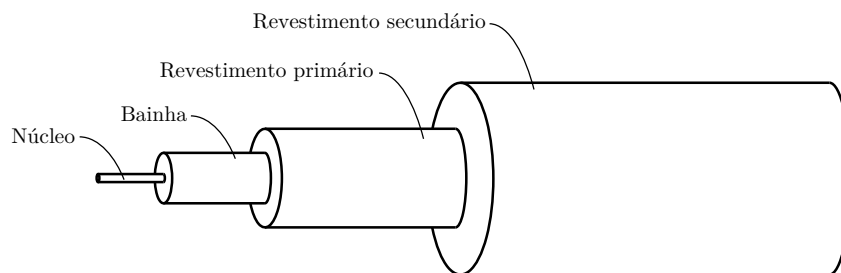


FIGURA 2.1: Representação esquemática da estrutura principal da fibra óptica: núcleo (*core*); bainha (*cladding*), revestimento primário (*buffer coating*) e revestimento secundário.

Das diferentes camadas que compõe a fibra, o núcleo e a bainha são as duas camadas funcionais, responsáveis primários pela condução da luz. As propriedades ópticas destes dois meios são distintas, sendo que o núcleo, geralmente em sílica ( $SiO_2$ ) com alto grau de pureza e homogeneidade, se distingue da bainha por possuir um índice de refração

ligeiramente mais elevado. A diferença dos índices de refração destas duas camadas é conseguida durante o fabrico da fibra por adição de elementos dopantes ao material constituinte da bainha, tais como, germânio, boro ou fósforo.

A diferença de propriedades ópticas dos dois meios supracitados potencia, por sua vez, a ocorrência de um fenómeno denominado reflexão interna total. Este fenómeno ocorre sempre que seja respeitado o cone de aceitação da fibra e conduz a que a luz que sobre ela incide seja sucessivamente reflectida no interface núcleo/bainha, propagando-se longitudinalmente através do núcleo, e não se perdendo para o meio exterior, conforme ilustrado na Figura 2.2.

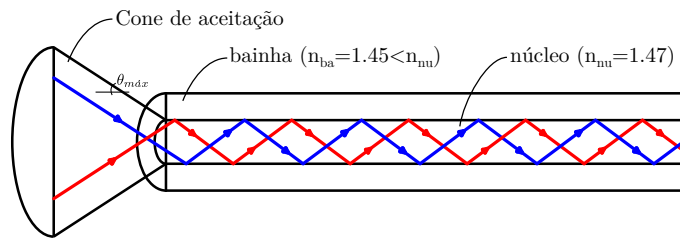


FIGURA 2.2: Propagação da luz na fibra óptica por ocorrência de reflexão interna total.

O cone de aceitação da fibra representa o espaço confinado pelo ângulo crítico a partir do qual deixa de haver reflexão interna total e passa a dar-se a refração da luz através da bainha com conseqüente perda para o exterior. Este ângulo é traduzido pela lei de Snell (Hecht, 2002) e corresponde a uma característica específica de cada fibra óptica geralmente especificada por intermédio da abertura numérica,  $AN$ , de acordo com

$$AN = \sin \theta_{max} = \sqrt{n_{nu}^2 - n_{ba}^2} \quad (2.1)$$

onde,  $\theta_{max}$  é o ângulo que define o cone de aceitação; e  $n_{nu}$  e  $n_{ba}$  são os índices de refração efectivos do núcleo e da bainha da fibra óptica, respectivamente.

Na estrutura da fibra óptica e complementarmente às duas camadas funcionais abordadas, surge ainda uma outra camada fundamental: o revestimento primário. Esta camada, geralmente em acrilato ou poliamida aderente à fibra, confere resistência mecânica ao conjunto, protegendo simultaneamente a sílica de ataques químicos. No funcionamento prático da fibra óptica, torna-se uma camada determinante tanto para a flexibilidade da fibra, como para a minimização de perdas devido a microcurvaturas.

Sobre estas três camadas são geralmente adoptadas protecções mecânicas secundárias, plásticas ou metálicas, contribuindo para uma maior robustez da fibra, conforme o tipo de cabo utilizado.

### 2.2.1 Propagação da luz

A propagação das ondas de luz no interior da fibra é representada genericamente pelas equações de Maxwell (Keiser, 2000; Hecht, 2002). Ultrapassando as deduções iniciais presentes na bibliografia, de uma forma já preliminarmente desenvolvida, a propagação da luz na fibra óptica traduz-se então em coordenadas cilíndricas do seguinte modo:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \psi}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial \psi}{\partial \phi} (k^2 - \beta^2) = 0 \quad (2.2)$$

onde  $\psi$  é a função da onda da luz transportada,  $\rho$  é o parâmetro radial,  $k$  é o vector de onda do meio,  $\beta$  é o vector de onda ao longo do eixo da fibra e  $\phi$  é o ângulo azimute.

As equações de Maxwell apresentadas são resolvidas tendo em conta as características das ondas electromagnéticas transportadas e as condições fronteira que definem o meio de propagação (Keiser, 2000; Hecht, 2002). Verifica-se que, para um determinado comprimento de onda, o modo como a luz se propaga no interior da fibra depende sobretudo do diâmetro do núcleo e da razão dos índices de refração das duas camadas internas. Deduz-se que o número de diferentes modos,  $M$ , transportados pela fibra é dado por:

$$M = \frac{V^2}{2} = \frac{1}{2} \left( \frac{2\pi r}{\lambda_0} \sqrt{n_{nu}^2 - n_{ba}^2} \right)^2 = \frac{1}{2} \left( \frac{2\pi r}{\lambda_0} AN \right)^2 \quad (2.3)$$

onde  $\lambda_0$  é o comprimento de onda da luz em vácuo,  $r$  é o diâmetro do núcleo da fibra, e  $n_{nu}$  e  $n_{ba}$  são os índices de refração do núcleo e da bainha, respectivamente.  $AN$  constitui a denominada abertura numérica da fibra, traduzindo a diferença entre os índices de refração do núcleo e da bainha da fibra.

Verifica-se então que para fibras onde  $V$  é menor do que 2.405 apenas um único modo de propagação da luz é admitido. Por outro lado, nas fibras onde  $V$  é superior a 2.405 múltiplos modos de propagação da luz podem existir concomitantemente. Surge assim a primeira forma de classificação das fibras ópticas. Tendo em conta o modo de propagação das ondas no interior da fibra, podem-se classificar as fibras ópticas em duas classes distintas: as fibras monomodo (*singlemode*) e as fibras multimodo (*multimode*). A diferença entre estas duas fibras está esquematizada na Figura 2.3.

Nas fibras monomodo (Figura 2.3.a)), com núcleos de diâmetro reduzido, entre 2 a 10  $\mu\text{m}$ , a luz propaga-se segundo um único feixe que percorre a fibra exclusivamente segundo o seu raio axial. Contrariamente, nas fibras multimodo (Figuras 2.3.b) e c)), com núcleos bastante maiores cujo diâmetro ultrapassa geralmente os 50  $\mu\text{m}$  e pode chegar a 150  $\mu\text{m}$ , a luz propaga-se segundo múltiplos trajectos através de vários feixes separados que vão sendo reflectidos sucessivamente.

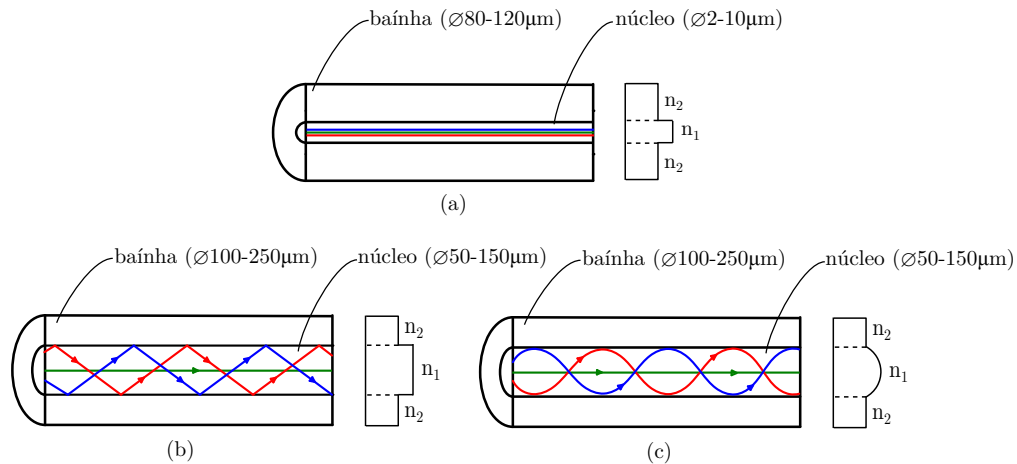


FIGURA 2.3: Modos de propagação da luz no interior de: a) fibra monomodo; b) fibra multimodo com transição em patamar; c) fibra multimodo com gradiente suavizado.

É ainda possível encontrar variações nas propriedades das fibras ópticas ao nível do perfil transversal do índice de refração. Este pode assumir uma configuração em patamar ou com um gradiente suavizado conforme se indica nas Figuras 2.3.b) e c), respectivamente. Esta característica condiciona também a forma como a luz percorre o interior da fibra. As fibras com gradiente suavizado, são particularmente interessantes nas redes de comunicação, uma vez que permitem aumentar as larguras de banda tendo em conta que os diferentes modos, assumindo trajetórias curvilíneas, demoram praticamente o mesmo tempo a percorrer uma determinada distância. A sua utilização nas redes de sensores é no entanto pouco frequente.

### 2.2.2 Propriedades físicas e mecânicas

As principais propriedades físicas e mecânicas da fibra óptica estão resumidas na Tabela 2.1 (Inaudi, 1997).

TABELA 2.1: Propriedades físicas e mecânicas da fibra óptica.

Composição química	SiO <sub>2</sub>
Densidade [ $\times 10^3$ kg/m <sup>3</sup> ]	2.2
Tensão de rotura [MPa]	5
Módulo de Young [GPa]	72
Coefficiente de Poisson	0.17
Extensão de rotura [%]	2-8
Coefficiente de dilatação térmica [ $\times 10^{-6}$ °C <sup>-1</sup> ]	0.5
Temperatura de fusão [°C]	1665
Índice de refração	1.46
Atenuação média [dB/km]	0.3
Dispersão média [ps/km.nm]	20

Do ponto de vista mecânico, salienta-se o seu módulo de Young a rondar os 72 GPa e a sua extensão de rotura balizada entre 2 a 8 %, muito dependendo da velocidade de aplicação e duração da mesma. Salienta-se ainda o reduzido coeficiente de dilatação térmica apresentado pela fibra óptica, aproximadamente igual a  $0.5 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ .

Em relação às propriedades ópticas, chama-se a atenção para o índice de refração médio igual a 1.46 e para a reduzida atenuação média que viabiliza a transmissão de sinais de luz ao longo de várias dezenas de quilómetros.

## 2.3 Tecnologias dos sensores em fibra óptica

Quando disposta convenientemente, por alteração das propriedades ópticas da própria fibra ou por interposição de qualquer dispositivo apropriado, as perturbações externas que actuam sobre a fibra óptica são capazes de introduzir alterações nas propriedades da luz transportada. É esta capacidade que é explorada pelos sensores em fibra óptica que permitem recorrer à medição de propriedades da luz propagada na fibra para medição de grandezas externas conforme ilustrado na Figura 2.4.

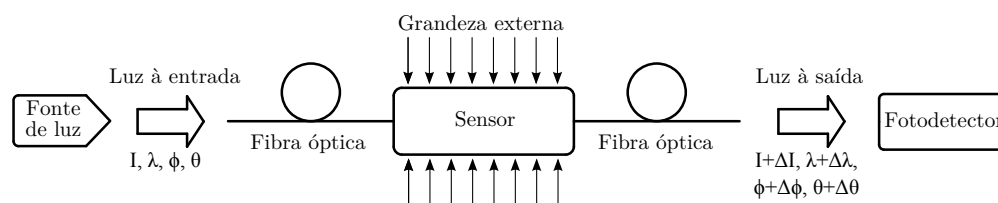


FIGURA 2.4: Princípio geral dos sensores em fibra óptica.

Várias tecnologias e propriedades ópticas têm sido estudadas para avaliação de parâmetros mecânicos, físicos e químicos com recurso à medição de variações nas propriedades da luz, tais como, a sua intensidade ( $I$ ), comprimento de onda ( $\lambda$ ), fase ( $\phi$ ) ou polarização ( $\theta$ ). Ao longo desta secção, destacam-se algumas das tecnologias ópticas mais exploradas e que se encontram actualmente no mercado sob a forma de soluções para medição de parâmetros estruturais. Focam-se aquelas que adquiriram já um grau de maturidade elevado, estando por isso já muitas vezes associadas a aplicações industriais e a produtos comerciais. Serão descritos os princípios essenciais de funcionamento de cada uma destas tecnologias.

### 2.3.1 Classificação

Os sensores em fibra óptica podem de uma forma genérica ser classificados de acordo com vários critérios na medida que podem ser considerados aspectos diversificados associados à morfologia e princípio de medição do sensor. Destacam-se aqui os seguintes critérios de classificação:

- i) natureza do elemento sensor;
- ii) base de medida;
- iii) princípio de medição.

### 2.3.1.1 Natureza do elemento sensor

Relativamente à natureza do elemento sensor, os sensores em fibra óptica podem ser classificados como sendo intrínsecos ou extrínsecos. A Figura 2.5 ilustra a distinção entre estes dois tipos de sensores.

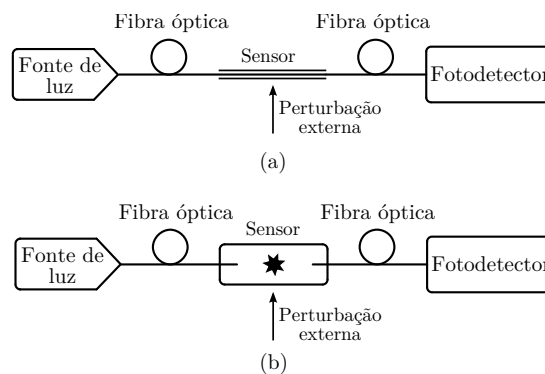


FIGURA 2.5: Classificação de sensores em fibra óptica quanto à sua natureza: a) sensor intrínseco; b) sensor extrínseco.

No caso dos **sensores intrínsecos**, o feixe de luz que percorre a fibra óptica é modificado por actuação do meio envolvente no interior da própria fibra óptica (Figura 2.5.a)). O elemento sensor está assim integrado na própria fibra, sendo que a luz é conduzida desde a fonte até ao fotodetector sempre no interior do mesmo meio. Neste caso, a fibra óptica funciona simultaneamente como meio de transmissão e como elemento sensor. Refere-se como exemplos de sensores intrínsecos, os sensores de Bragg e o interferómetro intrínseco de Fabry-Perot (IFPI).

Por sua vez, no caso dos **sensores extrínsecos**, a luz é encaminhada, através da fibra óptica, para um dispositivo sensor externo à fibra (Figura 2.5.b)). É no interior do dispositivo sensor que essa mesma luz sofre uma modulação de acordo com a variação da grandeza externa a medir, sendo novamente encaminhada para a fibra óptica de modo a atingir o fotodetector. Neste caso, a fibra óptica funciona exclusivamente como meio de transmissão de sinal. Indica-se a título de exemplo o interferómetro extrínseco de Fabry-Perot (EFPI).

Relativamente aos tipos de sensores apresentados, refira-se que os sensores intrínsecos apresentam algumas vantagens quando comparados com os extrínsecos. Destaca-se de uma forma geral, uma maior sensibilidade, uma maior facilidade de multiplexagem, menor tamanho e imunidade a ambientes sujos (Mrad, 2002). Do ponto de vista da

aplicabilidade prática, os sensores intrínsecos são por isso geralmente mais interessantes, evidenciando maior robustez, versatilidade e facilidade de instalação.

### 2.3.1.2 Base de medida

Outra forma de classificar os sensores em fibra óptica tem a ver com a sua base de medida. Neste caso, estes podem ser classificados como sendo pontuais, de longo comprimento de medição, quasi-distribuídos ou distribuídos (Grattan e Sun, 2000). Mostra-se na Figura 2.6 os aspectos essenciais definidores de cada tipologia.

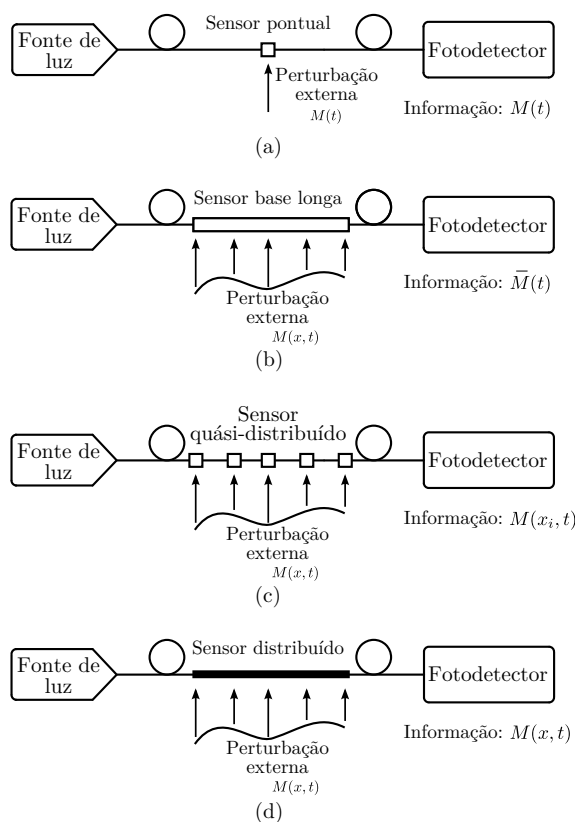


FIGURA 2.6: Classificação de sensores em fibra óptica quanto à base de medida: a) sensor pontual; b) sensor de base longa de medida; c) sensor quasi-distribuído; d) sensor distribuído.

Os **sensores pontuais** permitem, tal como o nome sugere, a medição de grandezas físicas em pontos discretos. Correspondem a sensores com uma base de medida de alguns milímetros. No caso da monitorização estrutural, são particularmente apropriados para avaliação de efeitos locais podendo captar com elevado rigor a concentração de efeitos. Refere-se como exemplo de sensores pontuais, os sensores de Bragg e os interferómetros de Fabry-Perot.

Por sua vez, os **sensores de base longa de medida** têm um princípio de medição que leva à captação de valores médios de uma determinada grandeza ao longo de uma base de referência já significativa. É possível encontrar sensores com bases de medida de

alguns centímetros até várias centenas de metros. São sensores particularmente adequados para avaliação de variações globais, levando à integração de efeitos locais, tais como, concentração de efeitos, não uniformidade e demais perturbações de carácter estritamente local. Refere-se o interferómetro de Michelson com bases de medida que podem chegar a algumas dezenas de metros para medição de deformações estruturais.

Recorrendo à combinação em rede de vários sensores pontuais é possível estabelecer os denominados **sensores quasi-distribuídos**. Embora não seja um sensor distribuído, permite determinar o traçado de perfis espaciais de determinadas grandezas físicas através da medição de valores discretos em pontos representativos. Geralmente esta configuração corresponde à multiplexagem em série de vários sensores pontuais. A multiplexagem em série de sensores de Bragg é a forma mais frequente de gerar sensores quasi-distribuídos.

O caso dos **sensores distribuídos** é um aspecto ímpar dos sensores em fibra óptica. Esta configuração permite a avaliação de uma determinada grandeza física ao longo de toda a extensão do sensor de uma forma contínua no espaço. Podem ser alcançados perfis de variação ao longo de desenvolvimentos que podem atingir vários quilómetros. São sensores particularmente adequados para detecção e localização de dano em elementos estruturais de grande desenvolvimento tais como barragens, oleodutos e obras geotécnicas. A tecnologia dos sensores de Brillouin e de Raman veio potenciar a criação de sensores distribuídos em fibra óptica.

### 2.3.1.3 Princípio de medição

Relativamente ao princípio de medição, é possível distinguir os sensores em fibra óptica tendo por base as propriedades da luz que são moduladas e variam em função da perturbação externa criada pela envolvente ao sensor. São geralmente quatro as propriedades da luz utilizadas na medição de perturbações externas, designadamente o comprimento de onda, a intensidade, a fase e a polarização.

Na Tabela 2.2 identifica-se a propriedade da luz utilizada em cada uma das tecnologias mais correntes na monitorização estrutural (Alves, 2007; Measures, 2001) e refere-se o respectivo princípio físico.

### 2.3.2 Sensores intensiométricos

Os sensores intensiométricos baseiam-se na modulação da intensidade da luz transmitida pela fibra óptica. Em diferentes configurações, a grandeza externa a medir pode interagir directamente com a fibra óptica ou, de forma diversa, com um transdutor mecânico interferindo na fibra de modo que a intensidade da luz à saída do sensor seja dependente da magnitude dessa mesma solicitação.

TABELA 2.2: Modulação da luz e respectivos princípios físicos

Modulação	Princípio Físico
Intensidade	Mudança na intensidade da luz transmitida ou reflectida devido à alteração da absorção, emissão ou dispersão
Fase	Interferência entre o sinal do sensor e um sinal de referência
Comprimento de onda	Dependência do comprimento de onda face à reflexão, absorção, emissão e índice de refração
Polarização	Mudança no tensor de polarização

São diversas as técnicas utilizadas para conferir propriedades sensoras à fibra óptica de onda se destacam a modulação da intensidade da luz por ocultação, por reflexão e pela introdução de perdas de luz na fibra (Medlock, 1986; Santos, 1989; Ribeiro, 1996).

Mostram-se na Figura 2.7 dois exemplos de sensores intensiométricos com princípios de funcionamento distintos. A primeira solução representada, na Figura 2.7.a), visa a medição da pressão total associando a microcurvatura da fibra com a pressão actuante sobre o transdutor (Mrad, 2002). Também pela introdução de microcurvaturas na fibra, a segunda solução, representada na Figura 2.7.b), permite a medição do deslocamento relativo entre as duas ancoragens extremas do transdutor (Oshima, 2003).

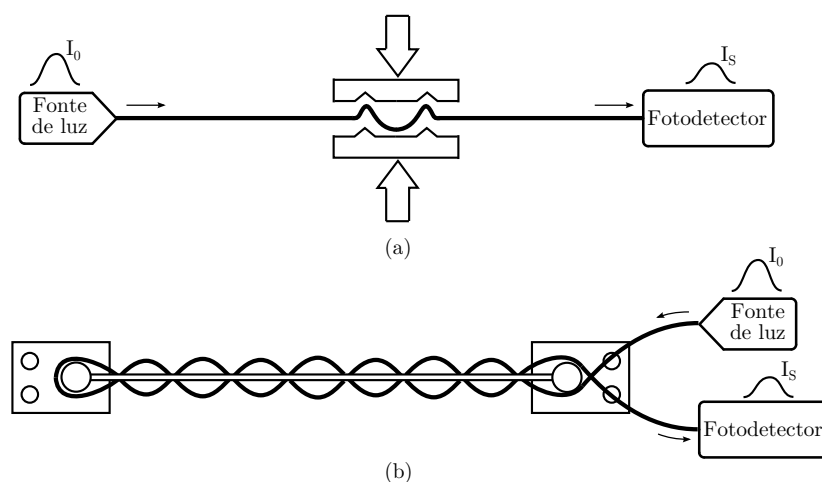


FIGURA 2.7: Configuração interna de sensores intensiométricos: a) configuração sensível à pressão; b) configuração sensível ao deslocamento longitudinal (Oshima, 2003)

No geral os sensores intensiométricos são simples de realizar, envolvendo configurações e tecnologias bastante acessíveis. Logo, são igualmente sensores de reduzido custo de produção, bastante competitivos para aplicações específicas. Refira-se que estes constituíram a primeira geração de sensores em fibra óptica desenvolvida. Continuam a ser utilizados como sensores de proximidade, na detecção de danos e fendilhação (Leung et al., 2002), na detecção de ataques químicos (Brandes et al., 2002), entre outras aplicações (Félix, 2004).

Chama-se no entanto a atenção para a potencial presença de fontes de erro de medição associada à natureza do sinal usado nos sensores com modulação de intensidade. Estes sensores podem tornar-se sensíveis a perturbações que não estejam associadas ao mesurando de interesse (Casas e Cruz, 2003). A medição da intensidade do sinal do sensor é particularmente sensível a flutuações na intensidade da fonte de luz, à variação da sensibilidade do fotodetector, bem como a eventuais perdas de luz introduzidas na fibra óptica fora da zona do sensor. Neste último aspecto, refira-se a sensibilidade do sensor também às perdas presentes em conectores, emendas, curvaturas e na própria dispersão ao longo do percurso de luz na fibra óptica.

Constata-se que a exactidão e a estabilidade natural destes sensores é intrinsecamente diminuta. No entanto, como forma de obviar a sensibilidade do sensor a perturbações externas que não estejam exclusivamente associadas ao mesurando de interesse, têm sido desenvolvidas técnicas de referenciação eficazes. Cita-se o recurso a técnicas temporais, a utilização combinada de dois comprimentos de onda distintos e o recurso a técnicas diferenciais (Ribeiro, 1996).

A título ilustrativo, mostra-se o exemplo de uma técnica de referenciação diferencial na Figura 2.8. Neste caso, juntamente com a fibra do sensor recorre-se a uma fibra paralela para obter uma intensidade de luz de referência que se utiliza para compensar variações na fonte de luz e variações ambientais.

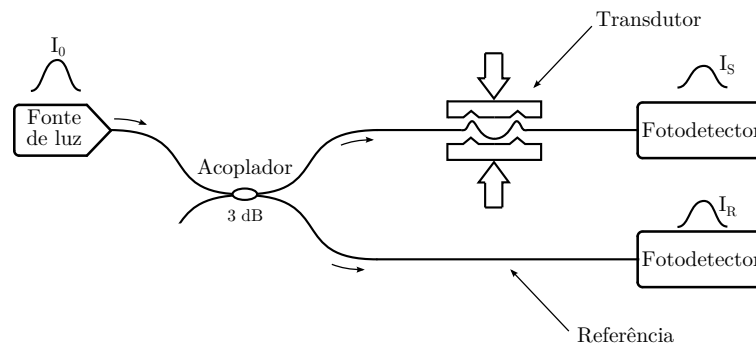


FIGURA 2.8: Princípio de funcionamento de uma técnica de referenciação de um sensor de intensidade baseada na componente diferencial da intensidade de luz através de duas fibras distintas.

A complexidade das técnicas de referenciação e a sua eficiência é muito variável com distintas vantagens e desvantagens associadas (Ribeiro, 1996). Faz-se, no entanto notar que o rigor que se pode atingir na medição está fortemente comprometido pela eficiência da técnica de referenciação o que pode aumentar significativamente a complexidade técnica do sensor.

Refere-se ainda a potencialidade dos sensores intensiométricos poderem ser utilizados enquanto sensores distribuídos, nomeadamente quando associados à introdução de perdas ao longo da fibra óptica (Leung et al., 2002). A desmodulação do seu sinal por intermédio de impulsos de luz e a detecção da luz reflectida de forma integrada no tempo, permite o

traçado de perfis de reflexão ao longo de toda a extensão de uma fibra. Preconiza-se a utilização das técnicas denominadas por OTDR (*Optical Time Domain Reflectometry*) para desmodulação do respectivo sinal (Barnoski e Jensen, 1976).

Baseado neste último princípio, Jang et al. (2000), Leung et al. (2002), Wan e Leung (2007), entre outros, apresentam métodos para a detecção de danos associados a sensores baseados na microcurvatura da fibra óptica decorrentes da fendilhação da estrutura. Em vários ensaios laboratoriais e algumas aplicações reais, com recurso ao OTDR não só o dano foi detectado como comprovam que a sua localização pode ser correctamente determinada.

### 2.3.3 Sensores de Bragg

As redes de Bragg, designadas na literatura internacional por *Fiber Bragg Gratings* (FBG), consistem numa modulação periódica permanente do índice de refração do núcleo da fibra óptica que confere, a determinada porção de fibra, propriedades reflectivas espectralmente controladas. São várias as potencialidades das redes de Bragg no domínio das fibras ópticas. Nas redes de comunicação têm sido sobretudo utilizadas como filtros e reflectores. As suas potencialidades como sensores são explanadas neste ponto, sendo de assinalar a sua elevada sensibilidade intrínseca tanto a variações de deformação como de temperatura.

#### 2.3.3.1 Princípio de funcionamento

Uma rede de Bragg caracteriza-se por um determinado esquema de variação do índice de refração do núcleo da fibra conforme apresentado na Figura 2.9 (Kashyap, 1999; Othonos, 1997). Ao encontrar a rede de Bragg, a luz que se propaga através do núcleo da fibra interage com as várias interfaces entre as porções de fibra que apresentam diferente índice de refração, dando origem à ocorrência reflexões parciais localizadas. Verifica-se que a generalidade do espectro de comprimentos de onda acoplados à fibra é reflectida fora de fase e tende a ser anulada, fazendo com que esta luz passe pela rede sem sofrer qualquer perturbação. No entanto, uma pequena porção do espectro de luz interagirá em fase, dando origem a um fenómeno de acoplamento dos modos de radiação que se traduz na reflexão de uma porção bastante estreita do espectro de luz centrada num comprimento de onda bem definido como esquematicamente se representa na Figura 2.9.

A rede de Bragg pode, desta forma, ser analisada como uma sucessão de espelhos de reflexão parcial que reflectem apenas os feixes luminosos com um comprimento de onda específico. Este comprimento de onda central, denominado por comprimento de onda de Bragg, é intrínseco à própria rede e é representado pela lei de Bragg através de

$$\lambda_b = 2n_{eff}\Lambda \quad (2.4)$$

onde  $\lambda_b$  é o comprimento de onda de Bragg,  $\Lambda$  é o período espacial da modulação e  $n_{eff}$  é o índice de refração efectivo do modo guiado no núcleo da fibra.

### 2.3.3.2 Técnica de fabrico

A primeira rede de Bragg foi reportada por Hill et al. (1978) que acidentalmente descobriu a fotosensibilidade das fibras ópticas enquanto procedia a experiências com incidência de radiação laser de iões de árgon numa fibra de sílica dopada com germânio. No entanto, a técnica descoberta era de difícil reprodutibilidade e permitia apenas a gravação de redes de Bragg com características espectrais semelhantes, condicionadas pelo comprimento de onda da fonte de luz utilizada na sua gravação ( $\text{Ar}^+$ ).

Depois disso, diferentes técnicas foram descobertas e aperfeiçoadas para modular as propriedades do núcleo da fibra baseadas na sua fotosensibilidade. Contudo, um dos desenvolvimentos mais importantes surgiu por intermédio de Meltz et al. (1989) que revelou a escrita holográfica das redes de Bragg. Esta nova técnica veio permitir a gravação permanente de redes de Bragg através da exposição transversal da fibra à interferência de dois feixes de radiação ultravioleta de forte intensidade. Conseguia-se assim aumentar significativamente a eficiência da gravação, bem como, tornava-se possível a gravação de comprimentos de onda mais elevados e flexíveis através do ajuste do padrão interferométrico.

Um novo avanço veio ainda a ser introduzido, pouco tempo mais tarde, com a aplicação das máscaras de fase. Neste caso, faz-se incidir uma emissão ultravioleta, com comprimento de onda e intensidade apropriados, no núcleo da fibra através de uma máscara

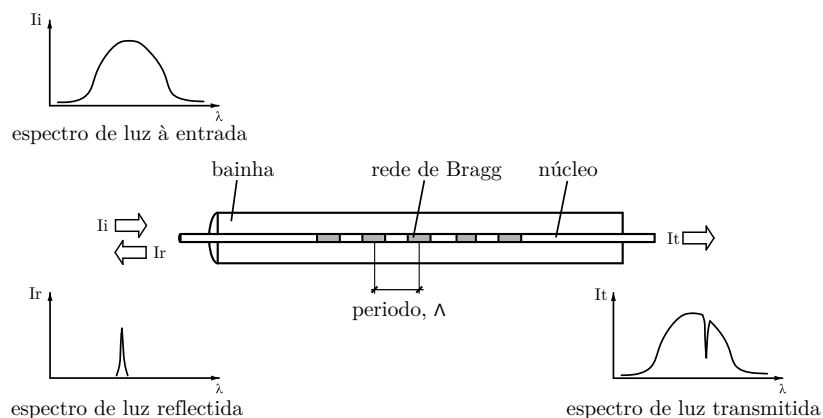


FIGURA 2.9: Representação esquemática do princípio de funcionamento de uma rede de Bragg: a) Rede de Bragg (FBG); b) espectro de luz à entrada da fibra; c) espectro de luz transmitida à saída da fibra; d) espectro da luz reflectida.

de fase, conforme ilustrado na Figura 2.10 (Hill et al., 1993). A gravação de redes de Bragg, com recurso a esta técnica, tornou-se mais expedita e controlada. O rigor alcançado permite que sejam produzidas redes de Bragg para aplicações sensoriais com comprimentos de poucos milímetros de desenvolvimento, conduzindo a reflexões de pico muito próximas dos 100%, com larguras de banda reflectida inferior a 0.5 nm.

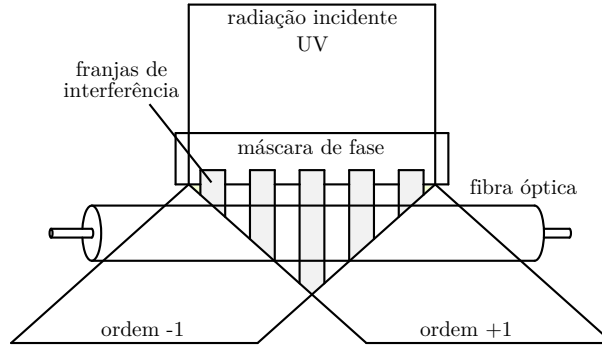


FIGURA 2.10: Processo de gravação da rede de Bragg por foto-indução por exposição da fibra a uma radiação ultravioleta através de uma máscara de fase

### 2.3.3.3 Sensibilidade à deformação e à temperatura

A utilização de redes de Bragg como sensores baseia-se na informação dada pela variação do comprimento de Bragg,  $\Delta\lambda_b$ , que pode ser detectada tanto no espectro de luz transmitida, como no de luz reflectida (Hill e Meltz, 1997; Kersey, 1997). A actuação de determinadas grandezas externas, de onde se destaca a variação da extensão mecânica,  $\Delta\varepsilon$  e as variações de temperatura,  $\Delta T$ , são agentes perturbadores tanto do índice de refração efectivo da fibra como do espaçamento da rede. A resposta normalizada do sensor de Bragg pode então ser encarada como a derivada da Equação 2.4 em ordem às respectivas grandezas externas

$$\frac{\Delta\lambda_b}{\lambda_b} = \left( \frac{1}{\Lambda} \frac{\partial\Lambda}{\partial\varepsilon} + \frac{1}{n_{eff}} \frac{\partial n_{eff}}{\partial\varepsilon} \right) \Delta\varepsilon + \left( \frac{1}{\Lambda} \frac{\partial\Lambda}{\partial T} + \frac{1}{n_{eff}} \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} \right) \Delta T \quad (2.5)$$

No caso em que a deformação é aplicada exclusivamente na direcção do eixo longitudinal da fibra óptica e tendo em conta as suas características mecânicas e ópticas, a expressão anterior pode ser expressa de forma simplificada como

$$\frac{\Delta\lambda_b}{\lambda_b} = P_e \Delta\varepsilon + [P_e(\alpha_s - \alpha_f) + \zeta] \Delta T \quad (2.6)$$

onde  $P_e$  e  $\zeta$  são os coeficientes foto-elástico e termo-óptico, respectivamente, e  $\alpha_s$  e  $\alpha_f$  são os coeficientes de dilatação térmica do material da estrutura de suporte e da própria fibra, respectivamente.

Devido aos efeitos foto-elástico e termo-óptico e invocando a lei de Bragg, ocorrem variações no comprimento de onda reflectido pelo sensor resultantes da aplicação de variações de temperatura e/ou extensões. Na Figura 2.11, ilustram-se duas respostas típicas de um sensor de Bragg ( $\lambda_b = 1550$  nm) perante variações de temperatura ( $\Delta T = \pm 10$  °C) e variações de extensão ( $\Delta \varepsilon = \pm 1000$  nm).

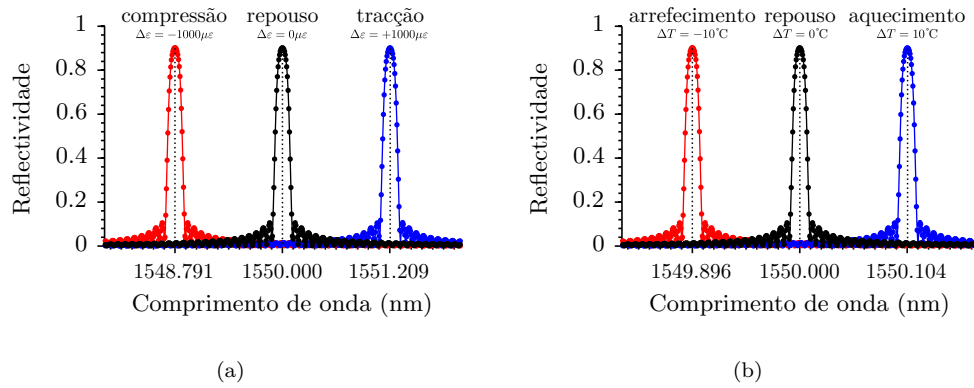


FIGURA 2.11: Variação do comprimento de onda em reflexão em sensores de Bragg em função da aplicação de: a) uma variação de extensão uniforme; b) uma variação de temperatura.

No caso particular das fibras ópticas de sílica, geralmente utilizadas no fabrico da grande maioria dos sensores de Bragg, os parâmetros indicados na Equação 2.6 assumem os valores característicos presentes na Tabela 2.3 (Morey et al., 1994; Alavie et al., 1995; Othonos, 1997; Hill e Meltz, 1997; Kersey et al., 1997; Kashyap, 1999; Yu e Yin, 2002).

TABELA 2.3: Valores de referência relativamente à sensibilidade dos sensores de Bragg.

Símbolo	Coefficiente	Valores característicos	Valor médio
$P_e$ [ $\times 10^{-6}$ m/m]	Coefficiente foto-elástico	0.74 - 0.82	0.78
$\zeta$ [ $\times 10^{-6}$ °C $^{-1}$ ]	Coefficiente termo-óptico	6.1 - 8.9	6.68
$\alpha_f$ [ $\times 10^{-6}$ °C $^{-1}$ ]	Coefficiente de dilatação térmica da fibra	0.50 - 0.55	0.55

Em termos médios, para as características das fibras ópticas utilizadas ao longo deste trabalho, a resposta normalizada de um determinado sensor de Bragg quando submetido isoladamente a uma variação de deformação sob temperatura constante é dada por

$$\frac{\Delta \lambda_b}{\lambda_b} = 0.78 \times 10^{-6} \tag{2.7}$$

e a resposta homóloga para uma variação de temperatura sob deformação constante tem o valor médio de

$$\frac{\Delta \lambda_b}{\lambda_b} = 6.68 \times 10^{-6} \tag{2.8}$$

Apesar de ser normalmente negligenciada, faz-se ainda uma referência final à sensibilidade à pressão lateral evidenciada pelas redes de Bragg. Invocada por alguns autores, verifica-se também que é bastante diminuta devido à elevada rigidez transversal da fibra óptica (Hill e Meltz, 1997). A respectiva sensibilidade normalizada média ronda os  $2.0 \times 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$  (Xu et al., 1993). A aplicação directa de sensores de Bragg para medição de pressões está, por isso, praticamente inviabilizada para os casos correntes da engenharia civil.

#### 2.3.3.4 Compensação da temperatura

Como se tem visto, é intrínseca às próprias redes de Bragg a sua sensibilidade natural tanto à deformação como à temperatura. Neste contexto, sempre que é do interesse avaliar isoladamente uma destas grandezas, deve ser adoptada uma metodologia que permita separar correctamente estes dois efeitos (Kashyap, 1999; Measures, 2001; Mrad, 2002; Sivanesan et al., 2002).

No que concerne à medição da extensão, a compensação dos efeitos da temperatura assume uma importância fundamental. Para além da sensibilidade intrínseca da fibra à temperatura, acresce, neste caso, a necessidade de se considerar a compatibilização das deformações térmicas da estrutura com as da própria fibra associadas a dois materiais com coeficientes de dilatação térmica bastante distintos. Considerando estes dois efeitos, faz-se notar que o efeito da variação da temperatura pode conduzir a um erro na ordem dos 10 a 25  $\mu\epsilon/^\circ\text{C}$ , dependendo do material onde se encontra aplicado, se não for convenientemente compensado.

É possível demonstrar que os efeitos cruzados da temperatura podem ser uma fonte de erro assinalável se não forem correctamente processados. Nas aplicações em campo, este aspecto assume então particular pertinência visto que não é possível isolar a estrutura de significativas variações de temperatura.

Várias metodologias têm sido propostas para compensação dos efeitos da temperatura com recurso a sensores de Bragg. Um vasto levantamento de técnicas avançadas visando a compensação dos efeitos da temperatura sobre os sensores de Bragg encontra-se presente em várias revisões (Measures, 2001; Mrad, 2002; Zhao e Liao, 2004; Majumder et al., 2008). A aplicabilidade prática destas técnicas está ainda muito condicionada pelo respectivo custo de produção e pela aceitação do mercado a essas mesmas técnicas. Destacam-se aqui algumas das formas mais comuns de se proceder à compensação dos efeitos da temperatura sobre os sensores de Bragg:

**A medição directa da variação da temperatura por intermédio de um sensor adicional** representa o meio mais comum para compensação dos efeitos da temperatura (Xu et al., 1994; Haran et al., 1998). Recorrendo a sensores de Bragg, a

técnica de medir variações de temperatura consiste em dispor a respectiva rede de Bragg de modo a se poder deformar de um modo totalmente livre quando sujeita a variações de temperatura. A configuração esquemática de um sensor de temperatura baseado numa rede de Bragg está presente na Figura 2.12. Este sensor deve ser colocado o mais próximo possível do ponto de medição de extensão de forma a experimentarem variações de temperatura idênticas. O conhecimento da temperatura e das propriedades da material estrutural permite compensar a temperatura por aplicação directa de

$$\Delta\varepsilon = \frac{\Delta\lambda_b}{P_e\lambda_b} - \left( (\alpha_s - \alpha_f) + \frac{\zeta}{P_e} \right) \Delta T \quad (2.9)$$

onde,  $\Delta\varepsilon$  e  $\Delta T$  são as variações da extensão e da temperatura, respectivamente;  $P_e$  e  $\zeta$  são os coeficientes foto-elástico e termo-óptico, respectivamente;  $\alpha_f$  é o coeficiente de dilatação térmica da fibra óptica;  $\alpha_s$  é o coeficiente de dilatação térmica do material da estrutura; e  $\Delta\lambda_b$  representa a respectiva variação do comprimento de onda relativamente ao seu valor de referência,  $\lambda_b$ .

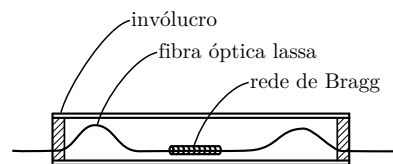


FIGURA 2.12: Configuração esquemática de um sensor de temperatura baseado num sensor de Bragg.

Uma variante à primeira técnica apontada, consiste na instalação de **um sensor de Bragg num provete, realizado no mesmo material da estrutura, que se garante igualmente imune a deformações mecânicas**. Mais uma vez devem ser criadas condições para que o referido provete se encontre à mesma temperatura dos pontos de medição de extensão. A medição da variação do comprimento de onda do sensor instalado no provete corresponderá ao conhecimento directo da segunda parcela presente na Equação 2.9 resultante não só da sensibilidade intrínseca do sensor de Bragg à temperatura, mas também da compatibilização da extensão térmica da estrutura e do sensor.

Aponta-se ainda a possibilidade de compensar os efeitos da temperatura com recurso a **dois sensores de Bragg dispostos em fibras opostas de elementos criteriosamente submetidos a flexão circular pura** (Tian et al., 2005). Este é um procedimento particularmente aplicável na concepção de transdutores.

Uma outra técnica promissora baseia-se na utilização de **dois sensores consecutivos com sensibilidades idênticas à deformação mas sensibilidades diferentes à temperatura**. Tal propriedade pode ser alcançada com a introdução de materiais dopantes distintos no núcleo da fibra (Cavaleiro et al., 1999; Bai-Ou et al.,

2000), diferentes comprimentos de onda (James et al., 1996), ou com a combinação de fibras com diferentes diâmetros (Song et al., 1997).

### 2.3.4 Sensores interferométricos

Os sensores em fibra óptica denominados por sensores interferométricos visam a medição de uma dada grandeza que actua externamente sobre a fibra óptica por intermédio da determinação de variações da fase de diferentes feixes de luz que percorrem o elemento sensor. São geralmente utilizadas fibras monomodo para uma maior sensibilidade. A título indicativo, refira-se que esta é actualmente a técnica mais precisa para medir distâncias, podendo alcançar uma resolução de aproximadamente  $10^{-6}$  do respectivo comprimento de onda do feixe de luz (Jackson et al., 1980).

#### 2.3.4.1 Princípio de funcionamento

O princípio de funcionamento dos sensores interferométricos assenta na capacidade de se proceder à divisão dos feixes de luz emitidos por uma determinada fonte, endereçando-os para percursos distintos de forma que sejam afectados de forma diferente pela grandeza a medir. Deste modo, quando os dois feixes luminosos são posteriormente combinados apresentam potencialmente uma diferença de fase relacionada com a variação das características de propagação da luz nos dois percursos paralelos.

Para o efeito, têm sido desenvolvidos esquemas que permitam a combinação de diferentes sinais ópticos e processos interferométricos que possibilitem a medição de diferenças de fase entre feixes de luz. Deduz-se que a relação entre a variação da fase e a variação do percurso da luz, é dada por:

$$\phi(\vec{r}, t) = \frac{2\pi}{\lambda} L(\vec{r}, t) \quad (2.10)$$

onde,  $\phi(\vec{r}, t)$  é a variação da fase;  $\lambda$  é o comprimento de onda da luz e  $L(\vec{r}, t)$  representa a variação do comprimento do percurso da luz (Gholamzadeh e Nabovati, 2008).

Como o comprimento de onda de luz é muito reduzido, próximo do micrón, verifica-se portanto que uma pequena alteração no comprimento do percurso de luz é passível de criar uma grande variação na respectiva fase.

Tal princípio de medição, baseando-se na comparação da fase de pelo menos dois feixes de luz que seguem percursos diferentes, implica a adopção de configurações de interferómetros com características adequadas. Os mais comuns na medição de grandezas físicas com interesse do ponto de vista estrutural são os interferómetros de Michelson, Mach-Zender e Fabry-Perot. Mostra-se, na Figura 2.13, a configuração esquemática de cada um destes interferómetros.

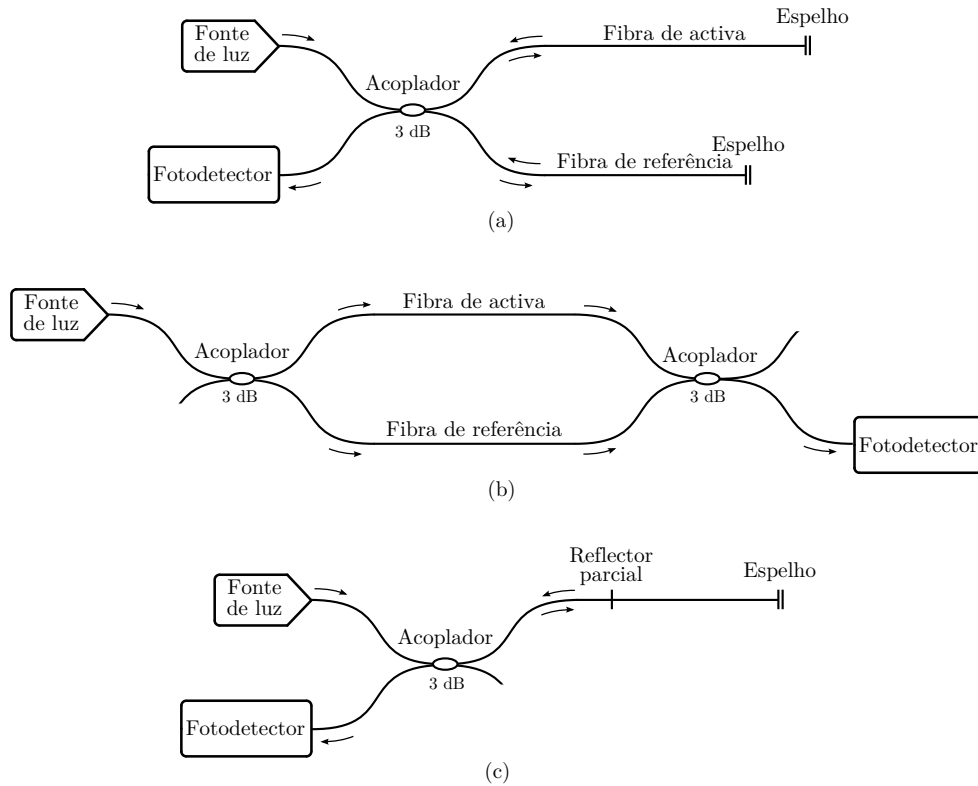


FIGURA 2.13: Diferentes configurações de sensores interferométricos em fibra óptica: a) interferómetro de Michelson; b) interferómetro de Mach-Zehnder; c) interferómetro de Fabry-Perot.

#### 2.3.4.2 Interferómetro de Michelson

O primeiro destes interferómetros, representado na Figura 2.13.a), corresponde a uma configuração bastante comum, utilizada eficazmente no desenvolvimento de sensores de deformação, e é designado por interferómetro de Michelson. Neste esquema, procede-se à divisão da radiação proveniente de uma fonte de luz comum em dois ramos distintos por intermédio de um acoplador direccional. Parte da luz percorre uma fibra que se manterá isolada da grandeza externa que se pretende medir, denominada por fibra de referência. A outra parte da luz percorre a outra fibra que estará exposta às perturbações induzidas pela grandeza a medir, por exemplo uma deformação, sendo esta denominada por fibra de sinal. Na extremidade de cada uma destas fibras, por intermédio de um espelho, a luz é reflectida, percorrendo agora o percurso inverso e novamente combinada no acoplador. Parte do sinal óptico é, desta forma, enviado para o fotodetector que receberá a combinação dos dois feixes de luz potencialmente com diferenças de fase uma vez que percorreram percursos diferentes. A utilização de técnicas de medição interferométrica permite a determinação rigorosa de alterações de fase e consequentemente de alterações presentes na fibra de sinal quando comparada com a fibra de referência.

### 2.3.4.3 Interferómetro de Mach-Zehnder

Uma configuração alternativa de sensores em fibra óptica, também interferométricos, está representada na Figura 2.13.b), correspondendo ao interferómetro de Mach-Zehnder. Este esquema, ligeiramente mais complexo que o anterior, recorre igualmente à combinação de duas fibras, uma de referência e outra de sinal, mas agora utiliza a combinação de dois acopladores direccionais para gerar dois feixes de luz em oposição de fase. A determinação da diferença de fase destes dois feixes pode ser determinada por intermédio de dois fotodetectores localizados nas extremidades dos dois percursos, conforme se mostra na figura. Importa referir que as técnicas de processamento de sinal aplicadas a este interferómetro, associadas a dois feixes de luz em oposição de fase, são mais eficientes do que as preconizadas na configuração anterior (Jackson e Jones, 1986; Udd e Spillman, 2011). Faz-se também notar que as reflexões de luz para a fonte óptica são também muito menores, contribuindo para a sua estabilidade (Goldberg et al., 1981).

### 2.3.4.4 Interferómetro de Fabry-Perot

O interferómetro de Fabry-Perot é porventura a configuração interferométrica que mais sucesso tem tido no desenvolvimento de sensores para a monitorização estrutural. Este esquema interferométrico recorre a uma única fibra óptica e utiliza uma cavidade óptica para estabelecer múltiplos percursos de luz antes de proceder à sua recombinação e encaminhamento para o fotodetector, tal como se mostra na Figura 2.13.c). Como representado na Figura 2.14, esta cavidade pode ser intrínseca à própria fibra ou extrínseca estando associada a um elemento sensor externo à fibra.

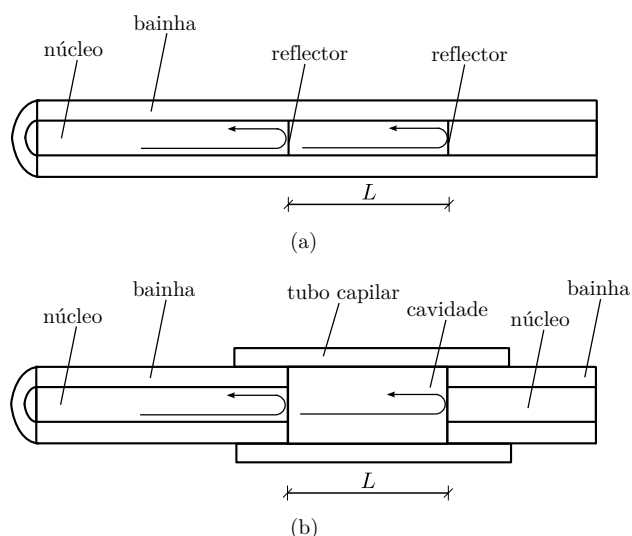


FIGURA 2.14: Interferómetro de Fabry-Perot em fibra óptica: a) intrínseco; b) extrínseco.

Em qualquer destes casos, o elemento sensor está perfeitamente localizado e consiste exclusivamente na cavidade óptica que, através das respectivas interfaces, materializa

dois espelhos de reflexão parcial. A interacção dos dois feixes de luz, um proveniente da reflexão na primeira interface e o segundo reflectido na segunda interface da cavidade, conduz a um comprimento ressonante resultante da diferença de fase. Esta diferença de fase varia com a diferença da distância percorrida por cada um dos feixes, ou seja pela alteração do comprimento de cavidade óptica que se procura relacionar com o efeito de determinada grandeza externa a medir.

#### 2.3.4.5 Sensibilidade

A medição da diferença de fase da luz é realizada, no caso dos sensores interferométricos, por via indirecta através da avaliação da intensidade do sinal combinado mediante o esquema interferométrico adoptado. Note-se que a grandeza medida no fotodetector é a intensidade da luz, que como se apresentará está relacionada com a respectiva diferença de fase.

No caso dos dois primeiros interferómetros apresentados, o de Michelson e o de Mach-Zehnder, está-se perante um caso típico de interferómetros de duas ondas. Recorde-se que a luz proveniente da fonte óptica é dividida em duas ondas que percorrem fibras ópticas distintas antes de novamente combinada. O sinal do sensor pode ser traduzido, em termos de intensidade de luz, por intermédio de (Ribeiro, 1996; Hecht, 2002):

$$I_{out} = (I_1 + I_2) \cdot (1 + V \cos(\phi)) \quad (2.11)$$

onde,  $I_{out}$  representa a intensidade de luz que chega ao fotodetector;  $I_1$  e  $I_2$  são as intensidades da luz proveniente das fibras de sinal e de referência, respectivamente;  $\phi$  é a diferença de fase entre as duas ondas em questão e  $V$  é a visibilidade das franjas de interferência definida por:

$$V = \frac{I_{out}^{max} - I_{out}^{min}}{I_{out}^{max} + I_{out}^{min}} \quad (2.12)$$

sendo,  $I_{out}^{max}$  e  $I_{out}^{min}$  as intensidade de luz máximas e mínimas, respectivamente.

Na Figura 2.15 traça-se a função de transferência anterior em função da diferença de fase das duas ondas. Por simplificação admitiu-se ausência de perdas ao longo das fibras do interferómetro e uma visibilidade,  $V$  unitária. Está-se perante um função sinusoidal compreendida entre 0 e 1. O emprego de técnicas de processamento de sinal adequadas permitem resolver a ambiguidade inerente à periodicidade da função representada (Grattan e Meggitt, 1998).

Sendo diferente o percurso da luz nos dois tipos de interferómetros de duas ondas analisados é também diferente a sensibilidade que revelam. Demonstra-se que, para o caso

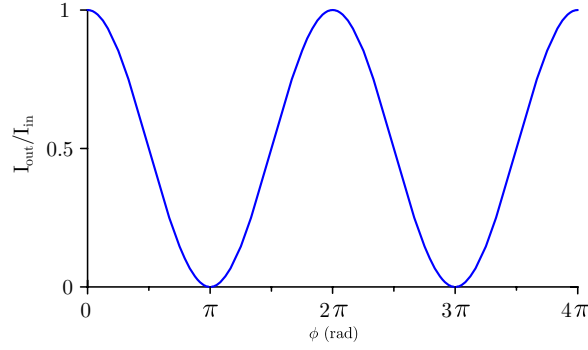


FIGURA 2.15: Função de transferência de interferômetros de duas ondas (interferômetros de Michelson e Mach-Zehnder).

do interferómetro de Michelson, a diferença de fase é igual a,

$$\phi_{Michelson} = \frac{4n\pi L}{\lambda} \quad (2.13)$$

e, de forma semelhante, para o interferómetro de Mach-Zehnder, eliminando o percurso em reflexão, passa a ser traduzida por,

$$\phi_{Mach-Zehnder} = \frac{2n\pi L}{\lambda} \quad (2.14)$$

onde,  $n$  é o índice de refração efectivo da fibra óptica,  $L$  é a diferença de percursos geométricos entre as duas ondas e  $\lambda$  é o comprimento de onda da luz emitida pela fonte.

O interferómetro de Fabry-Perot é por sua vez um interferómetro de ondas múltiplas. Neste caso, a onda de luz proveniente da fonte é dividida em múltiplos percursos antes de se processar a sua recombinação. A interferência que resulta da interferência das ondas associadas às diferentes reflexões resulta num comportamento ressonante. A respectiva função de transferência é dada por (Ribeiro, 1996; Hecht, 2002):

$$I_{out} = \frac{I_{in}}{1 + \left(\frac{4R}{(1-R)^2}\right) \sin^2(\phi/2)} \quad (2.15)$$

onde, onde,  $I_{out}$  representa a intensidade da luz que chega ao fotodetector;  $I_{in}$  a intensidade da luz que incide no sensor;  $R$  é a reflectividade associada às duas interfaces de reflexão; e  $\phi$  é a fase da luz.

De forma a ilustrar o funcionamento do sensor, traça-se na Figura 2.16 a respectiva função de transferência para um interferómetro de Fabry-Perot assumindo diferentes valores de  $R$ . Verifica-se que para valores de  $\phi = 2m\pi$  ocorre o valor máximo da transmissão.

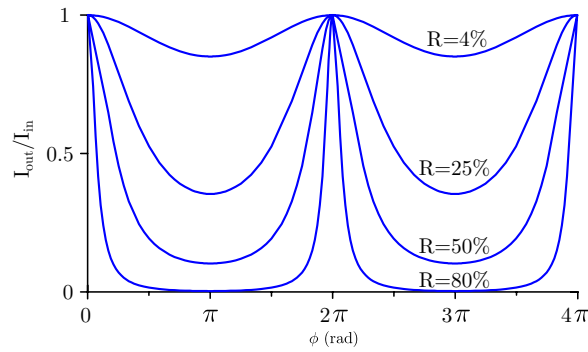


FIGURA 2.16: Função de transferência de interferômetros de ondas múltiplas (interferômetro de Fabry-Perot).

Neste caso, a respectiva fase óptica,  $\phi$ , pode ser obtida a partir da seguinte expressão:

$$\phi = \frac{4\pi nL}{\lambda} \quad (2.16)$$

sendo,  $L$  é o comprimento da cavidade;  $n$  é o índice de refração efectivo da cavidade; e  $\lambda$  o comprimento de onda da luz.

### 2.3.5 Sensores distribuídos baseados no espalhamento de Raman e Brillouin

Os sensores distribuídos baseiam-se num fenómeno natural inerente à transmissão de luz nas fibras ópticas, de acordo com o qual se verifica que uma pequena porção de luz é continuamente espalhada ao longo do seu percurso no interior da fibra. Este fenómeno, associado a perdas de luz, é provocado por perturbações locais no meio transmissor.

Enquanto o espalhamento na maioria das direcções se perde para o meio exterior, distingue-se o espalhamento na direcção longitudinal da fibra que acaba por ser propagado podendo ser detectado nas duas extremidades finais. Sustentando a génese dos sensores distribuídos, constata-se que algumas destas perturbações são sensíveis a variações de temperatura e deformação. Usando técnicas de desmodulação adequadas, consegue-se assim avaliar, através do espectro de luz que chega à extremidade da fibra, a deformação e a temperatura distribuída que lhe deram origem.

No cerne da fibra óptica, são três os fenómenos identificados que originam o espalhamento da luz. A estes foram dados os nomes dos investigadores que os descobriram, designadamente espalhamento de Raman, de Brillouin e de Rayleigh. A sua distribuição no espectro de luz está representada na Figura 2.17.

O efeito de Rayleigh está associado à existência de heterogeneidades microscópicas no núcleo da fibra óptica. Tratando-se de uma reflexão simples da luz propagada junto

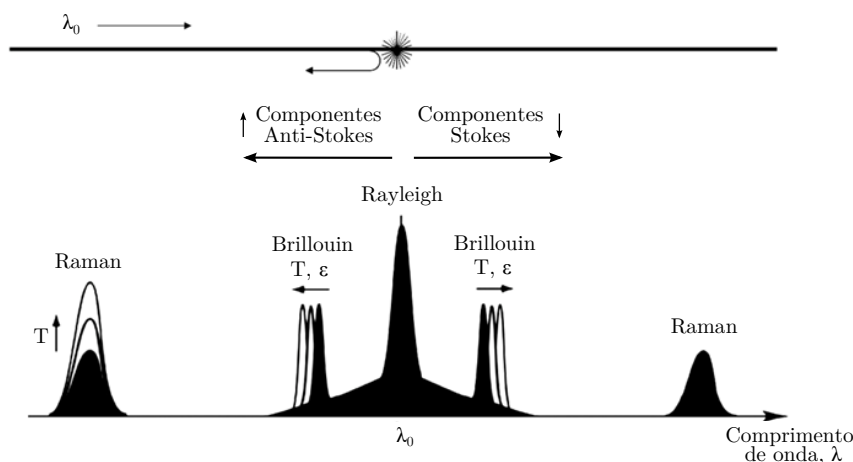


FIGURA 2.17: Componentes de Rayleigh, Brillouin e Raman no espectro de luz espalhado (Inaudi e Glisic, 2007).

das imperfeições, conclui-se que a componente de Rayleigh apresenta sempre o mesmo comprimento de onda da luz original. Logo, pela sua natureza, esta componente não apresenta qualquer tipo de sensibilidade às grandezas referidas.

Os sensores distribuídos centram-se então especificamente no espalhamento de Brillouin e Raman de forma independente. A sua origem está relacionada com a interação da luz com as ondas acústicas de origem térmica instaladas na fibra e nas vibrações moleculares, respectivamente. Refere-se a sensibilidade da componente de Raman a variações de temperatura e a sensibilidade da componente de Brillouin simultaneamente à temperatura e à deformação.

Se associado ao fenómeno de espalhamento atrás exposto, recorde-se contínuo ao longo da fibra, forem utilizadas técnicas de desmodulação por intermédio de impulsos de luz, torna-se possível discriminar os diferentes pontos ao longo da fibra utilizando o tempo utilizado no trajeto da luz. Recorre-se a uma técnica de radar para processamento de sinal. Combinando a técnica de radar com a análise espectral da luz reflectida, consegue-se então determinar o perfil completo da grandeza de interesse ao longo da fibra.

### 2.3.5.1 Sensores de Raman

Os sensores baseados no espalhamento Raman tiram partido de um efeito não-linear resultante da interação directa entre a luz que se propaga na fibra óptica com a própria matéria da fibra, ou seja com as suas moléculas. Devido à interação gerada entre os dois campos, o resultado é o aparecimento espontâneo de duas novas componentes espectrais com frequências diferentes da luz de excitação.

Na Figura 2.18 mostram-se diferentes níveis de energia de vibração da estrutura molecular da fibra traduzindo os seus níveis energéticos preferenciais. Representa-se igualmente a transição para um novo nível energético resultante de um fóton incidente.

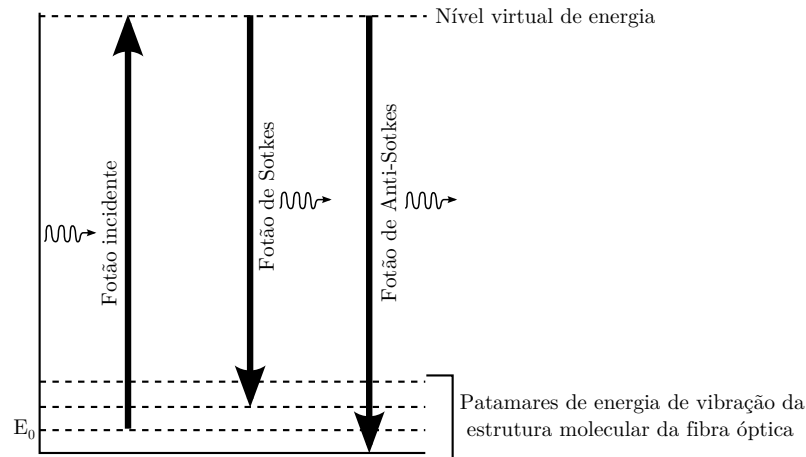


FIGURA 2.18: Relação entre as componentes de Stokes e Anti-Stokes e a energia de vibração das moléculas da fibra óptica.

O retorno natural a um estado de equilíbrio correspondente a um nível de energia mais baixo leva à emissão de um novo fóton. Nesta fase, é possível distinguir as componentes de Stokes e Anti-Stokes correspondentes ao retorno a dois níveis energéticos distintos. A componente de Stokes surge associada à parcela inferior da energia dos fótons e a componente Anti-Stokes, em oposição, à parcela de maior energia dos fótons emitidos (Measures, 2001). O efeito da transição entre diferentes níveis energéticos de vibração molecular repercute-se no espectro de luz emitido traduzindo-se nas duas componentes referidas presentes também na Figura 2.17 com diferentes comprimentos de onda.

Para a viabilidade enquanto sensor deste fenómeno natural da propagação da luz na fibra, demonstra-se que a intensidade relativa das duas componentes de Raman é função da temperatura presente na fibra óptica (Dakin et al., 1985; Hartog et al., 1985). A razão entre as intensidades dos picos de Stokes,  $\lambda_s$  e Anti-Stokes,  $\lambda_a$  é dada por:

$$r_R = \left[ \frac{\lambda_s}{\lambda_a} \right]^4 e^{-(hc\Delta\nu/kT)} \quad (2.17)$$

onde,  $h$  é a constante de Planck;  $c$  é a velocidade da luz;  $k$  é a constante de Boltzmann;  $\Delta\nu$  é a translação da frequência da Raman relativamente à frequência de original da luz na fonte; e  $T$  é a temperatura em graus Kelvin. Constata-se também que esta razão apresenta uma variação com a temperatura de cerca de  $0.8\% \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$  no intervalo entre 0 e 100 °C (Dakin, 1995).

Se se associar a este fenómeno intrínseco da fibra óptica, técnicas de desmodulação baseadas em impulsos de luz e na avaliação da intensidade da luz reflectida em função do tempo, torna-se possível a obtenção de perfis de temperatura ao longo da fibra. Este

processo pode ser realizado com a utilização de uma técnica avançada de OTDR que permite a avaliação simultânea da intensidade das componentes de Stokes e Anti-Stokes de Raman associando o instante de tempo de chegada. Conhecendo-se então a velocidade de propagação da luz e o instante de chegada do respectivo sinal, consegue-se determinar a posição da proveniência desse mesmo sinal.

Utilizando as técnicas expostas associadas a sensores de Raman e face às características dos mais modernos equipamentos de desmodulação, é possível obter perfis de temperatura contínuos ao longo de comprimentos que podem chegar a 8 km. Ao contrário dos sensores de Brillouin, neste caso, não se encontra nenhuma relação com a deformação da fibra. Refira-se ainda que se conseguem alcançar resoluções espaciais da ordem de 1 m com resoluções no domínio da temperatura de 0.1 °C (Inaudi e Glisic, 2007).

### 2.3.5.2 Sensores de Brillouin

O espalhamento de Brillouin é também um modo de espalhamento não-linear mas resultante da interação da luz com as ondas acústicas termicamente geradas, denominadas por *fónons*, presentes na fibra óptica. A presença de ondas acústicas origina, na fibra óptica, um efeito foto-elástico que resulta, na prática, numa ligeira modulação do respectivo índice de refração da fibra. Esta modulação funciona com uma rede dinâmica, conduzindo a que a luz que se propaga seja parcialmente reflectida por essa mesma rede (Measures, 2001).

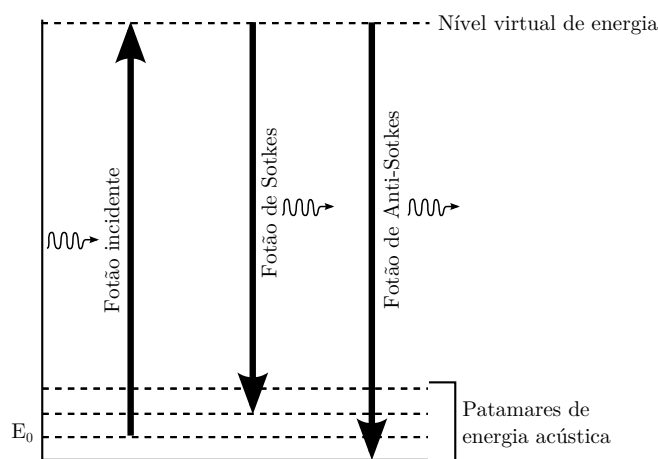


FIGURA 2.19: Relação entre as componentes de Stokes e Anti-Stokes e a energia de acústica presente na fibra óptica.

Devido à componente dinâmica da rede, traduzida pela velocidade de propagação das ondas acústicas, a luz reflectida apresenta um ligeiro desvio em termos de frequência, relativamente à componente que lhe deu origem. Assimila-se este fenómeno ao efeito de Doppler presente também nas ondas sonoras (Glisic e Inaudi, 2007).

Analisando o espectro de luz reflectida da Figura 2.17, verifica-se a existência de dois picos associados à componente de Brillouin, posicionados simetricamente relativamente ao comprimento de onda original ( $\lambda_0$ ). Mais uma vez se associam duas componentes, de Stokes e Anti-Stokes, provenientes de dois níveis energéticos representados na Figura 2.19. A sua posição, relativamente a  $\lambda_0$ , é proporcional à velocidade das ondas acústicas termicamente geradas, traduzindo-se numa translação da frequência de Brillouin,  $v_B$ , dada por:

$$v_B = \frac{2nV_a}{\lambda_0} \quad (2.18)$$

onde,  $n$  é o índice de refração da fibra,  $V_a$  é a velocidade das ondas acústicas e  $\lambda_0$  é o comprimento de onda original da luz.

A sensibilidade dos sensores de Brillouin a variações de temperatura e deformação provém do facto da velocidade das ondas acústicas ser dependente da densidade do meio de propagação. Como se sabe a densidade da sílica da fibra óptica depende tanto da temperatura, como da deformação. Consequentemente, a variação da frequência de Brillouin pode ser relacionada com variações de temperatura e/ou a deformação da fibra. Esta dependência é linear e pode ser expressa, de forma independente, em termos de (Horiguchi et al., 1989; Kurashima et al., 1990):

$$\Delta v_B = C_S \Delta \varepsilon \quad (2.19)$$

$$\Delta v_B = C_T \Delta T \quad (2.20)$$

onde  $\Delta v_B$  representam as respectivas variações de frequência de Brillouin, e  $C_S$  e  $C_T$  correspondem aos coeficientes de sensibilidade a deformação mecânica e temperatura, respectivamente.

Para as fibras ópticas de sílica ( $S_iO_2$ ), os supracitados coeficientes rondam em média  $0.058 \text{ MHz} \cdot \mu\varepsilon^{-1}$  e  $1.3 \text{ MHz} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ , respectivamente (Horiguchi et al., 1989; Kurashima et al., 1990)

Apesar do fenómeno de Brillouin ter a sua origem de forma espontânea na fibra óptica, o recurso directo ao respectivo sinal revela-se inapropriado. O razão entre o sinal obtido e nível de ruído é deficiente assim como a resolução obtida face à baixa magnitude do sinal. Refira-se que a intensidade das componentes de Brillouin espontâneas são cerca de 20 dB mais fracas do que a componente central de Rayleigh (Measures, 2001).

No entanto, foram descobertas técnicas que permitem estimular o efeito de Brillouin. Estas técnicas baseiam-se num fenómeno que ocorre sempre que se introduz um segundo feixe de luz de sondagem com frequência próxima da frequência espontânea de Brillouin propagando-se em sentido contrário à luz principal. Verifica-se então que, através da

interacção entre os dois campos ópticos e os fónons acústicos, o respectivo sinal do sensor é fortemente intensificado e melhorado (Yin, 2002).

Recorrendo à estimulação do espalhamento de Brillouin, a desmodulação destes sensores é processada por intermédio de técnicas denominadas por BOTDA (*Brillouin Optical Time Domain Analysis*) (Horiguchi et al., 1995; Bao et al., 1995). Esta técnica recorre à combinação da luz contínua introduzida por um laser numa extremidade da fibra, com uma luz pulsada de um laser de bombeio que é acoplada na outra extremidade conforme se indica na Figura 2.20.

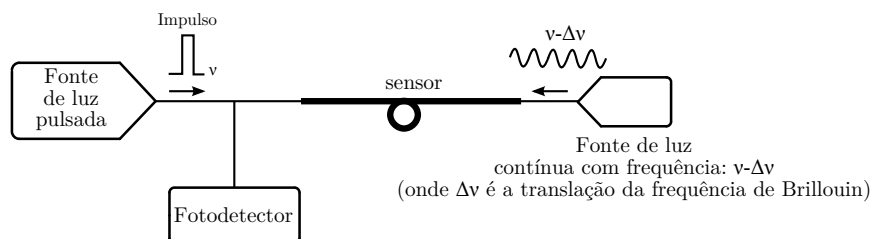


FIGURA 2.20: Representação esquemática do princípio do BOTDR baseado na estimulação do espalhamento de Brillouin (Yin, 2002).

A estimulação do efeito de Brillouin dá-se à medida que o impulso de luz de bombeio se propaga pela fibra e vai interagindo com o campo contínuo de luz injectado na extremidade oposta. Verifica-se que a amplificação da luz projectada depende directamente do desvio da frequência da Brillouin relativamente à luz de bombeio, dando origem a um ganho de sinal que segue o comportamento representado na Figura 2.21.

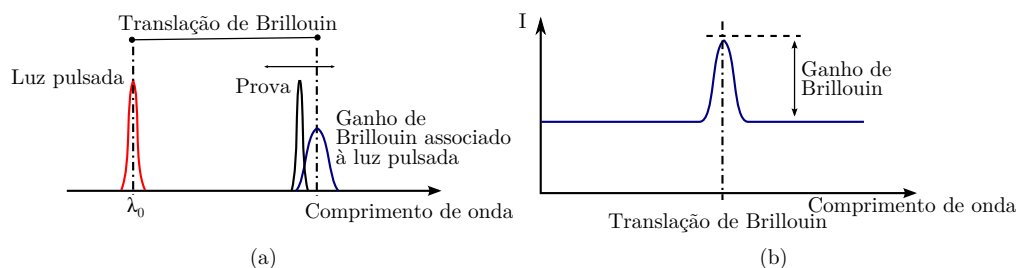


FIGURA 2.21: Ganho no espalhamento de Brillouin: a) representação esquemática da combinação do espectro das duas fontes de luz; b) ganho de Brillouin em função das características da luz utilizada na excitação do efeito de Brillouin.

Devido ao facto de uma das fontes de luz ser baseada em impulsos de luz, ocorre que a luz proveniente do espalhamento de Brillouin em cada ponto da fibra atinge o fotodetector em instantes de tempo distintos. Logo, acompanhando a intensidade da luz reflectida pelo sensor e sabendo-se à partida a respectiva velocidade de propagação da luz, consegue-se determinar a distância a partir da qual esse mesmo sinal teve origem. De acordo, a Figura 2.22 mostra o resultado da aplicação do BOTDR, podendo observar-se a relação entre a frequência de Brillouin e o respectivo ganho ao longo do comprimento do sensor. Neste caso concreto, é também visível a introdução de uma deformação externa acentuada numa zona específica do sensor.

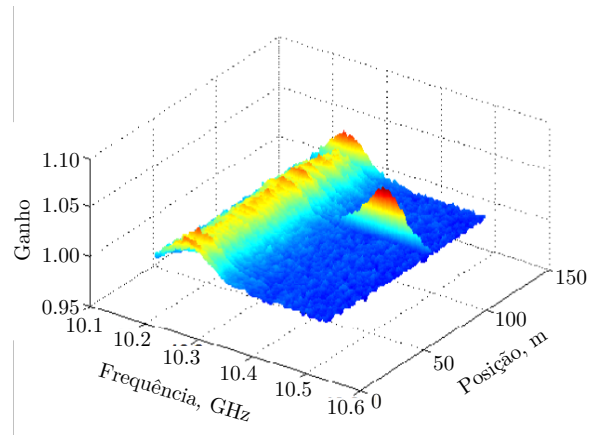


FIGURA 2.22: Resultado da aplicação do BOTDR num sensor distribuído de Brillouin.

Como referido anteriormente os sensores de Brillouin apresentam sensibilidade simultânea a variações de temperatura e a deformação. Esta traduz-se na translação da denominada frequência de Brillouin. Logo, sempre que se quer individualizar a quantificação de uma destas grandezas, devem procurar-se esquemas de transdução apropriados. No caso da medição da temperatura, é frequente utilizar-se um cabo óptico com uma fibra protegida no seu interior que se garante livre de se deformar perante variações de temperatura e imune a deformações mecânicas impostas. Por outro lado, na medição da deformação, exige-se a eficiente compatibilização da fibra óptica com a estrutura. Referem-se ainda alguns cabos desenvolvidos para este fim que integram paralelamente fibra livres de se deformar para medição da temperatura, e fibras solidárias com o exterior para medição de deformação (Inaudi e Glisic, 2007).

## 2.4 Multiplexagem

Uma das potencialidades mais relevantes associadas aos sensores em fibra óptica é a sua aptidão para serem integrados em esquemas de multiplexagem. Estes esquemas permitem a interrogação de múltiplos sensores partilhando a mesma fonte de luz, bloco de deteção e sistema de medição (Morey et al., 1992). Esta potencialidade torna-se determinante para viabilizar economicamente qualquer rede de sensores, uma vez que o equipamento de aquisição assume um custo significativo quando comparado com os demais componentes.

São várias as técnicas que têm sido exploradas com vista à discriminação e interrogação conjunta de vários sensores recorrendo à sua multiplexagem. O levantamento genérico destas técnicas está revisto em várias publicações (Udd, 1995b; Ribeiro, 1996; Dakin e Volanthen, 1999; Grattan e Sun, 2000). Referem-se as técnicas de multiplexagem baseadas no tempo, no comprimento de onda, no espaço, na frequência, na coerência e em códigos pseudo-aleatório. Pela sua viabilidade de implementação prática, equipamento

necessário e facilidade de processamento, destacam-se, neste trabalho, três técnicas de multiplexagem particularmente atractivas para as redes de sensores que se vão abordar: a multiplexagem temporal, a multiplexagem em comprimento de onda e a multiplexagem espacial.

### 2.4.1 Multiplexagem temporal

A designada multiplexagem temporal, *time division multiplexing (TDM)*, consiste na identificação do sinal de cada sensor através do conhecimento do instante de tempo em que o respectivo sinal atinge o fotodetector (Morey et al., 1992). Esta técnica segue então o princípio representado na Figura 2.23.

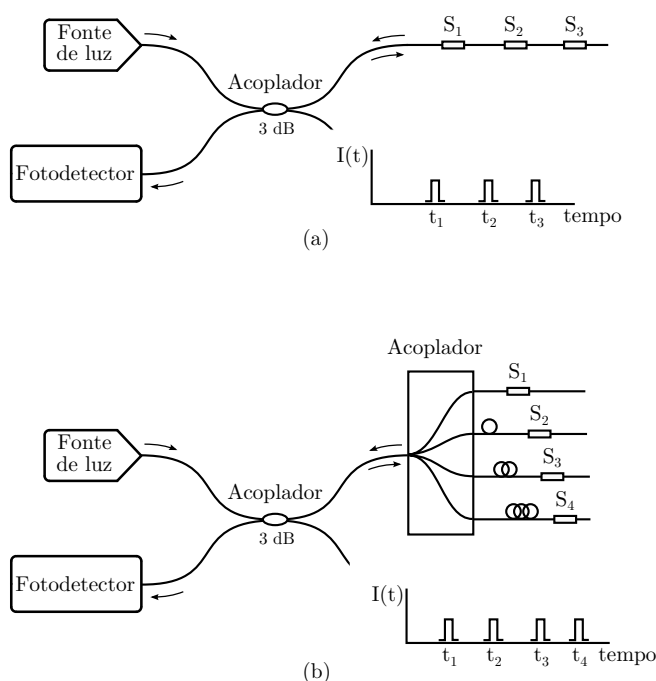


FIGURA 2.23: Esquema de multiplexagem temporal (TDM): a) em série; b) em paralelo.

Utilizando configurações que associem diferentes comprimentos de fibra óptica a vários sensores ligados ao mesmo canal óptico, verificam-se diferenças na duração do trajecto da luz afecta a cada sensor. Quanto maior o percurso que a luz tenha de percorrer desde que deixa a fonte de luz, passa pelo sensor e atinge o fotodetector, mais atrasado chegará esse sinal relativamente aos demais.

A discriminação do sinal dos distintos sensores é particularmente eficaz se a luz emitida for modulada através de impulsos. A duração dos impulsos e o intervalo de tempo entre a emissão de dois impulsos consecutivos deve ser tal que permita que o sinal proveniente dos diferentes sensores não se sobreponha no tempo. Esta condição implica que a duração do impulso tenha de ser significativamente inferior ao tempo gasto no percurso da luz entre sensores,  $T_{delay}$ , traduzida no cumprimento da seguinte condição (Measures, 2001):

$$\tau_L \ll T_{delay} = \frac{2nL_{sep}}{c} \quad (2.21)$$

onde,  $\tau_L$  é a duração do impulso de luz na fonte;  $T_{delay}$  é o tempo mínimo que medeia a recepção do sinal de dois sensores consecutivos;  $L_{sep}$  é o comprimento de fibra mínimo que medeia dois sensores consecutivos;  $n$  é o índice de refração efectivo do núcleo da fibra; e  $c$  é a velocidade da luz no vazio.

Fruto da sua natureza funcional, esta técnica de multiplexagem aplica-se a todas as tecnologias ópticas anteriormente apresentadas. Exige-se contudo fontes de luz específicas. São várias as publicações que demonstram a sua aplicabilidade em redes de Bragg, sensores interferométricos e sensores de intensidade (Morey et al., 1992; Measures, 2001; Inaudi, 1997).

### 2.4.2 Multiplexagem em comprimento de onda

A multiplexagem em comprimento de onda, *wavelength division multiplexing (WDM)*, baseia-se na diferenciação dos vários sensores através do comprimento de onda reflectido ou transmitido por cada sensor (Morey et al., 1992). Seguindo o princípio de funcionamento representado na Figura 2.24, desde que sejam conhecidas as bandas de funcionamento em comprimento de onda dos diversos sensores e desde que estas não se intersectem ao longo do tempo, a identificação de cada sensor ocorre de forma unívoca pelo respectivo comprimento de onda.

Esta técnica de multiplexagem aplica-se particularmente a sensores de Bragg. Beneficia-se do facto do espectro de luz reflectido por um conjunto de sensores ser constituído por um conjunto de picos independentes correspondentes à luz reflectida por cada um dos sensores. Todavia, tendo em conta que a resposta dos sensores de Bragg é também em comprimento de onda, alerta-se para a necessidade de se contabilizar a gama de espectro disponível para a multiplexagem e a banda de funcionamento de cada sensor. O número de sensores multiplexados e os respectivos comprimentos de onda devem pois ser definidos de forma que todos os sensores operem sempre em comprimentos de onda distintos mesmo quando submetidos a variações de temperatura e a extensões diferenciais.

### 2.4.3 Multiplexagem espacial

Outro tipo de multiplexagem muito frequente nas redes de sensores é designado por multiplexagem espacial, *spatial division multiplexing (SDM)*. Neste caso, recorre-se a um equipamento de multiplexagem adicional denominado comutador óptico ou *switch*. Esta técnica permite que cada canal de fibra possa ser multiplicado por um elevado número de novos canais, por varrimentos sucessivos, conforme esquematizado na Figura 2.25.

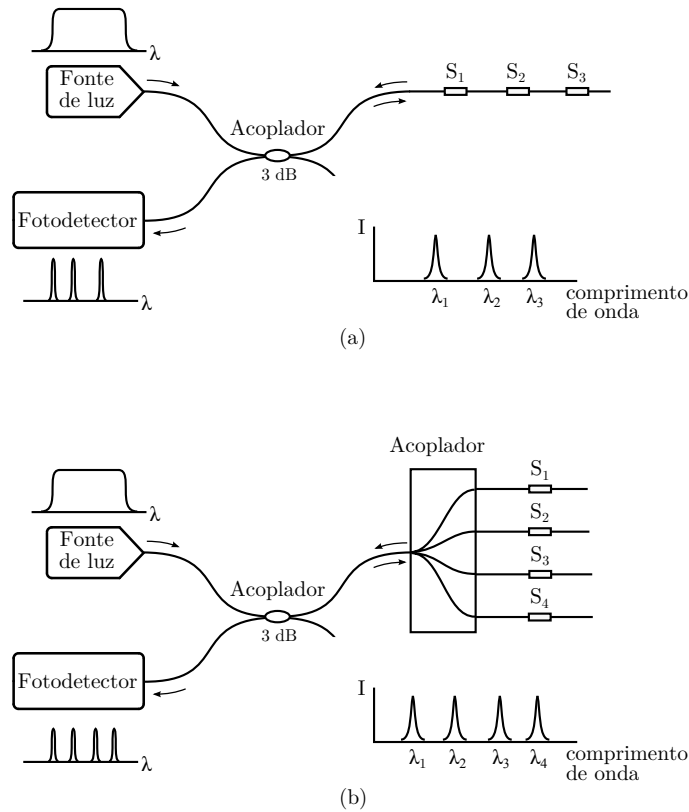


FIGURA 2.24: Esquema de multiplexagem em comprimento de onda (WDM): a) em série; b) em paralelo.

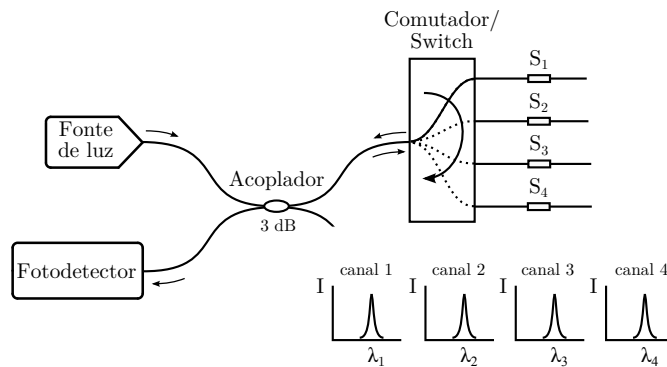


FIGURA 2.25: Esquema de multiplexagem espacial (SDM).

O comutador consiste num equipamento óptico ou óptico-mecânico que realiza um varrimento sequencial dos distintos ramos de forma controlada e extremamente precisa. Desta forma, em cada instante do varrimento, a luz está apontada de forma bidireccional para um único canal do multiplexador. Esta sequência é realizada de forma sincronizada com o equipamento de leitura que processa uma leitura por cada posição do comutador. Como cada ramo é lido num instante de tempo diferente e é conhecida a sua posição, é então possível identificar cada ramo e o respectivo sensor.

### 2.4.4 Multiplexagem híbrida

Soluções que combinam os diferentes esquemas base de multiplexagem são frequentes em redes de sensores mais complexas e de maior dimensão. O recurso à combinação da multiplexagem temporal, em comprimento de onda e espacial dá origem às designadas técnicas de multiplexagem híbrida. Estas permitem incrementar significativamente o número de sensores que podem partilhar o mesmo sistema de interrogação.

Representa-se a configuração de um esquema de multiplexagem híbrida na Figura 2.26. Neste caso, recorre-se a um comutador óptico para proceder ao varrimento de quatro canais ópticos, nos quais se utilizam técnicas de multiplexagem para integrar vários sensores com diferentes comprimentos de onda.

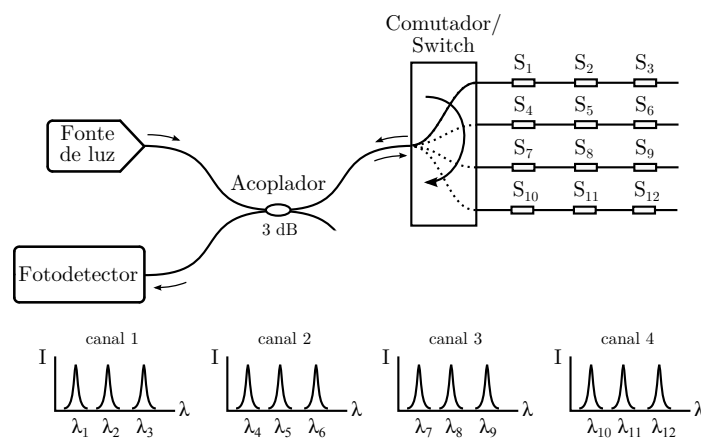


FIGURA 2.26: Esquema de multiplexagem híbrida.

Em termos gerais, estes sistemas combinam as potencialidades e limitações das duas técnicas anteriores. Geralmente, a multiplexagem híbrida representa também a forma mais económica de rentabilizar os equipamentos de aquisição e otimizar o trajecto e a complexidade da rede de sensores.

## 2.5 Arquitectura das redes de sensores

A associação de vários sensores recorrendo às técnicas de multiplexagem que se acabaram de expor conduz ao conceito de rede de sensores. Em primeiro lugar, a localização física dos pontos na estrutura onde se pretende medir as grandezas físicas de interesse determina a distribuição física da rede. Depois disso, a forma como se procede ao arranjo dos vários sensores por canais ópticos comuns ou paralelos continua a ser uma questão de extrema importância, com forte influência na fiabilidade, robustez e economia da respectiva rede. Descrevem-se de seguida as arquitecturas mais comuns para redes de sensores com aplicação na monitorização estrutural.

### 2.5.1 Redes em série

As redes em série recorrem à multiplexagem de vários sensores ao longo de uma fibra óptica comum, conforme representado na Figura 2.27. Técnicas de multiplexagem no tempo ou no comprimento de onda podem ser utilizadas para processar a desmodulação destas redes de sensores.

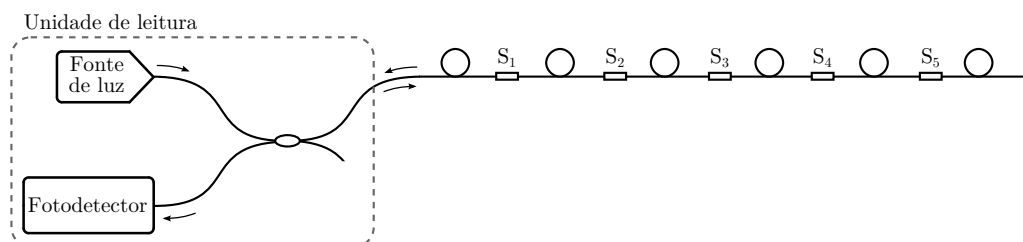


FIGURA 2.27: Arquitectura esquemática de uma rede de sensores em série.

No que concerne aos sensores de Bragg, este é a arquitectura de rede mais fácil de ser realizada. Para tal, basta a interconexão dos vários sensores que constituem a rede directamente entre si. Dispensa, por isso, a utilização de qualquer equipamento auxiliar.

Questões práticas limitam o número de sensores ligados em série. No caso dos sensores de Bragg, muitos fabricantes de redes de Bragg têm dificuldade em assegurar um elevado número de comprimentos de onda distintos durante o processo de fabrico. Por exemplo, são geralmente oferecidos pelos fabricantes apenas entre 10 a 20 comprimentos de onda na banda 1510 - 1590 nm. O regime dinâmico dos sensores e a necessidade de evitar sobreposições dificulta em muitos casos a integração de mais de 10 sensores no mesmo canal óptico.

Simultaneamente, a realização de redes de sensores em condições longe das ideais, leva à potencial existência de perdas localizadas junto aos sensores e ao longo da rede. A existência de perdas na rede faz com que o sinal dos sensores mais distantes possa começar a ser de difícil percepção quando um grande número de sensores está envolvido. Torna-se necessário contabilizar as perdas máximas introduzidas pelos próprios sensores, emendas, cabo e demais perturbações e confrontar essa estimativa com a gama de leitura do equipamento de aquisição.

Como grande vantagem desta configuração destaca-se a possibilidade de se poderem obter frequências de aquisição elevadas, estando estas limitadas unicamente pelo equipamento de leitura. Proceda-se também à interrogação simultânea de todos os sensores da rede sem qualquer custo adicional. É a configuração que, à partida, leva a esquemas e trajectos de cabos mais simples e curtos. Como desvantagem, nesta arquitectura de rede, destaca-se a sua vulnerabilidade e falta de redundância. Basta que a rede de sensores tenha um problema num único ponto para se perder todos os sensores ligados a jusante (Inaudi, 1997).

### 2.5.2 Redes em estrela

As redes em estrela, conforme apresentado na Figura 2.28, permitem igualmente a interrogação conjunta de vários sensores, podendo recorrer à multiplexagem espacial, temporal ou mesmo em comprimento de onda. Em qualquer caso, a ligação de cada sensor converge num ponto comum, onde os diversos sinais são combinados numa fibra única por intermédio de um dispositivo auxiliar ligado à unidade de leitura.

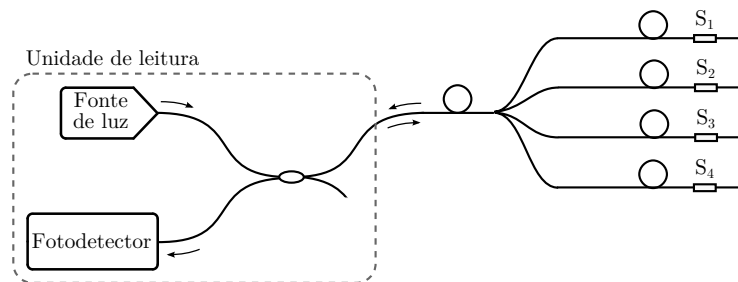


FIGURA 2.28: Arquitectura esquemática de uma rede de sensores em estrela.

No caso de se recorrerem a técnicas de multiplexagem temporal ou em comprimento de onda, é utilizado um acoplador óptico para reunir as várias fibras associadas aos diversos sensores. Este acoplador é um dispositivo passivo que permite dividir a luz proveniente do equipamento de leitura pelos vários tramos a jusante e reunir novamente a luz reflectida pelos sensores no ramo inicial. Salienta-se que, sendo o acoplador um elemento passivo, a frequência de aquisição continua limitada exclusivamente pelo equipamento de leitura.

No caso da multiplexagem espacial, a reunião dos vários ramos é realizada por intermédio de um comutador óptico. Este equipamento óptico-mecânico permite a leitura sequencial de cada um dos ramos da rede de forma sincronizada com o equipamento de leitura. Constitui uma forma de aumentar significativamente o número de canais associados a um equipamento de leitura comum, sendo possível encontrar no mercado comutadores com largas dezenas ou mesmo centenas de canais. Este esquema apresenta contudo, como contrapartida, a redução proporcional da frequência de aquisição agora limitada sobretudo pelo comutador óptico e pela duração do varrimento de todos os ramos da estrela.

No geral, quando comparadas com as redes em série, esta arquitectura conduz a soluções significativamente mais robustas. Neste caso a quebra de um ramo leva à perda de um único sensor, não comprometendo a leitura regular dos demais. Geralmente, potencia também a introdução de mais sensores na rede. No entanto, para além de limitar as frequências de aquisição, esta arquitectura pode aumentar significativamente a complexidade e a extensão de fibra envolvida e consequentemente o custo da instalação (Inaudi, 1997).

### 2.5.3 Redes em árvore

Com os sensores em fibra óptica é ainda possível construir redes em árvore conforme representado na Figura 2.29. Este esquema vai reunindo progressivamente o sinal de cada ramo acabando por combinar todos os sensores num único ponto de forma a partilhar um equipamento de leitura único.

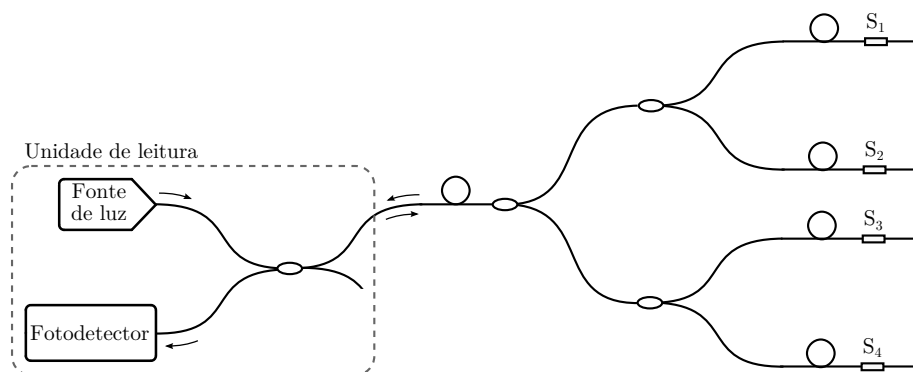


FIGURA 2.29: Arquitectura esquemática de uma rede de sensores em árvore.

Mais uma vez, à semelhança das redes em estrela, pode recorrer-se tanto à multiplexagem espacial, temporal ou em comprimento de onda, introduzindo comutadores ou acopladores ópticos nos nós de convergência. Contudo, dado o elevado número de equipamentos que podem estar envolvidos nesta rede, é especialmente interessante quando realizada com recurso à multiplexagem temporal ou em comprimento de onda, envolvendo acopladores de preço reduzido.

No geral, destaca-se a versatilidade desta arquitectura em se adaptar às estruturas mais exigentes. Embora, não tão robusta como a configuração em estrela, permite ainda que alguma quebra na rede possa conduzir a uma perda reduzida de sensores. Neste caso, as consequências de qualquer avaria tornam-se mais gravosas à medida a que esta se aproxima do ponto de convergência junto da unidade de leitura (Inaudi, 1997).

### 2.5.4 Redes híbridas

De forma a conciliar as potencialidades de cada uma das arquitecturas atrás expostas e de forma a aumentar a capacidade da rede em albergar cada vez mais sensores, é frequente recorrer-se a arquitecturas híbridas. Na Figura 2.30 ilustra-se uma rede híbrida que integra vários segmentos em estrela, em série e em árvore.

Quando combinada adequadamente, nomeadamente juntando multiplexagens espaciais com multiplexagem temporal, torna-se possível alargar a capacidade da rede para várias centenas de sensores. São redes que podem conciliar frequências elevadas de amostragem com elevada robustez e versatilidade.

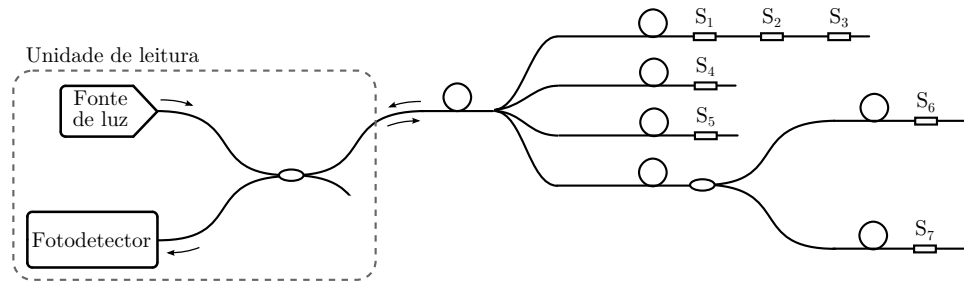


FIGURA 2.30: Arquitectura esquemática de uma rede de sensores híbrida combinando troços em série, em estrela e em árvore.

### 2.5.5 Comparação das arquitecturas de rede

Resumem-se, na Tabela 2.4, as principais características atrás enunciadas relativamente a cada uma das configurações base analisadas. Deve procurar-se, nas soluções híbridas, conciliar as mais-valias de cada uma destas arquitecturas base.

TABELA 2.4: Resumo das principais características das arquitecturas base das redes de sensores.

Série	Estrela	Árvore
Fácil instalação	Instalação complexa e dispendiosa	Instalação complexa e dispendiosa
Multiplexagem sem custo com sensores de Bragg	Requer equipamento (switch ou coupler)	Requer equipamentos pouco dispendiosos (coupler)
Frequências elevadas	Frequências limitadas pelo switch (baixas frequências)	Frequência elevadas (coupler não condiciona frequências de aquisição)
10 sensores (típico)	Elevado número de sensores (limitado pelo switch 1xN)	20 sensores
Sensível a perdas	Praticamente imune a perdas	Pouco sensível a perdas
Pouco robusta	Robustez elevada	Robustez média

## 2.6 Componentes de uma rede de sensores em fibra óptica

Tal como se tem vindo a descrever ao longo das secções anteriores, um sistema de medição baseado em fibra óptica é composto por um conjunto integrado de componentes. Muitos destes equipamentos foram já introduzidos nas secções anteriores. De forma integrada realçam-se com principal destaque os componentes expostos na Figura 2.31.

Ao longo desta secção faz-se uma introdução geral de cada um dos principais componentes ópticos referenciados focando várias vertentes da sua especificidade prática. Destaca-se aqui naturalmente a própria fibra óptica, os sensores e a unidade de leitura,

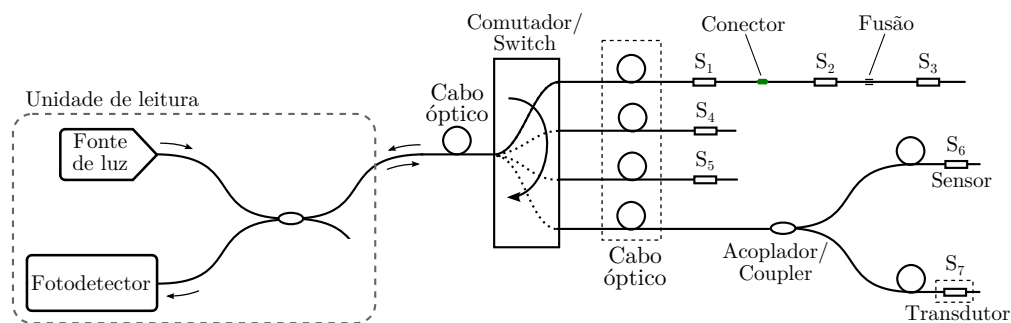


FIGURA 2.31: Principais componentes ópticos de uma rede de sensores.

compreendendo a fonte de luz e o fotodetector, bem como o esquema de condução da luz responsável pela multiplexagem dos distintos sensores e os respectivos equipamentos.

### 2.6.1 Sensores e transdutores

Em primeiro lugar desta lista está o próprio sensor enquanto elemento individualizado. Trata-se do elemento que apresenta sensibilidade intrínseca a determinadas grandezas externas que assim provocam alterações na luz em transmissão ou em reflexão na fibra.

Nos casos mais simples, estes elementos sensores podem ser directamente aplicados para medição de determinadas grandezas físicas. Refere-se o caso comum das redes de Bragg que se comercializam na sua forma mais primitiva conforme se mostra na Figura 2.32. Este sensor pode ser directamente colado em qualquer superfície lisa ou ancorado em dois pontos extremos para medir extensões mecânicas, ou pode ser utilizado de forma livre de se deformar para medir temperatura.



FIGURA 2.32: Rede de Bragg isolada apenas conectorizada em ambas as extremidades.

No entanto, em muitos casos, os elementos sensores simples não são adequados para serem aplicados directamente numa estrutura. Por um lado, porque apresentam sensibilidade exclusiva a um número muito limitado de grandezas e, por outro lado, porque apresentam extrema fragilidade e difícil instalação. A solução passa pela integração destes sensores em transdutores com capacidade de traduzir a grandeza física em causa numa grandeza adequada ao elemento sensor que o constitui.

Ilustra-se na Figura 2.33 algumas soluções disponíveis para monitorização estrutural. Mostram-se transdutores para medir deformação, temperatura, deslocamentos, pressão, força, aceleração e rotações. Trata-se de um mercado em desenvolvimento.

Focado numa determinada grandeza a medir, realça-se que a escolha do transdutor deve ser devidamente fundamentada. Devem ser tidos em conta aspectos metrológicos relacionados com o campo de medida, resolução, precisão, sensibilidade e erros de medição afectos ao transdutor. Questões relacionadas com a facilidade de instalação e com o custo podem também divergir significativamente entre diferentes soluções e devem ser igualmente contabilizadas.

### 2.6.2 Unidade de leitura

Dando fundamento ao princípio de funcionamento de um determinado sensor em fibra óptica, surge a necessidade de, por um lado, iluminar o sensor e, por outro lado, de avaliar as propriedades da luz moduladas pelo sensor. Neste contexto, surge assim a necessidade de combinar uma fonte de luz com um fotodetector.

Pese embora as tecnologias da fonte de luz e do fotodetector poderem variar em função do princípio de medição, este núcleo é comum a todas as tecnologias atrás enumeradas. A fonte de luz é responsável por iluminar o sensor com um espectro de luz apropriado à tecnologia óptica em causa. Por sua vez, o fotodetector procede à análise do sinal óptico proveniente do sensor, transformando-o em informação capaz de ser registada e processada.

Na maioria das soluções comerciais, estes dois elementos estão reunidos no mesmo dispositivo, que inclui ainda todos os demais componentes ópticos necessários para encaminhar a luz de e para os sensores. Acopladores, atenuadores, comutadores e conectores estão geralmente integrados na unidade de leitura, definindo um esquema de medição apropriado. Mostram-se alguns destes equipamentos na Figura 2.34 cobrindo diferentes tecnologias e soluções.

Actualmente, a maioria dos sistemas de medição é capaz de operar automaticamente de acordo com um determinado procedimento programado. Estes equipamentos podem ainda permitir a ligação em rede de vários dispositivos, o armazenamento de dados local e a sua visualização. Começam também a aparecer as primeiras configurações portáteis particularmente apelativas para monitorização temporárias e para controlo das instalações em campo.

#### 2.6.2.1 Fontes de luz

No que concerne às fontes de luz utilizadas para iluminar os sensores em fibra óptica, podem ser empregues diferentes tecnologias com características distintas (ver Figura 2.35).

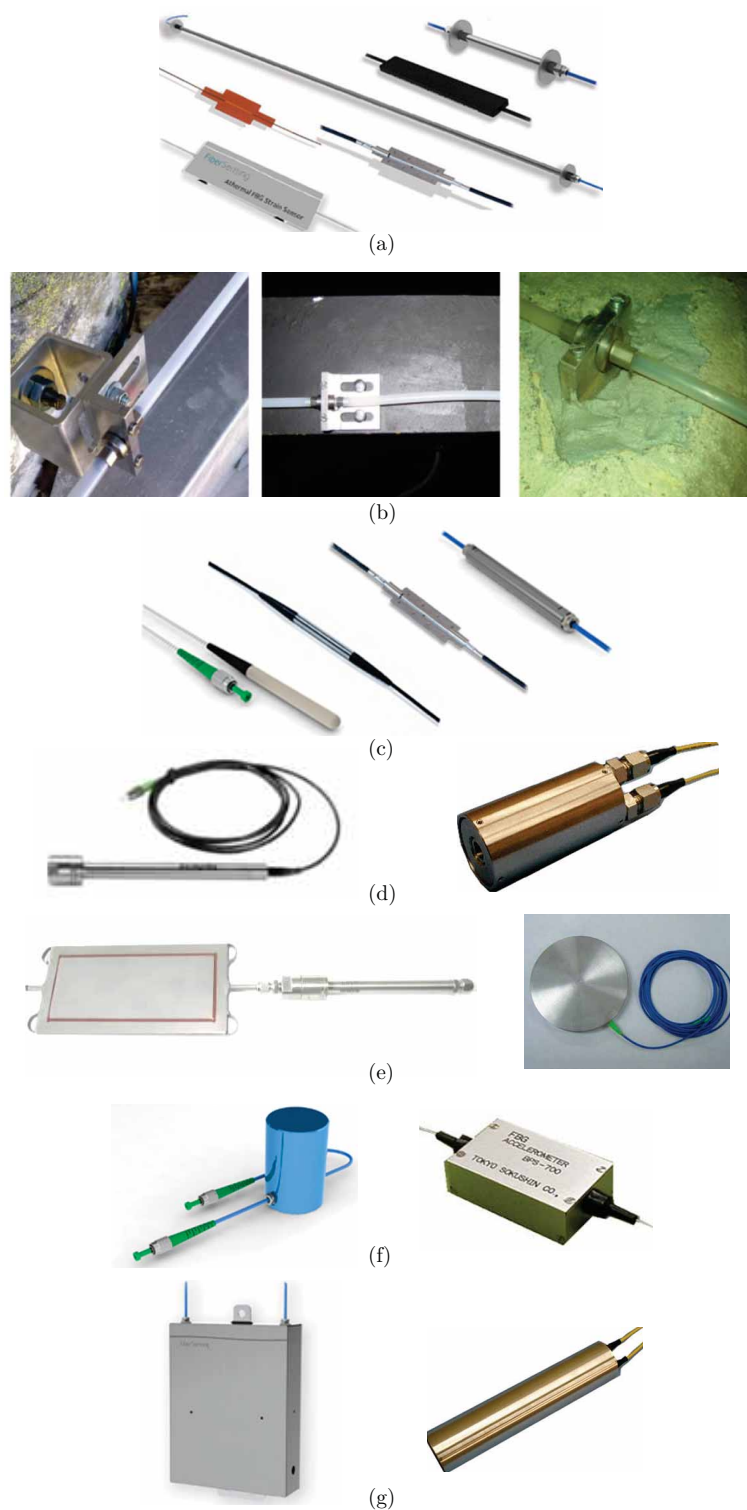


FIGURA 2.33: Transdutores em fibra óptica: a) para medir extensões, contendo transdutores para embeber, colar e soldar comercializados pela FiberSensing; b) para medir deformações médias, para embeber ou aplicação externa, comercializados pela SMART-TEC; c) para medir temperatura, com diferentes encapsulamentos, materiais e aplicações, da FiberSensing; d) para medição de pressão em líquidos (piezômetros), comercializados pela FOS&S e pela IFOS; e) para medição de pressão em solos (células de pressão), comercializados pela FOS&S e pela Welltech; f) para medição aceleração e vibrações (acelerômetros), comercializados pela FiberSensing e pela IFOS; g) para medição de rotações, comercializados pela FiberSensing e pela IFOS.



FIGURA 2.34: Equipamentos de leitura para interrogação de sensores ópticos: a) si425-250 da Micron Optics; b) sm130-500 da Micron Optics ; c) SpectralEye portátil da FOS&S; d) FS2200 da FiberSensing.

O levantamento de algumas dessas fontes de luz encontra-se presente na revisão de Ribeiro (1996). No presente caso, destacam-se dois tipos de fontes de luz utilizadas nas aplicações realizadas ao longo deste trabalho: as fontes monocromáticas e as fontes de baixa coerência.

As fontes monocromáticas, como é o caso típico dos díodos laser, procedem à emissão de luz com uma frequência espectral bem definida, mantendo uma relação de fase constante. O espectro de luz emitido por um laser foca-se assim numa janela bastante apertada. Estas fontes são, em geral, significativamente mais caras que as fontes de baixa coerência, no entanto, são também mais potentes, menos sensíveis à temperatura e mais resistentes.

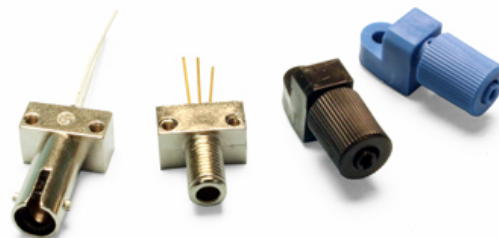


FIGURA 2.35: Vistas gerais de fontes de luz e fotodetectores para fibra óptica.

Por outro lado, as fontes de baixa coerência emitem luz com conteúdo ao longo de uma banda alargada de comprimentos de onda. Distinguem-se dois tipos de semicondutores utilizados para emissão de luz de baixa coerência: os LED (*Light Emitting Diode*) e os díodos superluminescentes SLD (*Superluminescent Diode*). Em termos de requisitos, as características primárias destas fontes prendem-se com o facto de necessitarem de ter um coerência espacial suficiente para garantir um acoplamento eficiente na fibra óptica,

assim como, possuem elevada radiância, baixa coerência temporal e estabilidade no comprimento de onda de emissão.

A selecção da fonte de luz está intimamente relacionada com a tecnologia óptica utilizada nos sensores. O comprimento de onda, ou a banda de comprimentos de onda iluminada, depende também dessa mesma tecnologia, do tipo de fibra utilizado e dos esquemas de multiplexagem previstos. A combinação das características do fotodetector determina também algumas das propriedades da fonte óptica, nomeadamente a sua largura espectral.

### 2.6.2.2 Fotodetectores

O fotodetector é o dispositivo ópto-electrónico que permite avaliar as propriedades da luz que chegam ao seu destino final depois de moduladas pelos elementos sensores. Este elemento converte uma ou várias propriedades da luz, sendo a mais frequente a sua intensidade, num sinal eléctrico capaz de ser processado e registado.

Os fotodetectores mais comuns consistem em fotodíodos semicondutores, nomeadamente tipo PIN (*Posite-Intrinsec-Negative*) e de avalanche APD (*Avalanche Photo-Diodes*) (ver Figura 2.35) (Ribeiro, 1996).

São aspectos primordiais associados ao desempenho e selecção dos fotodetectores a respectiva largura de banda, o tempo de resposta, o nível de ruído, a fraca sensibilidade a variações de temperatura, o acoplamento fácil à fibra óptica, o tempo de vida e naturalmente o custo.

### 2.6.3 Fibra óptica

Para as redes de sensores devem ser seleccionadas fibras com propriedades ópticas adequadas à rede em causa. Neste particular, deve ser prestada especial atenção de forma a assegurar a compatibilidade da fibra da rede com as características ópticas e geométricas da fibra utilizada no fabrico dos sensores e dos demais equipamentos. A escolha primária diz respeito à selecção entre fibras monomodo e multimodo. Concomitantemente, deve ser avaliado o desempenho da fibra, nomeadamente o nível máximo de atenuação admitido na banda do espectro de luz em que operam os sensores.

Vários fornecedores e modelos de fibra óptica estão actualmente disponíveis no mercado com soluções monomodo e multimodo, cumprindo os requisitos necessários para a sua utilização em redes de sensores. Os padrões ITU-T.G652 (A, B, C & D) normalizam as principais características das fibras compatíveis com a maioria dos sensores e equipamentos de aquisição. Destaca-se o caso das fibras monomodo onde a fibra SMF-28 da

TABELA 2.5: Principais características da fibra óptica Corning SMF-28

<b>Modo</b>	Monomodo (Single-Mode)
<b>Padrão</b>	ITU-T.G652
<b>Banda de funcionamento</b>	1300, 1550 nm
<b>Diâmetro do núcleo (core)</b>	8-10 $\mu\text{m}$
<b>Diâmetro da bainha (cladding)</b>	125 $\mu\text{m}$
<b>Diâmetro do revestimento (coating)</b>	245 $\mu\text{m}$
<b>Índice de refração</b>	1.468
<b>Atenuação</b>	<0.22 dB/km

Corning<sup>®</sup> é uma referência. Algumas das suas principais características encontram-se resumidas na Tabela 2.5.

A título ilustrativo, na Figura 2.36, apresenta-se um rolo de fibra óptica que pode albergar comprimentos lineares de fibra até mais de 1000 m. Esta solução é geralmente fornecida desprovida de qualquer protecção secundária. A sua utilização em redes de sensores passa por isso pela sua integração em cabos com protecção química a mecânica adequada.

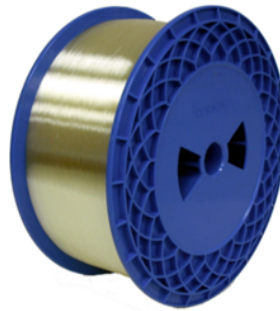


FIGURA 2.36: Rolo comercial de fibra óptica.

#### 2.6.4 Cabo óptico

Dada a sua vulnerabilidade a ataques químicos e mecânicos, a fibra óptica necessita de ser protegida e agrupada por intermédio de cabos. A especificação do tipo de protecção da fibra depende sobretudo da exposição da fibra a ambientes agressivos (radiações UV, humidade, etc.), da capacidade mecânica exigida ao cabo e da sua exposição ao choque.

Em muitos caso correntes, a condução da fibra é realizada individualmente por intermédio dos denominados cordões ou *patchcords*, geralmente fornecidos em comprimentos *standard* e conectorizados em ambas as extremidades, conforme ilustrado na Figura 2.37.a). Nestes casos, existem protecções secundárias padrão para serem utilizadas

em laboratório, ambiente interior ou ambiente exterior conforme representado na Figura 2.37.b). Soluções especiais permitem ainda que estes cabos possam ser, por exemplo, directamente enterrados no subsolo, puxados em ductos ou suspensos em sistemas indirectos.

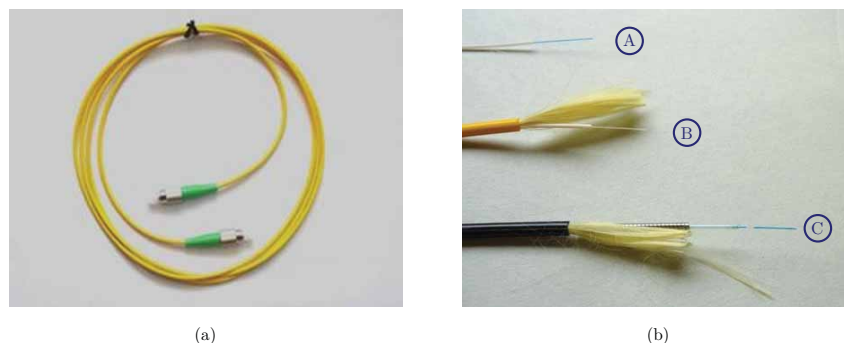


FIGURA 2.37: Cordões (*patchcords*) em fibra óptica: a) solução padronizada com conectores em ambas as extremidades; b) diferentes tipos de protecção secundária aplicáveis aos cordões (protecção para laboratório em plástico com 0.9 mm de diâmetro (A), protecção para utilização interior, em PVC com 3 mm de diâmetro (B) e protecção para instalações exteriores, armada com camisa em aço inox e revestimento em PVC com 3 mm de diâmetro (C)).

Em instalações mais complexas, a capacidade de reunir num mesmo cabo várias fibras deve ser convenientemente avaliada. Esta solução para além da redução do custo da instalação permite uma condução e protecção mais eficiente. Deve ser escolhido um tipo de cabo que permita a fácil integração dos vários sensores envolvidos. A utilização de cabos ópticos multicordão, do tipo do apresentado na Figura 2.38, é muitas vezes uma solução apropriada para aplicações mais exigentes visto que permite a separação das fibras e a interposição de sensores numa determinada fibra sem interrupção das demais.

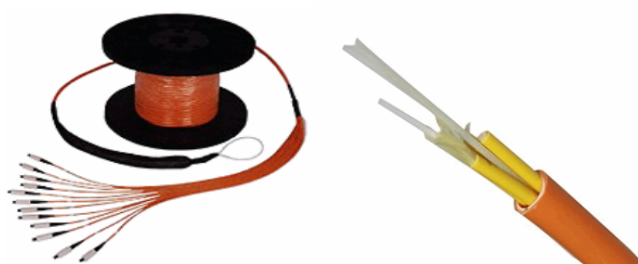


FIGURA 2.38: Exemplos de cabos multifibra resultantes do agrupamento individualizado de cordões.

A escolha do tipo de cabo a utilizar numa determinada aplicação deve, por isso, ser realizada em função do tipo de ataques a que este se encontrará potencialmente exposto e do número de fibras a transportar. Deve ainda ser avaliada a curvatura mínima e a força de tracção máxima que o cabo deve suportar. A consulta das especificações técnicas de cada solução deverá ser tida sempre em conta na referida escolha.

Os procedimentos e cuidados normais inerentes à condução de cabos eléctricos são também aplicáveis ao caso da fibra óptica. Contudo, alguns cuidados especiais devem ser garantidos tendo em conta a maior fragilidade da fibra (Hayes, 2006; Bailey, 2003):

- Em momento algum o cabo deve sofrer curvaturas acentuadas. Qualquer vinco realizado no cabo é suficiente para quebrar irreparavelmente a fibra óptica no seu interior;
- Devem ser verificadas e respeitadas as curvaturas mínimas especificadas pelo fabricante do cabo. Curvaturas demasiadamente apertadas conduzirão a perdas de luz significativas que comprometerão o desempenho da rede. Nos casos mais correntes, é tido como referência um raio mínimo de curvatura igual a 10 vezes o diâmetro do cabo óptico para cabos não tencionados e igual a 20 vezes para cabos sob tensão;
- Nas instalações onde é necessário introduzir o cabo em tubos, geralmente recorre-se ao uso de puxa cabos para conduzir a entrada do cabo no tubo. Como o cabo vai ser traccionado pelo puxa cabos, deve ser sempre escolhido um cabo com resistência mecânica adequada para suportar a força de puxe. Deve ser indicado, pelo fabricante do cabo, a tensão máxima suportada pelo cabo;
- Nos casos em que o cabo fica no interior de calhas ou esteiras, este deve ser posicionado no seu interior com cuidado para não danificar a protecção externa por exemplo por fricção nas arestas da esteira. Deve ser convenientemente fixado à estrutura por intermédio de abraçadeiras, tendo particular atenção para não esmagar o cabo durante o aperto.
- No final da instalação deve-se sempre recorrer a testes de conformidade como forma de avaliar o desempenho da rede.

Realça-se que a instalação de cabos ópticos será sempre uma operação mais exigente quando comparada com a instalação de cabos eléctricos visto as fibras serem frágeis e quebradiças. Cuidados redobrados devem ser prestados quando a instalação decorre concomitantemente com trabalhos de construção. Salienta-se que a quebra de um cabo durante a instalação implica muitas vezes a sua substituição integral.

### 2.6.5 Emendas

A emenda de duas fibras é necessária sempre que se pretende assegurar a transmissão de sinal de uma determinada fibra óptica para a fibra subsequente. As razões mais comuns para a realização de emendas podem ser, desta forma, as seguintes:

- i) ligação de sensores a uma rede genérica de sensores;

- ii) ligação da rede de sensores aos equipamentos de aquisição;
- iii) emenda de cabos de interligação dos sensores;
- iv) reparação de cabos danificados.

Do ponto de vista prático, para se proceder à emenda de fibras, são duas as técnicas com maior aceitação. Destacam-se as emendas por fusão e as emendas por intermédio de conectores.

Em ambos os casos, os pontos de emenda de fibras devem merecer cuidados especiais com vista a evitar perdas significativas de luz, assim como, garantir a resistência mecânica adequada à emenda. Dependendo da técnica utilizada podem necessitar de mão-de-obra e equipamento especializado, sendo uma operação crítica e muitas vezes morosa. A escolha de técnica de emenda deve ser decidida com base no desempenho exigido à rede e nas condições práticas para a sua realização no terreno.

### 2.6.5.1 Perdas de luz localizadas na emenda

Qualquer emenda de fibra óptica tem necessariamente associada uma perda de luz. Geralmente estas perdas são reduzidas e não comprometem o funcionamento da rede. Contudo, algumas deficiências podem comprometer mais seriamente o desempenho da ligação e conseqüentemente de toda a rede, estando algumas das principais causas presentes na Figura 2.39 (Tennyson, 2001).

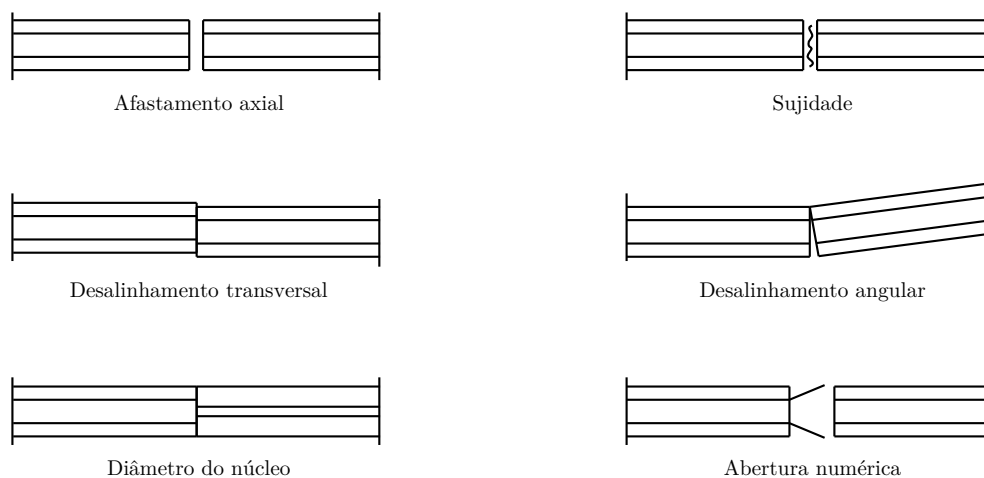


FIGURA 2.39: Deficiências na emenda de fibras ópticas geralmente conducentes à introdução de perdas ópticas anormais.

A realização de emendas merece então cuidados especiais com vista à minimização das perdas associadas. A escolha do processo de emenda bem como a selecção apropriada dos materiais deve ser analisada durante a concepção da rede para evitar casos semelhantes aos ilustrados. Durante a montagem da rede, o controlo de qualidade destes pontos deverá estar sempre presente.

### 2.6.5.2 Conectores

Os conectores foram desenvolvidos para emendas não-permanentes de fibras. Em termos práticos, permitem uma grande versatilidade e facilidade de utilização, na medida que uma emenda pode ser realizada e desmontada milhares de vezes, sem necessidade de qualquer equipamento, através de um sistema de alinhamento por aperto mecânico.

O conector consiste num dispositivo aplicado à extremidade da fibra que contém, com exactidão, a bainha da fibra centrada no interior de um mecanismo de alinhamento de precisão, denominado ferrule. A interconexão de dois conectores é consumada pelo alinhamento preciso de ambos os ferrules, e consequentemente do núcleo das fibras, no interior de um adaptador conforme apresentado na Figura 2.40.

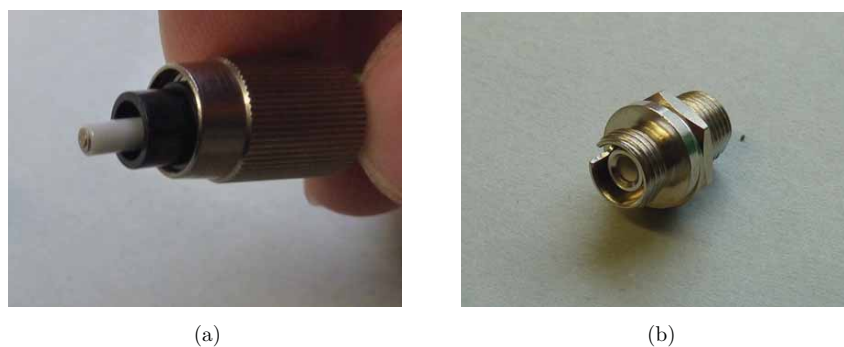


FIGURA 2.40: Conectores para emenda de fibras ópticas: a) vista do conector e respectivo ferrule onde se encontra centrada a fibra óptica; adaptador para alinhamento dos ferrules.

Vários tipos de conectores têm aparecido no mercado, respondendo a requisitos específicos, conforme se ilustra na vasta gama de soluções presentes na Figura 2.41. Contudo, os conectores FC/APC, cuja configuração se apresenta na Figura 2.42, têm revelado vantagens na integração prática de redes de sensores. Este é um tipo de conector robusto, fácil de manusear e de limpar, com excelentes propriedades ópticas ao nível de perdas de inserção e diminutas reflexões de acordo com a Tabela 2.6. Este tipo de conectores está, hoje em dia, generalizado pela maioria dos fabricantes dos sensores e equipamentos de aquisição, justificando a sua utilização quase em exclusivo na montagem de redes de sensores.

O principal cuidado no manuseamento dos conectores ópticos está relacionado com prevenção e eliminação da sua contaminação com qualquer tipo de sujidade. Manter os conectores isentos de impurezas é fundamental para um desempenho satisfatório da emenda e consequentemente de toda a rede.

Realça-se que qualquer partícula de pó pode ser quase do tamanho do núcleo da fibra, como se vislumbra na Figura 2.43, e pode ser o suficiente para comprometer seriamente o desempenho da conectorização. Por um lado, a sujidade, como meio que se interpõe nas superfícies dos conectores, impede a transmissão da luz de uma fibra para a outra.



FIGURA 2.41: Diferentes tipos de conectores usados na montagem de redes ópticas (itrademarket - connectors: , 2011).

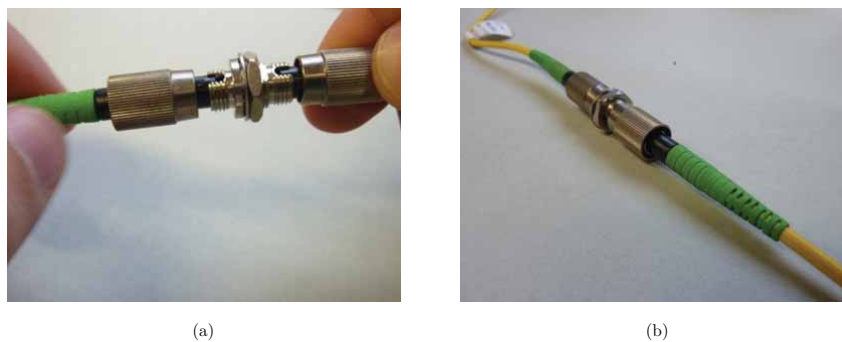


FIGURA 2.42: Emenda por intermédio de conectores FC/APC e respectivo adaptador de interconexão.

TABELA 2.6: Principais características dos conectores FC/APC.

Tipo de conector:	FC/APC
Modo:	Monomodo (Single-Mode)
Ângulo de contacto:	8°
Perda de inserção:	0.10 a 0.4 dB (média) 1.0 dB (máximo)
Perda por retorno:	Min. 60 dB
Repetibilidade:	Max. 0.1 dB
Durabilidade:	1000 ciclos montagem/desmont.
Temperatura de funcionamento:	-40/+80 °C

Por outro lado, com a pressão mecânica exercida no aperto dos conectores, pode ser o suficiente para danificar permanentemente a superfície dos mesmos.

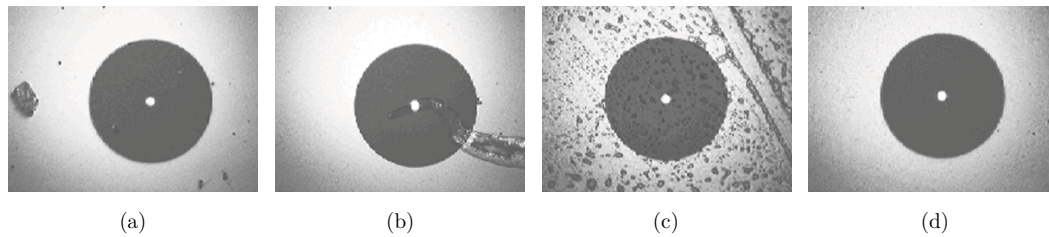


FIGURA 2.43: Vista ao microscópio da superfície dos conectores ópticos: a) conector contaminado com poeiras; b) conector contaminado com sujeira; c) conector com impressão digital; d) conector limpo (Hayes, 2006).

Desta forma, em qualquer instalação, todos os conectores devem ser resguardados do pó e devem ser convenientemente limpos antes de ser realizada a conectorização. Como regras gerais destacam-se os seguintes princípios a que deve obedecer o manuseamento dos conectores e correspondente limpeza (Tennyson, 2001; Hayes, 2006; Bailey, 2003):

- Manter sempre os conectores, adaptadores, painéis de ligação e demais elementos usados nas ligações com as respectivas tampas de protecção. Estas devem ser retiradas somente no momento em que é realizada a ligação, evitando o contacto do conector com qualquer superfície e com o ar e a sua conseqüente contaminação;
- Adoptar um procedimento de limpeza adequado para limpar os conectores antes de ser realizada qualquer conectorização.
- A utilização de toalhetes de papel combinados com isopropanol (IPA) tem demonstrado ser o procedimento de limpeza mais eficaz para remoção de partículas e contaminações (ver Figura 2.44.a)). Neste particular, recomenda-se a utilização exclusiva de álcool tipo isopropanol visto ser eficaz na remoção da sujeira, não deixar resíduo e não atacar as colas utilizadas na montagem do conector. Devem ser utilizados toalhetes que não libertem qualquer tipo de resíduo como, por exemplo pêlo, guardados de forma imune a qualquer contaminação. Deve igualmente ser evitada a contaminação do toalhete com as próprias mãos durante a limpeza.
- Para aplicações em campo, recorre-se também frequentemente à utilização de cassetes de limpeza a seco (ver Figura 2.44.b)). Estes dispositivos permitem a limpeza rápida do conector pela passagem deste por uma superfície isenta de impurezas capaz de reter a sujeira.
- Para limpeza dos adaptadores e painéis de ligação devem ser desmontados os conectores, limpando-se os adaptadores com recurso a cotonetes livres de pêlo (ver Figura 2.44.c)). Alternativamente, sempre que se está impossibilitado de remover os adaptadores, a utilização de ar seco em spray ajuda também na remoção de resíduos no interior do adaptador (ver Figura 2.44.d)).

- Nenhum processo de limpeza é totalmente eficaz. Devem por isso ser usadas medidas que permitam avaliar a eficiência da limpeza com vista à repetição, se necessário, do processo até o conector (ver Figura 2.44.e)) se encontrar num estado aceitável. O recurso a microscópios adaptados ao conector permite a inspeção da superfície do conector, conduzindo a informação do tipo da apresentada na Figura 2.43, devendo ser parte integrante do processo de limpeza.

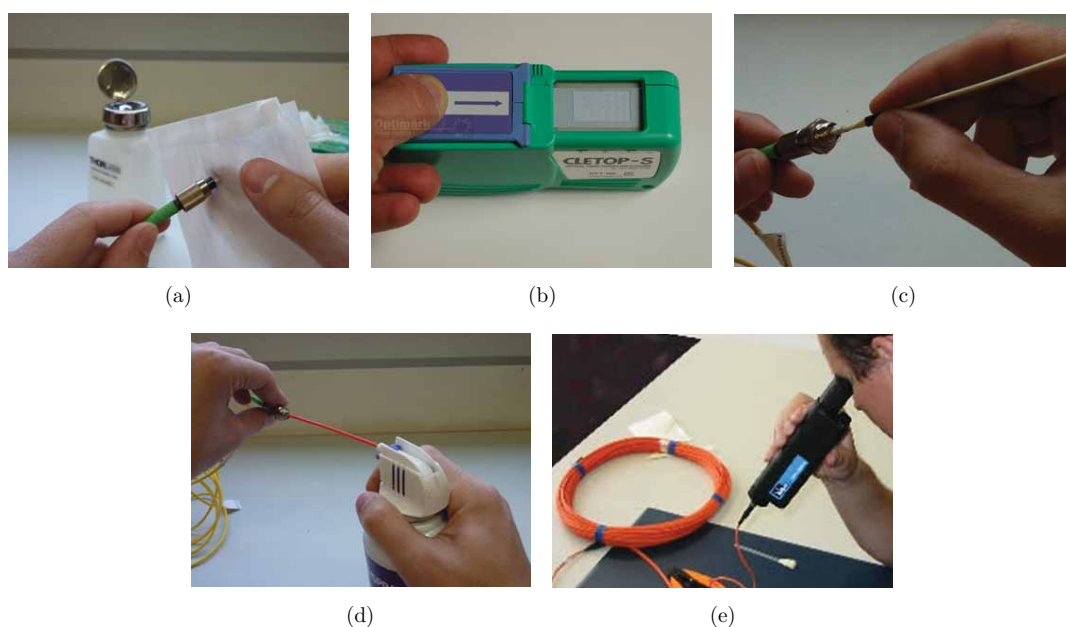


FIGURA 2.44: Limpeza de conectores ópticos: a) limpeza com toalhetes de papel embebidos em isopropanol; b) cassete de limpeza; c) limpeza de adaptadores ópticos por intermédio de um cotonete; d) limpeza de adaptadores ópticos spray de ar seco; e) inspeção da superfície dos conectores através de um microscópio óptico.

Tem-se igualmente verificado que as perdas associadas aos conectores podem variar ligeiramente conforme a pressão exercida durante o seu aperto nos adaptadores de emenda. Recomenda-se que o par de conectores seja apertado simultaneamente no adaptador até começar a surgir resistência. No entanto, deve ter-se em atenção que pressão excessiva, forçando o aperto, é geralmente prejudicial. Sempre que possível, a monitorização das perdas durante a conectorização ajuda a afinar o melhor desempenho de cada emenda.

### 2.6.5.3 Fusões

Alternativamente, quando se pretende que uma emenda seja permanente, podem adoptar-se emendas por fusão da fibra garantindo um desempenho mais eficiente. Este tipo de emendas tem, geralmente, menores perdas quando comparado com as soluções que recorrem a conectores. Contudo, estas ligações requerem a utilização de equipamento especializado, uma máquina de fusão, e mão-de-obra também especializada, conduzindo a um processo significativamente mais moroso (ver Figura 2.45).



FIGURA 2.45: Processo de emenda de fibras ópticas por fusão: a) equipamento de fusão; b) disposição da fibra óptica no equipamento para fusão.

As primeiras operações prendem-se com a preparação da fibra para a fusão. Esta operação inclui a remoção dos revestimentos da fibra ao longo de alguns centímetros junto a ambas as extremidades a unir e o corte da mesma de forma precisa e perpendicular ao seu eixo. Existem ferramentas específicas para a remoção dos vários revestimentos em função do diâmetro e do tipo de revestimento da fibra, mostrando-se dois exemplos na Figura 2.46.a).

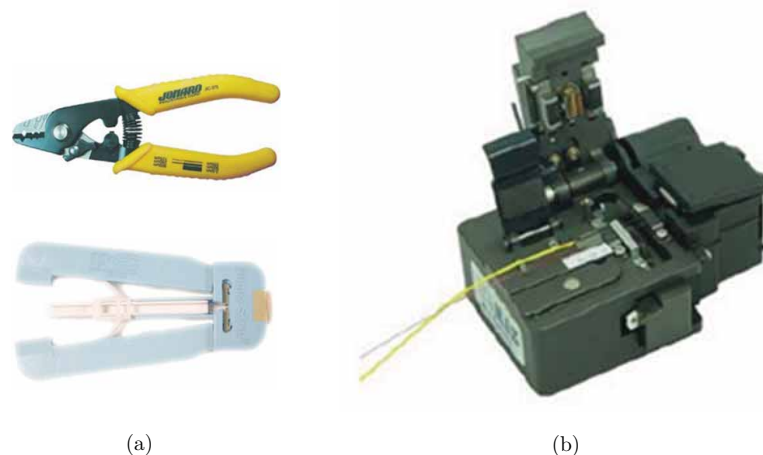


FIGURA 2.46: Ferramentas utilizadas na preparação da fibra para realização da fusão: a) diferentes tipos de descarnadores; b) máquina de corte (clivador) portátil para um corte preciso da fibra óptica.

Para o corte rigoroso da fibra, de forma a haver contacto das duas extremidades a emendar, exige-se a utilização de equipamento de corte de elevada precisão. São comercializados clivadores portáteis adaptados para um corte da fibra rápido e eficaz, com erros normalmente inferiores a  $0.5^\circ$ , do tipo do mostrado na Figura 2.46.b).

Preparadas as extremidades da fibra, a máquina de fusão assume o papel fundamental no processo de emenda. Esta é responsável pelo alinhamento preciso das duas fibras e pela descarga de um arco eléctrico que vai fundir as extremidades da fibra tornando-as num elemento praticamente contínuo, como se mostra na Figura 2.47.

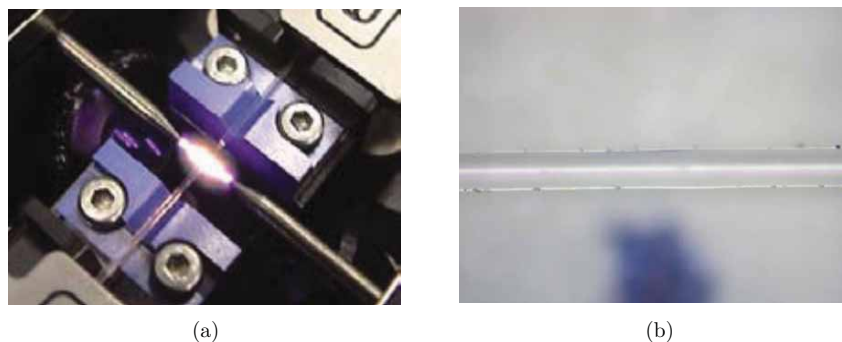


FIGURA 2.47: Emenda de uma fibra óptica por fusão: a) descarga do arco eléctrico no interior da máquina de fusão; b) vista ao microscópio da zona de emenda da fibra óptica por fusão.

Na maioria das máquinas de fusão todo o processo de alinhamento da fibra e descarga do arco eléctrico é automático e encontra-se programado em função do tipo de fibra a emendar. Destaca-se porém a importância do processo de alinhamento da fibra no desempenho da emenda. Vários processos para alinhamento das fibras têm sido comercializados com resultados e características distintas, sendo as duas técnicas mais comuns, baseadas no alinhamento bidireccional da fibra pela bainha ou no alinhamento igualmente bidireccional pelo núcleo da fibra. Estas tecnologias têm critérios de exigência diferentes relativamente ao alinhamento das fibras, logo naturalmente conduzem a perdas também diferentes consoante o grau de exigência. Verifica-se também custos significativamente diferentes, crescendo igualmente com a complexidade do alinhamento.

A título de exemplo, o alinhamento pelo núcleo é garantidamente a técnica que assegura menores perdas, em média cerca de metade relativamente ao alinhamento pela bainha, contudo uma máquina de fusão que recorra a esta técnica assume em média o dobro do preço de uma máquina equivalente com alinhamento pela bainha. A escolha da máquina de fusão é, desta forma, fortemente condicionada pelo grau de exigência da rede, sendo que qualquer uma das tecnologias supracitadas tem características apropriadas para as redes de sensores mais comuns.

Destaca-se que as máquinas de fusão têm evoluído significativamente ao longo dos últimos anos seguindo as necessidades crescentes de um mercado comandado pela proliferação massiva das redes de telecomunicações em fibra óptica. Novas funcionalidades, maior rapidez e fiabilidade, assim como, dimensões mais reduzidas têm sido preocupações dominantes. Actualmente, as seguintes funcionalidades são comuns à maioria dos equipamentos:

- Permitem emendas de múltiplos tipos de fibra (p.ex. SM, MM, DS, NZDS, etc.)
- Pré-programadas para operar em função do tipo de fibra utilizada;
- Alinhamento automático da fibra controlado por câmaras internas;

- Ecrã mostra ao utilizador o posicionamento da fibra durante todo o processo de fusão, permitindo rejeitar por inspecção visual a consumação da emenda;
- Descarga do arco por tempo adequado em função das características da fibra;
- Teste de tensão, no final da fusão, como forma de avaliar a integridade da mesma;
- Bateria para operações em campo;
- Peso e dimensão adequados para transporte;
- Estufa integrada para aquecimento da manga termoretráctil de protecção;
- Memória para guardar resultados da fusão;
- Alguns equipamentos permitem a fusão simultâneas de várias fibras.

#### 2.6.5.4 Conectores *versus* fusões

Em forma de resumo e em termos gerais, na Tabela 2.7, salientam-se os principais aspectos que distinguem as emendas por conectores das emendas por fusão. Em função do carácter da ligação, das condições para a realização da mesma e das exigências da rede, deve, desta forma, ser escolhida a tecnologia mais adequada.

TABELA 2.7: Comparação entre emendas por fusão e emendas por intermédio de conectores.

Fusão	Conectores
Carácter permanente;	Carácter temporário;
Perdas muito reduzidas (<0.05 dB);	Perdas mais elevadas (<0.4 dB);
Requer equipamento dispendioso;	Não requer qualquer equipamento;
Custo da emenda insignificante (somente requer tubo para protecção como consumível);	Conectores e adaptadores caros como material consumível face ao custo da fibra óptica;
Requer transporte de equipamento volumoso e energia eléctrica;	Fácil de realizar em campo através de <i>patchords</i> ou <i>pigtails</i> já conectorizados;
Grande estabilidade ao longo do tempo;	Pode degradar-se com o tempo em ambientes mais hostis;
Imunidade a sujidade;	Altamente condicionado por sujidade;
Requer pessoal qualificado.	Fácil montagem.

#### 2.6.6 Comutadores

O comutador óptico, muitas vezes também designado por *switch* óptico, é um equipamento utilizado em redes de sensores como meio para proceder à multiplexagem espacial

do sinal proveniente de várias fibras ópticas. Este equipamento permite o varrimento sequencial de um vasto número de sensores distribuídos por vários ramos de redes híbridas ou em estrela, partilhando um único equipamento de leitura.

Na escolha do comutador óptico deve ser avaliado o número de canais de saída necessários. É possível encontrar configurações que podem atingir mais de uma centena de canais. A luz que incide no canal de entrada vai ser sequencialmente direccionada para cada uma das portas de saída de forma programada. São várias as soluções disponíveis no mercado oferecendo produtos válidos para as redes de sensores, semelhantes ao que se ilustra na Figura 2.48.

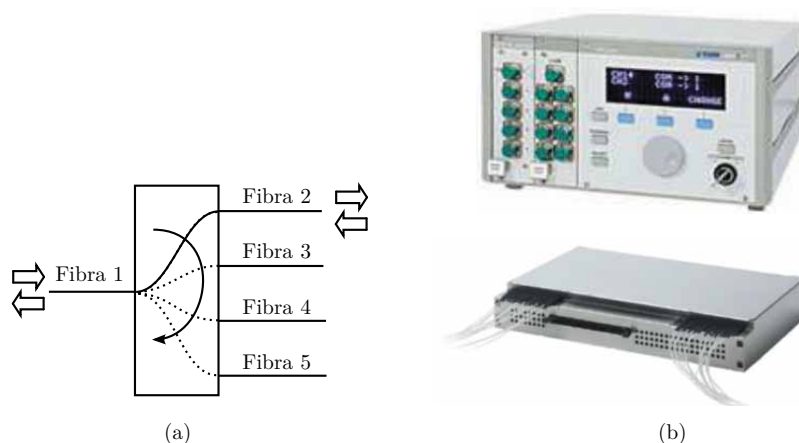


FIGURA 2.48: Exemplos de comutadores ópticos utilizados para varrimentos sucessivos de múltiplos canais ópticos: a) representação esquemática do seu funcionamento; b) dois modelos comerciais.

A principal diferença entre os equipamentos disponíveis tem a ver com o princípio de funcionamento e com o rigor alcançado no alinhamento interno da luz para o ramo programado. Este princípio pode ser óptico, mecânico ou opto-mecânico. No caso dos sistemas mecânicos, um elemento móvel é accionado de forma a proporcionar o alinhamento preciso entre a fibra de entrada e uma das fibras de saída. Embora sejam económicos, esta técnica é geralmente lenta e começa a acusar desgaste ao fim de um número limitado de ciclos. Os sistemas ópticos são neste aspecto mais eficientes controlando o percurso da luz por intermédio de sucessivas reflexões. Os sistemas MEMS começam também a proliferar, conduzindo a soluções mais compactas, robustas e económicas.

Aspectos relacionados com o princípio de funcionamento, velocidade de comutação, repetibilidade, durabilidade e custo variam significativamente de modelo para modelo em função da tecnologia utilizada. Devem ser avaliadas as necessidades da rede de sensores no que diz respeito à escolha do comutador óptico, devendo ser dada particular atenção ao tempo de comutação entre canais, vida útil do equipamento e perdas ópticas associadas.

Realça-se ainda que de forma a poderem estar sincronizados com o equipamento de leitura, os comutadores devem ser controlados remotamente, a partir de um PC, necessitando, para isso, de responder a comandos enviados por software. A escolha do protocolo de comunicação deve por isso ser contemplada na selecção do equipamento, sendo que a disponibilização de drivers adequados para a integração destes dois equipamentos é fundamental.

### 2.6.7 Acopladores

Os acopladores são elementos passivos, isto é, funcionam sem necessidade de qualquer tipo de energia, que permitem juntar ou dividir o sinal proveniente de várias fibras ópticas. O princípio de funcionamento é formalmente simples e está esquematicamente indicado na Figura 2.49.a). Estes componentes, exibindo baixo custo, tornam-se particularmente úteis na estruturação de redes de sensores em paralelo e na materialização dos esquemas de interrogação.

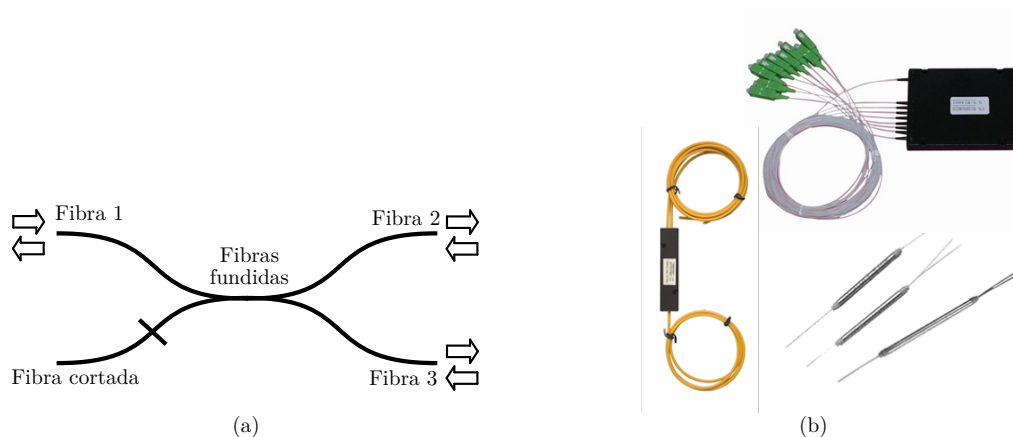


FIGURA 2.49: Acopladores ópticos para divisão de luz: a) princípio de funcionamento de um acoplador 1:2; b) exemplos de acopladores comerciais.

Em termos práticos, os acopladores são normalmente especificados em termos do número de canais de entrada e de saída e da proporção de luz que é atribuída a cada ramo. Existem no mercado várias soluções com diferentes configurações e encapsulamentos conforme mostrado na Figura 2.49.b).

## 2.7 Considerações finais

Hoje em dia assiste-se a uma rápida difusão e desenvolvimento das redes de sensores em fibra óptica em diferentes aplicações, de onde se destaca a monitorização de estruturas de engenharia civil. Esta tecnologia tem apresentado inúmeras vantagens quando comparada com as soluções tradicionais mormente de natureza eléctrica. Crê-se que

as potencialidades das redes de sensores em fibra óptica possam contribuir significativamente para o desenvolvimento de sistemas de monitorização estrutural mais fiáveis, eficientes e económicos num futuro muito breve.

Na primeira parte deste capítulo introduziram-se os conceitos gerais relacionados com a tecnologia das fibras ópticas e abordou-se, com particular detalhe, os tipos de sensores mais comuns na monitorização estrutural. Apresentaram-se os princípios de funcionamento dos sensores intensiométricos, redes de Bragg, interferómetros, assim como dos sensores distribuídos de Raman e Brillouin.

Descreveram-se técnicas de multiplexagem mais importantes e expeditas visando a associação de múltiplos sensores numa única fonte de luz e num único fotodetector. Destacaram-se as técnicas de multiplexagem temporal (TDM), em comprimento de onda (WDM) e espacial (SDM). Introduziram-se, em seguida, as principais arquitecturas de redes de sensores e compararam-se as redes de sensores em série, em estrela, em árvore e híbridas.

Identificaram-se, por fim, os equipamentos e os dispositivos fundamentais para a construção de redes de sensores em fibra óptica. Neste âmbito, descreveram-se os principais componentes, sensores, acessórios e equipamentos com vista à materialização deste tipo de rede de sensores. As questões práticas mais pertinentes foram também abordadas do ponto de vista da sua instalação.

Utilizou-se uma abordagem que se procurou que fosse conceptualmente acessível à engenharia civil, introduzindo os principais conceitos e tecnologias que se passarão a abordar com mais detalhe ao longo dos capítulos seguintes

## Capítulo 3

# Medição de Extensões com Sensores de Bragg

Neste capítulo, aborda-se a medição de extensões em elementos estruturais com recurso a sensores de Bragg. Apresentam-se os princípios gerais associados à medição desta importante grandeza mecânica. Descrevem-se as soluções e técnicas específicas adoptadas, baseadas na colagem superficial de sensores de Bragg cujo desempenho se avalia através de uma modelação numérica e de um conjunto vasto de ensaios laboratoriais. Termina-se este capítulo com a apresentação de um caso prático, demonstrando o desempenho e a mais-valia associada à medição de extensões com os referidos sensores, focado na reabilitação estrutural da Ponte Eiffel, em Viana do Castelo.

### 3.1 Introdução

Quando se procura a avaliação do comportamento e da integridade estrutural, de entre as grandezas mecânicas susceptíveis de serem monitorizadas, a medição combinada de tensões e/ou extensões mecânicas assume um interesse particular na engenharia civil. O conhecimento de níveis de tensão e extensão em elementos críticos permite não só a análise dos esforços instalados na estrutura, como permite a sua confrontação com os limites de segurança dos respectivos materiais.

No entanto, a medição directa de tensões apresenta dificuldades intrínsecas de complexa resolução. No que se aplica à engenharia civil, a sua quantificação directa revela-se muito limitada quando se procuram procedimentos não-destrutivos, sendo que os poucos processos existentes, nomeadamente com a introdução de macacos planos e de células tensométricas, têm associada uma significativa incerteza face a falhas de contacto e à própria descontinuidade que criam na estrutura (Sellers, 2003). A quantificação directa de tensões é por isso normalmente preterida e a sua determinação é estabelecida com base

em medições indirectas, por exemplo, através da medição de extensões, suportando-se nas leis constitutivas dos respectivos materiais.

A extensão mecânica, fruto da sua natureza dimensional, é, por seu lado, uma das grandezas mecânicas mais simples de ser medida. Pela sua definição, trata-se da medição de um deslocamento relativo ente dois pontos previamente definidos. É amplo o espectro de técnicas experimentais que permitem processar esta medição como adiante se descreve. Este facto tem contribuindo para que muitas das técnicas experimentais que têm vindo a ser desenvolvidas para avaliação da integridade estrutural e para detecção de danos recorram à avaliação da evolução de extensões em elementos críticos (Posenato, 2009). Como consequência, a extensão tem sido uma das grandezas mais frequentemente contemplada na monitorização estrutural.

Ao longo do tempo, têm-se revelado diferentes princípios para medição de extensões mecânicas. Um conjunto vasto de técnicas e soluções tem sido desenvolvido e explorado com os mais diversos fins que vão desde aplicações na engenharia civil, mecânica, medicina, entre outras áreas experimentais, conforme atesta o rol de publicações focadas no tema (Kobayashi, 1989; Dally e Riley, 1991; Figliola e Beasley, 2011). Em termos históricos, evocam-se os métodos mecânicos e opto-mecânicos, o recurso a extensómetros eléctricos (capacitivos, indutivos, piezoeléctricos e resistivos), as faixas de Moiré, a interferometria óptica e a fotoelasticidade.

No panorama da engenharia civil, muitas das técnicas anteriormente referidas são, no entanto, de difícil aplicação prática pelo que o número de soluções é mais reduzido. Amplamente empregues na engenharia civil e contabilizando um largo registo de experiências laboratoriais e de aplicações em campo, destacam-se os extensómetros de resistência eléctrica e os extensómetros de corda vibrante, ambos representados na Figura 3.1 (Dunncliff, 1988; Ko e Ni, 2005). Referem-se alguns exemplos da sua aplicação na monitorização estrutural (p.ex. Marecos (1979); Félix (2004); Robertson et al. (2005); Dimande (2010)). No entanto, ambas as soluções apresentam defeitos. No caso dos extensómetros de resistência eléctrica destaca-se a sua deficiente estabilidade para aplicações de longa-duração e a sua forte sensibilidade a fontes externas de ruído electromagnético. No caso dos extensómetros de corda-vibrante, não obstante apresentarem elevada estabilidade associada a uma referência absoluta, aponta-se a sua forte limitação na captação de regimes dinâmicos (Ko e Ni, 2005).

Referem-se ainda as técnicas no domínio óptico utilizadas na caracterização de campos de extensões, de onde se realça a correlação de imagens (Sutton et al., 1986; Bruck et al., 1989; Hung e Voloshin, 2003). A sua aplicabilidade na engenharia civil é promissora tendo em conta o desenvolvimento dos meios digitais de captação e dos recursos computacionais de processamento de imagem. Contudo, dadas as exigências práticas em termos de visibilidade, estas técnicas têm-se circunscrito mormente a ensaios laboratoriais, ainda com pouca incidência na monitorização estrutural.

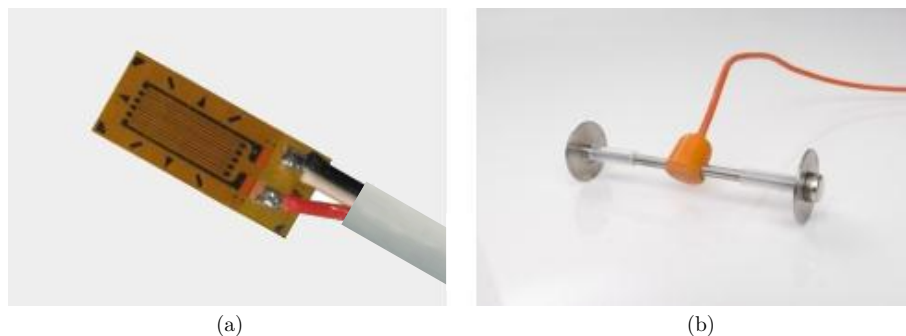


FIGURA 3.1: Sensores convencionais empregues na medição de extensões: a) extensómetro de resistência eléctrica; b) extensómetro de cordas vibrantes.

Focado nos sensores de fibra óptica, são diversas as tecnologias aptas para medição de extensões. Vários autores têm difundido o potencial desta tecnologia (Merzbacher et al., 1996; Ansari, 1997; Measures, 2001; Casas e Cruz, 2003; Graver et al., 2004; Li et al., 2004; Deng e Cai, 2007; Glisic e Inaudi, 2007). Os sensores de Bragg e os interferómetros de Fabry-Perot permitem a medição pontual de extensões. Os interferómetros de Michelson são particularmente vocacionados para a medição de extensões médias. A retroreflexão de Brillouin demonstra capacidade para medições distribuídas de extensão. Todas estas tecnologias permitem a medição directa de extensões, contribuindo com muitas das vantagens apontadas à tecnologia óptica, nomeadamente as suas reduzidas dimensões e a sua imunidade natural a interferências electromagnéticas (Maaskant et al., 1997).

De entre as tecnologias ópticas expostas, pelas suas características metrológicas e pela simplicidade de operação, os sensores de Bragg têm sido os que mais adesão têm tido na engenharia civil sempre que se procura a medição de extensões (Zhou e Jinping, 2004). Os seus atributos enquanto sensores revelam-se na sua elevada sensibilidade intrínseca à deformação, associada a uma elevada estabilidade e precisão. Baseando-se na medição de uma propriedade absoluta da luz, como se sabe o seu comprimento de onda, permitem a definição de um referencial absoluto particularmente adequado para monitorizações de longa duração. Quando comparados com as demais tecnologias ópticas, destacam-se ainda pela elevada e versátil capacidade de multiplexagem, tanto em série como em paralelo, e pelo seu reduzido custo de fabrico (Maaskant et al., 1997; Kersey et al., 1997).

Actualmente os principais desafios para a proliferação dos sensores de Bragg na instrumentação aplicada na engenharia civil prendem-se com o desenvolvimento de soluções fáceis de instalar, suficientemente robustas, fiáveis e duráveis, comportando um custo competitivo, igual ou inferior ao dos seus homólogos eléctricos. Neste contexto, o custo dos componentes ópticos tem vindo a diminuir significativamente ao longo dos últimos anos beneficiando do crescimento do mercado das telecomunicações em fibra óptica. O desenvolvimento de soluções e de técnicas de instalação expeditas e suficientemente robustas para a agressividade colocada pelas aplicações em campo deve, por isso, funcionar

como charneira para a proliferação desta tecnologia.

Neste capítulo, dá-se particular atenção aos sensores de Bragg para medição de extensões, destacando-se os sensores para aplicação externa por colagem na superfície do elemento estrutural. Face às suas características e dimensões, considera-se estes sensores idealmente vocacionados para a medição de extensões pontuais em elementos metálicos, próximos do homogéneo e isotrópico. Descreve-se o processo de transferência da extensão da estrutura até ao sensor e analisa-se o seu desempenho tendo em conta as características mecânicas e geométricas da fibra óptica e do adesivo responsável pela ligação do sensor à estrutura. Apresentam-se novos desenvolvimentos que pretendem tornar a sua instalação mais simples, robusta e fiável. Termina-se com a exposição de um caso de aplicação destes sensores numa ponte metálica, referindo os aspectos particulares da instrumentação, os principais objectivos e os resultados mais relevantes obtidos durante a monitorização da reabilitação e reforço estrutural da Ponte Eiffel, em Viana do Castelo.

## 3.2 Sensores de Bragg para medição da extensão

### 3.2.1 Princípio de funcionamento

Os princípios gerais afectos aos sensores de Bragg foram expostos no Capítulo 2. Neste ponto, realça-se contudo a sua aptidão para a medição de extensões.

Sabe-se já que devido aos efeitos foto-elásticos, um alongamento do núcleo da fibra provoca um aumento do comprimento de onda reflectido pela rede de Bragg e, por outro lado, um encurtamento produz uma diminuição equivalente (ver Figura 2.11.a)). A resposta do sensor de Bragg, avaliada ao nível comprimento de onda central reflectido foi apresentada na Equação 2.6.

Para as redes de Bragg gravadas em fibras de sílica, ou mais concretamente para o caso das fibras do tipo Corning<sup>®</sup> SMF 128 utilizadas ao longo deste trabalho, os coeficientes envolvidos podem ser assumidos, em média iguais a  $P_e = 0.78 \times 10^{-6}$ ;  $\zeta = 6.678 \times 10^{-6}$ ;  $\alpha_f = 0.55 \times 10^{-6}$  (Morey et al., 1994; Alavie et al., 1995; Kersey et al., 1997; Yu e Yin, 2002) e a expressão supracitada pode ser resumida à seguinte relação condensada

$$\Delta\varepsilon = \frac{\Delta\lambda_b}{0.78 \times 10^{-6}\lambda_b} - [(\alpha_s - 0.5) + 8.56] \Delta T \quad (3.1)$$

onde,  $\Delta\varepsilon$  é a variação de extensão que se pretende determinar;  $\Delta\lambda_b$  representa a respectiva variação do comprimento de onda medido relativamente ao seu valor de referência,  $\lambda_b$ ;  $\Delta T$  é a variação de temperatura ocorrida no mesmo período de referência; e  $\alpha_s \times 10^{-6}$  é o coeficiente de dilatação térmica do material da estrutura.

Para a banda de comprimentos de onda utilizada ao longo deste trabalho, compreendida entre 1520 nm e 1580 nm, a sensibilidade exibida pelos sensores de Bragg anda em torno dos  $1.21 \pm 0.02 \text{ pm} \cdot \mu\epsilon^{-1}$  perante variações de extensão quando isentos de variações de temperatura. Verifica-se também que a compensação dos efeitos da temperatura depende não só das características do sensor mas também do meio onde este está inserido.

### 3.2.2 Enquadramento e requisitos

Os sensores de Bragg apresentam aptidão intrínseca para medição de extensões, sendo que, quando associados a técnicas de instalação adequadas, devem promover o cumprimento dos seguintes requisitos essenciais para a monitorização de extensões mecânicas na engenharia civil (Merzbacher et al., 1996):

- i) estabilidade temporal;
- ii) sensibilidade adequada;
- iii) reposta linear num intervalo alargado de extensões;
- iv) captação de conteúdo dinâmico;
- v) possibilidade de compensação dos efeitos da temperatura;
- vi) capacidade de proceder a medições absolutas;
- vii) não perturbar o campo de extensão da estrutura;
- viii) imunidade a falhas de energia;
- ix) capacidade de multiplexagem;
- x) capacidade de produção em massa;
- xi) durabilidade elevada.

Qualquer que seja a solução e o encapsulamento conferido ao sensor, do ponto de vista mecânico, é objectivo a criação de uma compatibilização perfeita entre a estrutura e o elemento sensor. Exige-se a correcta medição da extensão não só a curto-prazo, mas também com elevada estabilidade ao longo do tempo. Não menos importante é a questão da protecção, com a qual se procura compensar a fragilidade natural da fibra óptica isolando-a de ataques mecânicos e químicos.

Considera-se que da qualidade da instalação muito dependerá o desempenho do sensor ao longo de toda a sua vida útil. No caso particular da engenharia civil, o desenvolvimento de soluções que permitam instalações expeditas e rápidas torna-se também uma

exigência. O aperfeiçoamento das técnicas de protecção quer dos sensores, quer das cablagens de forma a torná-las mais robustas e duradouras, emerge como um dos principais desafios colocados à utilização da fibra óptica na construção civil.

### 3.2.3 Tipos de encapsulamento

Respondendo às exigências colocadas pela instrumentação das obras de engenharia civil, têm, por isso, sido desenvolvidos e analisados vários tipos de encapsulamento que visam potenciar diferentes técnicas de instalação que, em função do tipo de estrutura, se pretendem eficientes, expeditas e robustas. Neste particular, assume importância a forma como o sensor é integrado na estrutura (Bronnimann et al., 1998).

Destacam-se quatro tipos de soluções para aplicação estrutural: sensores colados, sensores soldados, sensores embebidos e os sensores fixados mecanicamente (Méndez e Graver, 2007; Ansari, 2007). Ilustram-se, na Figura 3.2, as configurações mais representativas da integração destas soluções, remetendo-se para a Figura 3.3 alguns exemplos de soluções comerciais.

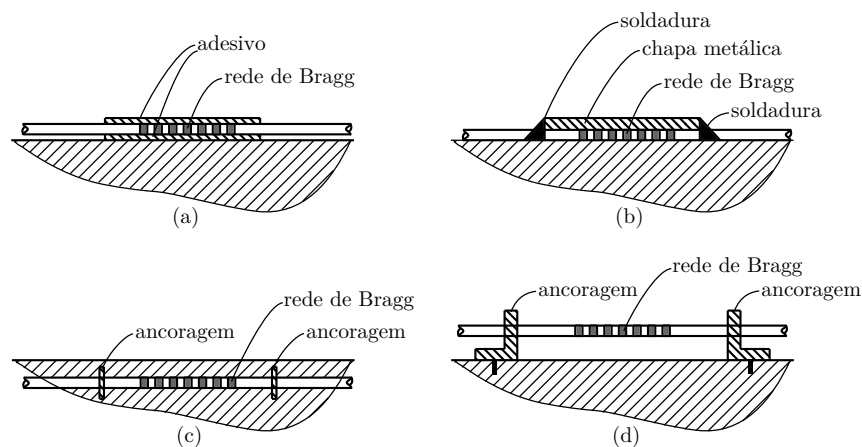


FIGURA 3.2: Integração de diferentes tipologias de sensores de Bragg para medição de extensão: a) sensor de colar; b) sensor de soldar; c) sensor de embeber; d) sensor fixado mecanicamente.

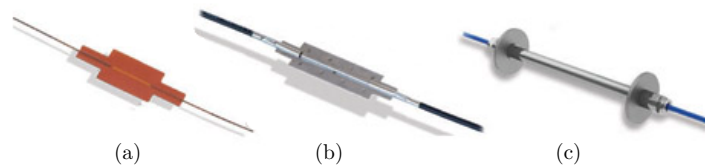


FIGURA 3.3: Configurações de sensores de Bragg para medição de extensões: a) solução de colar; b) solução de soldar; c) solução de embeber (FiberSensing, 2010a).

Considera-se que a colagem é a forma mais directa de se proceder à instalação de sensores de Bragg em qualquer tipo de estrutura. Recorre-se a um adesivo para realizar a

compatibilização mecânica entre a estrutura e elemento sensor, conforme se mostra na Figura 3.2.a). Este tipo de sensores representa soluções de baixo custo, particularmente vocacionadas para aplicações superficiais, revelando excelente comportamento tanto na monitorização de curta, como de longa-duração. No entanto, são soluções que se podem revelar extremamente frágeis e requerem um processo de instalação cuidado, nomeadamente no que diz respeito à preparação da superfície estrutural e ao emprego do adesivo. Exige-se novos desenvolvimentos para aplicação mais eficiente destas soluções, pelo que se foca a próxima secção na sua análise.

Os sensores soldados têm sido desenvolvidos e explorados para aplicações em estruturas que admitam soldadura, nomeadamente nas estruturas de aço. Destacam-se as soluções apresentadas por Mufti (2001) e Barbosa et al. (2008) que descrevem a pré-asmblagem da fibra óptica numa pequena base de aço inox destinada a ser soldada na estrutura (ver Figura 3.2.b)). Fruto da protecção conferida pela chapa de aço inox, revelam-se soluções bastante robustas. A ligação por soldadura revela-se também bastante rápida, onde se dispensa a necessidade de preparar previamente a superfície de instalação, permitindo o início da monitorização pouco tempo após a instalação, sem necessidade de qualquer processo de cura ou endurecimento. Revela também excelente desempenho em termos de estabilidade a longo-prazo e na presença de variações de temperatura (Barbosa et al., 2008). Quando comparadas com as soluções anteriores, são no entanto mais intrusivas para a estrutura, mais dispendiosas e exigem o recurso a equipamento específico para proceder à soldadura do sensor.

De outra forma, as soluções de embeber (ver Figura 3.2.c)) tornam-se particularmente interessantes em estruturas que apresentem uma fase líquida durante a sua execução. Destacam-se dois casos na engenharia civil: as estruturas de compósito e as estruturas de betão. As estruturas de compósito são um caso paradigmático desta aplicação. Atendendo às dimensões da fibra óptica, esta pode ser integrada na matriz compósita durante o fabrico do elemento estrutural ocupando simplificadaamente a posição de qualquer fibra da respectiva matriz (Kuang et al., 2001). No caso de betão, o processo torna-se bem mais complicado. A betonagem é particularmente agressiva para permitir a integração directa da fibra óptica no interior do betão. Alia-se ainda a natureza alcalina do cimento, particularmente agressiva para a sílica da fibra. Majumder et al. (2008) reporta a necessidade de se recorrer a transdutores para embeber no betão com protecções e características mecânicas adequadas. Várias destas soluções serão abordadas no capítulo seguinte.

Por último, as soluções ancoradas mecanicamente baseiam-se na fixação do sensor por intermédio de elementos de fixação ligados mecanicamente à estrutura (ver Figura 3.2.d)). Neste caso, a ligação entre o sensor e a estrutura pode dar-se por intermédio de parafusos ou grampos (Inaudi et al., 1997). São soluções particularmente interessantes para aplicações de curta duração, em que se consegue recuperar o sensor no final do seu período de utilização. A sua utilização pode tornar-se no entanto inadequada em

estruturas com elevados índices de vibração ou em aplicações de longa duração devido à pouca estabilidade temporal das referidas ligações mecânicas.

### 3.2.4 Sensores de Bragg de colar

A colagem directa de sensores de Bragg revela ser particularmente eficiente tendo em conta as diminutas dimensões e a reduzida rigidez da fibra óptica, facilitando o processo de transmissão de extensões através do adesivo. Com a utilização de um adesivo de cura rápida, podem permitir o início da monitorização poucos minutos após a instalação. Nos casos em que se torna vital dispor de uma solução localizada e pouco intrusiva para a estrutura, considera-se que esta é a solução mais eficiente e de menor custo.

Apresenta-se, na Figura 3.4, as três soluções comerciais utilizadas ao longo deste trabalho para medição de extensão por colagem superficial.

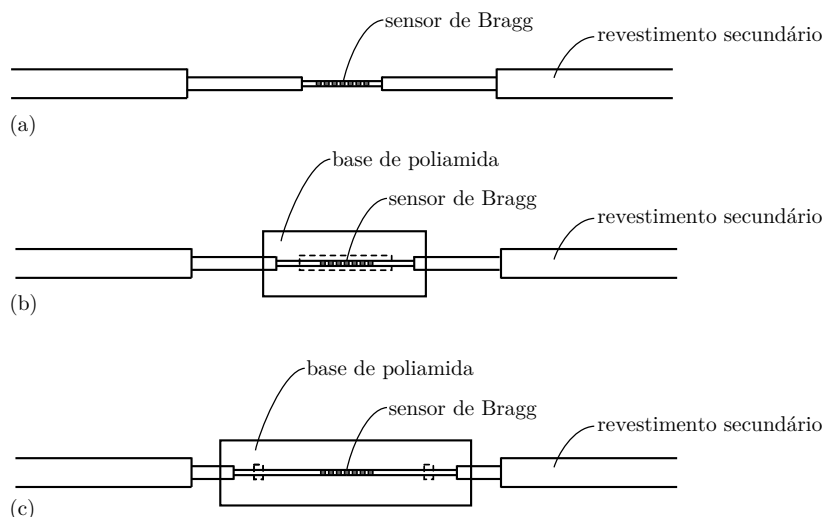


FIGURA 3.4: Sensores FBG para medição de deformação através de colagem superficial: a) tipo I (*bare type*); b) tipo II (*mini polyimide*); c) tipo III (*long polyimide*).

A primeira solução apresentada, correspondente à Figura 3.4.a), representa a configuração mais básica de um sensor de Bragg, tratando-se de uma simples fibra óptica com a rede gravada. Este tipo de sensores, usualmente designados por *bare type*, encontra-se em plena comercialização, contabilizando inúmeros fabricantes a nível mundial.

Chama-se no entanto a atenção para a fragilidade mecânica destas soluções. A remoção da camada de revestimento, necessária durante a gravação da rede de Bragg, torna a região do sensor particularmente frágil e exposta a ataques químicos. Se nenhuma protecção for adicionada a esta porção de fibra, o manuseamento do sensor fica praticamente impossibilitado, resultando na quebra da fibra, por exemplo, durante o seu posicionamento e colagem. Além do mais, a sílica da fibra fica também exposta a agentes químicos potencialmente agressivos, como pode ser o caso dos álcalis do cimento, comprometendo o seu desempenho e durabilidade.

De forma a obviar este problema, é comum recorrer-se à nova protecção da fibra, aplicando uma nova camada de revestimento primário depois da gravação da rede. Este é um processo normalmente designado por *recoating*, sendo dois os materiais mais utilizados para esse efeito: a poliamida e o acrilato. Na Figura 3.5, mostra-se a configuração destas diferentes protecções cujos principais atributos se encontram resumidos na Tabela 3.1 (Inaudi, 1997). As suas propriedades mecânicas e particularmente a sua influência na transmissão da extensão serão discutidas ao longo da próxima secção.

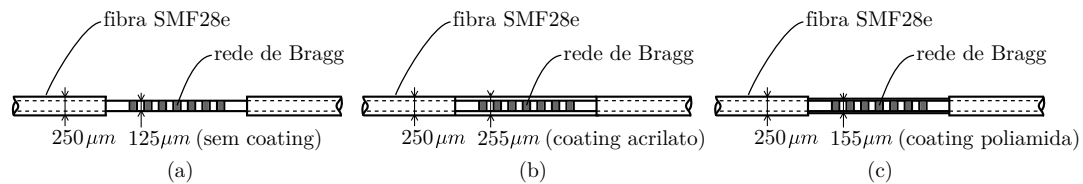


FIGURA 3.5: Diferentes configurações de protecção dos sensores de Bragg: a) sem *recoating*; b) com *recoating* de acrilato; c) com *recoating* de poliamida.

TABELA 3.1: Propriedades dos diferentes tipos de *recoating*.

Propriedade	Acrilato	Poliamida
Diâmetro externo ( $\mu\text{m}$ )	250	145
Remoção	mecânica ou química	química
Transmissão da extensão	boa para curta duração, baixas tensões e baixas temperaturas	excelente
Protecção mecânica	fraca	fraca
Protecção química	moderada	moderada
Coefficiente de dilatação térmica	$0.5 \times 10^{-6}$	$0.5 \times 10^{-6}$
Preço	reduzido	elevado

A segunda solução, presente na Figura 3.4.b), desenvolvida e comercializada pela empresa FiberSensing (FiberSensing, 2010a), visa sobretudo a melhoria da robustez e das condições de colagem. A rede de Bragg é integrada, em laboratório, ficando compreendida entre duas pequenas bases de poliamida. Estas bases conferem uma robustez acrescida à fibra assim como permitem uma aplicação mais expedita do adesivo. Para que estas folhas de poliamida não interfiram com o mecanismo de transmissão de extensões, a folha inferior, aquela que ficará em contacto directo com a superfície da estrutura, possui uma abertura longitudinal, na região central, garantindo assim que, na zona do sensor, a colagem seja directamente processada entre a fibra e a estrutura.

Ainda se apresenta uma última solução, representada na Figura 3.4.c), que se baseia no mesmo tipo de protecção mecânica anteriormente apresentado, materializada por duas folhas de poliamida envolvendo o sensor, contudo a colagem dá-se agora de forma directa ao núcleo da fibra somente através de duas pequenas janelas localizadas na proximidade do sensor. Repare-se que a zona onde se encontra inscrita a rede de Bragg

não está directamente colada à estrutura. A justificação para esta solução prende-se com a capacidade de uniformizar a extensão ao longo do sensor, evitando distorções no espectro em reflexão devidas à solicitação não uniforme da rede de Bragg. Refere-se, no entanto, que esta solução, sobretudo utilizada no início destes trabalhos, veio a ser substituída quase integralmente pela tipologia anterior sem qualquer prejuízo prático.

### 3.3 Transmissão de extensões da estrutura para o sensor

#### 3.3.1 Mecanismo de transmissão da extensão até ao sensor

A variação do comprimento de onda exibido pelo sensor de Bragg reflecte, como se tem vindo a apresentar, uma extensão no núcleo da fibra óptica, logo, quando se aplicam sensores de Bragg na medição de extensões estruturais, deseja-se que a extensão induzida no núcleo da fibra seja a mesma que se encontra instalada no elemento estrutural. No caso dos sensores colados, compete ao adesivo assegurar a compatibilização dessas mesmas deformações.

Na Figura 3.6 esquematiza-se uma configuração típica da colagem de um sensor de Bragg, onde é visível o núcleo da fibra óptica, a respectiva camada de revestimento primário e a camada de adesivo circundante ligado à estrutura. Como se pode constatar, entre o elemento estrutural e o núcleo da fibra, a extensão vai ter de ser sucessivamente transmitida de forma a atravessar a camada de adesivo e a camada de protecção primária da fibra. Os diferentes interfaces envolvidos são constituídos por materiais deformáveis de características mecânicas distintas tanto da estrutura, como do próprio núcleo da fibra, conduzindo a sucessivas distorções associadas a tensões de corte presentes nos diferentes meios (ver Figura 3.6.b)).

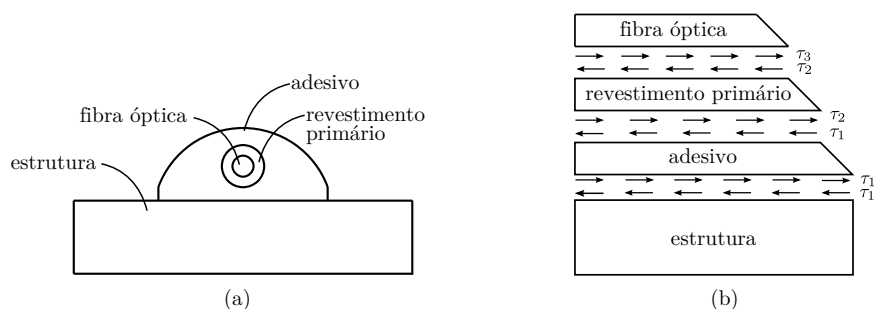


FIGURA 3.6: Sensor de Bragg colado na estrutura: a) diferentes interfaces na envolvente do sensor; b) distorção associada à transmissão de tensões de corte.

Ilustrando o fenómeno responsável pela transmissão da extensão da estrutura até ao sensor, chama-se a atenção para a Figura 3.7, onde se mostra o perfil típico de extensões ao longo da zona de colagem (Wan et al., 2008). No diagrama apresentado, verifica-se que a extensão verificada na fibra óptica,  $\varepsilon_f$ , só iguala a extensão presente na estrutura,

$\varepsilon_0$ , suficientemente longe do início da colagem. A mesma extensão,  $\varepsilon_f$ , tende ainda para zero à medida que se aproxima dos limites da colagem. O valor médio,  $\varepsilon_m$ , experimentado pelo elemento sensor ao longo do comprimento  $L_B$  depende pois da sua posição relativa no diagrama. Antevê-se, por isso, que a extensão lida pelo sensor possa ser influenciada pelas propriedades geométricas e mecânicas dos diferentes interfaces envolvidos.

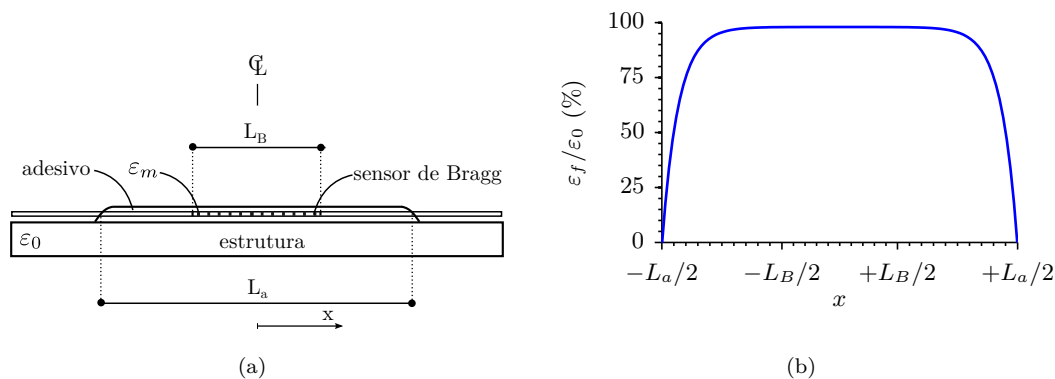


FIGURA 3.7: Perfil de extensões ao longo da zona de colagem: a) geometria da colagem; b) perfil longitudinal de extensões.

A eficiência da transmissão da extensão do elemento estrutural para o sensor tem sido objecto do estudo de vários autores que têm recorrido a formulações analíticas (Ansari e Libo, 1998; Li et al., 2006; Wan et al., 2008), modelos de elementos finitos (Duck e LeBlanc, 2000; Wan et al., 2008), assim como ensaios experimentais (Ansari e Libo, 1998; Wan et al., 2008) para quantificar essa mesma transmissão em função de diferentes configurações e diferentes materiais. A maioria dos estudos referenciados tem incidido sobre sensores embebidos em materiais compósitos onde são válidas as condições de axissimetria. São mais escassos os resultados sobre sensores colados à superfície.

No que concerne aos sensores colados à superfície, faz-se referência ao trabalho pioneiro de Ansari e Libo (1998) que propôs pela primeira vez um modelo numérico visando o estudo da transferência de extensões entre a estrutura e a fibra óptica. Nesse trabalho, os autores assumiram, no entanto, que a fibra óptica, provida de revestimento primário, se encontrava directamente compatibilizada com a estrutura, desprezando portanto qualquer camada de adesivo sob o sensor. Mais realista e completo foi o trabalho realizado por Wan et al. (2008) que desenvolveu um novo modelo analítico adaptado às condições fronteira de uma colagem superficial e validou-o quer com uma modelação numérica com recurso a elementos finitos, quer com resultados experimentais. Nesse trabalho, Wan et al. (2008) estudou o efeito de quatro características geométricas do adesivo em torno do sensor: a largura e o comprimento de colagem, bem como, as espessuras de adesivo sob e sobre o sensor. Her e Huang (2011) desenvolveu um estudo semelhante, aplicado a sensores interferométricos de Mach-Zender, avaliando diferentes propriedades do revestimento primário.

No geral, todos os autores têm detectado diferenças entre as extensões estruturais e as extensões verificadas no núcleo da fibra. Esta tem sido relacionada com o comprimento do sensor, com o comprimento de colagem, com as propriedades do adesivo e com a camada de revestimento primário da fibra. De forma unânime, todos os autores têm verificado que quanto maior for o comprimento de colagem e quanto mais rígido for quer o adesivo, quer a camada de revestimento primário, melhores serão as condições para transferência de extensões. Verifica-se, no entanto, que o efeito da deformação do adesivo é mais premente no caso dos sensores interferométricos, que medem a extensão integrada ao longo do comprimento de colagem, sendo praticamente impossível atingir transferências de extensões próximas das ideais. No caso dos sensores de Bragg, representando a extensão média ao longo de um comprimento bem definido, conseguem porém atenuar muitos dos efeitos assinalados que se verificam sobretudo junto às fronteiras (ver Figura 3.7).

### 3.3.1.1 Modelação numérica

Neste trabalho, procurou-se analisar, de forma mais realista, o efeito das diferentes condições geométricas e dos diferentes materiais no contexto dos sensores de Bragg que vão ser utilizados. Para o efeito, procedeu-se à modelação numérica do fenómeno em causa, representando as características dos sensores de Bragg com 10 mm de desenvolvimento. Foram analisados dois tipos de protecções primárias bastante frequentes, nomeadamente as de poliamida e as de acrilato (ver Figura 3.5). Foi ainda avaliado o efeito do módulo de deformabilidade e da espessura de adesivo sob o sensor. Pretende-se com esta análise, por um lado, identificar as variáveis que mais impacto têm na transmissão da extensão e, por outro lado, definir alguns requisitos mínimos que possam servir de referência na concepção de técnicas de instalação mais eficientes.

Desenvolveu-se o modelo numérico ilustrado na Figura 3.8 com recurso ao software *Autodesk Robot Structural Analysis*. Trata-se de um modelo, 3D, baseado em elementos finitos sólidos com geometria arbitrária, que reflecte as diferentes combinações geométricas e os diferentes materiais envolvidos. Retracta-se a constituição esquemática deste modelo na Figura 3.9, onde foram tidas em conta as condições de simetria longitudinal do fenómeno em estudo, pelo que apenas meio desenvolvimento do sensor foi efectivamente modelado. Dispõe-se assim de um volume laminar simulando a estrutura, um volume representando o adesivo e dois corpos cilíndricos concêntricos representando a fibra óptica e o respectivo revestimento primário. Fruto da formulação utilizada, foi admitido um comportamento linear de todos os materiais, bem como uma aderência perfeita entre todos os elementos. Considera-se realista esta abordagem tendo em conta o campo de medição analisado.

Todas as propriedades geométricas e materiais foram apuradas de modo a representar fidedignamente as soluções que se pretendem implementar ao longo deste trabalho. Os

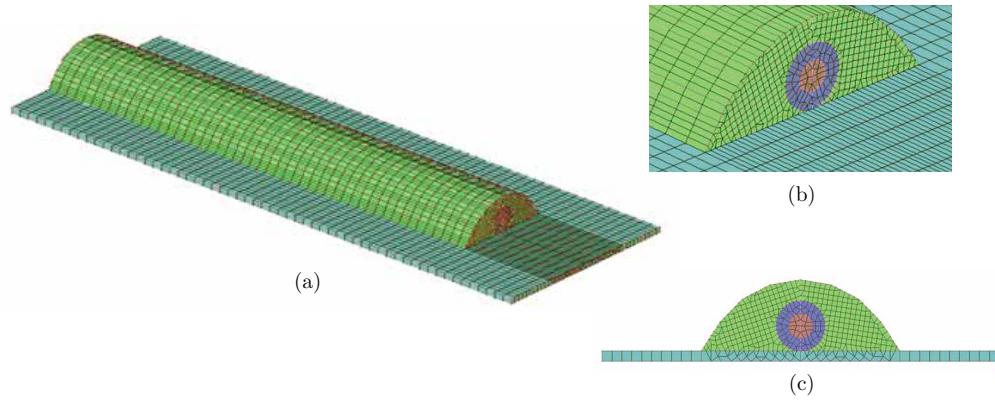


FIGURA 3.8: Vistas gerais do modelo de elemento finitos desenvolvido para análise da transmissão de extensões até ao sensor.

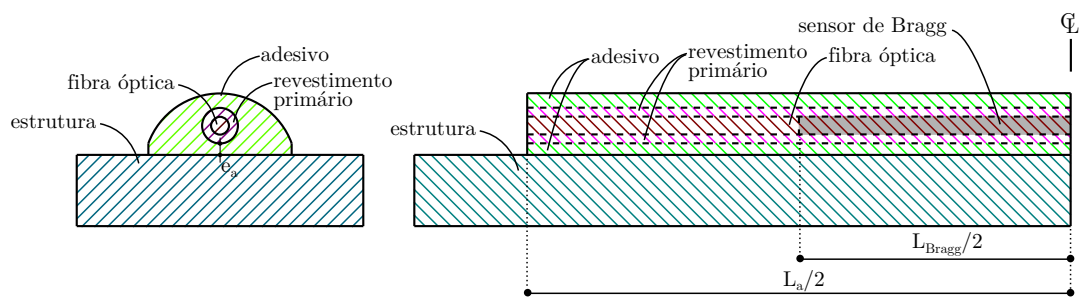


FIGURA 3.9: Representação esquemática das principais características geométricas do modelo de cálculo desenvolvido.

materiais considerados e as respectivas condições geométricas estão detalhadas na Tabela 3.2 tendo-se recorrido às propriedades mecânicas reportadas na bibliografia para definir a generalidade dos materiais (Wan et al., 2008; Her e Huang, 2011). De modo a garantir que o sensor e o adesivo não tivessem efeito directo sobre o campo de extensões instalado no elemento estrutural, apesar de ter sido modelada uma camada de reduzida espessura, o respectivo módulo de elasticidade foi majorado cerca de cem vezes ( $E_e=20000$  GPa).

TABELA 3.2: Propriedades mecânicas dos diferentes interfaces modelados.

	$\varnothing$ (mm)	E (GPa)	$\nu$
Fibra óptica	0.125	72.0	0.17
Revestimento primário			
Acrilato	0.255	0.70	0.46
Poliamida	0.155	2.40	0.35
Adesivo	-	2-9	0.35
Estrutura	-	200	0.30

Foi aplicado, numa das faces laterais do corpo afecto à estrutura, um deslocamento regular de forma a introduzir um campo de extensões uniforme ( $\varepsilon_0=1000 \mu\varepsilon$ ) alinhado com a direcção principal do elemento sensor. De forma a tornar esta análise paramétrica,

reflectindo a sensibilidade da medição às diferentes variáveis envolvidas, fez-se variar, de forma criteriosa, algumas das propriedades geométricas e mecânicas mais relevantes. Este modelo foi então repetidamente calculado com diferentes propriedades. Do ponto de vista geométrico, fez-se variar a espessura do adesivo sob o sensor,  $e_a$ , e o comprimento de colagem,  $L_a$ . Do ponto de vista dos materiais, fez-se variar o módulo de elasticidade do adesivo,  $E_a$ .

### 3.3.1.2 Resultados

As Figuras 3.10 e 3.11 mostram, respectivamente, duas perspectivas gerais relativas ao campo de deslocamentos e de extensões instalado no pormenor modelado. Nestes mapas coloridos, é perfeitamente visível a distorção criada junto ao início da colagem. Tal como anteriormente introduzido, constata-se que nesta zona de descontinuidade o campo de extensões instalado na estrutura é bastante diferente daquele verificado na fibra óptica. Verifica-se também que, suficientemente longe desta descontinuidade, isto é, mais próximo da zona central, a transmissão de extensões à fibra óptica é praticamente perfeita. Face aos resultados alcançados apresenta-se uma análise de sensibilidade cobrindo as variáveis anteriormente identificadas.

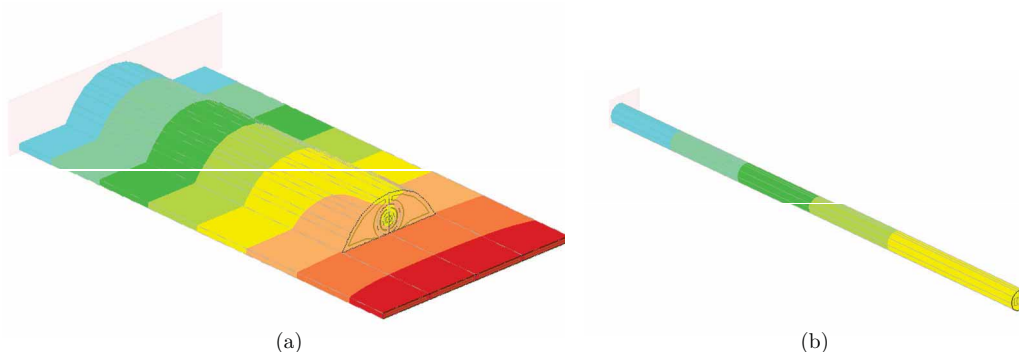


FIGURA 3.10: Perspectivas com os campos de deslocamentos obtidos a partir do modelo numérico: a) meio envolvente; b) fibra óptica.

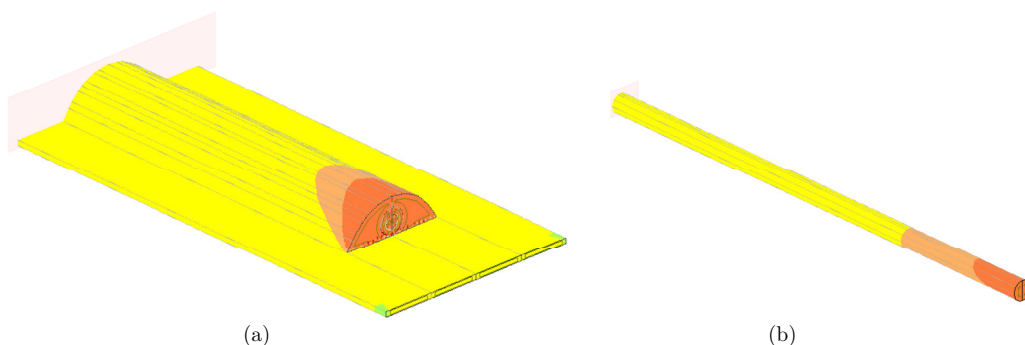


FIGURA 3.11: Perspectivas com os campos de extensões obtidos a partir do modelo numérico: a) meio envolvente; b) fibra óptica.

Na Figura 3.12 pretende-se avaliar o efeito do comprimento de colagem. Representa-se a percentagem da extensão instalada na estrutura,  $\varepsilon_0$ , efectivamente medida pelo sensor,  $\varepsilon_f$ . Recorde-se que foi assumido um desenvolvimento médio do sensor em questão de 10 mm com simetria coincidente com a zona de colagem conforme se representa na Figura 3.9 ( $L_{Bragg}=10$  mm). Constata-se que, por exemplo, a colagem de um sensor com revestimento de poliamida e com uma espessura de adesivo de 0.5 mm, ao longo de um desenvolvimento total de 12 mm, conduz a uma extensão média no sensor que representa 93% da extensão real presente na estrutura.

Na informação contida na mesma figura, verifica-se que para comprimentos de colagem reduzidos, isto é, próximos do desenvolvimento efectivo do sensor, conduzem a perdas significativas na transmissão da extensão. Tal efeito é mais acentuado nas fibras revestidas a acrilato e agrava-se com o aumento da deformabilidade do adesivo, conforme se mostra com os resultados obtidos para duas espessuras,  $e_a$ , distintas (0.1 e 0.5 mm). Verifica-se também que, para cada configuração, existe um comprimento a partir do qual a transmissão é cem por cento efectiva. Aumentar o comprimento de colagem a partir deste valor não trás qualquer melhoria ao desempenho do sensor visto que o sensor está integralmente colado no patamar máximo representado na Figura 3.7. Na globalidade dos casos analisados, conclui-se que a colagem de um comprimento total de 20 mm, isto é estendendo a colagem 5 mm para além de cada extremidade do sensor, leva a resultados suficientemente próximos dos ideais.

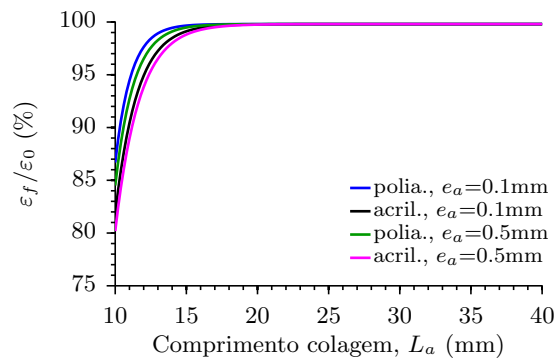


FIGURA 3.12: Percentagem da extensão estrutural representada pelo sensor de Bragg em função do comprimento de colagem ( $E_a = 2.0$  GPa).

Na Figura 3.13 analisa-se, de forma semelhante, a influência da espessura do adesivo alojado sob o sensor. Constata-se que quanto maior a espessura de adesivo, maior o erro patente na transmissão da extensão. Comparando duas situações idênticas, tal efeito torna-se significativamente mais relevante quanto menor for o comprimento de colagem. Repare-se na diferença de resultados associada aos comprimentos de colagem de 10 e 20 mm contemplados. Mais uma vez se conclui que, para comprimentos de colagem suficientemente extensos, a espessura do adesivo deixa de afectar a extensão transmitida ao elemento sensor.

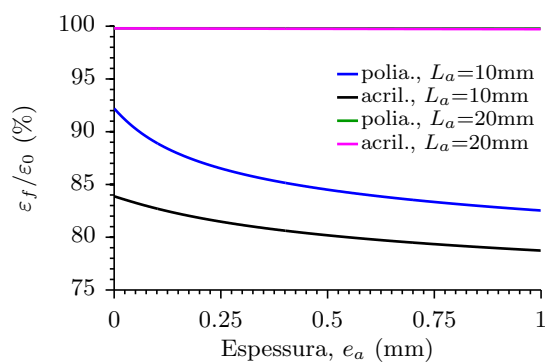


FIGURA 3.13: Percentagem da extensão estrutural representada pelo sensor de Bragg em função da espessura do adesivo ( $E_a = 2.0$  GPa).

Por último, apresenta-se na Figura 3.14 a variação da eficácia da transmissão do campo de extensões em função do módulo de elasticidade do adesivo. No seguimento das conclusões apresentadas, verifica-se que quanto maior a rigidez do adesivo, mais eficazmente se processa a transmissão da extensão. Confirma-se que a utilização de adesivos com elevada deformabilidade conduz a erros significativos quando se está na presença de espessuras consideráveis. Mais uma vez, a adopção de comprimentos de colagem adequados praticamente elimina a dependência relativamente ao módulo de elasticidade em análise.

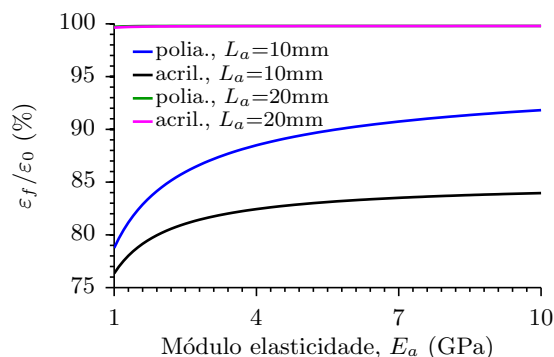


FIGURA 3.14: Percentagem da extensão estrutural representada pelo sensor de Bragg em função do módulo de elasticidade do adesivo ( $e_a = 0.5$  mm).

Análises complementares com base neste mesmo modelo permitiram ainda concluir que a largura de colagem, assim como a espessura de adesivo sobre o sensor têm um impacto muito reduzido no campo de extensões gerado na fibra óptica. Constata-se que a sua variação praticamente não surte efeito na correcta transmissão da extensão estrutural, concluindo-se que, do ponto de vista prático, estes dois aspectos podem ser considerados pouco importantes para o desempenho da colagem.

Em suma, a análise de sensibilidade exposta permitiu concluir que é possível, com recursos a materiais e técnicas de instalação adequadas, instalar sensores de Bragg que

sejam capazes de representar adequadamente a extensão presente na estrutura, admitida constante. Neste âmbito, as fibras com revestimento de poliamida foram aquelas que demonstram melhores resultados. Fruto desta conclusão e conhecidos alguns problemas de fluência associados aos acrilatos, pode-se rejeitar a utilização destes últimos na prática exposta. Fibras com revestimentos primários alternativos, menos rígidos, devem igualmente ser rejeitados para este tipo de aplicação.

A colagem deve ser uniformemente realizada, não só ao longo do comprimento estrito do sensor, mas prolongando-se criteriosamente para além do seu limite. No caso dos sensores de Bragg com 10 mm estudados, recomenda-se a colagem de pelo menos 20 mm de fibra (sensor incluído). O procedimento de colagem deve ser tal que permita o correcto posicionamento do sensor, o uniforme espalhamento do adesivo e a minimização da espessura deste sob o sensor.

Na selecção do adesivo deve ter em conta a sua deformabilidade. Recomenda-se a adopção das soluções com módulos de elasticidade suficientemente elevados. No caso analisado, demonstrou-se que um adesivo com módulo de elasticidade igual ou superior a 4 GPa é no geral adequado. Este último aspecto é importante, visto que a maior parte dos cianoacrilatos e das resinas epóxi revelam deformabilidades em torno dos 4 GPa, pelo que se podem considerar adequadas para esta aplicação.

### 3.4 Técnicas de instalação

Como se verificou na secção anterior, as características geométricas da fibra e a sua diminuta rigidez conduzem a que a compatibilização entre a extensão instalada na estrutura e a extensão verificada no elemento sensor possa ser eficientemente realizada. A selecção do adesivo mais adequado e o procedimento de instalação deve otimizar as condições para compatibilização das supracitadas extensões. Paralelamente, este procedimento de instalação deve ainda garantir a integridade da própria fibra e a protecção mecânica e química da instalação.

Cuidados especiais devem então ser depositados na técnica de instalação. A instalação de sensores em fibra óptica nas estruturas de engenharia civil exige, desta forma, técnicas ligeiramente diferentes daquelas correntemente empregues na indústria mecânica e aeronáutica. As condições presentes em campo são significativamente mais agressivas quer durante a instalação, quer durante a exploração dos sensores. Está-se na presença de acções mecânicas e agentes químicos que não existem em ambientes industriais e laboratoriais mais controlados.

As regras principais para a colagem dos sensores em fibra óptica respeitam, em vários aspectos, os procedimentos preconizados para a instalação dos extensómetros de resistência eléctrica tradicionais. Neste domínio, o autor considera que os procedimentos

preconizados pela Vishay (Vishay, 2010) e pela FiberSensing (FiberSensing, 2010b) são uma boa referência prática. Também na fibra óptica se recomendam procedimentos adequados relacionados com a preparação da superfície da estrutura para a colagem, com o posicionamento do sensor, a aplicação do adesivo, a sua cura e a posterior protecção final (Tennyson, 2001). Expõem-se, neste ponto, os principais aspectos relacionados com a instalação de sensores em fibra óptica por colagem que se foram aperfeiçoando ao longo deste trabalho, tendo por base o referido nas supracitadas instruções.

1. Exige-se a preparação da superfície da estrutura criando condições para suportar o adesivo. Numa primeira fase, é necessário remover qualquer isolamento existente sobre a superfície metálica, nomeadamente qualquer camada de tinta ou primário, assim como, eventuais incrustações ou ferrugem superficial. No final desta operação, deve ficar-se com uma superfície lisa e uniforme, embora não polida. Recomenda-se o recurso a meios abrasivos, como por exemplo, a folhas de lixa e/ou a uma rebarbadora eléctrica para o efeito, conforme se ilustra na Figura 3.15.a).

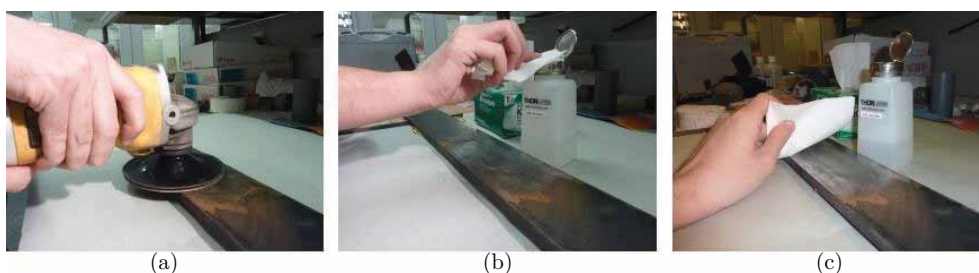


FIGURA 3.15: Técnica de instalação dos sensores FBG num elemento metálico: a) preparação das superfícies; b) emprego de isopropanol em toalhetes; c) limpeza da superfície com isopropanol.

2. Seguidamente, essa mesma superfície deve ser limpa de modo a eliminar as impurezas e óleos presentes. A potencial presença de gordura na superfície deve ser removida com recurso a solventes apropriados. Recomenda-se a utilização de isopropanol, destacando-se por dissolver a generalidade das gorduras e não deixar resíduos após aplicação. A aplicação do solvente deve ser realizada com movimentos únicos e lineares, de forma a evitar o espalhamento das impurezas, com recurso a toalhetes livres de pêlo apropriados, conforme se sugere nas Figuras 3.15.b) e 3.15.c).
3. Finalmente a superfície deve ser tratada e polida de modo a formar, na zona de colagem, uma superfície perfeitamente polida e quimicamente neutra (7.0 a 7.5 pH), favorecendo assim, química e mecanicamente, a ligação do adesivo. O polimento deve ser realizado com a passagem de lixa de água combinada com uma solução condicionadora adequada (ver Figura 3.16.a)). Termina-se a limpeza com o auxílio de gaze impregnada com uma solução alcalina (Figura 3.16.b)). A título indicativo, referem-se as duas soluções de neutralização para utilização e superfícies

metálicas fornecidas pela Vishay: o condicionador *Conditioner A* e o neutralizador *M-Prep Neutralizer 5A*, utilizadas ao longo deste trabalho.

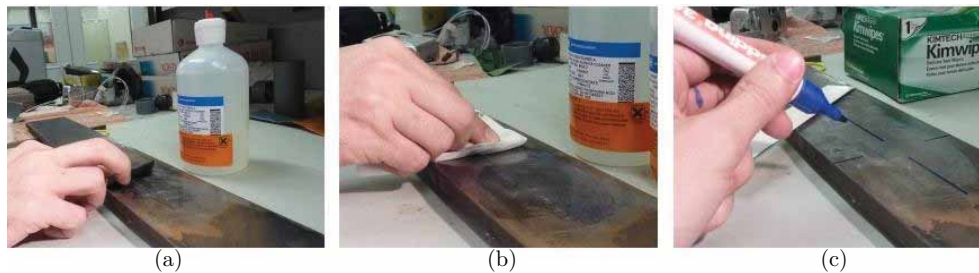


FIGURA 3.16: Técnica de instalação dos sensores FBG num elemento metálico: a) polimento com lixa de água combinada com uma solução condicionadora; b) tratamento químico com gaze impregnada com uma solução alcalina; c) marcações para alinhamento do sensor.

4. Preparada a superfície, segue-se o posicionamento do sensor determinando a sua posição de colagem. Para o efeito, considera-se conveniente a realização de marcações prévias, com o auxílio de um marcador e uma régua, que sirvam de guia para a definição da posição relativa do sensor e do seu alinhamento longitudinal conforme se ilustra na Figura 3.16.c). Todas as marcações devem ser realizadas, tendo em conta o objecto de medição, fora da zona de colagem de forma a não contaminar a superfície anteriormente tratada.
5. O posicionamento e o manuseamento do sensor deve ser sempre realizado com o máximo cuidado tendo em conta a fragilidade da fibra antes de colada. Colocado e centrado nas marcações previamente efectuadas, o sensor necessita de ser pré-fixado na sua posição definitiva, recomendando-se o recurso a fita-cola como meio de fixação provisória durante a colagem. Sugere-se a utilização de uma fita-cola transparente, de largura apropriada, disposta sobre o sensor e se necessário sobre as extremidades da fibra óptica não apoiadas, conforme se mostra nas Figuras 3.17.a) e 3.17.b)

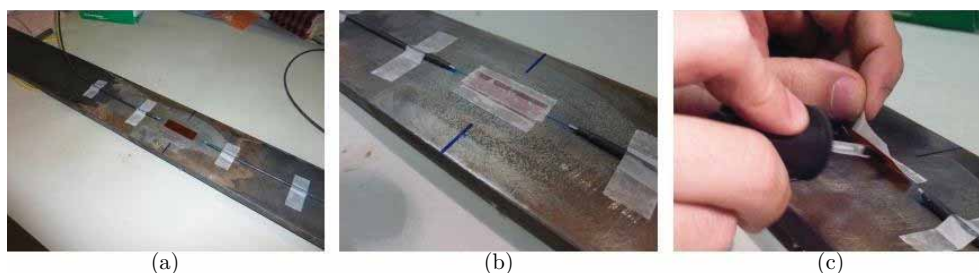


FIGURA 3.17: Técnica de instalação dos sensores FBG num elemento metálico: a) fixação das cabragens com fita-cola; b) pré-fixação do sensor com recurso a fita-cola; c) aplicação do adesivo.

6. Estão reunidas as condições para a aplicação do adesivo na zona do sensor. Para o efeito, parte da fita-cola disposta anteriormente, aderente ao sensor, deve ser

parcialmente descolada de modo a permitir o destacamento do sensor e o espalhamento do adesivo (ver Figura 3.17.c)). A parte da fita-cola que se deixou colada deve assegurar a posição final do sensor assim que terminado o espalhamento do adesivo. Deve ser empregue uma camada uniforme e fina de adesivo, estritamente ao longo do comprimento de colagem.

7. Rapidamente o sensor deve ser recolocado na sua posição definitiva, voltando a aderir a fita-cola previamente destacada. Esta deve ser cuidadosamente pressionada contra o elemento estrutural de forma a expulsar o adesivo em excesso sob o sensor e remover eventuais bolhas de ar retidas junto à fibra, segundo se mostra na Figura 3.18.a). A pressão exercida com os dedos, do centro para a periferia do sensor, deve ser a suficiente para a regularizar o adesivo e assim expulsar o seu excedente.

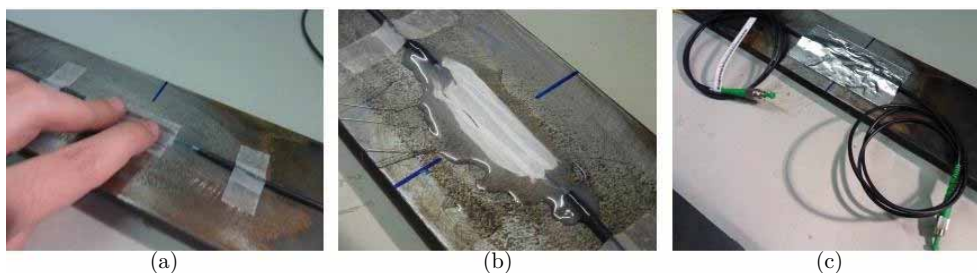


FIGURA 3.18: Técnica de instalação dos sensores FBG num elemento metálico: a) aplicação de pressão para retirar adesivo em excesso; b) camada de protecção de resina epóxi sobre fita de *teflon*; c) protecção química e mecânica final.

8. Terminada a aplicação e regularização do adesivo, inicia-se naturalmente a sua cura. Devem ser respeitadas as condições de temperatura, humidade e pressão indicadas pelo fabricante do mesmo. Estas são muito dependentes do tipo de adesivo utilizado e o seu cumprimento é vital para assegurar não só a correcta resistência do adesivo, mas também a sua futura estabilidade e elevado desempenho.
9. A última fase passa pela protecção mecânica e química do sensor. Nas Figuras 3.18.b) e 3.18.c), mostra-se uma protecção simples baseada na aplicação de uma capa de resina epóxi sobre uma folha de *teflon* previamente disposta em cima do sensor. É no entanto fundamental ajustar o tipo de protecção tendo em conta a durabilidade pretendida e o tipo de ataques químicos e mecânicos que se prevêem presentes durante a exploração da instalação. São exigidas protecções mais completas e duráveis em aplicações mais exigentes.

Do processo anteriormente pormenorizado, salienta-se a importância que recai sobre a selecção do adesivo. A sua possível distorção comprometerá o rigor da medição com uma transmissão deficiente de deformações, podendo ser fonte de erros de sensibilidade, histerese, relaxação e sensibilidade anormal à temperatura.

Deve recorrer-se a adesivos de elevado desempenho, traduzido por uma elevada resistência ao corte, capacidade de resistir às diferentes solicitações químicas e ambientais, assim como, uma elevada estabilidade ao longo do tempo e reduzida fluência e retracção. Em termos mecânicos, deve procurar-se adesivos de elevada rigidez, bem como com coeficientes de dilatação térmica próximos do material estrutural. Outros aspectos, tais como as características da superfície de instalação, a temperatura de serviço, a durabilidade pretendida e o tempo de cura desejado, devem também ser considerados na selecção do adesivo que melhor se adequa.

Destacam-se as propriedades dos adesivos do tipo epóxi e dos cianoacrilatos para as aplicações em campo mais correntes. Enquanto os primeiros visam instalações onde se exige maior durabilidade, como é o caso das monitorizações permanentes, os segundos tornam-se ideais para aplicações de curta duração que podem assim beneficiar dos reduzidos tempos de cura sempre associados aos cianoacrilatos. Estes dois tipos de adesivo vão ser testados ao longo deste trabalho.

Destaca-se ainda a importância atribuída à protecção final da instalação, determinante para o desempenho a longo-prazo do sensor e para a respectiva durabilidade. Esta deve ser uma eficaz barreira, não só contra ataques químicos e mecânicos, mas também contra a insolação. No entanto deve ser uma solução que nada interfira com o campo de extensões presente na estrutura e transmitido ao sensor.

Nos casos mais simples, de curta e média duração, a aplicação de uma capa sobre o sensor, como a apresentada na Figura 3.18, representa um meio simples e eficaz de protecção contra os agentes externos mais comuns. Recomenda-se a utilização de materiais estanques de reduzida rigidez, tais como a borracha de silicone, algumas resinas epóxi e as massas asfálticas de fácil aplicação prática.

Nos casos de natureza permanente, exige-se contudo soluções mais duráveis e com um nível de protecção mais elevado. Diferentes autores têm recorrido à aplicação de um escudo de protecção baseado na cobertura do sensor com bandas de material compósito, materializadas por mantas de fibra de vidro impregnadas em resina (Gebremichael et al., 2005; Costa et al., 2006a; Kister et al., 2007a). O resultado é uma capa rígida e totalmente estanque desligada do sensor, com elevados índices de protecção mecânica e higro-térmica. A interposição de uma placa de cortiça foi adoptada por Costa et al. (2006a) para aumentar o grau de protecção à insolação. Outros autores recorreram à inclusão da instalação no interior de uma caixa plástica ou metálica de protecção com resultados igualmente satisfatórios (Chan et al., 2006).

### 3.5 Avaliação do desempenho de sensores de Bragg através de ensaios laboratoriais

De forma a caracterizar o desempenho real de diferentes sensores de Bragg e das respectivas técnicas de instalação na monitorização de extensões, foi realizada uma campanha de ensaios laboratoriais com vista à avaliação das suas características mais representativas. Estes ensaios vieram simular e avaliar as solicitações e especificações mais frequentes nas aplicações da engenharia civil, cobrindo vários aspectos metrológicos. Foram, para o referido efeito, preparados dois provetes distintos, integrando múltiplos sensores de Bragg quer do tipo I (*bare type*), quer do tipo II (*mini polyimide*), instalados em condições criteriosamente definidas. O primeiro provete foi concebido com o objectivo de realizar uma vasta campanha experimental contemplando um elevado número de sensores do tipo I e dois tipos distintos de adesivo. O segundo provete permitiu avaliar o desempenho dos sensores do tipo II. Apresenta-se uma série de ensaios mecânicos e térmicos para avaliação.

#### 3.5.1 Provede 1: Varão com 20 sensores de Bragg (tipo I)

A configuração do Provede 1 está esquematicamente representada na Figura 3.19, remetendo para um varão de aço A500NR com 20 mm de diâmetro e cerca de 1.30 m de comprimento.

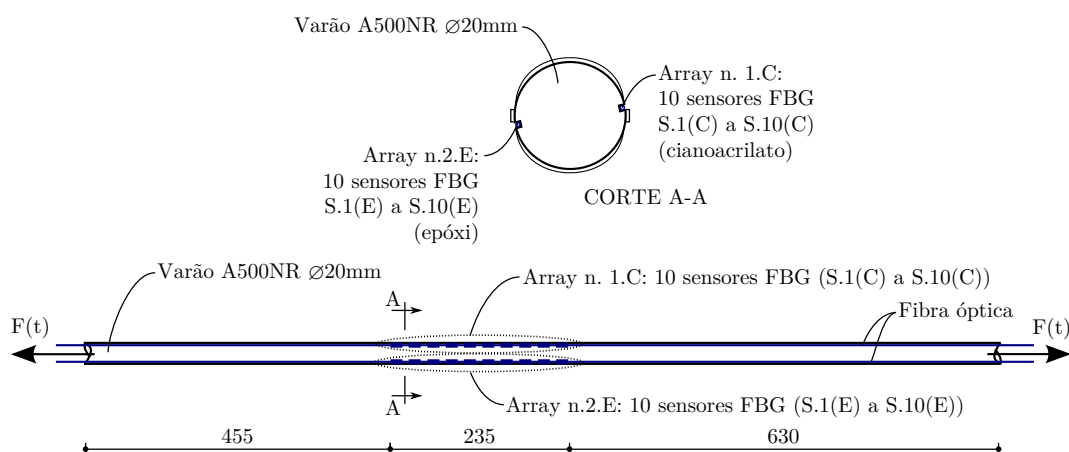


FIGURA 3.19: Representação esquemática do Provede 1 utilizado para avaliação de 20 sensores de Bragg (dimensões em mm).

Este varão foi instrumentado com um total de 20 sensores de Bragg, agrupados em duas séries multiplexadas, denominadas por *arrays*, cada uma compreendendo 10 sensores de Bragg do tipo I, com *recoating* de poliamida, regularmente distribuídos. O conjunto de sensores foi instalado no interior de dois pequenos rasgos longitudinais realizados no varão, com secção aproximada de  $1 \times 1 \text{ mm}^2$ , permitindo acomodar as duas fibras ópticas e os respectivos sensores em duas posições paralelas, diametralmente opostas (ver corte

AA na Figura 3.19). Como referência, representa-se a geometria dos *arrays* de sensores contemplados na Figura 3.20, estando os respectivos comprimentos de onda resumidos na Tabela 3.3. A aquisição simultânea de todos os sensores foi realizada com recurso a uma unidade de leitura da Micron Optics sm130-500.

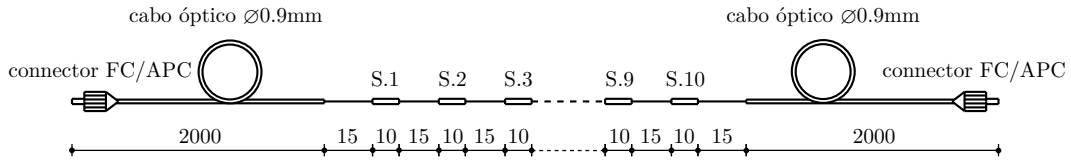


FIGURA 3.20: Configuração esquemática do *array* de sensores instalado no Provete 1 constituído por 10 sensores de Bragg com *recoating* de poliamida (dimensões em mm).

TABELA 3.3: Comprimentos de onda de referência dos sensores de Bragg agrupados pelos dois *arrays* ( $T=20^\circ\text{C}$ ).

Sensor	Comprimento de onda (nm)	
	<i>Array</i> 1 (Cianoacrilado)	<i>Array</i> 2 (Epóxi)
1	1527.711	1528.064
2	1531.168	1531.306
3	1535.498	1535.550
4	1538.941	1539.134
5	1542.616	1543.084
6	1546.864	1547.208
7	1550.330	1550.636
8	1554.937	1555.183
9	1558.423	1558.620
10	1562.740	1562.898

Foram testados dois adesivos distintos utilizados para colar cada uma das séries de sensores. Uma das séries, aqui designada por *Array* 1, foi instalada com recurso a um adesivo de cianoacrilato (Loctite<sup>®</sup> 501). Enquanto o outro conjunto de sensores, denominado por *Array* 2, foi instalado por intermédio de uma resina epóxi, correspondendo ao produto comercial Araldite<sup>®</sup> 2011. Estes dois adesivos de elevado desempenho compreendem um vasto espectro de utilizações, resumindo-se algumas das propriedades mais relevantes na Tabela 3.4.

### 3.5.1.1 Erro de medição

Para avaliar o erro de medição associado ao conjunto de 20 sensores instalados foi realizado um ensaio de tracção uniaxial que decorreu numa prensa servo-controlada, cuja configuração geral se ilustra na Figura 3.21.

TABELA 3.4: Propriedades médias dos dois adesivos utilizados nos testes laboratoriais.

	Loctite® 401	Araldite® 2011
Tipo	Cianoacrilato	Epóxi (2 componentes)
Tempo de cura	20 seg (@T=23 °C)	12 horas (@T=23 °C)
Módulo de elasticidade	6 GPa	2 GPa
Coefficiente de dilatação térmica	107 $\mu\epsilon \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	85 $\mu\epsilon \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$
Resist. ao corte-Aço (ISO4587)	17 MPa	25 MPa
Resist. ao corte-Poliamida (ISO4587)	8 MPa	4 MPa



(a)



(b)

FIGURA 3.21: Vistas gerais dos ensaios de caracterização mecânica visando a avaliação do comportamento dos sensores instalados no Provete 1: a) provete; b) prensa de carga.

A Figura 3.22 mostra a evolução deste ensaio, representando a força e a extensão de tração instaladas ao longo do tempo, perfazendo um ciclo completo de carga e descarga. Foi programada uma carga linear crescente, dimensionada para atingir uma extensão máxima de 1500  $\mu\epsilon$ , e posterior descarga, igualmente linear. Os valores apresentados foram obtidos por intermédio da instrumentação auxiliar de natureza eléctrica de desempenho superior e representam valores de referência que se passarão a comparar com o sistema de medição em fibra óptica.

Os resultados homólogos, obtidos nos sensores de Bragg distribuídos pelas duas séries instaladas, estão representados na Figura 3.23. Para uma comparação mais perceptível do comportamento dos dois adesivos, mostram-se os registos ao longo do tempo dos dois conjuntos de forma separada. É, de qualquer forma, assinalável a concordância obtida no conjunto de 20 sensores, sendo praticamente imperceptível à escala qualquer desvio. De referir que estes resultados foram determinados com base na medição da variação do comprimento de onda e na relação teórica presente na Equação 3.1, tendo-se dispensado, à semelhança daquilo que é corrente na generalidade das aplicações, qualquer calibração prévia. Foi, deste modo, adoptada a sensibilidade preconizada na bibliografia e igualmente prescrita pelo fabricante, correspondente a um factor  $P_e = 0.78 \times 10^{-6} \mu\epsilon^{-1}$ .

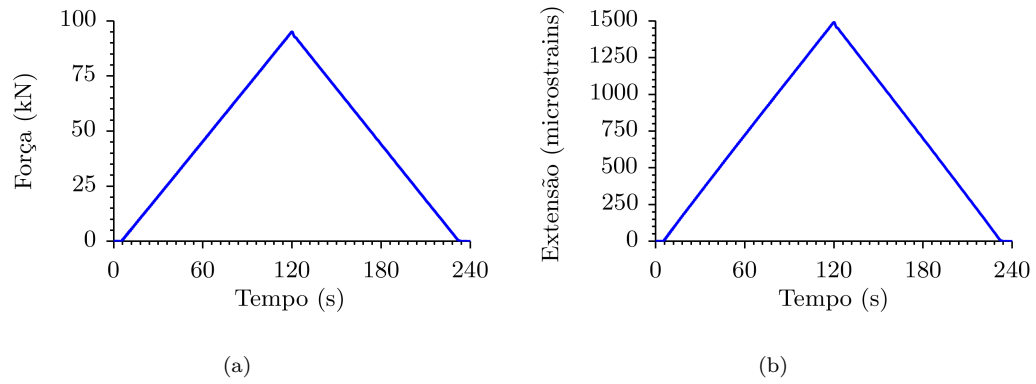


FIGURA 3.22: Ciclo de carga e descarga: a) força; b) extensão imposta.

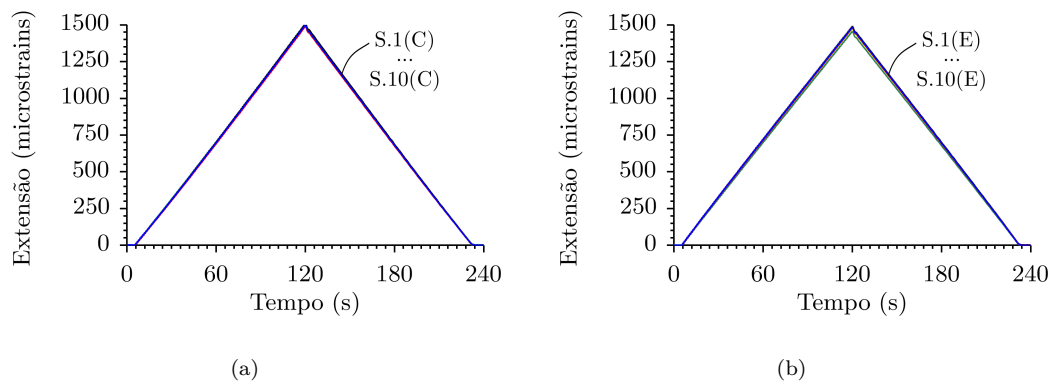


FIGURA 3.23: Ensaio 1: Extensões medidas durante o ensaio: a) sobreposição dos registos obtidos no *array 1*; a) sobreposição dos registos obtidos no *array 2*.

De forma a melhor interpretar e quantificar o erro de medição patente na figura anterior, apresenta-se ainda, na Figura 3.24, a correlação entre extensão imposta,  $\epsilon_0$ , e a correspondente extensão medida por cada um dos sensores,  $\epsilon_m$ . O declive das regressões lineares, bem como a quantificação dos desvios máximos tendo em conta as medidas de referência estão detalhados na Tabela 3.5.

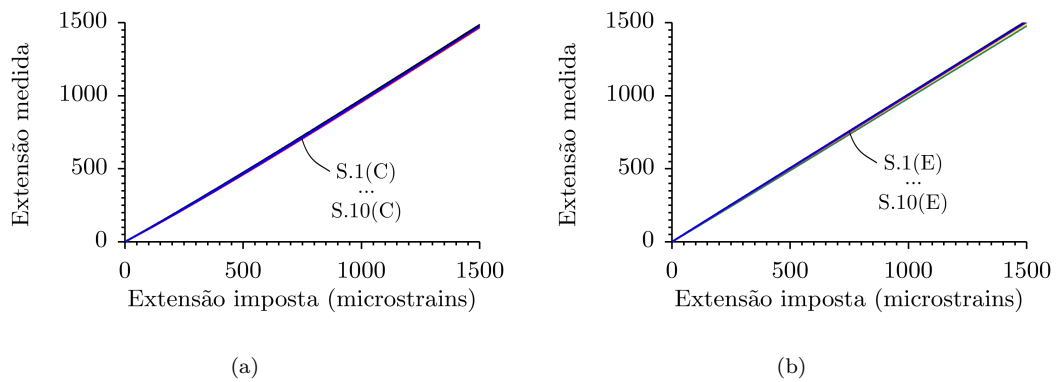


FIGURA 3.24: Correlação entre a extensão medida e a extensão imposta: a) *Array 1*; *Array 2*

TABELA 3.5: Quantificação dos desvios.

Sensor	Array 1		Array 2	
	$\varepsilon_m/\varepsilon_0$	máx $\ \varepsilon_m - \varepsilon_0\ $ ( $\mu\varepsilon$ )	$\varepsilon_m/\varepsilon_0$	máx $\ \varepsilon_m - \varepsilon_0\ $ ( $\mu\varepsilon$ )
1	1.002	10.7	1.004	8.2
2	0.998	15.5	1.001	5.6
3	1.009	8.4	1.006	14.5
4	0.999	13.1	0.996	6.8
5	0.997	16.0	1.009	16.3
6	1.009	7.6	0.997	7.2
7	0.999	10.4	0.999	3.1
8	1.000	8.9	1.000	4.9
9	1.000	6.0	1.012	19.5
10	0.999	3.8	0.986	25.1

Analisando os resultados apresentados, é assinalável, o reduzido erro de medição registado. Neste particular, verifica-se que a amplitude dos respectivos desvios foi inferior a 1.4% quando analisada a totalidade de sensores relativamente aos registos de referência. Em consonância, o erro máximo ficou limitado a 16.0  $\mu\varepsilon$  e 25.1  $\mu\varepsilon$  nos *arrays* 1 e 2, respectivamente.

Simultaneamente, verificou-se que entre os dois conjuntos de sensores, instalados com dois adesivos distintos, a concordância foi praticamente perfeita, não sendo notada qualquer diferença comportamental com significado. Destaca-se a proximidade patente entre o declive da regressão linear do primeiro *array* que ronda  $1.001 \pm 0.006$  e o indicador homólogo do segundo *array* que se centra em  $1.002 \pm 0.014$ . Salienta-se que a repetibilidade obtida, comparando os 20 sensores testados, foi excelente.

### 3.5.1.2 Sensibilidade à extensão

Complementando a análise anterior, procede-se agora a uma avaliação análoga mas no sentido inverso. Neste caso, parte-se do conhecimento da extensão imposta e da medição da variação do comprimento de onda normalizado de cada um dos sensores para determinar a respectiva sensibilidade. Adopta-se assim uma metodologia de calibração. Os resultados obtidos estão ilustrados na Figura 3.25 e detalhadamente quantificados na Tabela 3.6.

Corroborando as conclusões tecidas anteriormente, é assinalável a aproximação entre a sensibilidade obtida e aquela preconizada na bibliografia. Dos 20 sensores analisados retira-se uma sensibilidade média de  $0.781 \pm 0.01$  pm· $\mu\varepsilon^{-1}$ . Todos os sensores evidenciaram linearidade praticamente perfeita traduzida por indicadores  $R^2$  superiores a 0.999.

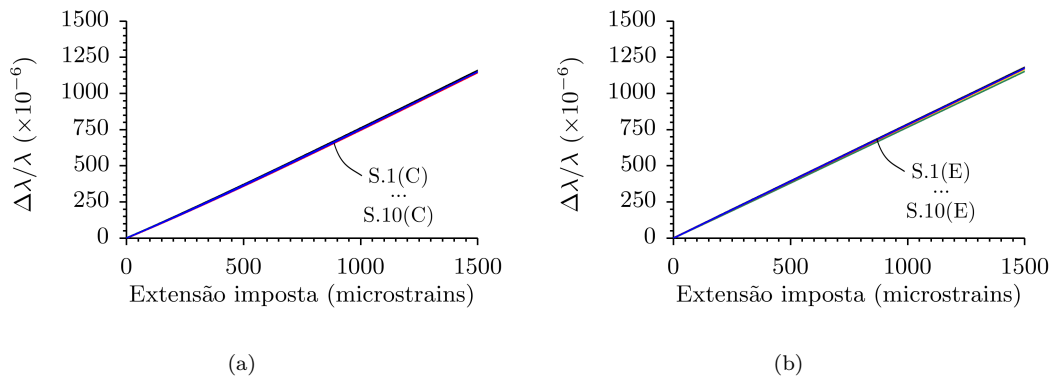


FIGURA 3.25: Correlação entre a variação do comprimento de onda normalizado e a extensão imposta: a) Array 1; b) Array 2 .

TABELA 3.6: Quantificação experimental das sensibilidades à deformação.

Sensor	Array 1		Array 2	
	$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \Delta\epsilon^{-1}$	RMSE( $\times 10^{-6}$ )	$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \Delta\epsilon^{-1}$	RMSE ( $\times 10^{-6}$ )
1	0.782	0.624	0.783	0.737
2	0.778	0.817	0.781	0.642
3	0.787	1.150	0.785	1.207
4	0.779	1.003	0.777	0.782
5	0.778	0.819	0.787	0.652
6	0.787	0.421	0.778	0.682
7	0.780	0.041	0.779	0.573
8	0.780	0.406	0.780	0.782
9	0.780	0.735	0.789	0.692
10	0.779	1.189	0.769	1.120

Apresenta-se igualmente o erro quadrático médio (*root mean square error - RMSE*) relativamente ao modelo de ajuste linear, verificando-se que o valor máximo não ultrapassa  $1.2 \times 10^{-6}$ . Mais uma vez não é perceptível qualquer diferença no comportamento médio das duas soluções analisadas.

### 3.5.1.3 Resposta dinâmica

De forma a avaliar a resposta dos mesmos sensores em regime dinâmico, procedeu-se à realização de um conjunto de ciclos de carga sinusoidal, com amplitude constante e frequência variável. Na Figura 3.26, através de um conjunto de diagramas, apresenta-se o andamento destes ensaios traduzido pelos valores médios obtidos para três frequências distintas de solicitação, respectivamente 0.10, 1.00 e 4.00 Hz. Nesta mesma figura, apresenta-se a análise desses registos no domínio da frequência através dos respectivos espectros de resposta.

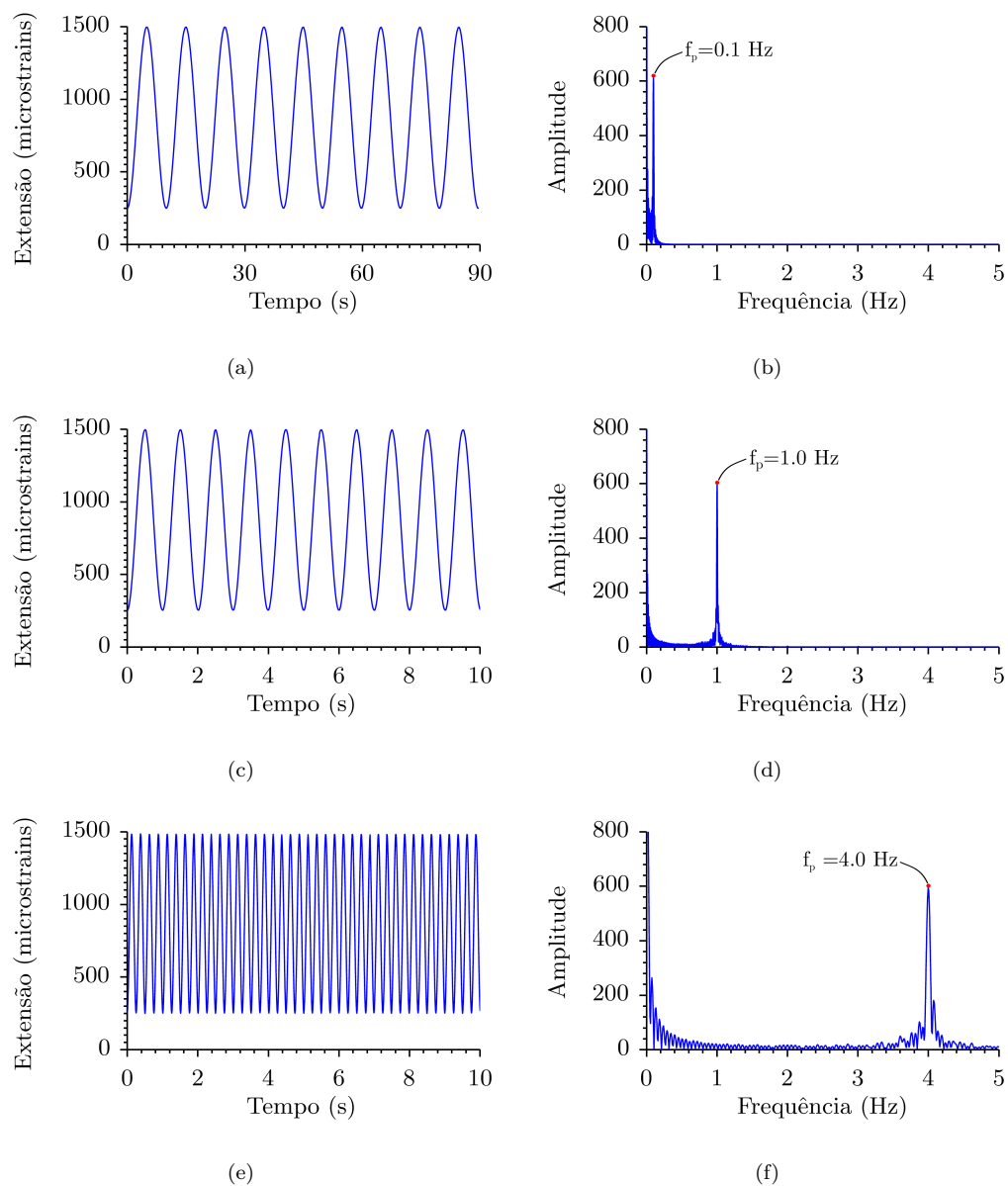


FIGURA 3.26: Ensaio dinâmico: a) ensaio dinâmico 1 ( $f_p=0.1$  Hz); b) FFT ensaio dinâmico 1; c) ensaio dinâmico 2 ( $f_p=1.0$  Hz); d) FFT ensaio dinâmico 2; e) ensaio dinâmico 3 ( $f_p=4.0$  Hz); f) FFT ensaio dinâmico 3.

Da análise dos resultados apresentados, constata-se que ambos os adesivos revelaram comportamentos coincidentes em conteúdo dinâmico. Realça-se a concordância verificada entre os valores de pico do espectro no domínio da frequência e a correspondente solicitação. A aptidão destes sensores para medição de fenômenos dinâmicos, até uma frequência de 4.0 Hz fica assim demonstrada. Faz-se, no entanto, notar que não foi possível, com os meios laboratoriais disponíveis, aplicar, neste ensaio, excitações controladas de maior frequência.

### 3.5.1.4 Histerese e fadiga

De forma a completar os dois testes anteriores, procedeu-se ainda à realização de um conjunto de cem mil ciclos ( $10^5$ ), representando uma função sinusoidal com amplitude de  $1250 \mu\epsilon$  e frequência de 4 Hz, semelhante em forma ao apresentado na Figura 3.26.e). Procurou-se, com este procedimento, avaliar potenciais efeitos de histerese e/ou fadiga presentes nos sensores e respectivos adesivos. A Figura 3.27 mostra os resultados médios revelados pelas duas soluções analisadas, representando a evolução da amplitude média dos ciclos normalizados em cada um dos *arrays*.

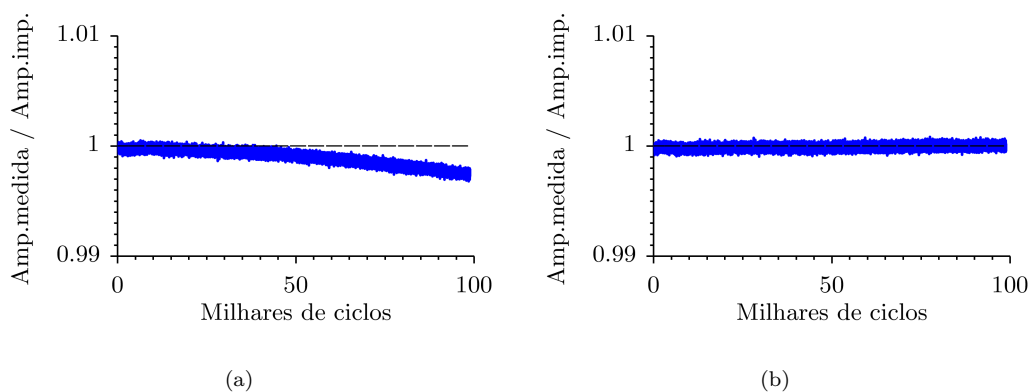


FIGURA 3.27: Ensaio de fadiga: Avaliação da resposta em termos de fadiga: a) resposta média do *array* 1; b) resposta média do *array* 2.

As diferenças comportamentais entre os dois adesivos são agora visíveis. Neste ensaio, verificou-se que os sensores colados com o adesivo de cianoacrilato evidenciaram uma ligeira diminuição na medição da amplitude dos ciclos de carga à medida que o ensaio se foi processando. No final dos cem mil ciclos de carga, a extensão medida correspondia a cerca de 99.8% da extensão original. Este resultado aponta para ténues sinais de fadiga associada ao adesivo de cianoacrilato testado. Em contrapartida, o adesivo à base de epóxi revelou um comportamento constante ao longo de todo o ensaio, não sendo de apontar qualquer sinal de histerese ou fadiga do adesivo.

### 3.5.1.5 Sensibilidade à temperatura

Este mesmo provete foi ainda submetido a um ensaio de caracterização térmica, sob temperatura e humidade controlada no interior de uma câmara climática, conforme se mostra na Figura 3.28. Fez-se variar a temperatura, entre 5 e 40 °C, sob patamares incrementais de 5 °C, com humidade constante e igual a 50%. O registo da temperatura e da humidade relativa durante o ensaio está presente na Figura 3.29.

Relativamente ao desempenho dos sensores de Bragg, mostram-se os resultados obtidos em cada uma das séries de sensores na Figura 3.30, correlacionando a variação de temperatura com a variação do comprimento de onda normalizado de cada sensor. As

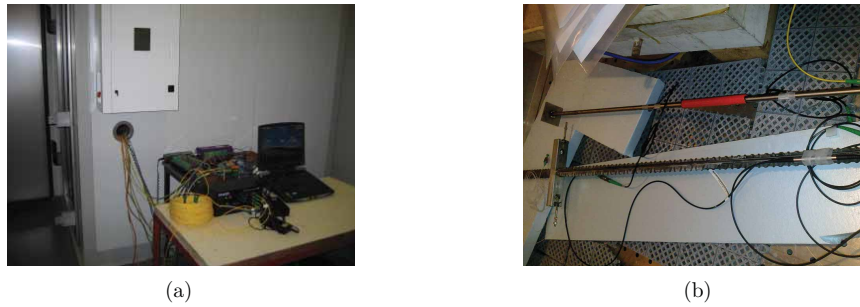


FIGURA 3.28: Ensaio no interior de uma câmara climática para avaliação dos efeitos da temperatura: a) vista geral da câmara (*walk-in*) e do equipamento de leitura; b) provete ensaiado, entre outros sensores, no interior da câmara.

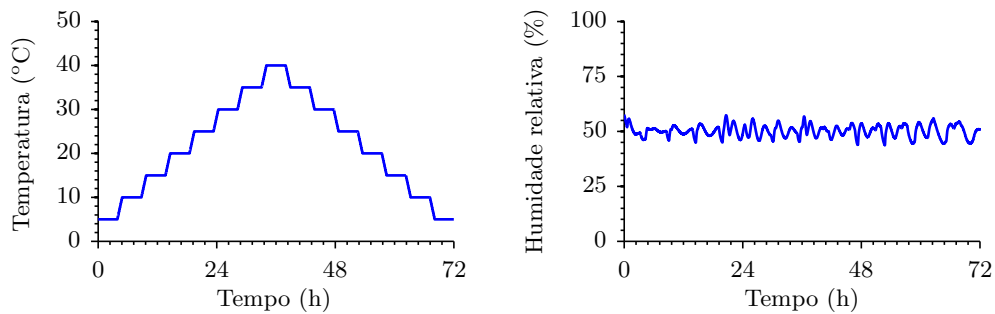


FIGURA 3.29: Evolução da temperatura e da humidade durante o ensaio.

respectivas sensibilidades à temperatura, bem como os erros quadráticos médios associados ao ajuste linear estão indicados na Tabela 3.7.

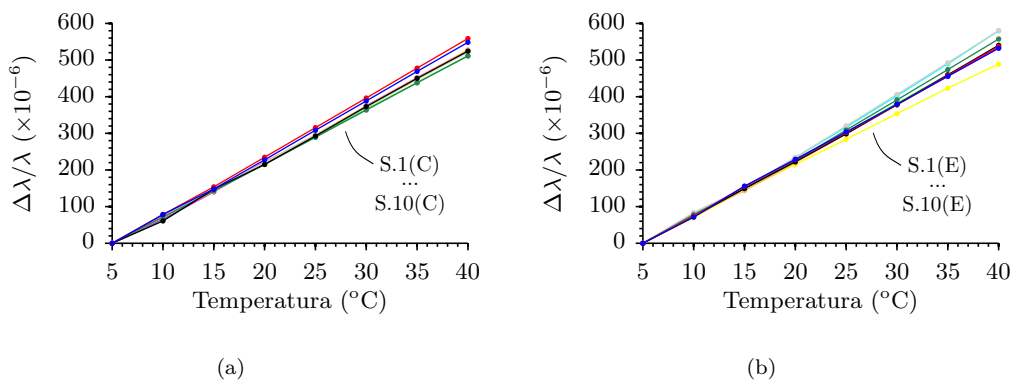


FIGURA 3.30: Correlação entre a variação do comprimento de onda normalizado e a temperatura: a) *Array 1*; b) *Array 2*.

Analisando a resposta dos sensores perante variações de temperatura, fica patente uma excelente linearidade entre a variação de temperatura e a variação do comprimento de onda normalizado dos sensores. A sensibilidade média exibida por cada um dos *arrays* corresponde a  $15.15 \pm 0.68$  e  $15.48 \pm 1.28$   $\text{pm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ .

TABELA 3.7: Quantificação experimental das sensibilidades à temperatura.

Sensor	Array 1		Array 2	
	$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \Delta T^{-1}$	RMSE ( $\times 10^{-6}$ )	$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \Delta T^{-1}$	RMSE ( $\times 10^{-6}$ )
1	15.69	3.2	15.216	2.2
2	15.99	2.0	15.29	2.1
3	15.16	4.5	15.42	3.6
4	15.12	4.2	16.51	6.3
5	15.18	4.2	15.21	1.5
6	15.01	2.5	14.00	2.4
7	14.65	1.0	15.30	1.7
8	15.11	2.3	15.31	4.2
9	14.92	1.5	16.56	6.0
10	14.63	1.4	15.93	4.7

Verifica-se que sensibilidades obtidas diferem em cerca de 2.2% quando comparados os valores médios revelados pelos dois adesivos. Repare-se que este é um desvio bastante superior ao desvio observado na análise da sensibilidade à extensão. Também analisando a dispersão de sensibilidades ao longo de cada *array* se verificam diferenças assinaláveis. Os respectivos coeficientes de variação correspondem a 2.8% e 4.8% para os *array 1* e *array 2*, respectivamente.

Relativamente às diferenças comportamentais observadas, refere-se o possível efeito do adesivo, sendo de assinalar as diferentes espessuras e os diferentes coeficientes de dilatação térmica envolvidos. Dos resultados obtidos, o adesivo de cianoacrilato foi aquele que revelou um comportamento mais uniforme. Em todo o caso, o desvio observado é compatível com o rigor pretendido na maioria das aplicações práticas onde se esperam amplitudes térmicas também bastante inferiores.

Relativamente aos valores da sensibilidade à temperatura que se estão a discutir, importa ainda referir que estes reflectem não só a sensibilidade intrínseca dos sensores de Bragg à temperatura, mas também a extensão térmica do material do provete. Tendo em conta o valor médio determinado e a sensibilidade resultante da Equação 2.6, pode-se estimar um coeficiente de dilatação térmica para o material do provete de  $11.52 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ . Este é um valor perfeitamente enquadrado com as especificações do aço de carbono utilizado.

Os resultados expostos alertam, no entanto, para a elevada sensibilidade à temperatura deste tipo de sensores, nomeadamente quando instalados em elementos metálicos. Esta deverá ser tida em conta sempre que se pretende avaliar deformações na presença simultânea de variações de temperatura. Exige-se uma metodologia de compensação dos efeitos térmicos. O procedimento sugerido ao longo deste capítulo passa pela medição da temperatura com recurso a um ou vários sensores adicionais e pela correcção linear da

extensão aparente mediante a sensibilidade retratada na Figura 4.26 ou traduzida pela Equação 2.6 se for conhecido o coeficiente de dilatação térmica do material estrutural.

### 3.5.2 Provetete 2: Viga com sensores de Bragg (tipo II)

O segundo provete foi desenvolvido para teste de sensores, igualmente de Bragg, mas integrados numa base de poliamida para colagem superficial (ver tipo II na Figura 3.4). Este provete, esquematicamente representado na Figura 3.31, veio a consistir numa barra de aço, com dimensões de  $800 \times 80 \times 10 \text{ mm}^3$ , na qual foram instalados vários sensores de Bragg na sua secção média. Para esta análise, foram seleccionados dois sensores de Bragg semelhantes, isto é, com idêntico comprimento de onda inicial e idênticas dimensões para uma análise comparativa. Tal como se tinha procedido no provete anterior, foram experimentados dois tipos de adesivos distintos (Araldite<sup>®</sup> 2011 e Loctite<sup>®</sup> 401). Este provete foi também submetido a um conjunto de ensaios mecânicos e posteriormente a um ensaio de caracterização térmica.

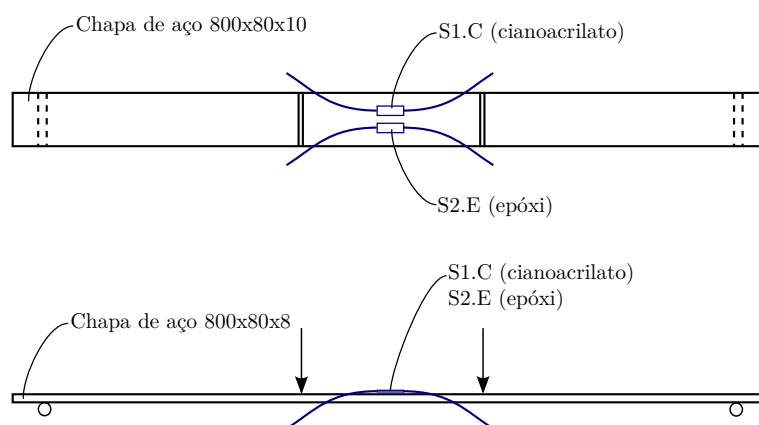


FIGURA 3.31: Configuração esquemática do Provetete 2.

#### 3.5.2.1 Sensibilidade à extensão

Para determinar e comparar a sensibilidade à extensão dos dois sensores, procedeu-se a um carregamento estático, por intermédio de patamares de carga, submetendo a zona na qual foram colados os sensores a um estado de flexão circular pura. O procedimento de carga está patente na Figura 3.32, sendo possível visualizar o provete e o esquema de aplicação da carga na prensa servo-controlada utilizada para o efeito.

Na Figura 3.33 apresentam-se os resultados mais pertinentes, onde se correlaciona a extensão imposta com a variação do comprimento de onda normalizado de cada sensor. Tratando-se de um ensaio estritamente estático, foram utilizados os valores médios de cada patamar. É então de salientar a linearidade observada entre a extensão imposta e

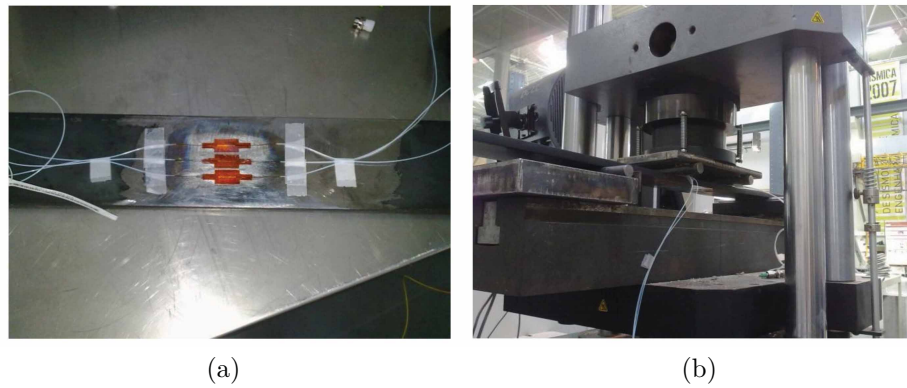


FIGURA 3.32: Vistas gerais dos ensaios de caracterização mecânica do comportamento dos sensores instalados no Provete 2: a) provete instrumentado; b) esquema de carga.

a respectiva variação do comprimento de onda normalizado. Ambos os sensores apresentam uma linearidade praticamente perfeita traduzida por um indicador  $R^2$  superior a 0.9999. As sensibilidades obtidas correspondem a  $0.779$  e  $0.782 \times 10^{-6} \mu\epsilon^{-1}$  para os sensores colados com cianoacrilado e epóxi, respectivamente. Também com esta solução, fica patente, em ambos os casos, uma excelente aproximação à sensibilidade teórica indicada na Equação 2.6, sendo o desvio observado em termos de sensibilidade efectiva inferior a 0.25%.

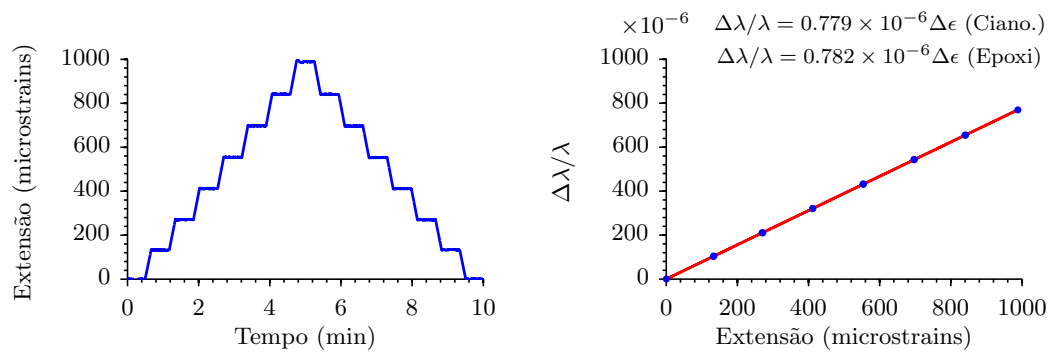


FIGURA 3.33: Resultado dos ensaios laboratoriais realizados com vista à avaliação dos sensores perante uma deformação imposta.

### 3.5.2.2 Sensibilidade à temperatura

Na Figura 3.34, apresentam-se, de forma semelhante, os resultados obtidos no ensaio de caracterização térmica, onde está correlacionada a variação de temperatura e a variação do comprimento de onda normalizado dos dois sensores. Mais uma vez a resposta obtida é ligeiramente diferente quando comparadas as duas soluções. Realça-se a menor sensibilidade demonstrada pelo adesivo de cianoacrilato, cerca de 3.7% inferior à solução

colada com a epóxi. Estes resultados confirmam a tendência também observada no Provet 1. Remete-se a justificação desta diferença para as características dos dois adesivos e para as respectivas espessuras de colagem.

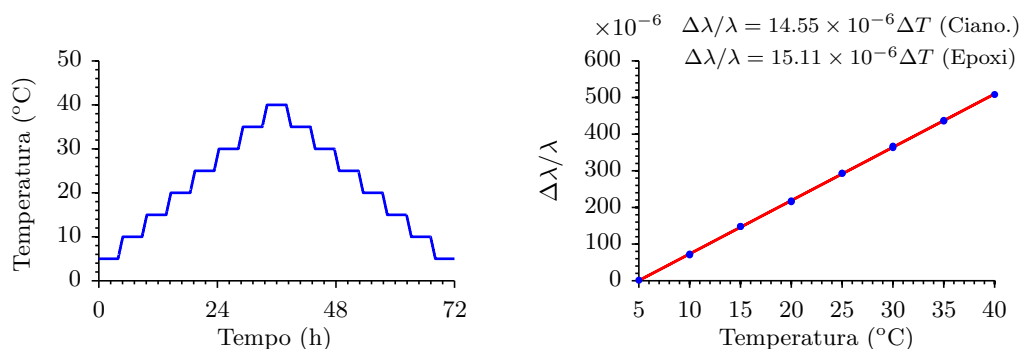


FIGURA 3.34: Resultado dos ensaios laboratoriais realizados com vista à avaliação dos sensores perante variações de temperatura.

Resumindo os resultados alcançados, conclui-se que as duas tipologias de sensores, os referidos procedimentos de colagem e os respectivos adesivos apresentam características adequadas para a medição de extensões estruturais. Em todos os casos, verificou-se ser possível dispensar qualquer calibração prévia com erros de medição, no geral, inferiores a 1.4%. É igualmente válido afirmar que os resultados obtidos ultrapassam o desempenho geralmente observado nos extensómetros de resistência eléctrica alternativos.

## 3.6 Aplicação prática na reabilitação da Ponte Eiffel

### 3.6.1 Enquadramento geral

No projecto de novas estruturas, os modelos numéricos são suficientemente robustos e realistas para poderem ser usados na estimativa dos esforços potencialmente instalados nos diferentes elementos estruturais. Diferentes formulações de elementos finitos, passando por análises lineares elásticas até complexos modelos não-lineares, fornecem soluções expeditas e conservativas para fins de projecto. O cumprimento final de prescrições regulamentares assegura a aplicabilidade desses modelos e, conseqüentemente, a segurança das soluções projectadas.

Porém, na análise de estruturas existentes, a abordagem tem de ser necessariamente diferente. A informação proveniente da modelação numérica não é realista se, na prática, forem ignoradas as condições reais presentes na estrutura. Avarias, danos, alterações nas condições de apoio, entre outras, podem condicionar significativamente o comportamento da estrutura, desviando-o das previsões numéricas. Efectivamente, o modelo de análise mais realista é, nestes casos, a própria estrutura (Bhattacharya et al., 2005).

Considera-se portanto que análise experimental das estruturas existentes, nomeadamente aquelas que apresentam significativas deficiências, é crítica para uma correcta avaliação do comportamento efectivo da estrutura, para a programação da sua manutenção e para o projecto sustentado da sua reabilitação.

A aplicação prática que se passa a apresentar procura demonstrar as potencialidades dos sensores anteriormente apresentados numa aplicação efectiva, reportando o caso da monitorização estrutural de uma ponte metálica em reabilitação. Foca-se esta Secção na monitorização desenvolvida durante a reabilitação estrutural da centenária Ponte Eiffel, sobre o rio Lima, em Viana do Castelo, onde se recorreu a diferentes campanhas de monitorização de curta-duração baseadas em sensores de Bragg para avaliar a condição e o comportamento da estrutura. Tendo em conta o âmbito proposto, destaca-se o tipo de instrumentação aplicada e os seus objectivos, assim como se apresentam os resultados alcançados, avaliando o desempenho deste tipo de instrumentação óptica e concomitantemente o comportamento da referida estrutura.

### 3.6.2 A Ponte Eiffel

Em meados do século XIX, com o advento do desenvolvimento industrial na região Norte de Portugal, tornou-se necessário melhorar as condições para ligação de duas importantes regiões, criando condições para uma nova travessia ferroviária, integrada na Linha do Minho, e melhorando as condições de circulação rodoviária, condicionadas por uma velha ponte de madeira obsoleta. Em 1876, foi então dado início ao processo de projecto e construção de uma nova ponte sobre o rio Lima, em Viana do Castelo. Estava-se a dar início ao processo que havia de culminar com a construção de uma notável obra de engenharia posta ao serviço de um empreendimento da maior importância para o desenvolvimento da cidade e de toda a região de Viana do Castelo.

A agora denominada Ponte Eiffel foi apresentada pela famosa Casa Gustave Eiffel & C.<sup>a</sup>, de Paris, sob projecto do próprio Gustave Eiffel, um dos mais audaciosos engenheiros do mundo do século XIX. Este concebeu uma ponte ferroadoviária de tabuleiro duplo, sobreposto, que visava a circulação de veículos rodoviários a um nível superior e de veículos ferroviários à cota inferior. O projecto apresentado mereceu parecer favorável do governo central, tendo sido rapidamente dado início à construção da ponte que veio a ser inaugurada em 1878, cerca de dois anos depois do início da construção.

Hoje em dia, a importância desta estrutura mantém-se perfeitamente actual ao serviço do trânsito local de veículos rodoviário e ao serviço da linha ferroviária do Minho. A sua importância apresenta hoje valores acrescentados relacionados com o seu valor enquanto património municipal classificado, sendo esta um belíssimo exemplar da arquitectura do ferro do século XIX que proliferou um pouco por todo o mundo.



FIGURA 3.35: Vista actual da Ponte Eiffel, mantendo a traça original, 130 anos após a sua inauguração.

### 3.6.3 Solução estrutural original

A configuração geral da Ponte Eiffel está ilustrada nas duas imagens que compõe a Figura 3.35. Em termos de implantação, a ponte é composta por um conjunto de 10 tramos contínuos que lhe permitem vencer um comprimento total de 562 m, segundo uma divisão regular que confere uma extensão de 47 m aos tramos extremos e 58.5 m aos vãos intermédios. Apoiada nos pilares intermédios e nos dois encontros de alvenaria, ergue-se a estrutura portante principal materializada por duas vigas metálicas treliçadas paralelas. Estas duas treliças, afastadas de 5.20 m, apresentam uma altura constante de 7.50 m e compreendem as respectivas cordas superiores e inferiores e um conjunto vasto de diagonais orientadas segundo duas direcções (ver Figura 3.36.a)) que descarregam nos pilares através dos respectivos montantes suportados em aparelhos de apoio rotulados (REFER, 2007).

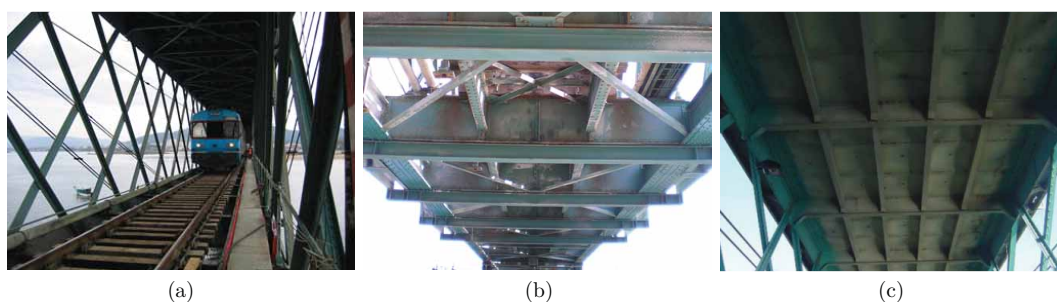


FIGURA 3.36: Pormenores da estrutura da Ponte Eiffel: a) vista geral das duas treliças; b) tabuleiro inferior; c) tabuleiro superior (antes da reabilitação).

O tabuleiro inferior mantém praticamente intacta a solução estrutural inicial, consistindo numa grelha formada por carlingas e longarinas coincidentes com a posição dos carris, conforme se mostra na Figura 3.36.b). Tanto as carlingas como as longarinas, ainda originais, possuem uma secção transversal composta em I, obtida com chapas e cantoneiras solidarizadas por rebites.

Por sua vez, o tabuleiro superior tem sofrido sucessivas alterações ao longo da história da ponte. A solução inicial, que consistia num estrado de madeira, foi substituída em 1922,

sendo então construída uma laje mista aço-betão. Esta laje, que foi mantida até à última reabilitação de 2004, era constituída pela chapa copada que serviu de cofragem perdida e por uma camada de betão de espessura variável entre 15 e 20 cm, apoiada numa malha de carlingas, INP400, e longarinas secundárias, INP300 (ver Figura 3.36.c)).

Todos os elementos metálicos originais são em ferro puddado (*wrought iron*), material de transição entre o ferro e o aço actual, utilizado à época da construção. Ensaios de caracterização mecânica realizados recentemente permitiram determinar um módulo de Young médio de 180 GPa e tensões limite de proporcionalidade e última de 265 MPa e 285 MPa, respectivamente (Lisconcebe, 2007). Seguindo a prática corrente da época, todas as barras metálicas estruturais originais, nomeadamente as cordas e diagonais, apresentam secções em T compostas pela combinação de cantoneiras e de chapas de altura e espessura variável solidarizadas por intermédio de rebites. Todas as restantes ligações, entre os diferentes elementos estruturais, são igualmente formadas por rebites cravados.

### 3.6.4 Reabilitação estrutural

No historial da ponte, é de assinalar a intervenção de 1989, quando foi realizado o maior reforço efectuado na estrutura até à data. Para aumentar a capacidade de carga associada ao tráfego rodoviário, foi então instalada uma solução de pré-esforço exterior, materializado por varões de aço de alta resistência, inflectindo nas secções sobre os pilares com o objectivo de compensar o peso próprio da estrutura. Somente em 2004, se viria a dar início a uma nova empreitada de reabilitação e reforço que se passa a apresentar.

Em Novembro de 2004, com o objectivo de aumentar a capacidade de tráfego rodoviário na Ponte Eiffel, melhorando igualmente os seus níveis de segurança e conforto, foi então lançado um concurso para o projecto de reabilitação e alargamento do respectivo tabuleiro rodoviário. Este projecto previa inicialmente apenas a substituição do referido tabuleiro. Contudo, após início dos primeiros trabalhos, foi detectado um avançado estado de corrosão instalado globalmente ao nível das duas cordas superiores conforme se mostra na Figura 3.37. Foi então necessário reformular o projecto de reabilitação fazendo face ao novo cenário detectado. Toda a reabilitação estrutural que se seguiu veio a revelar-se particularmente complexa uma vez que a circulação ferroviária teve de permanecer activa durante toda a empreitada.

Algumas das principais tarefas levadas a cabo no âmbito da referida reabilitação estão ilustradas na Figura 3.38. Destaca-se o alargamento da plataforma rodoviária acarretando a substituição do tabuleiro superior, misto aço-betão, por novos módulos metálicos instalados sobre a estrutura portante principal (REFER, 2007). O novo tabuleiro passou a ser constituído por uma solução do tipo estrado, em que cada módulo, com 3.84 m de



FIGURA 3.37: Sinais de corrosão avançada instalada nas cordas junto do tabuleiro superior da ponte.

comprimento e 8.20 m de largura, funciona individualmente, sem continuidade, simplesmente apoiado nas vigas principais (ver Figura 3.38.c)). Esta operação incluiu não só a demolição da laje existente, mas também a remoção das longarinas secundárias que lhe serviam de suporte (ver Figura 3.38.a)).

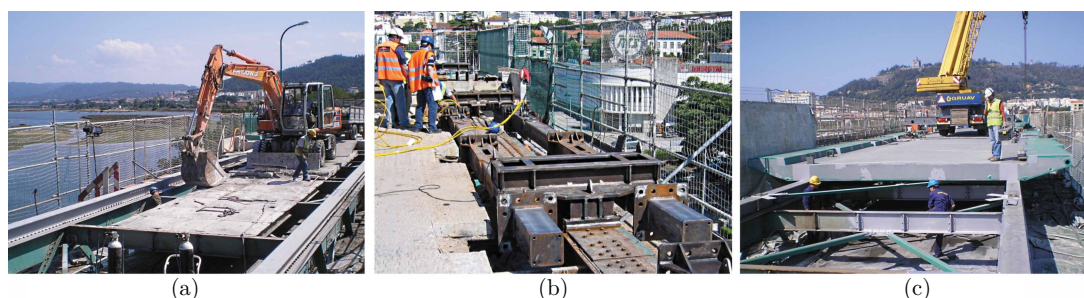


FIGURA 3.38: Vistas dos principais trabalhos levados a cabo durante a reabilitação: a) remoção do tabuleiro misto aço-betão; b) estrutura temporária para aplicação de força durante a substituição das banzos das cordas superiores; c) instalação dos novos módulos metálicos.

Devido à necessidade intervir sobre as cordas superiores da estrutura, atendendo ao seu avançado estado de corrosão, foi prescrita a substituição integral das chapas que materializavam o seu banzo superior. Desta forma, as chapas corroídas, com espessura variável até 40 mm, foram substituídas por uma secção composta de área equivalente, constituída por um perfil HEB300 soldado sobre uma chapa de  $420 \times 12 \text{ mm}^2$ . De forma a não desvirtuar o funcionamento da secção composta, os novos elementos introduzidos foram igualmente rebitados às cantoneiras originais mantendo a tipologia das ligações originais nas novas ligações alma-banzo. Refira-se que esta substituição acabou por ser a tarefa de reabilitação estrutural mais complexa.

Durante a substituição dos elementos acima referidos, para evitar a introdução de deformadas definitivas na ponte e de forma a assegurar uma rigidez estrutural que permitisse manter a exploração ferroviária foi utilizada uma estrutura provisória adicional, provida de um sistema activo com macacos hidráulicos de duplo êmbolo (ver Figura 3.38.b)). Este sistema temporário visava a aplicação de forças controladas, aplicadas junto às cordas superiores, em segmentos de 8 m onde se procedia à substituição faseada dos referidos banzos. Procurava-se aplicar, localmente, um esforço equivalente e de sinal

oposto ao instalado nos elementos a remover de forma a garantir a sua substituição com esforços nulos, sem reduzir a rigidez da estrutura e sem induzir qualquer deformada permanente (Lisconcebe, 2007; Rodrigues e Rodrigues, 2007).

Finalizada a montagem do novo tabuleiro, no que concerne ao pavimento rodoviário, foi instalada uma camada de desgaste, com cerca de 5 mm de espessura, formada por um polímero betuminoso à base de resina de epóxi curada com poliamida contendo cargas minerais (Sigma® ColturaTEP® 8320).

De forma independente, foi ainda contemplada a substituição integral dos aparelhos de apoio originais, procedendo-se simultaneamente à consolidação das fundações com colocação de enrocamento em redor de todos os pilares, assim como ao reforço dos pilares com a injeção de calda de cimento no interior da alvenaria e com a adição de uma cinta de aço inoxidável no seu topo (Appleton et al., 2009). Finalmente, a infraestrutura foi ainda submetida a uma pintura geral e foi contemplada a substituição de vários equipamentos secundários, tais como juntas de dilatação, drenagens, candeeiros e guarda-corpos.

### 3.6.5 Monitorização durante a reabilitação estrutural

O projecto de reabilitação da ponte Eiffel, que decorreu essencialmente entre Fevereiro de 2005 e Outubro de 2007, complementado por trabalhos ligeiros até 2010, foi suportado pontualmente por campanhas de monitorização estrutural. Estas campanhas surgiram em diferentes fases da empreitada, nomeadamente antes do início da reabilitação, durante as fases mais críticas que se seguiram, durante um ensaio de carga final e, posteriormente, durante a reabilitação do piso rodoviário. Na Tabela 3.8, resumem-se as principais fases referidas.

TABELA 3.8: Fases da monitorização estrutural levada a cabo na Ponte Eiffel.

Fase	Elementos estruturais monitorizados	N. de secções	N. de sensores
I: Início da reabilitação	Cordas superiores e inferiores	3	19
II: Reforço e substituição das cordas superiores	Cordas superiores	3	15
III: Ensaio de carga	Cordas superiores e inferiores, diagonais, longarinas, tabuleiro	8	32
IV: Reparação do pavimento rodoviário	Pavimento rodoviário	2	14

Com o objectivo de dar resposta a dúvidas específicas dos vários intervenientes, nomeadamente da equipa projectista, do empreiteiro e do dono de obra, entendeu-se conveniente proceder a campanhas de monitorização de extensões mecânicas em elementos críticos perante diferentes cenários estruturais e diferentes solicitações. Repartidos por

quatro fases distintas, onde se procedeu a campanhas de monitorização estrutural de curta-duração, foi então instalado um total de 80 sensores repartidos pelos elementos estruturais mais críticos. Na Figura 3.39, mostram-se alguns contornos da instalação destes sensores na estrutura.



FIGURA 3.39: Vistas gerais da instalação dos sensores de Bragg na Ponte Eiffel.

Foram utilizados sensores de Bragg do tipo II, contendo uma base de poliamida, nas fases I a III colados directamente na superfície dos principais elementos estruturais. Por sua vez, na fase IV, dada a especificidade da instalação, recorreu-se a sensores do tipo I, agrupados em *arrays* com *recoating* de poliamida. Em todas as fases foi utilizado um adesivo de cianoacrilato (Loctite<sup>®</sup> 401), permitindo o início das campanhas de monitorização poucas horas após a instalação dos sensores.

Ao longo das várias campanhas de monitorização, foram adoptadas diferentes frequências de aquisição, compatíveis com a componente dinâmica da solicitação em causa. Em cada fase, procedeu-se a esquemas de multiplexagem em série de forma a dividir o conjunto de sensores inquiridos pelo máximo de quatro canais disponíveis na unidade de leitura (Micron Optics sm130-500). Um interface de visualização gráfica, especificamente desenvolvido, permitiu acompanhar a evolução em tempo-real de cada fase monitorizada, conforme ilustra a Figura 3.40.

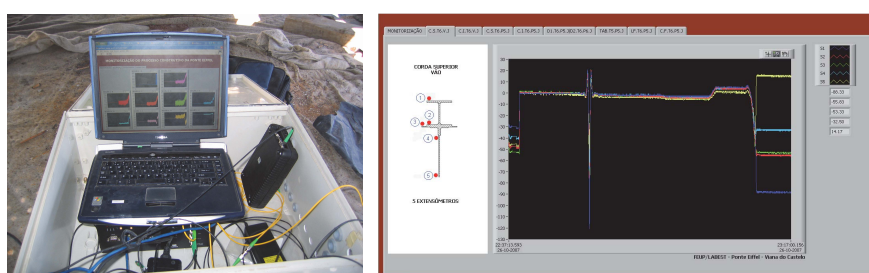


FIGURA 3.40: Visualização em tempo real dos resultados das campanhas de monitorização.

### 3.6.5.1 Monitorização no início dos trabalhos de reabilitação (Fase I)

No início dos principais trabalhos de reforço estrutural, tornou-se crítico para o projectista e para as demais entidades envolvidas, a avaliação do comportamento inicial da estrutura, nomeadamente ao nível dos esforços introduzidos pelo tráfego ferroviário.

Pretendia-se ainda avaliar o efeito da remoção do tabuleiro rodoviário na magnitude e na distribuição das tensões nas cordas superiores principais. Era de igual forma importante, durante esta fase, afirmar o comportamento das cordas principais enquanto elementos compostos, designadamente na distribuição das extensões ao nível da secção transversal.

Programou-se então uma primeira campanha de monitorização e procedeu-se à observação da resposta da estrutura perante a passagem de tráfego ferroviário representativo em duas fases distintas: numa primeira fase, com a estrutura intacta no que diz respeito ao tabuleiro rodoviário e, numa segunda fase, com o referido tabuleiro desligado das vigas principais depois de removida uma faixa de tabuleiro em torno de cada uma das vigas (ver Figura 3.38). Instrumentaram-se, com sensores de Bragg, duas secções da corda superior e uma secção da corda inferior, cobrindo uma zona junto ao apoio e outra a meio do primeiro vão da estrutura, conforme se representa na Figura 3.41. Procedeu-se então a várias campanhas de leitura durante a passagem de comboios correntes, cujo tráfego, embora condicionado, se manteve activo durante a reabilitação da ponte.

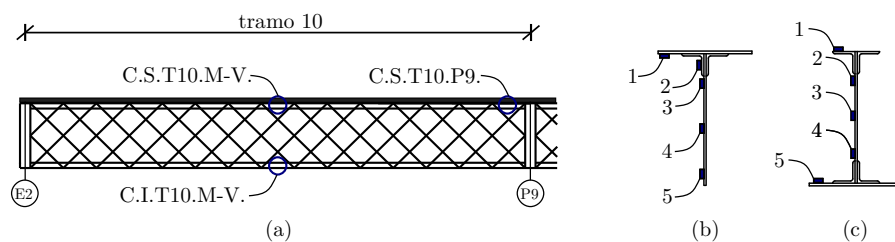


FIGURA 3.41: Instrumentação da Fase I: a) alçado com a posição relativa das diferentes secções instrumentadas; b) secção C.S.T10.M-V. com disposição e nomenclatura dos sensores; c) secção C.I.T10.M-V. com disposição e nomenclatura dos sensores.

Apresenta-se, na Figura 3.42.a), a extensão medida ao nível do banzo da corda superior na secção de meio-vão (sensor 1 na secção C.S.T10.M-V. (ver Figura 3.42)) durante a passagem de múltiplos comboios nas diferentes condições estruturais indicadas.

Sobre estes resultados, importa fazer a separação entre as passagens correspondentes às linhas i) a iv), daquela representada na linha v). O primeiro conjunto corresponde à observação do comportamento da estrutura mantendo intacto o tabuleiro rodoviário, nomeadamente mantendo a ligação entre as cordas superiores e a chapa de base do tabuleiro. A passagem de três comboios semelhantes, caracterizados nas linhas i) a iii), confirma o nível semelhante dos efeitos associados ao tráfego ferroviário de passageiros. Ainda com o tabuleiro intacto, a passagem de um comboio de mercadorias (iv) revela ser significativamente superior. A linha v), destacada anteriormente, corresponde à passagem de um comboio de passageiros depois de realizada a separação do tabuleiro das vigas principais. Constata-se assim que a contribuição da chapa copada no desempenho da estrutura era notória na medida que, após a sua remoção, se observou um acréscimo significativo, cerca de 50%, nas deformações associadas à passagem de comboios de passageiros idênticos (linhas i e v).

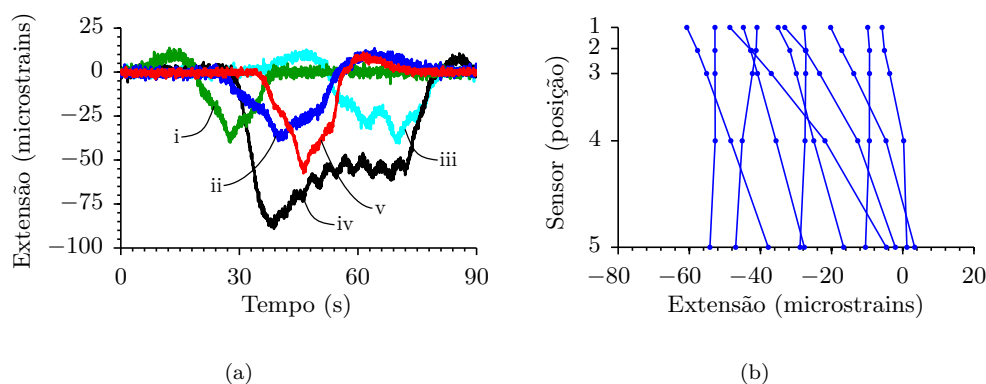


FIGURA 3.42: Resultados da Fase I da monitorização estrutural cobrindo a passagem de vários veículos ferroviários correntes: a) extensões observadas no banzo da corda superior (sensor 1 na secção C.S.T10.M-V.); b) perfis de extensões observadas durante a passagem de um comboio de mercadorias (v) na secção C.S.T10.M-V. (ver Figura 3.41 relativa à nomenclatura dos sensores).

Na Figura 3.42.b), mostra-se o perfil transversal de extensões na mesma corda superior, representando diferentes posições da carga durante a passagem de um comboio representativo. Apesar da sobreposição de diferentes efeitos axiais e de flexão, evidencia-se a linearidade geral, patente no perfil transversal de extensões ao longo da secção analisada. Tais resultados permitiram aferir o funcionamento da referida secção como elemento composto, atestando a validade da premissa das secções planas após deformação.

Destaca-se que os resultados expostos, combinando os níveis de extensões associados à passagem de veículos ferroviários com as respectivas distribuições ao nível da secção transversal, permitiram avaliar os principais pressupostos adoptados durante o projecto estrutural, suportando a análise estrutural que se veio a seguir. Com estes resultados, o projectista calibrou e validou o seu modelo de cálculo numérico. Os resultados combinados foram posteriormente utilizados para comparação com a resistência efectiva de cada elemento estrutural.

### 3.6.5.2 Monitorização durante a substituição das cordas superiores (Fase II)

A segunda fase da monitorização estrutural centrou-se na avaliação do comportamento da estrutura durante uma fase crítica associada à substituição dos banzos superiores da estrutura portante. Pretendia-se calibrar o sistema de forças a aplicar que, recorde-se, deveria garantir um estado de tensão neutro em cada elemento a substituir.

Procedeu-se à instrumentação de três secções transversais do primeiro tramo a ser reforçado com vista à avaliação do campo de extensões introduzido pelo sistema auxiliar de aplicação de forças. Neste caso, pretendia-se avaliar as extensões introduzidas pelo actuador em três secções representativas, conforme indicado na Figura 3.43: no segmento já reforçado (C.S.T10.S1.), no segmento onde se processa o reforço (C.S.T10.S2.), e no

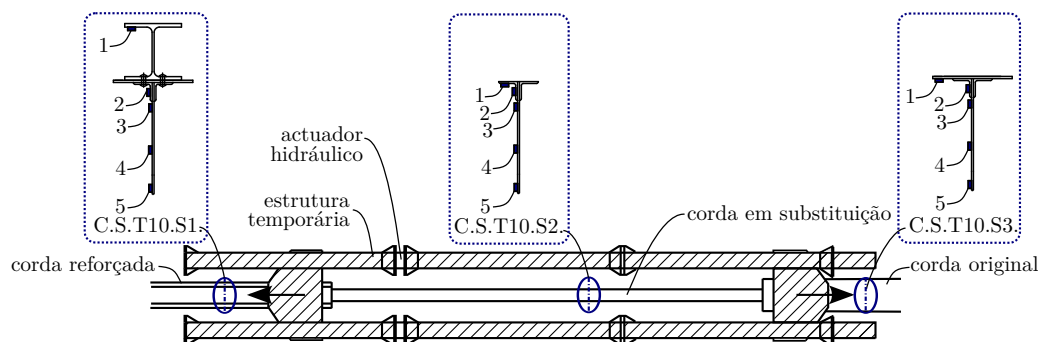


FIGURA 3.43: Instrumentação Fase II com disposição e nomenclatura dos sensores.

segmento adjacente ainda intacto (C.S.T10.S3). Durante o período limitado de monitorização, foram então impostos vários níveis de força cujos principais resultados se apresentam na Figura 3.44.

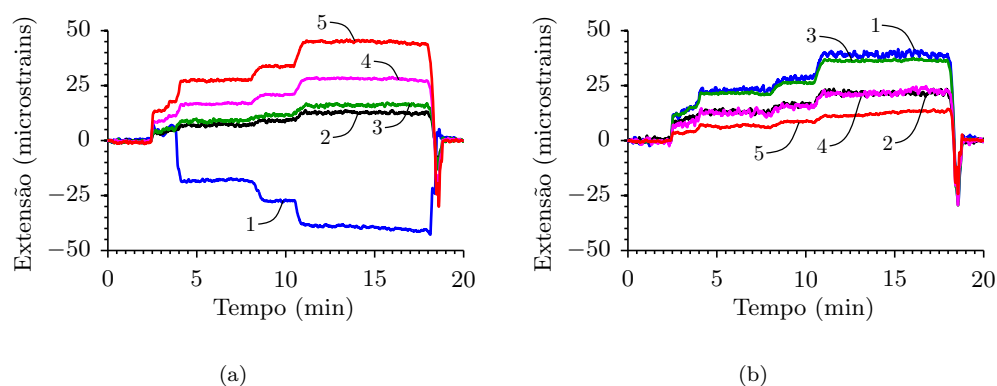


FIGURA 3.44: Resultados da Fase II da monitorização estrutural durante a substituição do banzo da corda superior com aplicação do sistema de forças activo: a) extensões na secção C.S.T10.S1.; b) extensões na secção C.S.T10.S2. (ver Figura 3.43 relativa à nomenclatura dos sensores).

Os resultados seleccionados mostram que é notório o efeito do sistema activo de imposição de forças ao nível do banzo superior da zona a substituir. Este efeito reflecte-se sobretudo na evolução das extensões no Sensor 1 da secção S.T10.S2 (Figura 3.44.b)). Os resultados presentes na Figura 3.44.a) mostram também a eficácia da secção já reforçada (S.T10.S1) comprovando o funcionamento conjunto e planar dos diferentes elementos.

Destaca-se a importância do conhecimento dos efeitos associados a cargas de magnitude conhecida no segmento onde se procedeu à substituição. No âmbito da reabilitação estrutural, o seu conhecimento revelou-se de importância assinalável na calibração das forças a introduzir nos restantes tramos da ponte.

### 3.6.5.3 Monitorização durante um ensaio de carga (Fase III)

Depois de concluídas as principais etapas da reabilitação estrutural, foi realizado um ensaio de carga, com a passagem controlada de um par de camiões e de uma locomotiva ferroviária convenientemente caracterizados e pesados (ver Figura 3.45). Pretendia-se caracterizar a resposta global da estrutura no final da reabilitação para avaliar a eficácia da reabilitação e para calibrar um modelo numérico a utilizar em referências futuras. Foram medidas, para além de extensões, as flechas em todos os vãos, as rotações e os deslocamentos de juntas (Cavadas et al., 2008). Atendendo ao âmbito desta tese, foca-se contudo, esta exposição na apresentação dos principais resultados obtidos com os sensores de Bragg no que diz respeito às extensões.



FIGURA 3.45: Veículos em marcha lenta durante o ensaio de carga: a) locomotiva ferroviária (121 ton.); b) camiões rodoviários a par ( $2 \times 30.2$  ton.).

Esta fase de monitorização incluiu um total de oito secções de elementos estruturais localizados num dos tramos centrais, tramo T6, conforme indicado na Figura 3.46. Foram assim contempladas as cordas superiores e inferiores, quer a meio-vão (C.S.T6.M-V. e C.I.T6.M-V.), quer na secção junto ao apoio (C.S.T6.P5. e C.I.T6.P5.), duas diagonais de compressão junto ao apoio (D1.T6.P5. e D2.T6.P5.), uma longarina ferroviária (LF.T6.P5.), um contraventamento ferroviário (CVF.T6.P5.), e ainda um módulo pré-fabricado do tabuleiro rodoviário (Ta.T5.P5.). Procedeu-se, de acordo com o descrito, à observação de extensões em 32 pontos distintos da estrutura, procurando caracterizar de forma abrangente o comportamento da ponte neste tramo representativo.

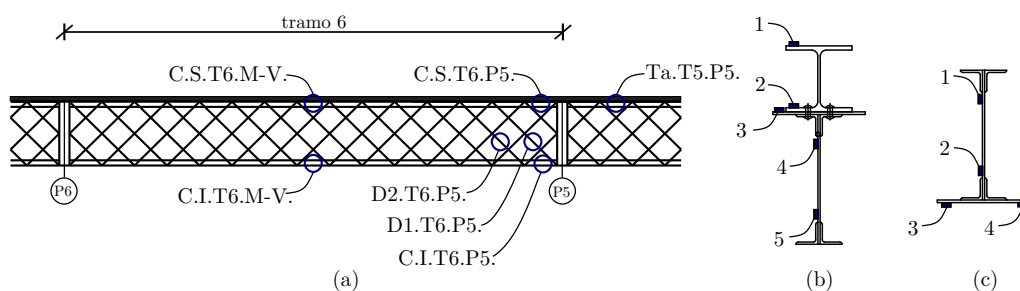


FIGURA 3.46: Instrumentação Fase III: a) alçado com a posição relativa das diferentes secções instrumentadas; b) secção C.S.T6.M-V. com disposição e nomenclatura dos sensores; c) secção C.I.T6.M-V. com disposição e nomenclatura dos sensores.

Na Figura 3.47 são apresentadas as extensões observadas na secção de meio-vão do referido tramo das cordas superior e inferior (C.S.T6.M-V. e C.I.T6.M-V., respectivamente). Nesta figura, detalham-se os resultados relativos às passagens lentas da locomotiva e do par de camiões de forma independente.

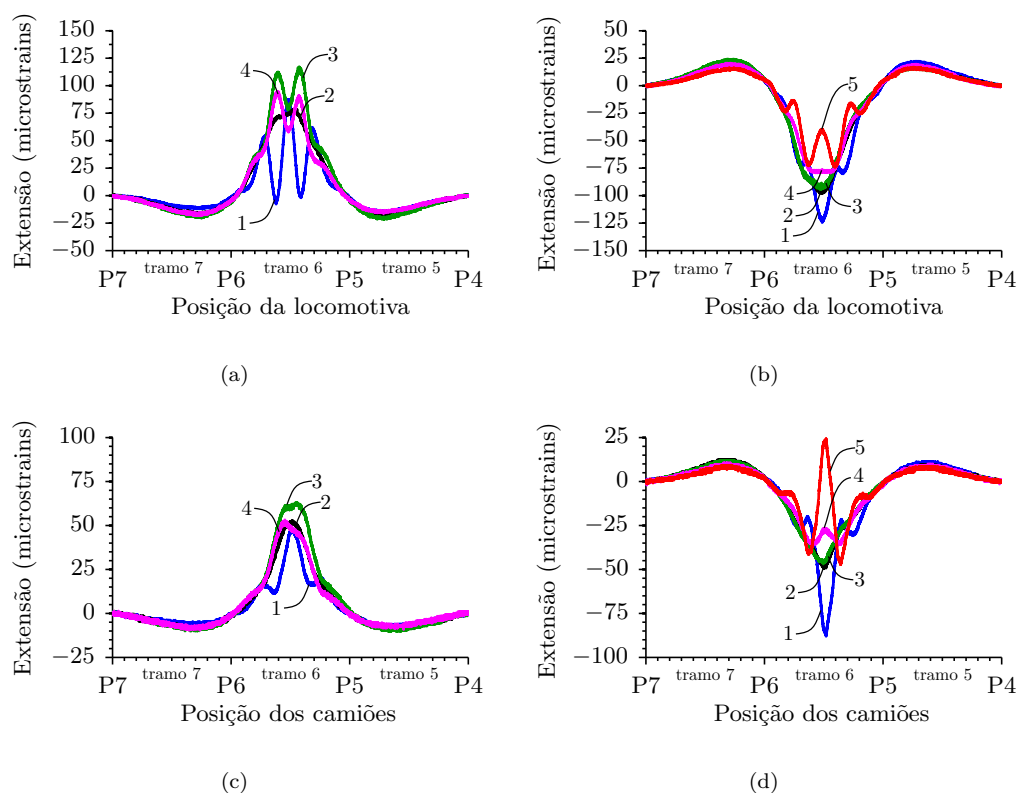


FIGURA 3.47: Resultados da Fase III da monitorização estrutural durante a realização do ensaio de carga: a) extensões na corda inferior (C.I.T6.M-V) durante a passagem da locomotiva; b) extensões na corda superior (C.S.T6.M-V) durante a passagem da locomotiva; c) extensões na corda inferior (C.I.T6.M-V) durante a passagem dos camiões a par; d) extensões na corda superior (C.S.T6.M-V) durante a passagem dos camiões a par (ver Figura 3.46 relativa à nomenclatura dos sensores).

Estes resultados foram analisados e confrontados com os resultados de um modelo numérico convenientemente calibrado. Este modelo numérico está representado na Figura 3.48, assentando numa formulação tridimensional baseada em elementos de barra com continuidade representando na totalidade as condições materiais e geométricas efectivamente existentes na estrutura (Cavadas, 2008).

Confrontam-se os resultados numéricos com os resultados experimentais, na Figura 3.49, escolhendo por representatividade as linhas de influência na corda superior associadas à passagem da locomotiva e dos camiões a par anteriormente considerados. Refira-se que as linhas de influência experimentais foram determinadas com base nas extensões medidas, admitindo válida a hipótese de Bernoulli no que concerne à manutenção das secções planas e tendo em conta a distribuição dos sensores e as propriedades geométricas e mecânicas da referida secção.

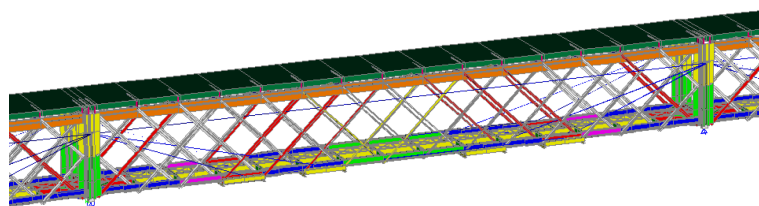


FIGURA 3.48: Perspectiva geral de um tramo do modelo numérico (*software*: SAP2000) (Cavadas, 2008).

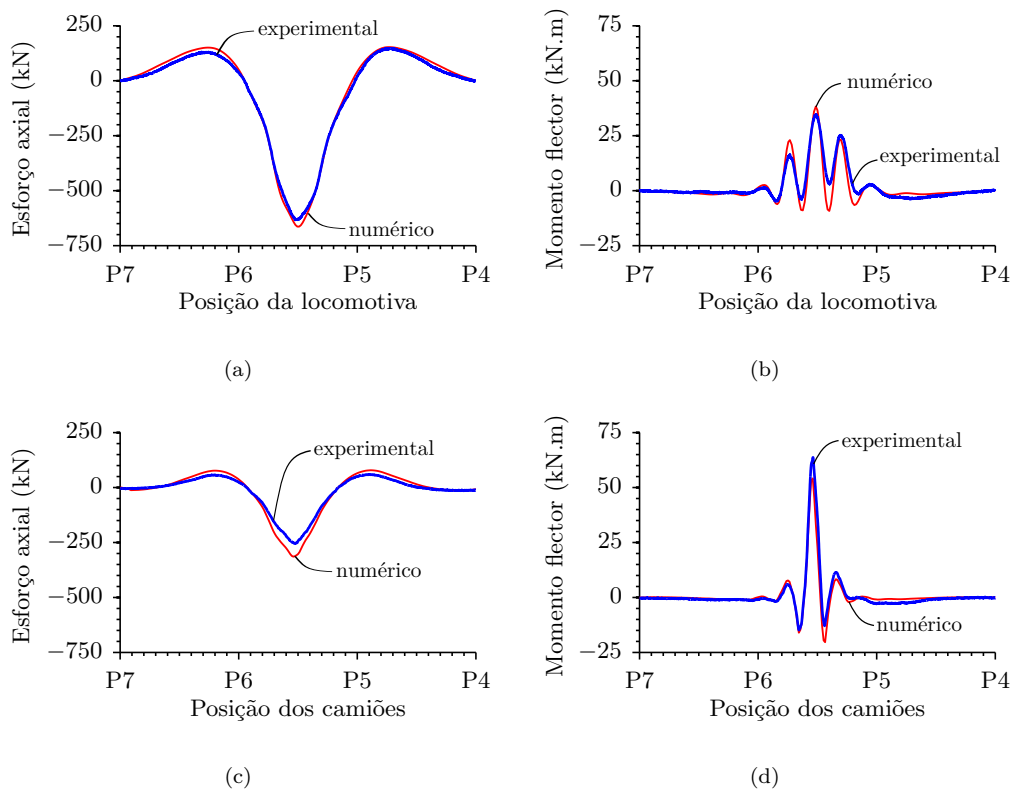


FIGURA 3.49: Comparação das linhas de influência obtidas a partir do modelo numérico e calculadas a partir das extensões medidas na corda superior (C.S.T6.M-V): a) linhas de influência do esforço axial durante a passagem da locomotiva ferroviária; b) linhas de influência do momento flector durante a passagem da locomotiva ferroviária; c) linhas de influência do esforço axial durante a passagem dos camiões a par; d) linhas de influência do momento flector durante a passagem dos camiões a par.

É assinalável a concordância entre os resultados experimentais e os resultados numéricos. Através da análise dos esforços transmitidos a cada barra, verifica-se que as deformações observadas resultam da sobreposição do funcionamento global das vigas, nas quais as cordas constituem os banzos da treliça, com o funcionamento local das cordas, registando flexão local quando as cargas circulam no tramo a observar. A combinação dos resultados numéricos com os experimentais permitiu assim validar o comportamento espectável da estrutura, confirmando a eficácia da reabilitação, nomeadamente ao nível da substituição dos banzos das cordas superiores analisadas.

Do ensaio de carga realizado, importa ainda referir que o conjunto de resultados obtidos atestou um comportamento linear e elástico dos materiais estruturais e da própria estrutura. Por um lado, não só os resultados obtidos para níveis de carga idênticos (posições estáticas e passagens lentas) se revelaram semelhantes, como também se verificou que a resposta estrutural era proporcional à magnitude dos carregamentos proporcionados pelas diferentes combinações de carga. Por outro lado, constatou-se que a estrutura quando descarregada regressava ao estado que apresentava antes de ser solicitada.

### 3.6.5.4 Monitorização durante a reparação do pavimento rodoviário (Fase IV)

Dois anos após a reabilitação estrutural e após reabertura da ponte ao tráfego rodoviário, começaram a ser detectados sinais de degradação prematura do piso rodoviário. Com vista à avaliação das potenciais causas que podiam estar a contribuir para a degradação prematura do novo piso rodoviário procedeu-se a uma nova campanha de monitorização localizada, complementada com uma bateria de ensaios laboratoriais (Figueiras et al., 2011). Com a instrumentação e observação do tabuleiro rodoviário e da respectiva camada de revestimento, procurou-se avaliar os efeitos do tráfego sobre esse mesmo piso.

O piso rodoviário, compreendendo a chapa de aço de base e a respectiva camada de desgaste, foi instrumentado segundo a distribuição representada na Figura 3.50. Foram então instalados dois *arrays* idênticos, contendo cada um deles sete sensores de Bragg, dispostos de forma paralela entre si, distanciados cerca de 400 mm, de forma a cobrir os principais alinhamentos, por cima das chapas rigidificadoras, sobre as quais se registam fendas longitudinais. Um *array* foi instalado na superfície superior da chapa de aço, em contacto com o revestimento, e o outro *array* na superfície da camada de desgaste.

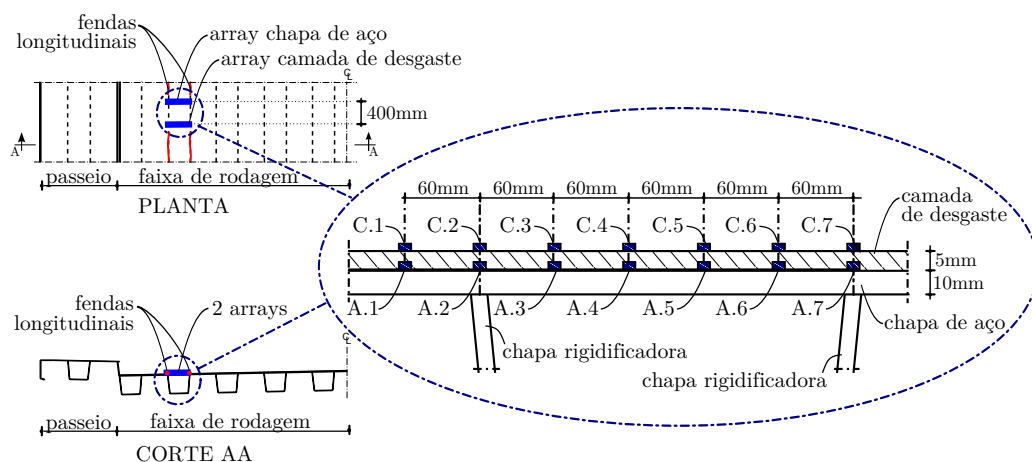


FIGURA 3.50: Instrumentação Fase IV com disposição e nomenclatura dos sensores.

Foram então levadas a cabo duas campanhas de observação do comportamento em serviço da estrutura, designadamente durante a passagem de tráfego rodoviário corrente

e durante um ensaio de carga realizado mediante a passagem de um veículo pesado de referência, no caso, o autotanque da corporação de bombeiros local. Cada sensor que constitui o *array* permitiu avaliar pontualmente a variação de extensão e o respectivo conjunto de medições permitiu determinar diagramas de extensões ao longo de um comprimento representativo compreendido entre duas fendas longitudinais.

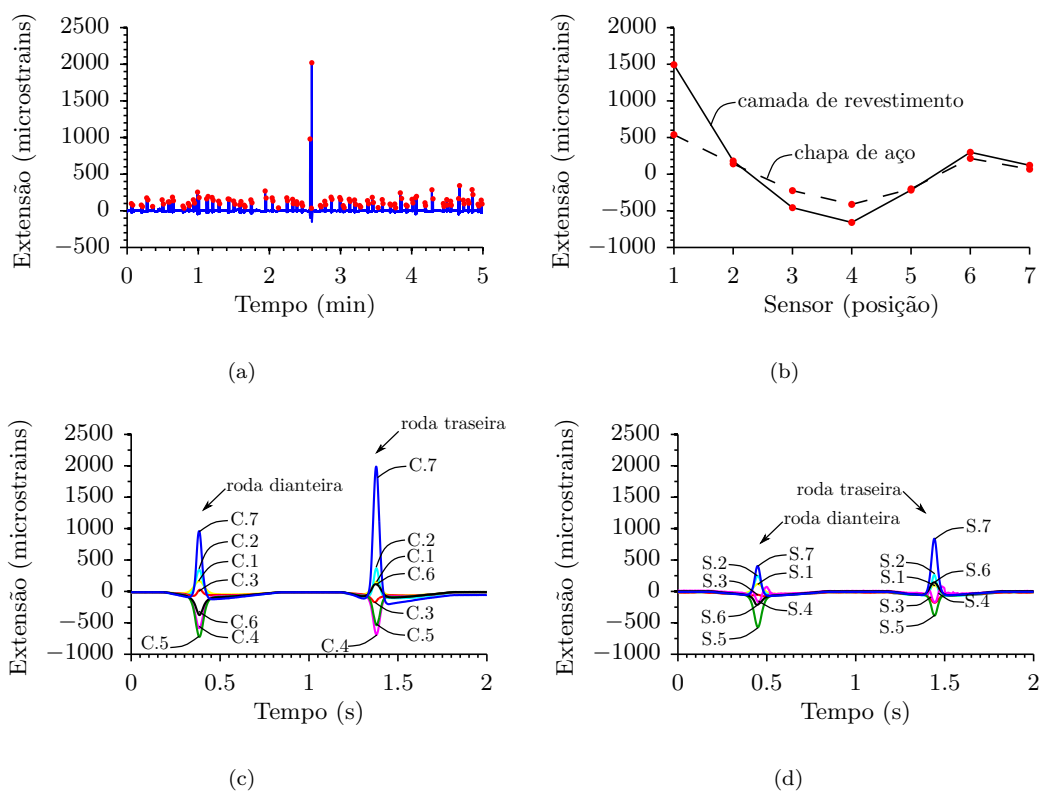


FIGURA 3.51: Resultados da Fase IV da monitorização estrutural: a) registo de extensões no sensor C.7, na camada de desgaste, durante 5 min. de tráfego corrente; b) diagrama de extensões na chapa de aço e na camada de desgaste durante a passagem de um autocarro de referência; c) linhas de influência de extensões na camada de revestimentos; d) linhas de influência de extensões na chapa de aço (ver Figura 3.46) relativa à nomenclatura dos sensores).

Representa-se, na Figura 3.50.a), os resultados obtidos no sensor mais esforçado, o sensor C.7, instalado na camada de desgaste, para um período de observação de cinco minutos sob tráfego corrente. Estão assinaladas as passagens dos veículos mais relevantes, sendo perceptível a passagem de um veículo pesado de passageiros, cujo efeito se situa claramente acima da média. Faz-se notar que o trânsito de veículos pesados de mercadorias estava já impedido de forma permanente na ponte.

Na Figura 3.50.b), mostram-se os diagramas de extensões registados aquando da passagem do pesado de passageiros anteriormente identificado. Em pormenor, mostra-se ainda, nas Figuras 3.50.c) e 3.50.d), as 14 linhas de influência durante a passagem do mesmo veículo. Concluiu-se que a maior magnitude de extensões ocorre na posição do sensor C.7, chegando a valores que podem ultrapassar com facilidade  $2000 \mu\epsilon$ . Faz-se

notar que este sensor se encontrava sobre uma chapa rigidificadora (ver Figura 3.50), correspondente ao percurso preferencial do rodado dos veículos, precisamente onde as fendas longitudinais foram aparecendo ao longo da ponte.

Estes resultados medidos *in situ*, complementados com ensaios de avaliação de resistência levados a cabo em laboratório e modelações numéricas, foram usados para detectar as causas da degradação prematura do piso rodoviário (Figueiras et al., 2011). Com base nos testes laboratoriais, concluiu-se que a capacidade de deformação do material constituinte da camada de desgaste se torna bastante reduzida para temperaturas baixas ( $\varepsilon_u = 1900 \mu\varepsilon$  a 0 °C). Consequentemente, constata-se que os efeitos combinados do tráfego rodoviário e da temperatura excedem a capacidade de deformação do material, justificando por si só as fendas observadas. Está-se neste momento a proceder à sua reparação com uma nova solução ajustada.

### 3.7 Considerações finais

Ao longo deste capítulo abordou-se a aplicação de sensores de Bragg para monitorização de extensões estruturais. Apresentaram-se sucintamente os princípios básicos de funcionamento desta tecnologia e revelaram-se as principais características e propriedades enquanto sensores de deformação. Neste particular, destacou-se a sua elevada precisão, imunidade a interferências electromagnéticas, suporte para frequências de aquisição elevadas e aptidão para esquemas de multiplexagem tanto em série como em paralelo.

Focou-se o estudo nas soluções para colagem superficial, particularmente adequadas para instrumentação temporária e permanente de estruturas metálicas. Descreveram-se três soluções comerciais adequadas para o efeito. Tendo em conta estas soluções, desenvolveu-se uma técnica expedita para instalação destes sensores em estruturas metálicas, direccionada para campanhas de monitorização de curta duração. Considera-se a técnica exposta mais eficiente do que as recomendações presentes na bibliografia.

Procedeu-se a uma análise numérica e experimental com vista à avaliação efectiva do desempenho destes sensores. Numericamente foi analisado o efeito de diferentes condições de colagem, nomeadamente do tipo de protecção primária da fibra, do módulo de elasticidade do adesivo, do comprimento de colagem e da espessura de adesivo sob o sensor. As fibras com revestimento de poliamida foram aquelas que demonstram melhores resultados. Relativamente à configuração da colagem, verificou-se a necessidade de colar o sensor não só ao longo do seu comprimento estrito, mas prolongando-se criteriosamente para além do seu limite. No caso dos sensores de Bragg com 10 mm estudados, recomenda-se a colagem de pelo menos 20 mm de fibra (sensor incluído). A espessura de adesivo sob o sensor deve também ser minimizada

Na selecção do adesivo, deve ser analisado o seu módulo de elasticidade, recomendando-se a adopção de adesivos com módulos de elasticidade suficientemente elevados. Face aos resultados obtidos, considera-se que os cianoacrilatos e as resinas epóxi com módulos de elasticidade superiores a 4 GPa podem ser consideradas adequadas para esta aplicação. Ainda na selecção do adesivo, deve ser tida em conta a sua resistência ao corte, a capacidade de resistir às diferentes solicitações químicas e ambientais, a durabilidade, o tempo de cura, assim como uma elevada estabilidade ao longo do tempo com reduzida fluência e retracção. O seu coeficiente de dilatação térmica deve também ser tão próximo quanto possível do coeficiente do respectivo material estrutural.

Os resultados experimentais alcançados permitiram validar o desempenho desta tecnologia, sendo de assinalar a sua elevada resolução, precisão e linearidade. Analisou-se a sensibilidade à temperatura e à deformação de um conjunto de 20 sensores de Bragg idênticos (*bare type*), utilizando dois tipos de adesivos distintos, nomeadamente um cianoacrilato (*array 1*) e uma resina epóxi (*array 2*).

No que concerne à sensibilidade à deformação, a repetibilidade obtida é assinalável. Também foi assinalável a linearidade entre a extensão imposta e a variação do comprimento de onda normalizado dos sensores. A respectiva sensibilidade obtida foi de cerca de  $0.781 \pm 0.01 \text{ pm} \cdot \mu\epsilon^{-1}$ , sendo a dispersão de resultados inferior a 2 %. Foi também comprovada a resposta dinâmica dos sensores sujeitos a ciclos de carga dinâmica com uma frequência máxima de 4.0 Hz. Em testes cíclicos, encontraram-se, no entanto, ligeiros indícios de fadiga no adesivo de cianoacrilato ao fim de cem mil ciclos de carga.

Analisando a resposta dos mesmos sensores perante variações de temperatura, ficou, mais uma vez, patente uma excelente linearidade entre a variação de temperatura e a variação do comprimento de onda normalizado dos sensores. A sensibilidade média dos sensores colados no provete de aço fixou-se em torno dos  $15.31 \pm 1.28 \text{ pm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ . Quando comparados os dois adesivos, verificou-se porém uma diferença com algum significado nas respectivas sensibilidades:  $15.15 \pm 0.68$  e  $15.48 \pm 1.28 \text{ pm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ , para os sensores colados com cianoacrilato e com epóxi, respectivamente. Neste particular, o adesivo de cianoacrilato foi aquele que revelou um comportamento mais uniforme. Os resultados obtidos alertam também para a elevada sensibilidade à temperatura deste tipo de sensores, nomeadamente quando instalados em elementos metálicos. Ficou vincada a necessidade de compensar os efeitos térmicos sempre que ocorram variações de temperatura significativas.

Apresentou-se, posteriormente, a monitorização realizada sobre a Ponte Eiffel, onde foram instalados um total de 80 sensores de Bragg durante a sua reabilitação e reforço. Realizaram-se campanhas de monitorização em diferentes fases da empreitada, nomeadamente antes do início da reabilitação (i), durante as fases mais críticas que se seguiram (ii), durante um ensaio de carga final (iii) e, posteriormente, durante a reabilitação do piso rodoviário (iv). No âmbito desta tese, era objectivo demonstrar a viabilidade

e a utilidade prática da metodologia e das soluções desenvolvidas num contexto real. Introduziu-se assim a estratégia adoptada para dar resposta às várias questões que foram surgindo durante o processo de reabilitação. Reportaram-se os objectivos e soluções adoptadas nas várias fases da reabilitação e apresentaram-se os principais resultados obtidos. Procedeu-se à análise crítica destes resultados também suportada por um modelo numérico.

Entende-se que no cômputo geral deste capítulo ficaram bem evidenciadas a adequação e as potencialidades dos sensores de Bragg para monitorização de extensões estruturais. O caso da Ponte Eiffel demonstra toda a viabilidade técnica e económica desta tecnologia. Este último pode ser considerado um caso crítico do recurso à monitorização estrutural para auxiliar o projecto de reabilitação de pontes metálicas. A mais-valia e o sucesso desta monitorização é actualmente reconhecida por todos os intervenientes, donde se destaca o dono de obra, o projectista e a empresa construtora. Considera-se que a sua qualidade foi em muito impulsionada pelos atributos associados aos sensores de Bragg adoptados.



## Capítulo 4

# Transdutores de Deformação: Comparação e Aplicações

Apresenta-se, neste capítulo, o papel dos transdutores de deformação com base longa de medida focados na avaliação do comportamento mais global das estruturas. Introduce-se o conceito de monitorização global. Realiza-se uma campanha experimental para avaliar e comparar um conjunto considerável de soluções comerciais em fibra óptica. Dá-se a conhecer uma monitorização real, levada a cabo na Ponte Ricciolo, demonstrando a viabilidade de uma estratégia de monitorização global baseada em sensores de deformação.

### 4.1 Introdução

As estruturas da engenharia civil são ricas em descontinuidades. Empregam-se frequentemente materiais heterogéneos, como é o caso do betão armado e outros compósitos, admitem-se diferentes estados de fendilhação, bem como se incorre em diversas variações geométricas, associadas a intersecções, negativos, ligações, espessamentos, reduções, etc. Estas descontinuidades resultam em perturbações localizadas nos campos de tensões e extensões mecânicas associadas, conduzindo a efeitos locais que podem ser múltiplas vezes superiores ao perfil médio correspondente. A concentração de tensões pode ser relevante se analisada a uma escala apertada dentro do elemento estrutural. Verifica-se, no entanto, que, do ponto de vista da deformação global da estrutura, o seu impacto é geralmente residual.

O recurso a sensores com bases curtas de medida para medição de deformações conduz a resultados que são fortemente influenciados por qualquer perturbação local presente no respectivo campo de extensões. Verifica-se que, embora estejam a representar correctamente as extensões instaladas num determinado ponto, estes sensores são pouco

representativos da deformação global da estrutura. Justifica-se a sua utilização na caracterização do comportamento local conforme se demonstrou no capítulo anterior. No entanto, a sua utilização na monitorização da integridade estrutural ignora, por completo, potenciais ocorrências ou anomalias fora da zona instrumentada.

Na monitorização do comportamento global das estruturas, justifica-se, neste contexto, a adopção de uma base de medida mais alargada, capaz de avaliar a deformação média de forma independente da posição das descontinuidades que afectam o material. Remete-se esta característica para os sensores de deformação de base longa de medida, usualmente designados por *long-gauge sensors* na literatura internacional. Estes sensores permitem a medição directa de extensões médias ao longo de comprimentos que podem ir de algumas dezenas de centímetros até vários metros. Torna-se assim possível, cobrindo a estrutura com um número limitado de sensores, obter informação representativa do seu comportamento global. Do ponto de vista da avaliação do comportamento da estrutura, qualquer fenómeno que actue a uma escala global pode ser eficazmente detectado e quantificado.

Pela sua morfologia e pelo seu princípio de transdução, os sensores tradicionais, de onde se realça os extensómetros de resistência eléctrica, como os usuais com 5 a 10 mm, enquadram-se no grupo dos sensores de deformação de base curta de medida. Repare-se que a respectiva base de medida é da ordem de grandeza das descontinuidades presentes nas estruturas da engenharia civil, nomeadamente da ordem de grandeza da dimensão de um agregado do betão ou inferior ao espaçamento entre fendas numa estrutura fendilhada.

Por sua vez, os sensores em fibra óptica, dependendo do seu encapsulamento e do seu princípio de medição podem funcionar como sensores de base curta ou como sensores de base longa de medida. Desta forma, os sensores em fibra óptica vieram incrementar e abrir novas possibilidades para o desenvolvimento de transdutores de deformação com base longa de medida. Destaca-se, por exemplo, o caso dos sensores interferométricos que podem atingir bases de medida de várias dezenas de metros com resoluções na ordem do micron. A utilização destes sensores na monitorização estrutural tem sido comprovada ao longo de um vasto rol de aplicações tanto no domínio académico como industrial (Glisic e Inaudi, 2007).

Ao longo deste capítulo, aborda-se a temática em torno da medição de extensões médias com recurso a sensores de deformação de base longa de medida. Neste contexto, expõe-se uma metodologia para avaliação do comportamento global das estruturas baseada numa distribuição criteriosa de sensores de deformação. Apresentam-se os princípios básicos associados à medição desta grandeza e descrevem-se as principais tipologias de sensores. Analisa-se um estudo experimental realizado com o objectivo de avaliar o desempenho efectivo de um conjunto de soluções em fibra óptica, onde se abordam os requisitos mais significativos da monitorização estrutural, comparando-se o desempenho

de sete soluções alternativas mediante a realização de um rol de testes laboratoriais, assim como de uma aplicação experimental numa ponte real. Apresenta-se, por último, um exemplo de aplicação ilustrado com alguns resultados da monitorização estrutural da Ponte Ricciolo durante a sua construção.

## 4.2 Sensores de deformação de base longa de medida

Os sensores de deformação englobam todos os sensores que permitem a medição de deslocamentos relativos ou de extensões médias entre dois pontos da estrutura. Atendendo à sua resolução espacial, estes podem, numa primeira instância, ser classificados como sensores pontuais ou como sensores distribuídos. Os sensores pontuais fornecem uma medição singular, que se considera representativa da deformação média no desenvolvimento compreendido entre dois pontos de referência. Por sua vez, os sensores distribuídos fornecem a medição da deformação de uma forma contínua, ou num conjunto significativo de pontos ao longo do desenvolvimento do sensor.

No caso dos sensores de deformação discretos, isto é, naqueles que fornecem a deformação média entre dois pontos, a distância que separa esses pontos de referência pode ser mais ou menos significativa dependendo das características do sensor. Esta distância, aqui denominada por base de medida, estabelece um segundo critério para classificar estes sensores, que em conformidade podem ser classificados como sendo de base curta de medida ou de base longa de medida.

Measures (2001) propôs o limite de 50 mm para distinção entre sensores de base curta e de base longa de medida. Entende-se, no entanto, que este critério, embora aplicável no caso de estruturas realizadas em materiais homogêneos, em aço por exemplo, é pouco ajustado no caso de betão armado. Repare-se que os agregados do betão podem atingir dimensões da ordem dos 32 mm, com distâncias entre fendas tipicamente entre 100 a 200 mm. Considera-se, desta forma, mais pertinente a classificação dos sensores em função das características do material estrutural e da própria estrutura. Na Figura 4.1, propõe-se então um critério de classificação dos sensores de deformação que se entende mais ajustado ao betão estrutural, onde os respectivos limites são meramente indicativos e dependem da estrutura, nomeadamente da dimensão e distribuição das descontinuidades.

A classificação que se propõe, define um sensor de deformação de base curta de medida como sendo um sensor que tem um comprimento de referência da mesma ordem de grandeza da distância entre descontinuidades. No caso do betão, um sensor de base curta de medida será então um sensor que apresenta uma base de medida da mesma ordem de grandeza dos agregados do betão ou, existindo fendilhação, que fica compreendido entre duas fendas. Demonstra-se que a medição realizada com estes sensores, representando

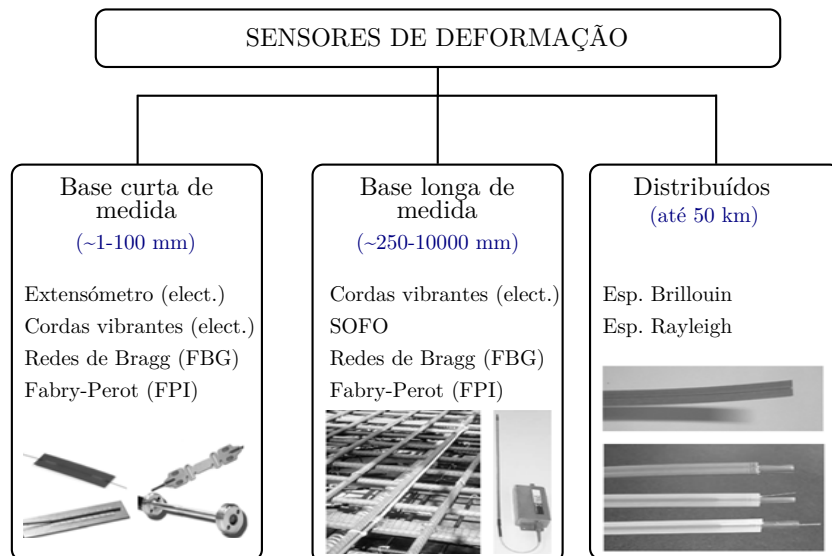


FIGURA 4.1: Classificação relativa dos sensores de deformação baseada na respectiva base de medida.

o comportamento dos materiais no local, é fortemente influenciada por defeitos locais e torna-se inapropriada para traduzir o comportamento global da estrutura (Glisic, 2011).

Por outro lado, um sensor com uma base longa de medida é, por definição, um sensor com um comprimento de referência várias vezes superior à distância entre descontinuidades. No caso do betão, devem então ser várias vezes maior do que a dimensão máxima dos agregados e, no caso do betão com fendas macroscópicas, várias vezes maiores do que a distância entre fendas. A principal vantagem do recurso a estes sensores advém da sua capacidade intrínseca para integrar todas as descontinuidades de forma que o resultado obtido seja representativo do comportamento médio entre os dois pontos de referência e praticamente imune a efeitos estritamente locais. Esta informação está muito mais relacionada com o comportamento global da estrutura como um todo, do que propriamente de comportamentos localizados.

#### 4.2.1 Deformação média

O conceito de extensão média remete para a Figura 4.2, onde está representado um transdutor de deformação de base longa de medida embebido num elemento estrutural potencialmente heterogéneo e fendilhado.

Se A e B forem os pontos de ancoragem do referido sensor, define-se a deformação média,  $\varepsilon_{C,s}$ , como sendo,

$$\varepsilon_{C,s} = \frac{\Delta L_s}{L_s} = \frac{u_B - u_A}{x_B - x_A} = \frac{1}{L_s} \int_{x_A}^{x_B} \varepsilon_{x,s}(x) dx + \frac{1}{L_s} \sum_i \Delta w_{d,i} \quad (4.1)$$

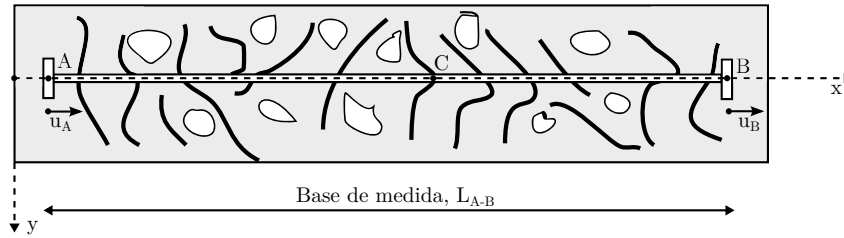


FIGURA 4.2: Representação esquemática da envolvente de um sensor de deformação no interior do betão.

onde,

A e B são os pontos de referência que os limites do sensor com coordenadas  $x_A$  e  $x_B$ ;

C é o ponto médio com coordenada  $x_C = (x_A + x_B)/2$ ;

$L_s = x_B - x_A$  é o comprimento original do sensor antes de deformado;

$u_A$  e  $u_B$  são respectivamente os deslocamentos dos pontos A e B associados a um determinado estado de deformação

$\varepsilon_{C,s}$  é a deformação média, no ponto C, medida pelo sensor;

$\varepsilon_{x,s}(x)$  é o extensão distribuída ao longo do eixo  $x$  do sensor;

$\Delta w_{d,i}$  representa a variação da abertura das várias discontinuidades (fendas, vazios, etc.) depois de aplicada a deformação.

#### 4.2.2 Deformação média no betão fendilhado

No caso das estruturas de betão armado, especificamente onde se admite a hipótese de ocorrer fendilhação generalizada e regular, a definição da base de medida do transdutor revela-se uma questão importante. Ao contrário dos meios homogêneos, onde a base de medida tem um efeito residual sobre a medição, neste caso a grandeza medida pode ser em muito dependente do desenvolvimento e da posição relativa do transdutor (Glisic e Inaudi, 2007; Glisic, 2011).

Repare-se na Figura 4.3 onde se representam dois transdutores idênticos, isto é com a mesma base de medida,  $L_s$ , em posições críticas ladeando uma fenda num elemento de betão submetido a uma deformação média constante. Assume-se a constância do campo de extensões médio, com fendas igualmente abertas,  $w_c$ , e igualmente espaçadas,  $L_c$ . Em termos representativos, deseja-se medir uma deformação média,  $\varepsilon_{S,m}$ , que pode ser expressa como sendo igual a:

$$\varepsilon_{S,m} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta L_c + \sum_{i=1}^n w_c}{\sum_{i=1}^n L_c} \quad (4.2)$$

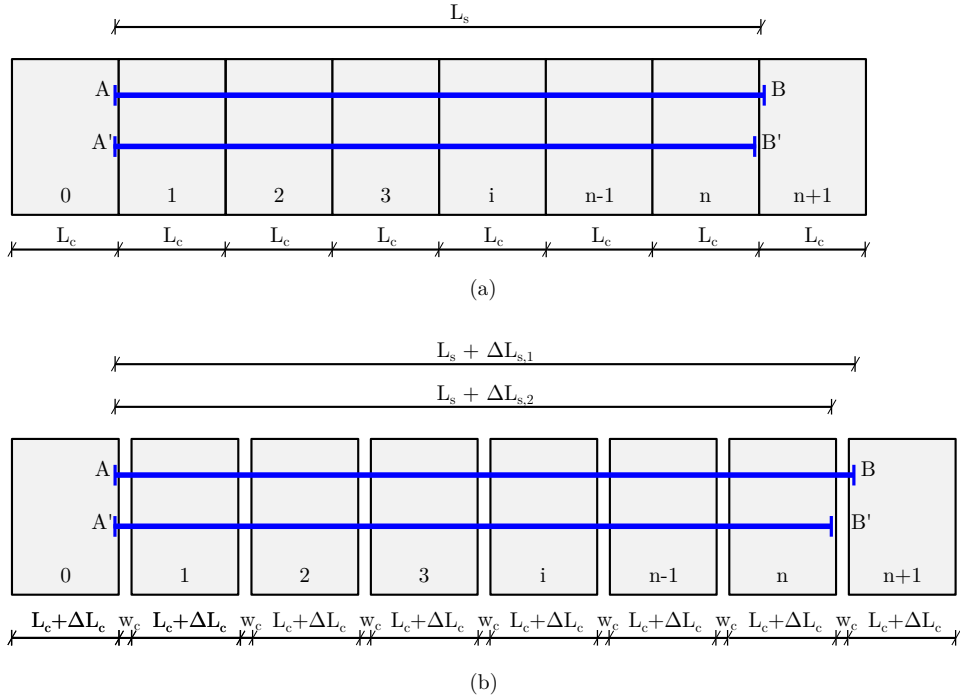


FIGURA 4.3: Representação esquemática das grandezas medidas por dois transdutores ladeando uma fenda: a) configuração em repouso; b) configuração deformada.

Analisando o posicionamento relativo dos transdutores, verifica-se que um apresenta um ponto de ancoragem à direita da última fenda (A-B), enquanto o segundo está ancorado à sua esquerda (A'-B'). Tendo em conta a abertura de fendas representada, constata-se que os resultados obtidos com estes dois transdutores são efectivamente diferentes. Os transdutores A-B e A'-B' conduzem, respectivamente, à medição das seguintes grandezas:

$$\varepsilon_{S,AB} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta L_c + \sum_{i=1}^{n+1} w_c}{\sum_{i=1}^n L_c} \quad (4.3)$$

$$\varepsilon_{S,A'B'} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta L_c + \sum_{i=1}^n w_c}{\sum_{i=1}^n L_c} \quad (4.4)$$

O desvio obtido entre cada transdutor e o valor médio pretendido, correspondente ao erro máximo de medição,  $\delta\varepsilon_S$ , é, desta forma, dado pela diferença das Equações (4.3) e (4.4),

$$\delta\varepsilon_S = \varepsilon_{S,A'B'} - \varepsilon_{S,AB} = \pm \frac{w_c}{L_s} \quad (4.5)$$

De forma mais conveniente, este mesmo erro pode ser expresso em termos relativos, através do quociente entre as Equações (4.5) e (4.2),

$$\delta\varepsilon_{S,r} = \frac{\delta\varepsilon_S}{\varepsilon_{S,m}} = \pm \frac{w_c}{\Delta L_c + w_c} \frac{L_c}{L_s} \quad (4.6)$$

O resultado anterior demonstra que, sobretudo no caso de elementos fendilhados, quanto maior for a base de medida relativamente ao espaçamento entre fendas, mais representativa se torna a grandeza medida em relação ao valor médio. Verifica-se que a adopção de bases de medida a rondar dez vezes a distância entre fendas garante desvios inferiores a 10% no betão fendilhado, independentemente da abertura das fendas (Glisic, 2011).

### 4.3 Monitorização estrutural com base em sensores de deformação

Uma metodologia genérica para a monitorização de estruturas estritamente baseada no uso de sensores de deformação de base longa de medida tem sido apresentada por Glisic e Inaudi (2007). A proposta apresentada pelo referido autor, e aqui adoptada, fundamenta-se na divisão da estrutura em partes, denominadas por células, e pela instrumentação de cada uma dessas células com uma disposição apropriada de sensores de deformação. Estes sensores devem ser dispostos em função dos esforços estruturais que predominam, ou que interessam analisar. O conhecimento do campo de extensões em cada célula permite, numa abordagem semelhante à utilizada nos modelos de elementos finitos, utilizando algoritmos apropriados, extrapolar essa informação de forma a caracterizar o comportamento global da estrutura.

Partindo da validade da hipótese de Bernoulli, isto é, assumindo que as secções se mantêm planas mesmo depois de deformadas, deduz-se, a partir da combinação do valor medido por cada sensor, tendo em conta as características geométricas da secção e dos respectivos materiais, os seguintes parâmetros estruturais:

- i) curvatura média da secção;
- ii) deformação média da secção;
- iii) deformação de corte na secção;
- iv) esforço axial;
- v) momento flector;
- vi) esforço transversal;
- vii) momento torsor;
- viii) posição do eixo neutro;

- ix) aparecimento de fendilhação;
- x) abertura de fendas ao longo do sensor.

O número de sensores necessário em cada célula depende da natureza e da direcção espectável dos esforços nela instalados. Na Figura 4.4, apresentam-se as configurações mais pertinentes do ponto de vista da avaliação estrutural. São propostas disposições distintas em função dos esforços internos mais representativos (Glisic e Inaudi, 2007). Para avaliação dos efeitos relacionados com o esforço axial, sugere-se a utilização de um único sensor longitudinal. Para caracterização de momentos flectores, propõe-se a disposição de sensores longitudinais paralelos, em pares, convenientemente afastados. Na quantificação dos efeitos de corte, sugere-se a colocação de dois sensores dispostos em cruz. Quando é de interesse quantificar o deslocamento relativo entre dois pontos, recorre-se ainda a configurações diagonais. Vários exemplos práticos da exploração desta metodologia foram compilados por Glisic e Inaudi (2007) cobrindo o caso de pontes, edifícios, barragens, túneis, fundações e estruturas de suporte.

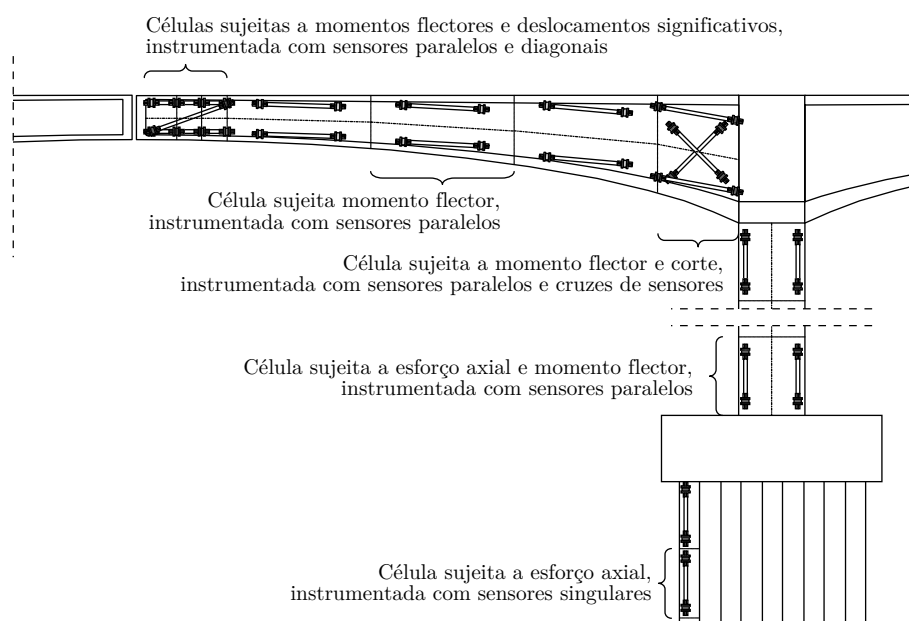


FIGURA 4.4: Representação esquemática da estratégia de monitorização baseada em sensores de deformação de base longa de medida (Glisic e Inaudi, 2007).

Focando no caso das pontes, e sobretudo no seu tabuleiro, são duas as disposições que mais interessam, na medida em que, na estrutura, predominam sobretudo os esforços de flexão e de corte. Analisa-se com maior detalhe estes dois casos focados nas disposições paralela e na disposição em cruz de sensores de deformação.

Nos casos onde predomina a flexão, na sua versão mais genérica presente em duas direcções, preconiza-se o recurso a dois pares de sensores criteriosamente dispostos. Um par de sensores pretende avaliar os efeitos de flexão na direcção vertical e o outro par na

direcção horizontal, justificando-se a instalação de, no mínimo, três sensores conforme se ilustra na Figura 4.5. É contudo frequente, nestes casos, aumentar a redundância da rede de sensores e recorrer a quatro sensores criteriosamente dispostos em detrimento dos três estritamente necessários. Em contrapartida, nos casos em que os esforços numa das direcções sejam à partida desprezáveis, tipicamente a direcção horizontal, pode ser suficiente dispor de um único par de sensores longitudinais, alinhados na direcção de interesse. Esta é a disposição mais frequente nas secções de vão, suficientemente afastadas dos apoios.

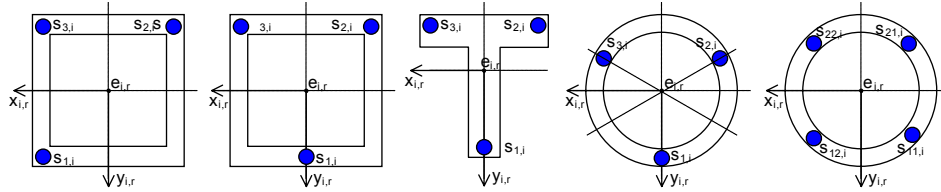


FIGURA 4.5: Disposições possíveis de sensores paralelos para avaliação de efeitos de flexão bi-direccional (Glisic e Inaudi, 2007).

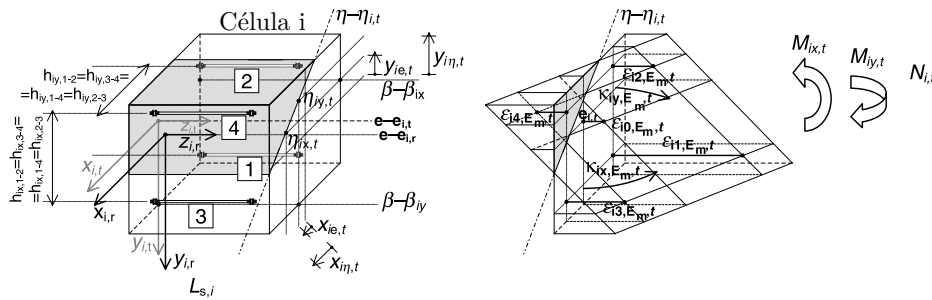


FIGURA 4.6: Distribuição de sensores e esforços na avaliação de um elemento sujeito a flexão (Glisic e Inaudi, 2007).

Partindo da validade da hipótese de Bernoulli e atendendo à disposição tridimensional de sensores e de esforços presente na Figura 4.6, resulta então a seguinte relação essencial que permite determinar as respectivas curvaturas médias

$$\begin{cases} \kappa_{ix,t} \cdot h_{ix,1-2} - \kappa_{iy,t} h_{iy,1-2} = \varepsilon_{i1,m,t} - \varepsilon_{i2,m,t} \\ \kappa_{ix,t} \cdot h_{ix,1-3} - \kappa_{iy,t} h_{iy,1-3} = \varepsilon_{i1,m,t} - \varepsilon_{i3,m,t} \end{cases} \quad (4.7)$$

onde,

$\kappa_{ix,t}$  e  $\kappa_{iy,t}$  representam a curvatura média segundo  $x$  e  $y$ , respectivamente;  $h_{ix,1-2}$  e  $h_{ix,1-3}$  representam a distância relativas entre pares de sensores; e  $\varepsilon_{i1,m,t}$ ,  $\varepsilon_{i2,m,t}$  e  $\varepsilon_{i3,m,t}$  representam as deformações medidas por cada sensor.

Nos casos em que é de interesse quantificar o esforço transverso, a disposição de sensores de deformação em cruz, dispostos segundo um determinado ângulo, permite, por sua vez, avaliar a deformação de corte no plano definido pelo par de sensores. Algumas disposições possíveis estão representadas na Figura 4.7. Esta configuração é sobretudo

empregue em células junto aos apoios ou na proximidade de cargas concentradas, onde o esforço transversal pode atingir valores significativos.

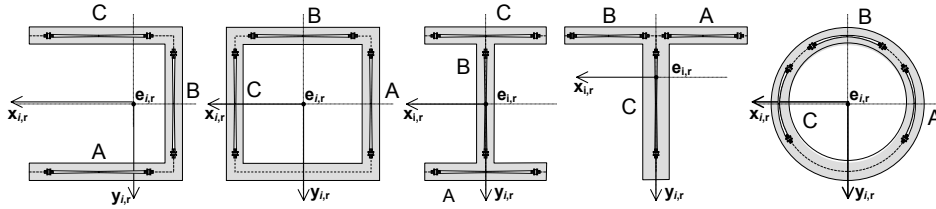


FIGURA 4.7: Representação esquemática da estratégia de monitorização baseada em sensores de deformação de base longa de medida (Glisic e Inaudi, 2007).

Caso seja esperada a presença de esforço transversal vertical e horizontal, assim como de torção, torna-se estritamente necessário recorrer, em cada célula, a três conjuntos de sensores dispostos em cruz. A orientação destes sensores deve representar os planos onde predomina a transmissão dos efeitos de corte (ver exemplos na Figura 4.7). Nos casos em que se possa desprezar à partida um destes efeitos, frequentemente o esforço transversal horizontal, passa a ser suficiente o recurso a dois conjuntos de cruces convenientemente dispostas.

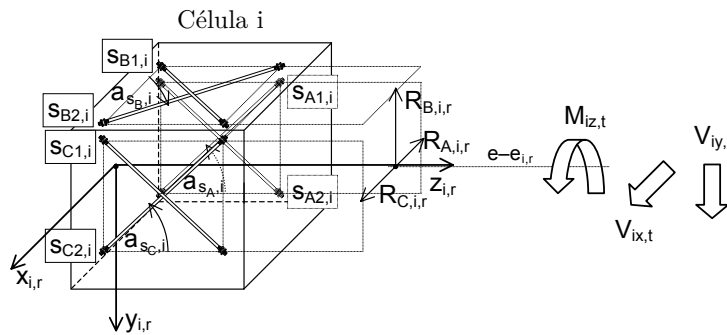


FIGURA 4.8: Representação esquemática da estratégia de monitorização baseada em sensores de deformação de base longa de medida (Glisic e Inaudi, 2007).

Tendo em conta a representação esquemática da Figura 4.8, com base nas deformações medidas numa determinada cruz associada a um plano de corte, pode expressar-se a respectiva extensão de corte através de

$$\gamma_{i,Q,m,t} = \frac{\varepsilon_{i,Q_1,m,t} - \varepsilon_{i,Q_2,m,t}}{2 \sin \alpha_{s_{Q,i}} \cos \alpha_{s_{Q,i}}} \quad (4.8)$$

onde,

$\gamma_{i,Q,m,t}$  representa a extensão média de corte;

$\varepsilon_{i,Q_1,m,t}$  e  $\varepsilon_{i,Q_2,m,t}$  representam as deformações medidas em cada um dos sensores da cruz; e

$\alpha_{s_{Q,i}}$  representa o ângulo do sensor relativamente à horizontal.

## 4.4 Avaliação e comparação de soluções comerciais

### 4.4.1 Introdução

Fruto de várias iniciativas reportadas, o mercado dos sensores em fibra óptica oferece, hoje em dia, um rol significativo de soluções para medição de deformação ao longo de bases de medida adequadas para aplicações no âmbito da monitorização das estruturas de engenharia civil. Nesta secção, procede-se à avaliação e comparação de sete soluções alternativas em plena exploração comercial visando a avaliação do desempenho de diferentes tecnologias de sensores em fibra óptica para aplicação estrutural.

### 4.4.2 Soluções analisadas

Identificam-se no Quadro 4.1 os sensores de deformação de base longa de medida analisados ao longo do presente estudo. Cada solução apresentada corresponde à combinação de um transdutor de deformação com uma unidade de leitura adequada à tecnologia em causa. Estes sistemas foram definidos com base nas recomendações e experiência dos fornecedores dos respectivos sistemas de medição. Salienta-se que todas estas soluções estavam, no momento em que foram analisadas, a ser comercializadas pelos respectivos fabricantes, apresentando um estado avançado de maturidade e contabilizando inúmeras aplicações no domínio da monitorização estrutural.

TABELA 4.1: Sistemas baseados em transdutores de deformação de base longa de medida analisados.

Sistema	Sensor	Unidade de leitura	Princípio de medição	Fornecedor
A	SOFO	SOFO VI	Duplo interferómetro de Michelson de baixa coerência	Smartec, SA
B	SOFO	MuST Light	Interferómetro de Michelson com desmodulação espectral	Smartec, SA
C	MuST	MuST Light	Sensor de Bragg	Smartec, SA
D	FOD	FISO UMI-4	Fabry-Perot	Fiso Technologies
E	VW-JM	Campbell AVW200	Corda vibrante (sensor eléctrico convencional)	Roctest
F	SMARTprofile	DiTeSt STA-SMA	Espalhamento de Brillouin	Smartec, SA
G	SMARTape	DiTeSt STA-SMA	Espalhamento de Brillouin	Smartec, SA

O objectivo principal desta campanha de testes é a comparação do desempenho de cada solução face aos principais requisitos da monitorização das estruturas de engenharia civil. Escolheu-se, por isso, algumas das soluções mais representativas para cobrir um conjunto de sensores em fibra óptica baseados em diferentes tecnologias de medição. Incluiu-se, desta forma, um Bragg, um interferómetro do tipo Michelson de baixa coerência, um interferómetro extrínseco de Fabry-Perot e duas configurações de sensores distribuídos baseados no espalhamento de Brillouin. Avaliou-se ainda um sensor convencional de cordas vibrantes, estabelecendo a comparação desta tecnologia convencional com os sensores em fibra óptica, principais alvos deste estudo.

Todos os sensores, cujos princípios gerais seguidamente se compilam, foram configurados para constituir soluções alternativas para aplicação idêntica na monitorização estrutural. Procuraram-se soluções para monitorização de deformações médias ao longo de uma base de medida de um metro com aplicação de carácter estritamente estático. Refere-se um conjunto de sensores para instalação exterior que podem ser instalados na superfície de qualquer elemento estrutural através de ancoragens mecânicas aparafusadas.

#### 4.4.2.1 Sistema SOFO

Apresenta-se, na Figura 4.9.a), o sistema SOFO<sup>®</sup> utilizado neste estudo, constituído pelo transdutor de deformação e pela respectiva unidade de leitura, SOFO VI. O sistema apresentado baseia-se no princípio de um duplo interferómetro de Michelson, recorrendo à sua desmodulação por processos de interferometria de baixa coerência (Inaudi et al., 1994; Inaudi, 1997). Este sistema foi inicialmente desenvolvido por Inaudi (1997) durante os trabalhos conducentes ao seu doutoramento e encontra-se presentemente a ser produzido e comercializado pela empresa suíça SMARTEC (SMARTEC, SA: , 2011).



FIGURA 4.9: Sistema SOFO: a) transdutor de deformação; b) unidade de leitura SOFO VI.

Relativamente ao transdutor de deformação (ver Figura 4.9.a)), trata-se de uma solução concebida particularmente para aplicações na engenharia civil, podendo ser embebida internamente ou acoplada na superfície de qualquer elemento estrutural. Sendo este um

transdutor de deformação de base longa de medida, esta pode ser configurada, durante a produção, para valores compreendidos normalmente entre 0.20 m e 10 m. O fabricante permite ainda que sejam adoptadas bases de medida superiores em casos excepcionais que assim o justifiquem, no entanto incrementando significativamente a complexidade da sua instalação e transporte. São inúmeras as aplicações presentes na monitorização de pontes, barragens e edifícios com sistemas de medida SOFO um pouco por todo o mundo, fruto do sucesso que este transdutor está a ter no seio da engenharia civil (Glisic e Inaudi, 2007).

Na Figura 4.10 esquematiza-se a arquitectura interna do respectivo transdutor de deformação, onde é possível distinguir três zonas no transdutor: a parte activa, a parte passiva e a terminação. A parte activa é a parte fundamental do transdutor, sendo responsável por receber a deformação da estrutura, por intermédio de duas cabeças de ancoragem extremas, e pela sua transmissão à fibra óptica. Na parte passiva e na terminação, encontram-se os componentes que permitem a transmissão adequada de luz para a parte activa do sensor, nomeadamente dois espelhos e um acoplador direccional.

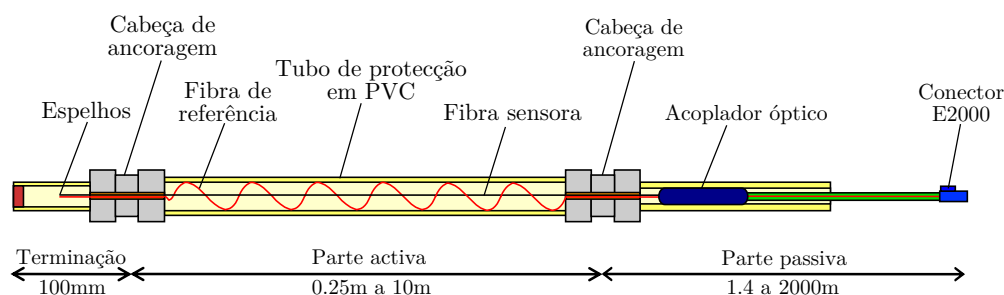


FIGURA 4.10: Arquitectura interna do transdutor de deformação SOFO.

Materializando um interferómetro de Michelson (ver Secção 2.3.4.2), a parte activa é composta por um par de fibras ópticas idênticas, mas solicitadas de forma distinta quando o transdutor é deformado. Uma das fibras encontra-se pré-tensionada e solidária com as duas ancoragens externas, enquanto a outra fibra está lassa no interior do corpo oco do transdutor e portanto isenta de deformações impostas. Consequentemente, a medição da variação relativa do comprimento destas duas fibras representa, de forma directa, a deformação integrada entre os dois pontos de ancoragem. Realça-se que este esquema de medição compensa intrinsecamente outras perturbações externas como, por exemplo, variações de temperatura que afectem de modo idêntico as duas fibras.

A empresa SMARTEC desenvolveu e comercializa uma unidade de leitura, denominada SOFO IV, concebida especificamente para este transdutor, baseando-se esta também num interferómetro de Michelson (ver Figura 4.9.b)). A desmodulação resulta, desta forma, na combinação de dois interferómetros de Michelson, o do transdutor e o da unidade de leitura, conforme se indica na Figura 4.11.

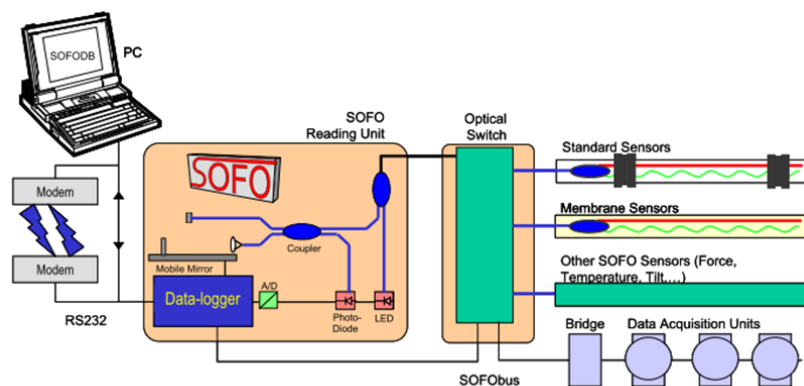


FIGURA 4.11: Arquitectura interna da unidade de leitura SOFO IV (Inaudi, 2000).

O interferómetro de Michelson no interior da unidade possui um dos seus braços ligado a um espelho móvel, passível de ser deslocado por meios mecânicos controlados remotamente. O deslocamento controlado deste espelho conduz à obtenção de um sinal modular sempre que a diferença do trajecto da luz no interior da unidade de leitura coincide com a diferença do trajecto no elemento sensor (Inaudi, 2000). O fabricante deste sistema indica uma repetibilidade de  $2 \mu\text{m}$ , sendo esta independente da base de medida do transdutor, o que corresponde a  $2 \mu\epsilon$  ( $0.002 \text{ mm/m}$ ) num transdutor com  $1.00 \text{ m}$  de base de medida.

Mais recentemente, o mesmo autor desenvolveu uma técnica alternativa de desmodulação do sensor SOFO baseada na análise do espectro de luz em reflexão no domínio da frequência (Inaudi et al., 2005). Esta técnica tem apresentado vantagens significativas na medida que permite combinar na mesma unidade de leitura diferentes tecnologias em fibra óptica, como é o caso dos sensores de Bragg e dos sensores SOFO. Neste trabalho procede-se por isso à análise e comparação de desempenho dos transdutores de deformação SOFO quando interrogados quer por processos interferométricos (Sistema A), quer recorrendo a uma análise espectral (Sistema B).

#### 4.4.2.2 Sistema MuST

O transdutor MuST<sup>®</sup>, também comercializado e desenvolvido pela empresa SMARTEC, SA. (SMARTEC, SA: , 2011), é, em termos de transdução mecânica e de encapsulamento externo, idêntico ao anterior transdutor SOFO, conforme se mostra na Figura 4.12.a). A diferença principal reside na tecnologia dos sensores internos, sendo o transdutor MuST baseado em sensores de Bragg (ver Secção 2.3.3). Neste caso recorre-se à desmodulação do comprimento de onda reflectido pelo elemento sensor para se proceder à medição simultânea da deformação média e da variação da temperatura no interior do transdutor.



FIGURA 4.12: Sistema MuST: a) transdutor de deformação; b) unidade de leitura MuST light

Apresenta-se, na Figura 4.13, a arquitectura interna do transdutor de deformação MuST. A parte sensora deste transdutor é constituída por uma única fibra integrando, na região central, um sensor de Bragg com 10 mm de comprimento. Esta fibra encontra-se pré-tensionada no interior do corpo tubular do transdutor, estando mecanicamente encastrada nas duas cabeças de ancoragem. Logo, a deformação do elemento estrutural, solidário com as cabeças de ancoragem, origina uma variação do alongamento da fibra e conseqüentemente do sensor de Bragg associado. No caso de se poder assumir uma extensão uniforme ao longo de todo o tramo de fibra compreendido entre as cabeças de ancoragem, resulta que a deformação experimentada pela rede de Bragg corresponde à deformação média entre pontos de ancoragem. A uniformidade geométrica da fibra óptica, assim como das próprias redes de Bragg quando realizadas criteriosamente, tem permitido constatar a validade desta medição junto do fabricante. Porém, a calibração do sensor pode ser justificada, sendo sempre possível estabelecer a relação efectiva entre a extensão média aplicada e a variação do comprimento de onda associado ao sensor de Bragg.

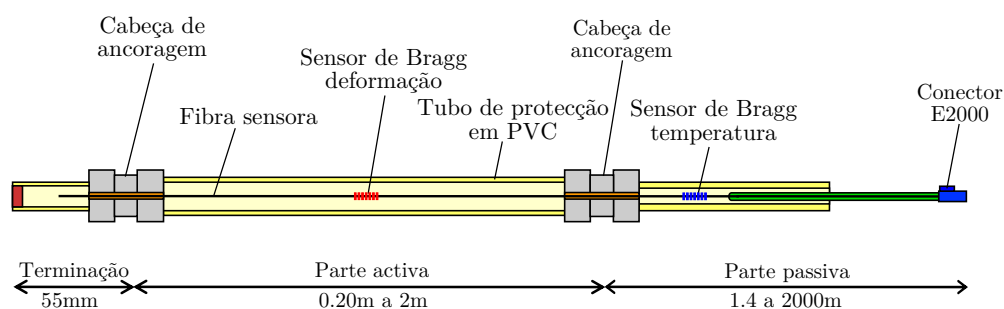


FIGURA 4.13: Arquitectura interno do transdutor de deformação MuST.

A sensibilidade intrínseca dos sensores de Bragg tanto a variações de deformação, como de temperatura conduz a que, na maior parte dos casos, seja necessário proceder à medição complementar da temperatura de forma isolada. Recorde-se que podendo o efeito da temperatura ser negligenciado em muitas aplicações laboratoriais, onde a temperatura

pode ser controlada e mantida praticamente constante, esta assume no caso das redes de Bragg um papel fundamental em aplicações de campo, sendo imprescindível para a correcta avaliação da deformação. Desta forma, este mesmo transdutor inclui um sensor de Bragg, localizado na parte passiva, livre de se deformar, para medição exclusiva da temperatura interna, conforme se mostra na Figura 4.13. Este último sensor destina-se, em primeiro lugar, à compensação dos efeitos da temperatura sobre o elemento sensor exposto à variação de deformação, podendo naturalmente ser utilizado simultaneamente para monitorização da própria temperatura.

Existem no mercado diversas unidades de leitura aptas para a interrogação de sensores de Bragg. Diferem sobretudo no princípio de medição, na banda de comprimentos de onda suportada, nas frequências de leitura e, naturalmente, na precisão. A SMARTEC comercializa as unidades MuST produzidas pela Micron Optics (ver Figura 4.12), baseadas em lasers de varrimento sincronizado a operar entre 1520 nm e 1580 nm. São disponibilizadas duas versões: a MuST *light* e a MuST *dynamic* para aplicações estáticas e dinâmicas, respectivamente. Neste estudo foi adoptada a unidade MuST *light*, cuja repetibilidade, especificada pelo fabricante, está definida em  $1 \mu\epsilon$  (0.001 mm/m) (Sistema C).

#### 4.4.2.3 Sistema FOD

O transdutor FOD utilizado é um transdutor de deslocamento relativo que, no que concerne à sua configuração externa, se aproxima de um convencional LVDT, conforme se ilustra na Figura 4.14. Contudo, este transdutor é baseado num interferómetro extrínseco de Fabry-Perot (ver secção Secção 2.3.4.4) configurado para medição de deslocamento por intermédio de fibras ópticas. Actualmente, a empresa canadiana Roctest (RoctestGroup: , 2011) detém a patente e a exploração comercial deste equipamento.

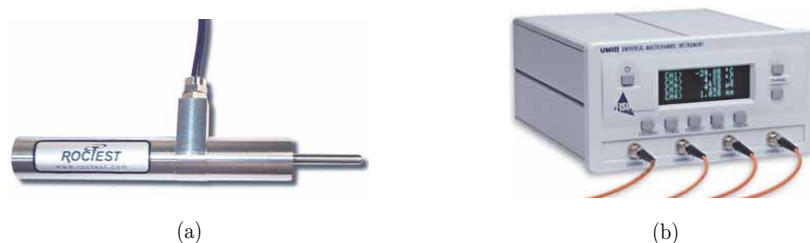


FIGURA 4.14: Sistema FOD: a) transdutor de deformação FOD; b) unidade de leitura UMI-4.

Este transdutor está concebido para medição de deslocamentos relativos por intermédio de uma haste metálica deslizante, podendo atingir um campo de medida de 20 mm, com aplicação directa, por exemplo, na medição de abertura de fendas e movimentos de juntas. A sua adaptação para medição de deformação foi realizada por intermédio de um prolongamento da haste móvel e de um conjunto de elementos de fixação adequados.

A respectiva base de medida fica assim definida pela distância entre os pontos de fixação à estrutura.

O princípio de funcionamento do presente transdutor assenta num interferómetro extrínseco de Fabry-Perot associado à forma móvel do transdutor, cuja configuração se esquematiza na Figura 4.15. Esta permite que a abertura da cavidade que forma o interferómetro de Fabry-Perot varie com a posição longitudinal da haste deslizante numa configuração denominada por interferómetro de Fizeau (Duplain et al., 1997). A repetibilidade indicada para este transdutor é da ordem dos 20  $\mu\text{m}$

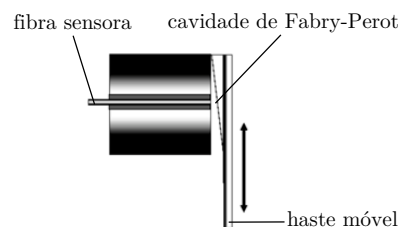


FIGURA 4.15: Representação esquemática do princípio de funcionamento do transdutor FOD.

O grupo Roctest fornece igualmente unidades de leitura apropriadas para interrogação de sensores de Fabry-Perot em geral. A particularidade dos sistemas de medição comercializados por esta empresa reside na possibilidade de desmodulação do respectivo sensor por intermédio de luz branca. A unidade UMI-4 (ver Figura 4.14) é um exemplo desta tecnologia, correspondendo à solução adoptada (Sistema D) apresenta especificações que garantem a medição do comprimento absoluto de qualquer cavidade de Fabry-Perot com exactidão da ordem do nanómetro.

Enquanto o interferómetro de Fabry-Perot é morfologicamente imune a variações de temperatura, as barras metálicas associadas sofrem variações de comprimento quando submetidas a variações de temperatura. Torna-se por isso necessário um processo de compensação de temperatura sobre o conjunto transdutor, sendo a medição da mesma por intermédio de sensores de temperatura auxiliares o processo mais expedito para fazê-lo. O conhecimento da temperatura permite uma compensação linear dos efeitos térmicos por calibração.

#### 4.4.2.4 Sistema SMARTape e SMARTprofile

As soluções SMARTape e SMARTprofile remetem para sensores distribuídos desenvolvidos e comercializados pela SMARTEC (SMARTEC, SA: , 2011). Ambos os sensores são baseados na mesma tecnologia óptica, no caso no espalhamento de Brillouin (ver Secção 2.3.5), diferindo no tipo de encapsulamento e na disposição da fibra óptica. Este encapsulamento é responsável não só pela transferência eficiente da deformação da estrutura para a fibra óptica, mas também pela protecção da mesma durante a instalação.

Recorde-se que no caso dos sensores distribuídos de Brillouin, o elemento sensor é a própria fibra óptica.

A solução SMARTape consiste numa única fibra embebida numa fita composta por material termoplástico reforçado com fibra de vidro conforme se mostra na Figura 4.16. Já o SMARTprofile consiste numa solução mais avançada potenciando a medição, não só da deformação, mas também da temperatura, conforme representado na Figura 4.17. Este último sensor é composto por um conjunto de duas fibras aderentes a um perfil moldado de plástico polietileno combinado com duas fibras livres para medição de temperatura. A duplicação de fibras, particularmente daquelas aderentes ao perfil, permite criar redundância na medição assim como potencia, quando disposta convenientemente, a avaliação do efeito da curvatura (flexão) estrutural. Ambas as soluções descritas podem ser instaladas de forma solidária com o elemento estrutural, à superfície por intermédio de colagem, fusão ou fixação mecânica. Estão reportados casos da sua utilização em oleodutos e gasodutos, obras geotécnicas, túneis, barragens e centrais nucleares (Glisic e Inaudi, 2007).

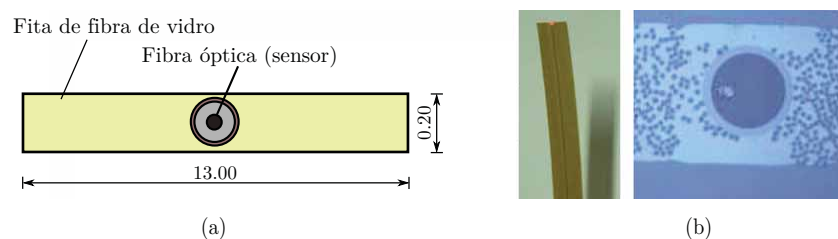


FIGURA 4.16: Transdutor SMARTape: a) seção transversal (dimensões em mm); b) vista geral.

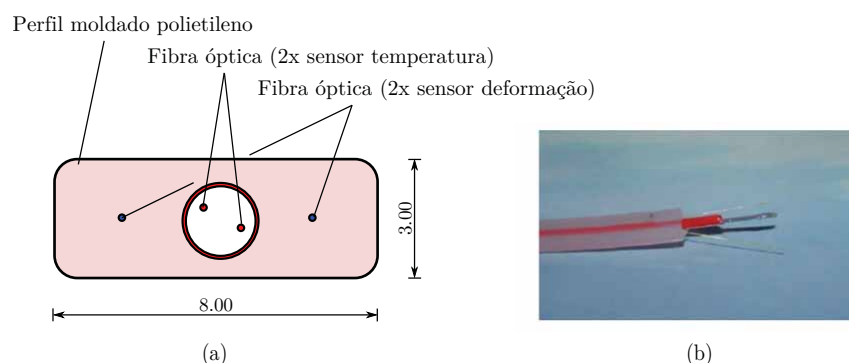


FIGURA 4.17: Transdutor SMARTprofile: a) seção transversal (dimensões em mm); b) vista geral.

No presente caso, pretendendo-se simular a sua utilização enquanto transdutor de deformação de base longa de medida, optou-se pela utilização de duas peças de ancoragem que, por aperto mecânico, asseguram a fixação do transdutor em dois pontos afastados pelo comprimento de medida. A deformação média deste troço de transdutor corresponde à deformação média do elemento estrutural nessa mesma base de medida.

A propriedade óptica medida é frequência de Brillouin associada ao fenómeno de espalhamento contínuo ao longo da fibra óptica monomodo que constitui o sensor. A SMARTEC e a Omnisense (Omnisens: , 2011) comercializam unidades de leitura adequadas para interrogação deste tipo de sensores, cujo modelo DiTeSt, destinada à monitorização estrutural, foi utilizado no conjunto de ensaios realizados. Este equipamento tira partido de uma tecnologia desenvolvida pelo *Metrology Laboratory of the Swiss Federal Institute of Technology of Lausanne* que permite a obtenção da frequência de Brillouin, promovendo a sua excitação com recurso a uma única fonte laser (Thevenaz et al., 1999). Este processo permite também a obtenção de medições perfeitamente auto-referenciadas sem necessidade de calibração prévia. A título informativo, o conjunto apresentado, constituído pelo transdutor e pela unidade DiTeSt, revela uma repetibilidade especificada em  $20 \mu\epsilon$  (0.020mm/m), com uma resolução espacial máxima de 0.20 m.

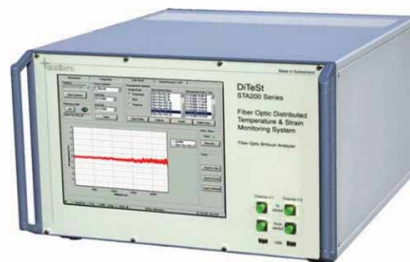


FIGURA 4.18: Unidade de leitura DiTeSt baseada no espalhamento de Brillouin estimulado.

Recorda-se que a frequência de Brillouin apresenta sensibilidade tanto à variação de deformação como de temperatura. Logo, também neste caso, se torna necessário proceder à sua compensação. A medição independente da mesma representa a forma mais corrente de efectuar essa compensação. No caso da solução SMARTprofile é possível quantificar, para este efeito, o perfil de temperaturas utilizando as duas fibras livres logo à partida integradas no sensor. A utilização de um cabo óptico externo, livre de se deformar, pode ser usada para medir temperaturas distribuídas de forma independente.

#### 4.4.2.5 Sistema VW-JM

O transdutor VW-JM corresponde a um transdutor para medição de abertura de juntas baseado no princípio da corda vibrante cuja arquitectura externa se mostra na Figura 4.19.a). Apesar de ter sido originalmente desenhado para medição de deslocamentos relativos em juntas, este sensor pode ser adaptado para medir deformações. Através de uma barra de prolongamento acoplada à haste móvel do transdutor foi possível definir a base de medida, utilizando um esquema de fixação semelhante ao adoptado anteriormente para o transdutor FOD.



FIGURA 4.19: Sistema VW-JM: a) transdutor VW-JM; b) unidade de leitura AVW200.

Em termos de princípio de funcionamento, o presente transdutor é baseado numa corda vibrante que se encontra ligada, numa extremidade, a uma mola fixa ao corpo do transdutor e, na outra extremidade, a haste deslizante. Com este princípio simples, a movimentação da haste influi directamente na tensão instalada na corda e, conseqüentemente, altera a sua frequência de vibração natural. Dada a sensibilidade intrínseca deste sensor a variações de temperatura, este transdutor integra um sensor de temperatura interno para posterior compensação dos efeitos térmicos. Em termos gerais, a repetibilidade especificada para este sistema situa-se nos  $10 \mu\epsilon$ .

Para medição da frequência de vibração do sensor, adoptou-se a unidade de leitura da Campbell Scientific (Campbell Scientific, Inc.: , 2011), representada pelo modelo AVW200 (ver Figura 4.19.b), que permite a excitação electromagnética automática da corda e posterior processamento do sinal no domínio da frequência através de uma transformada interna de Fourier realizada autonomamente.

#### 4.4.3 Avaliação do desempenho e resultados

Procedeu-se à comparação directa do desempenho dos diferentes sistemas de medição, submetendo-os a testes realizados em condições idênticas, procurando avaliar as características mais relevantes tendo em vista as especificidades das aplicações de engenharia civil. Recorrendo à realização de um conjunto de ensaios, tanto em condições laboratoriais como de campo, foram avaliadas as seguintes características metrológicas de cada sistema:

- i) exactidão do sistema de medida;
- ii) precisão do sistema de medida;
- iii) sensibilidade à temperatura da unidade de leitura;
- iv) sensibilidade à temperatura do transdutor.

Numa primeira fase, foram realizados testes laboratoriais, em condições controladas, para caracterização da exactidão e precisão de cada sistema de medição, assim como, da sensibilidade à temperatura das respectivas unidades de leitura. Todos os testes foram

repetidos em condições idênticas para todos os sistemas de medida. Depois disso, o conjunto de transdutores foi instalado em condições criteriosamente definidas na Ponte Ricciolo, na cidade de Lugano, na Suíça, com vista à avaliação e comparação do seu desempenho em condições reais. Neste caso, foi dada especial atenção à avaliação da sensibilidade à temperatura dos transdutores tendo em conta as flutuações diárias de temperatura observadas na ponte.

#### 4.4.3.1 Exactidão

A exactidão de cada sistema de medição foi avaliada em laboratório, comparando o grau de aproximação entre o resultado da medição dado pelo respectivo sistema e a deformação imposta ao transdutor em condições controladas de ensaio. Eventuais erros associados à não-linearidade, não-repetibilidade e histerese do conjunto formado pela unidade de leitura e respectivo transdutor de deformação foram sumariamente quantificados por intermédio do respectivo erro de medição.

O esquema utilizado para imposição da deformação está caracterizado na Figura 4.20. Este é composto por uma base rígida integrando, afastados de um metro, dois pontos para fixação dos transdutores. Enquanto um ponto de fixação está rigidamente solidário com a base e não se move durante o ensaio, o outro elemento de fixação encontra-se ligado a uma base móvel que permite imposição de deslocamentos de translação longitudinal com recurso a um parafuso micrométrico (ver Figura 4.21.a)). Ambas as bases estavam preparadas para fixação das cabeças de ancoragem dos diferentes transdutores testados.

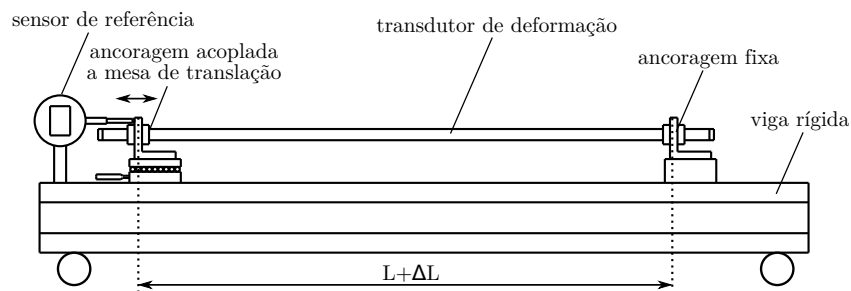


FIGURA 4.20: Configuração do esquema utilizado para realização de testes laboratoriais.

As deformações impostas foram medidas com recurso a um comparador digital (ver Figuras 4.21.b) e 4.21.c)), cujas características metrológicas certificadas pelo fabricante revelam possuir um erro de medição máximo de 0.001 mm. Faz-se notar que o erro referido corresponde, numa base de medida de 1.00 m, a um rigor na medição da deformação de  $1 \mu\epsilon$  (0.001 mm/m). O resultado do comparador foi desta feita adoptado para referência na quantificação do erro de medição dos diferentes transdutores.

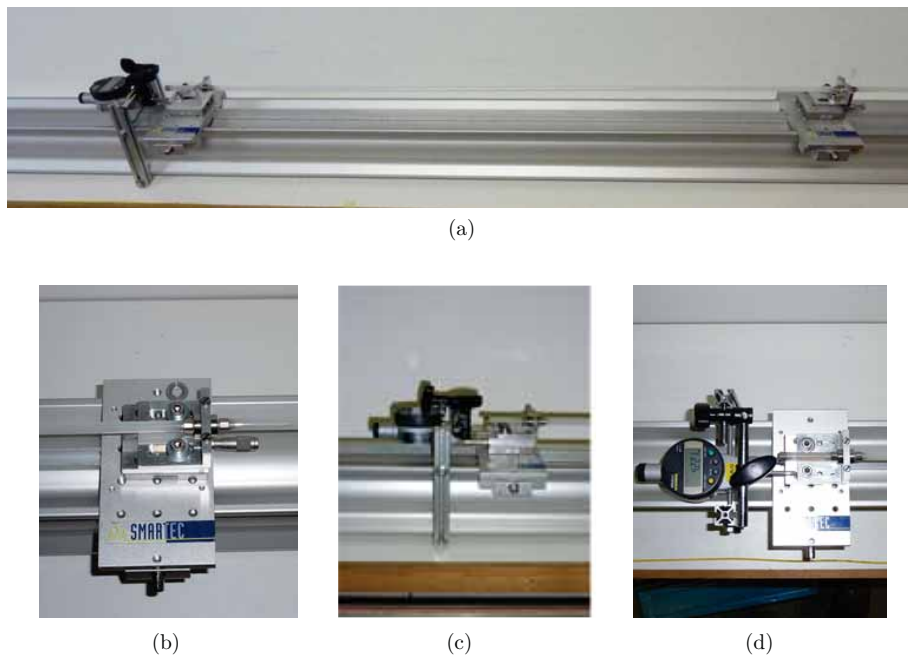


FIGURA 4.21: Pormenores do esquema utilizado para realização de testes laboratoriais: a) vista geral; b) parafuso micrométrico para imposição de deslocamentos; c) vista de topo do comparador utilizado como equipamento de referência; d) vista de lateral do comparador e respectiva ancoragem móvel.

Para cada sistema analisado, os respectivos erros de medição foram determinados comparando os resultados obtidos com o sistema em causa e a correspondente deformação imposta quantificada rigorosamente através do sensor de referência.

No total foram impostos 20 patamares de deformação compreendidos no intervalo de 0 a 10000  $\mu\epsilon$  (10 mm/m), associados ao alongamento do transdutor (tração). Estes patamares foram definidos com variações médias de 500  $\mu\epsilon$ , formando um ciclo de alongamento e retorno ao estado de repouso. A Figura 4.22 ilustra o resultado típico deste ensaio, usando por representatividade os resultados do sistema SOFO (Sistema B). Na mesma figura, representa-se a recta de regressão linear dada pela minimização dos desvios quadrados e revelam-se alguns indicadores estatísticos relativos ao modelo de ajuste.

Os resultados pormenorizados dos restantes sistemas podem ser encontrados na bibliografia (Rodrigues e Inaudi, 2010a). Neste documento, para comparação do desempenho dos distintos sistemas, são adoptados dois indicadores. Em primeiro lugar, recorre-se ao erro associado ao declive da recta de ajuste dado pela diferença entre o valor unitário ideal e aquele obtido pelo melhor ajuste ( $p_1$  na Figura 4.22). De forma complementar, utiliza-se a dispersão de pontos em torno da recta de melhor ajuste linear dada pela raiz do erro quadrático médio (RMSE). Desta forma, remete-se para o erro de declive a capacidade de avaliar a calibração fornecida pelo fabricante do transdutor (adoptada previamente), e atribui-se ao RMSE a possibilidade de indicar a dispersão relativamente

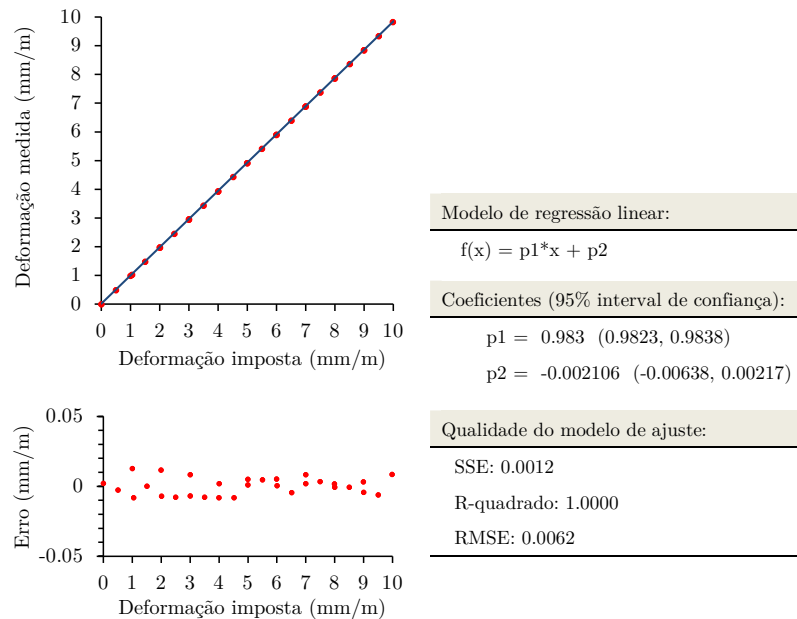


FIGURA 4.22: Resultado do teste para avaliação da exactidão do sistema constituído pelo transdutor SOFO combinado com a unidade de leitura MuST correspondente a um interferómetro de Michelson desmodulado no domínio espectral

ao melhor modelo de ajuste. Este segundo indicador deverá reflectir erros de histerese e outros erros de não-linearidade, assim como ruído revelado pelo sistema. Faz-se notar que o indicador R-quadrado não foi comparado, visto que revelou valores superiores a 0.9999 para todos os sistemas. A comparação integrada dos resultados obtidos está presente na Figura 4.23.

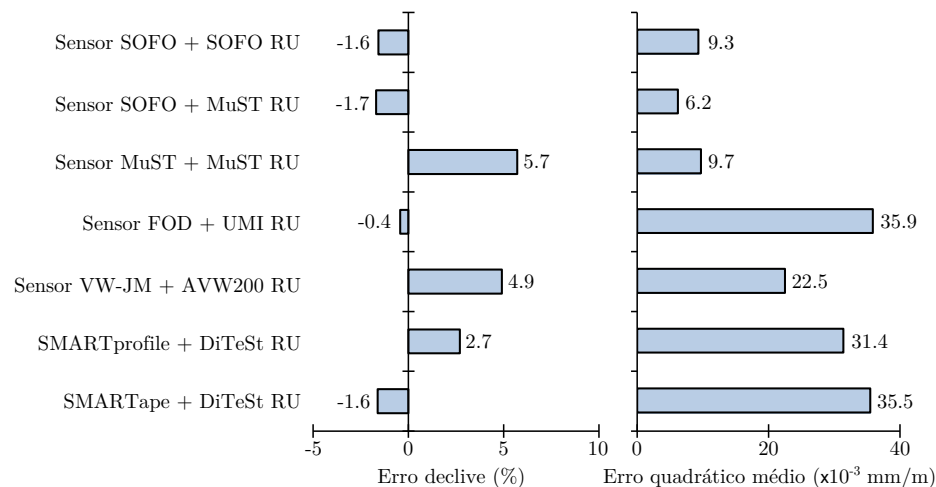


FIGURA 4.23: Comparação dos erros de medição associados a cada sistema avaliado: a) erro associado ao declive da recta de ajuste; b) erro quadrático médio

No conjunto de sistemas analisado, obteve-se um erro máximo no declive da recta de ajuste de 5.7%, correspondendo ao sistema que integra o transdutor MuST, baseado nos sensores de Bragg (Sistema C). Contudo, apesar de este sistema apresentar o maior erro de calibração, verifica-se que foi simultaneamente aquele que apresentou um menor

indicador RMSE. Isto significa que, se forem ajustados os coeficientes da expressão usada para converter a variação do comprimento de onda em deformação média, se poderá reduzir significativamente o respectivo erro de medição. Recorde-se que inerente ao princípio de transdução deste transdutor, o fabricante assume que a deformação medida pelo sensor de Bragg corresponde à deformação média entre cabeças de ancoragem. Face ao resultado encontrado, constata-se que esta pode ser uma consideração grosseira, pelo que se recomenda uma calibração adequada deste transdutor para redução directa do respectivo erro de medição. Conclusões semelhantes podem ser tiradas dos sistemas com resultados semelhantes, nomeadamente no que diz respeito à necessidade de calibrações mais adequadas.

Salienta-se igualmente uma excelente concordância nos resultados obtidos na desmodulação do sensor SOFO por intermédio da unidade SOFO VI (Sistema A) e pela unidade MuST (Sistema B), correspondendo a uma desmodulação interferométrica e espectral, respectivamente. Neste particular, verificou-se que os resultados alcançados com a desmodulação espectral são ligeiramente melhores quando comparados com a desmodulação tradicional, conforme atestam os respectivos indicadores RMSE.

Importa ainda referir que o menor erro de declive foi obtido pelo sistema FOD (Sistema D), baseado no interferómetro de Fabry-Perot. Contudo, este sistema foi aquele que revelou maior índice RMSE. No decorrer dos ensaios ficou patente a existência de sinais de histerese, justificando desde já a maior dispersão de resultados. Pensa-se que este erro de medição está associado ao princípio mecânico interno do transdutor.

Verificou-se ainda que ambos os sistemas distribuídos, recorrendo aos transdutores SMARTape (Sistema F) e SMARTprofile (Sistema G), exibiram comportamentos muito semelhantes como era aliás de esperar. O erro de medição, assim como o RMSE assumem valores bastante próximos nestes dois sistemas. Recorde-se que foi utilizada a mesma unidade de leitura para interrogação dos dois transdutores.

#### 4.4.3.2 Precisão

A precisão de cada sistema foi avaliada no que caracteriza a sua repetibilidade, ou seja, avaliando a dispersão de um conjunto significativo de leituras realizadas nas mesmas condições, o que inclui o mesmo operador, a mesma localização, o mesmo equipamento e as mesmas condições de temperatura e deformação. Para o efeito, utilizou-se o mesmo esquema de suporte apresentado anteriormente (ver Figura 4.20) mas agora mantendo constante um nível médio de deformação e procedendo à recolha de 100 amostras com a cadência máxima permitida pelo sistema.

Apresenta-se na Figura 4.24 os resultados alcançado com o sistema SOFO onde se encontra avaliado o desvio padrão e a amplitude da dispersão de um conjunto de 100 medições consecutivas realizadas em condições controladas de repetibilidade. Os dois indicadores

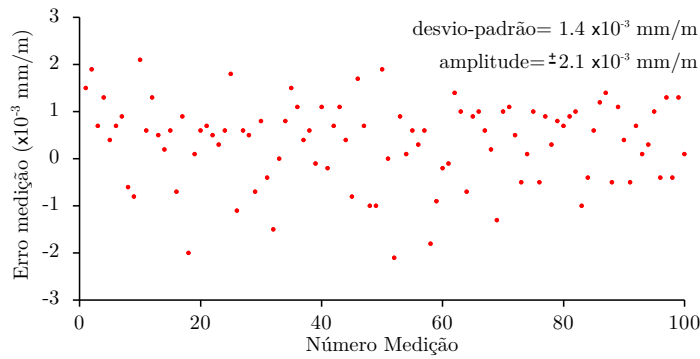


FIGURA 4.24: Resultado do teste para avaliação da repetibilidade do sistema constituído pelo transdutor SOFO combinado com a unidade de leitura MuST correspondente a um interferómetro de Michelson desmodulado no domínio espectral

referidos encontram-se comparados na Figura 4.25, confrontando os diversos sistemas analisados.

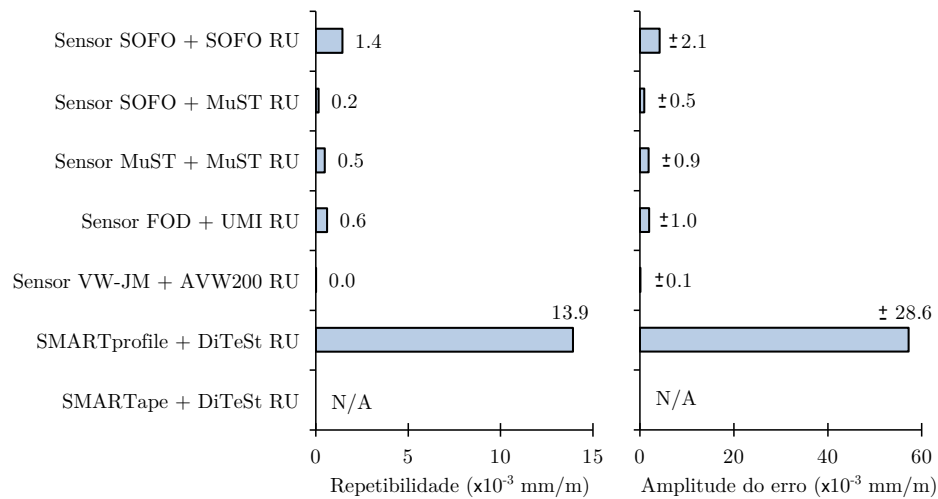


FIGURA 4.25: Comparação da repetibilidade associada a cada sistema avaliado: a) repetibilidade (desvio-padrão de 100 medições consecutivas); b) amplitude da nuvem de pontos

Todos os resultados obtidos estão contidos nos limites de precisão especificados pelos fornecedores dos sistemas de medição. Neste particular, o sistema constituído pelo transdutor convencional de cordas vibrantes (Sistema E) foi aquele que exibiu maior precisão. Salienta-se que a precisão demonstrada por este sensor convencional ultrapassou em cerca de cinco vezes o melhor valor obtido com os sistemas em fibra óptica. Por outro lado, as soluções distribuídas baseadas na dispersão de Brillouin, inquiridas com a unidade DiTeSt revelaram a menor precisão tal como seria espectável devido às limitações associadas à tecnologia óptica em apreço.

Mais uma vez se realça que a utilização conjunta do sensor SOFO combinado com a

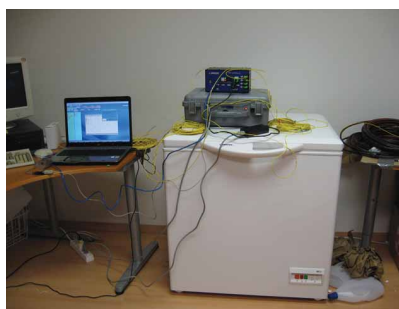
unidade de leitura MuST (Sistema B) permitiu obter um assinalável incremento na precisão do sistema de medição quando comparado com a solução convencional recorrendo à unidade SOFO VI (Sistema A). O valor obtido pelo processamento espectral foi cerca de 10 vezes melhor que o equivalente associado ao interferómetro de Michelson da unidade SOFO VI.

#### 4.4.3.3 Sensibilidade à temperatura das unidades de leitura

A sensibilidade à temperatura e o respectivo erro de medição foram quantificados por intermédio do desvio padrão dos resultados obtidos durante a monitorização de um transdutor mantido em condições de temperatura e deformação estáveis, sujeitando a unidade de leitura a variações térmicas extremas. Procurou-se assim isolar o erro de medição associado exclusivamente à exposição da unidade de leitura a variações bruscas de temperatura. Refere-se que esta é uma característica metroológica raramente especificada pelos fornecedores dos sistemas, mas que se considera de importância significativa na monitorização estrutural visto que é corrente verificarem-se variações térmicas significativas no ambiente que rodeia o equipamento de leitura.



(a)



(b)

FIGURA 4.26: Execução do ensaio para avaliação da sensibilidade à temperatura das unidades de leitura: a) unidade DiTeSt no interior de câmara frigorífica à temperatura de 0 °C; b) unidades SOFO VI e MuST light à temperatura ambiente (22 °C) após retirada a da câmara.

Durante o teste, os transdutores foram mantidos com um nível constante de deformação, utilizando para o efeito o esquema da Figura 4.20, e mantidos num ambiente sob temperatura constante. Nestas condições, a unidade de leitura foi transferida das condições ambientais do laboratório (22 °C) para o interior de uma câmara frigorífica mantida a 0 °C, conforme se ilustra na Figura 4.26. Depois da estabilização da temperatura na unidade de leitura, próxima dos 0 °C, esta foi ainda removida da câmara e novamente exposta às condições ambientais do laboratório. A monitorização contínua durante este período com a ocorrência de variações bruscas de temperatura ( $\Delta T = \pm 22$  °C) permitiu identificar potenciais perturbações decorrentes da sensibilidade à temperatura das diversas unidades de leitura.

A Figura 4.27 confronta os resultados obtidos para os diferentes sistemas no que diz respeito ao erro quadrático médio observado durante a introdução e retirada da unidade de leitura do interior da câmara frigorífica.

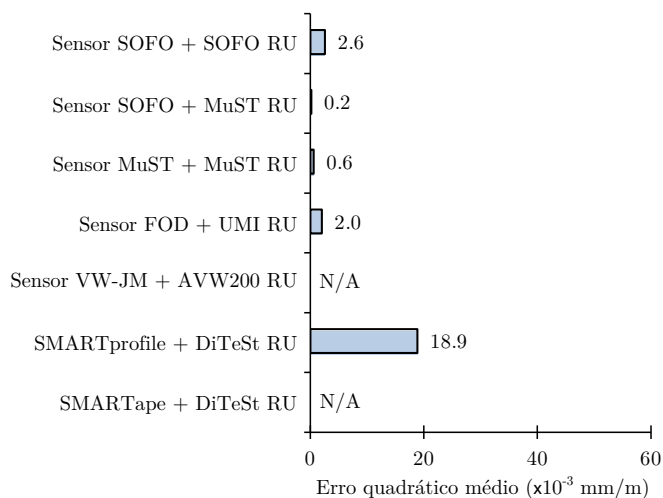


FIGURA 4.27: Comparação do erro de medição associado à sensibilidade à temperatura de cada unidade de leitura avaliada.

Assinala-se a ausência de variações significativas na leitura dos sensores associadas às variações térmicas expostas. Os valores respeitantes aos erros representados são também compatíveis com os limites de precisão indicados para as respectivas unidades de leitura, encontrando-se igualmente em consonância com aqueles obtidos anteriormente com as unidades de leitura mantidas em condições estáveis de temperatura.

#### 4.4.3.4 Sensibilidade à temperatura

Procurou-se avaliar a sensibilidade relativa à temperatura do conjunto definido por cada transdutor e pela respectiva unidade de leitura com recurso aos resultados obtidos durante a monitorização da Ponte Ricciolo. Refere-se que este ensaio foi realizado numa estrutura real porque, por um lado, não havia uma câmara climática disponível que permitisse o ensaio em condições específicas de transdutores com 1 m de base de comprimento e, por outro lado, se considerou de todo o interesse comparar o desempenho dos transdutores em condições que se podem considerar próximas da generalidade das aplicações da engenharia civil.

A estrutura do Ponte Ricciolo, uma ponte de betão armado pré-esforçado com secção em caixão, ofereceu um conjunto de características que justificaram a sua adopção para o presente teste. Desde logo se destaca o facto de estar sujeita a um plano de monitorização estrutural permanente em pleno funcionamento. Realça-se igualmente a proximidade desta ponte relativamente às instalações da SMARTEC, facilitando em muito a logística inerente à instalação e leitura de um conjunto ainda significativo de novos sensores.

Para o propósito acima exposto, os vários transdutores de deformação foram instalados ao longo da uma secção transversal comum da ponte em posições tão próximas quanto possíveis. Ilustra-se, na Figura 4.28, a posição dos transdutores no interior da secção em caixão da ponte, sendo possível avaliar a proximidade dos mesmos ao longo da alma lateral dessa secção.



FIGURA 4.28: Vistas gerais da instalação dos vários transdutores de deformação, em paralelo, numa secção transversal da Ponte Ricciolo, na Suíça.

Procurou-se instalar estes transdutores numa secção transversal com momento flector

nulo conforme se determinou num modelo de cálculo simplificado da ponte e se comprovou com base nos resultados da monitorização permanente. Encontraram-se assim condições para assumir como praticamente constante o perfil de deformação ao longo de toda a altura da secção transversal, logo esperam-se deformações idênticas em todos os transdutores devido a variações de temperatura uniforme. Complementarmente, com os sensores de deformação descritos foram instalados sensores de temperatura adicionais para monitorização das respectivas variações diárias. Procedeu-se à recolha praticamente contínua de dados a uma cadência de uma leitura a cada 30 minutos durante um período de um mês.

Assumi-se, nesta análise, o facto de o sistema SOFO ser praticamente insensível a variações de temperatura conforme demonstram os testes realizados por Lienhart (2005). Desta forma os resultados alcançados com o sistema SOFO foram adoptados como referência para avaliação da sensibilidade à temperatura dos outros pares. Seleccionaram-se também os períodos de monitorização nocturna procurando a predominância natural de variações de temperatura uniforme. Desta forma, atendendo à predominância de esforços normais na secção transversal instrumentada, assumiu-se igualmente a uniformidade da deformação mecânica experimentada por todos os transdutores.

A relação entre os registos obtidos com o sistema SOFO, traduzindo a deformação total, e a temperatura registada no betão está presente na Figura 4.29. Correlacionam-se as duas grandezas, registando-se uma capacidade de ajuste assinalável revelada pelo modelo linear representado. O declive obtido, igual a  $11.18 \mu\text{e}\cdot\text{°C}^{-1}$ , representa também uma aproximação muito aceitável do coeficiente de dilatação térmica do betão estrutural.

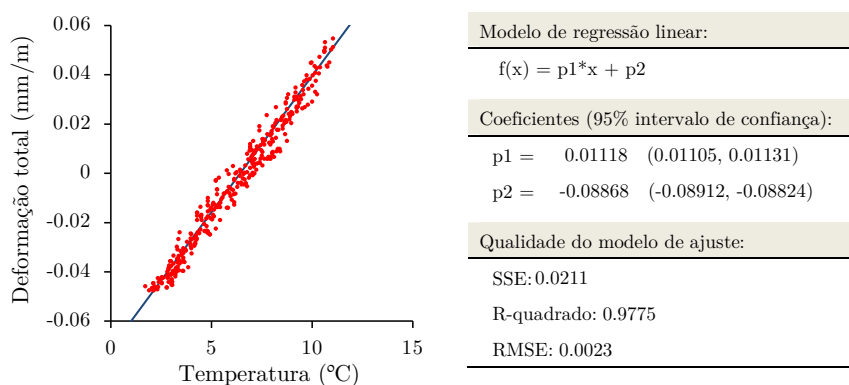


FIGURA 4.29: Correlação entre a temperatura na Ponte Ricciolo e a extensão total registada com o sistema SOFO beneficiando de total insensibilidade a variações de temperatura por parte do sensor.

Procedeu-se ao cálculo da deformação residual associada à temperatura, subtraindo aos resultados de cada sistema, sem qualquer tipo de compensação de temperatura, os resultados do sistema SOFO, tido como referência. A correlação entre a variação de temperatura medida e a deformação residual associada foi, desta forma, adoptada para estimar a sensibilidade à temperatura de cada sistema. Mostra-se em representatividade

os resultados obtidos para o sistema MuST, na Figura 4.30. Resultados análogos foram obtidos para os restantes sistemas, resumindo-se a respectiva comparação na Figura 4.31.

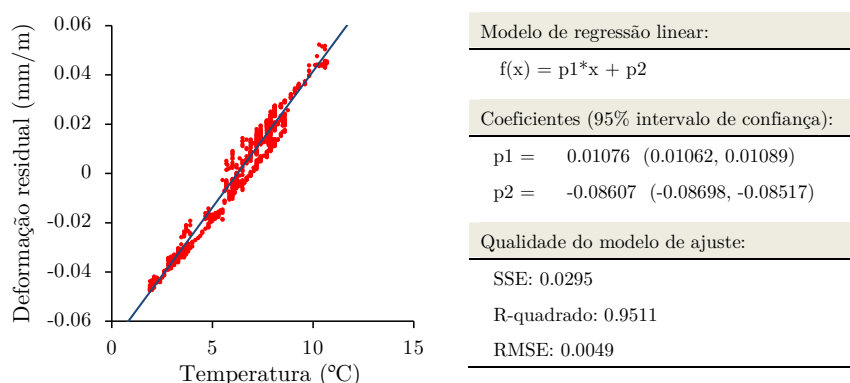


FIGURA 4.30: Correlação entre a temperatura na Ponte Ricciolo e a extensão residual registada com o sistema constituído pelo transdutor MuST combinado com a unidade de leitura MuST *light*, baseado num sensor de Bragg.

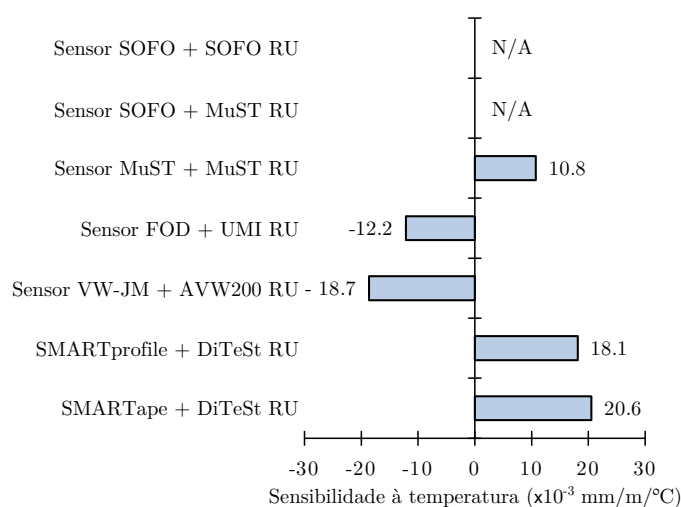


FIGURA 4.31: Comparação das sensibilidades à temperatura associadas a cada sistema avaliado obtidas a partir da monitorização da Ponte Ricciolo.

Assinala-se que todos os sistemas, excluindo naturalmente o SOFO, revelaram uma sensibilidade à temperatura que não pode ser negligenciada. Tal característica significa que se não for tida em conta a compensação dos efeitos térmicos durante a avaliação da deformação, pode-se estar na presença de erros com elevado significado incompatíveis com a exactidão exigida ao sistema. Contudo, o conhecimento da temperatura, ou melhor da sua variação, durante o período de monitorização permite eficazmente compensar os referidos efeitos de forma perfeitamente linear.

Apesar dos resultados obtidos poderem ser vistos como valores razoáveis, estes resultam de uma análise realizada sobre uma estrutura real cuja complexidade não pode ser negligenciada, nem simplificada. Isto significa que muitos outros efeitos, para além

da variação uniforme da temperatura, podem ter afectado os resultados. Contudo e ainda assim, verifica-se uma correspondência aceitável entre os valores obtidos e aqueles esperados, apontando-se um valor de  $10.8 \mu\epsilon/^\circ\text{C}$  e  $18 \mu\epsilon/^\circ\text{C}$  para os sistemas baseados no sensor de Bragg (MuST) e no espalhamento de Brillouin (SMARTape e SMARTprofile), respectivamente.

Relativamente às soluções baseadas no interferómetro de Fabry-Perot (FOD) e na corda vibrante (VW-JM) recorde-se que estes transdutores foram instalados com necessidade de se recorrer a barras metálicas para definição da base de medida. A expansão térmica destas barras introduz por si só alguma sensibilidade à temperatura no sistema de medição. Os valores obtidos para estes coeficientes são perfeitamente compatíveis com os coeficientes de dilatação térmica dos materiais envolvidos na materialização das barras de prolongamento (aço). Seguindo uma análise semelhante, poder-se-ão ter em conta os valores dos coeficientes de dilatação térmica dos respectivos materiais para extrapolações para outras bases de medida.

No cômputo geral e apesar da relativa aproximação dos resultados obtidos, pode-se recomendar a realização de testes para avaliação da sensibilidade à temperatura de forma isolada e em condições mais controladas, nomeadamente com recurso a ensaios de caracterização realizados em laboratório. A avaliação de uma banda maior de temperaturas deveria também ser contemplada. Ainda assim, pensa-se que este teste revelou utilidade significativa na avaliação do comportamento dos diferentes sistemas em condições reais, permitindo comparar não só o seu comportamento mas as especificidades da instalação e leitura em condições bem diferentes das condições laboratoriais anteriormente experimentadas.

## 4.5 Aplicação durante a construção da Ponte Ricciolo

De forma a ilustrar as potencialidades da utilização de sensores de deformação de base longa de medida na monitorização do comportamento global das estruturas, complementa-se este capítulo com uma breve apresentação dos resultados obtidos na Ponte Rocciolo, na Suíça, durante o acompanhamento do seu processo construtivo. Trata-se de uma ponte instrumentada e monitorizada pela SMARTEC, SA (Glisic et al., 2008, 2010).

Realça-se que a exposição exaustiva dos resultados desta monitorização excede o âmbito desta tese e ultrapassa os objectivos e o trabalho do autor. Procura-se, no entanto, analisar um conjunto de resultados seleccionados de forma a demonstrar a eficiência do método proposto na monitorização desta estrutura sobretudo focando a fase da sua construção. Detalhes complementares relativos a este projecto de monitorização podem ser encontrados na bibliografia (Glisic et al., 2008, 2010).

### 4.5.1 A Ponte Ricciolo

A Ponte Ricciolo foi construída entre 2004 e 2005, servindo o nó de acesso a auto-estrada A2, na região de Lugano, no sul da Suíça. Mostram-se duas vistas gerais da ponte, na Figura 4.32, remetendo para um enquadramento geral da estrutura.



FIGURA 4.32: Vistas gerais da Ponte Ricciolo, servindo a Auto-estrada A2, na Suíça: a) vista exterior do tabuleiro curvo; b) vista do interior do caixão.

Estruturalmente a ponte apresenta cinco vãos com continuidade ao longo de um desenvolvimento total de 134 m. Distingue-se o seu traçado circular, materializado por uma secção em caixão de betão armado e pré-esforçado em várias direcções.

### 4.5.2 Plano de instrumentação

Centra-se a monitorização estrutural, em exclusivo, no vão central com 35 m, sobre o rio Vedaggio. Na Figura 4.33, representa-se, em planta e em corte transversal tipo, o plano de instrumentação adoptado para este vão da ponte (Glisic et al., 2008).

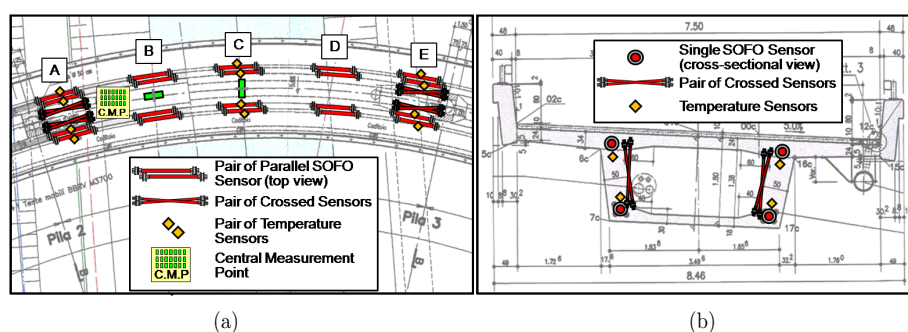


FIGURA 4.33: Plano de instrumentação adoptado durante a construção da Ponte Ricciolo: a) representação esquemática em planta; b) representação esquemática em corte transversal na secção-tipo (Glisic et al., 2008, 2010).

A instrumentação aplicada consistiu sobretudo em transdutores de deformação SOFO, idênticos aos anteriormente analisados, com 1.00 m de base de medida, embebidos no betão, distribuídos por cinco secções transversais da ponte. Em cada secção foram

dispostos de forma criteriosa quatro transdutores, em cada vértice do caixão, em distribuição paralela, alinhada longitudinalmente com o eixo da estrutura. Externamente foram ainda instalados, em duas secções junto aos apoios, quatro pares de cruces de sensores de deformação, fixados externamente à estrutura, para avaliação dos efeitos de corte. Ilustra-se a instalação dos sensores de deformação na Figura 4.34.



FIGURA 4.34: Instalação dos sensores de deformação na Ponte Ricciolo durante a sua construção: a) sensores paralelos embebidos no betão (secção C); b) cruz de sensores externos junto da secção de apoio (secção E) (Glisic et al., 2008, 2010).

Faz-se ainda referência, embora de carácter secundário para este estudo, ao facto de terem ainda sido instalados dois inclinómetros ortogonais junto à secção de meio-vão. Foram ainda contemplados vários termopares não só embebidos no betão junto aos demais sensores, mas também no meio envolvente para medição da temperatura ambiente.

### 4.5.3 Resultados durante a fase construtiva

No âmbito deste capítulo, mostram-se diferentes resultados relativos à monitorização estrutural desenvolvida durante a construção da ponte correspondendo a um período aproximado de quatro meses e meio. Identificam-se os principais trabalhos abrangidos no período de monitorização, que se verificam com significativo impacto nos esforços instalados na estrutura, nomeadamente (Glisic et al., 2008):

- (i) aplicação parcial do pré-esforço (30 a 70%) e a remoção parcial do cimbra;
- (ii) construção das guardas e separadores;
- (iii) aplicação do pré-esforço remanescente (70 a 100%) e remoção total do cimbra.

A título ilustrativo, representa-se, na Figura 4.35, a evolução dos efeitos de flexão observados durante o período assinalado da construção da ponte. Estão representadas as curvaturas verticais médias, na direcção vertical e horizontal, na secção de meio-vão (secção C) e na secção junto ao apoio (secção E). O período de ocorrência dos trabalhos acima enumerados está também assinalado. Destaca-se que estes resultados foram

determinados com base na ponderação directa dos pares paralelos de transdutores embebidos.

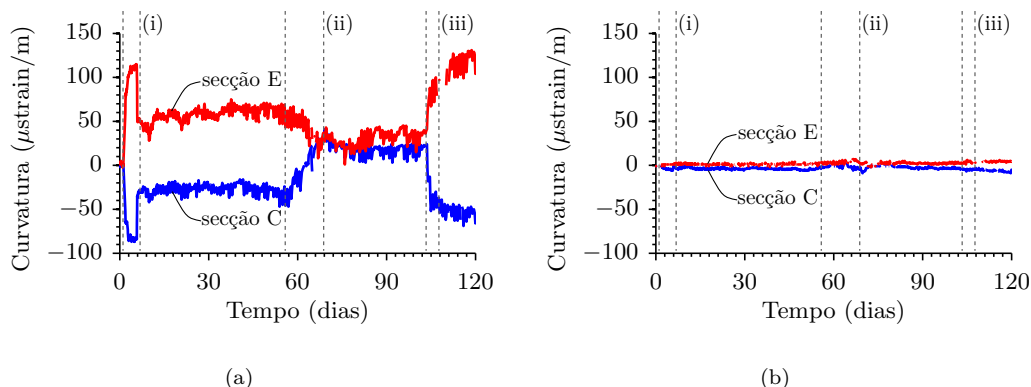


FIGURA 4.35: Resultados da monitorização estrutural levada a cabo na Ponte Ricciolo durante a sua construção: a) curvaturas verticais médias nas secções C e E; b) curvaturas horizontais médias nas secções C e E.

Na Figura 4.36, mostram-se de forma semelhante a evolução dos efeitos de corte, cobrindo a extensão de corte nas duas secções próximas dos respectivos apoios (secção A e E). Mais uma vez, foram utilizados exclusivamente os resultados dos transdutores de deformação, nomeadamente das quatro cruces de transdutores presentes nas secções de apoio.

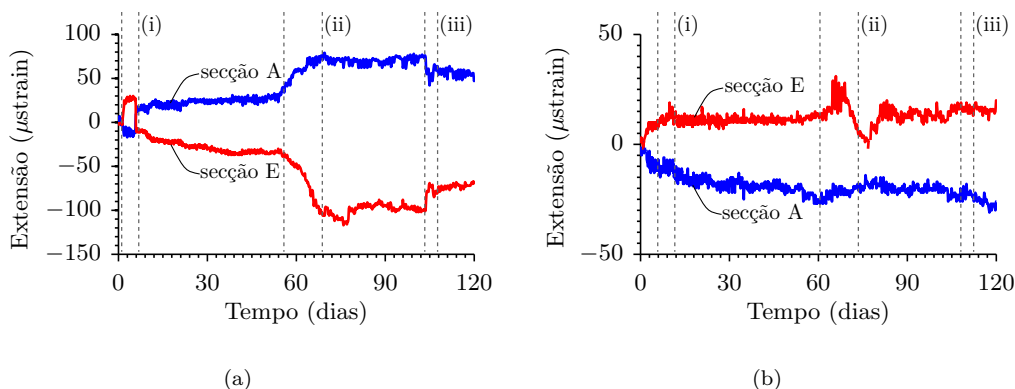


FIGURA 4.36: Resultados da monitorização estrutural levada a cabo na Ponte Ricciolo durante a sua construção: a) extensão de corte média devida ao esforço transversal vertical nas secções A e E; b) extensão de corte média devida à torção nas secções A e E.

Na Figura 4.37 mostra-se ainda, para o mesmo período, a deformada aproximada da estrutura nas duas direcções transversais. Refere-se que estes resultados foram estimados com base na dupla integração das respectivas curvaturas medidas obtidas nas cinco secções instrumentadas. É claramente visível o impacto do andamento da construção no comportamento e geometria da estrutura deformada. Os efeitos da temperatura, nomeadamente da sua componente diferencial, estão também retratados nestes resultados.

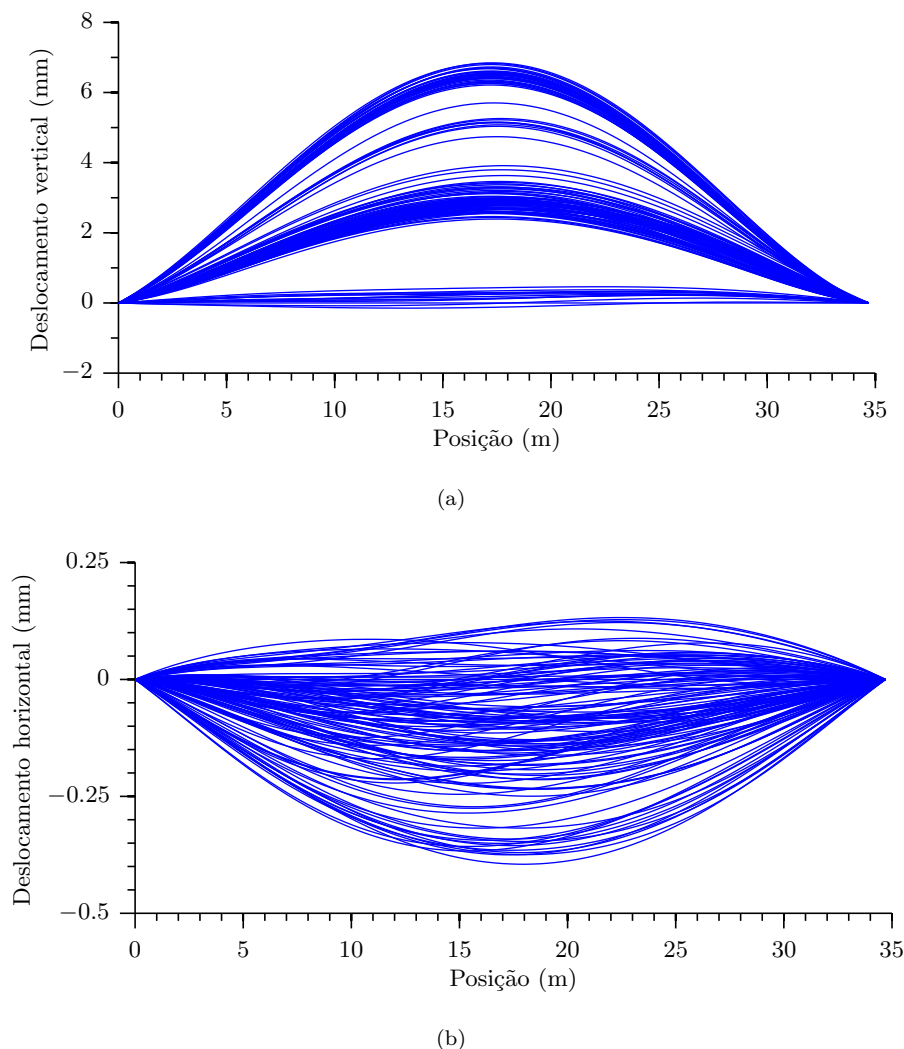


FIGURA 4.37: Deformadas obtidas a partir dos resultados da monitorização estrutural levada a cabo na Ponte Ricciolo durante a sua construção: a) deslocamentos verticais do eixo da ponte; b) deslocamentos horizontais do eixo da ponte.

## 4.6 Considerações finais

Apresentaram-se, neste capítulo algumas particularidades associadas à medição de deformações visando a avaliação do comportamento e global das estruturas. Destacou-se a natureza heterogénea de alguns materiais, bem como diversos constrangimentos geométricos que perturbam, de forma natural, os campos de extensões mecânicas levando a concentrações significativas. Neste contexto e no que se relaciona com a monitorização estrutural, onde importa conhecer o comportamento global de uma estrutura, mais do que a distribuição local de extensões, salienta-se a competência dos sensores de deformação com base longa de medida. Reporta-se este estudo a sensores que permitem a medição de extensões médias ao longo de distâncias representativas, que podem ir de 250 mm até algumas dezenas de metros.

Apresentou-se um estudo laboratorial, contemplando uma campanha de ensaios que permitiram validar, quantificar e comparar o desempenho de diferentes sensores de deformação de base longa de medida, existentes no mercado, com aplicação alternativa, baseados em princípios de medição distintos. Neste contexto, foram analisadas seis soluções em fibra óptica, englobando uma rede de Bragg, um interferómetro de Fabry-Perot, dois interferómetros de Michelson e dois sensores baseados no espalhamento de Brillouin. Foi ainda incluída uma solução convencional, baseada no princípio das cordas vibrantes, também para comparação.

Procedeu-se à avaliação directa de quatro importantes características metrológicas: a exactidão dos sistemas, a precisão dos sistemas, a sensibilidade à temperatura das unidades de leitura e, por último, a sensibilidade à temperatura do conjunto constituído pelos sensores e pelas respectivas unidades de leitura. Os principais resultados alcançados foram apresentados ao longo deste capítulo, resumindo-se os principais indicadores na Tabela 4.2. Face aos resultados, considera-se que, no geral, todas as soluções exibiram um comportamento adequado para a monitorização estrutural, respondendo muito satisfatoriamente às especificações necessárias para aplicações em campo.

Contudo, considera-se que, de forma a aumentar a exactidão das medições, deveriam ser adoptados, pelos fabricantes, procedimentos mais rigorosos de calibração tanto no que se relaciona com a medição directa da deformação, como no que diz respeito à compensação dos efeitos cruzados da temperatura. As dependências lineares evidenciadas na resposta dos sensores, tanto à deformação, como à temperatura, demonstram que esta melhoria seria possível e relativamente simples de ser processada. Face às deficiências encontradas e na ausência de regulamentação e controlo sobre as especificações dos fabricantes, recomenda-se ao utilizador a prévia calibração dos sensores antes da sua instalação em obra.

No que concerne à comparação directa de diferentes tecnologias ópticas, salienta-se que a selecção da solução mais adequada para um determinado projecto é um aspecto a ponderar de forma integrada. Do ponto de vista metrológico, os indicadores apresentados podem ser determinantes. Chama-se no entanto a atenção para outros aspectos não menos relevantes, tais como a gama de bases de medida disponível, o campo de medida tanto à compressão (C), como à tracção (T), as respectivas temperaturas de funcionamento tanto dos sensores como das unidades de leitura, bem como alguns aspectos mais subjectivos, tais como a facilidade de instalação e o custo do sistema. A título indicativo compararam-se algumas destas características na Tabela 4.3, resultantes não só da informação compilada junto dos fabricantes, mas também da experiência adquirida durante a utilização reportada.

Em suma, relativamente aos sistemas SOFO, baseado no interferómetro de Michelson, destaca-se a sua aptidão intrínseca para medição de deformações integradas, bem como a imunidade a variações de temperatura, a elevada precisão e a facilidade de instalação

TABELA 4.2: Resumos dos principais resultados alcançados durante a avaliação de diferentes sistemas baseados em sensores de deformação de base longa de medida.

	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>	<b>G</b>
Sensor	SOFO	SOFO	MuST	FOD	VW-JM	SMART profile	SMART Tape
Unidade leitura	SOFO VI	MuST Light	MuST Light	UML-4	AVW 200	DiTeSt	DiTeSt
Erro declive [%]	-1.6	-1.7	5.7	-0.4	4.9	2.7	-1.6
RMSE [ $\mu\epsilon$ ]	9.3	6.2	9.7	35.9	22.5	31.4	35.5
Repetibilidade [ $\mu\epsilon$ ]	1.4	0.2	0.5	0.6	0	13.9	N/A
Erro medição [ $\mu\epsilon$ ]	$\pm 2.1$	$\pm 0.5$	$\pm 0.9$	$\pm 1.0$	$\pm 0.1$	$\pm 28.6$	N/A
S. temp.:UL-RMSE [ $\mu\epsilon$ ]	2.6	0.2	0.6	2	N/A	18.9	N/A
S. temp.:S [ $\mu\epsilon/^{\circ}C$ ]	N/A	N/A	10.8	-12.2	-18.7	18.1	20.6

TABELA 4.3: Principais características dos diferentes sistemas baseados em sensores de deformação de base longa de medida.

	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>	<b>G</b>
Sensor	SOFO	SOFO	MuST	FOD	VW-JM	SMART profile	SMART Tape
Unidade leitura	SOFO VI	MuST Light	MuST Light	UMI-4	AVW 200	DiTeSt	DiTeSt
Base medida [m]	0.25 a 10	0.25 a 10	0.2 a 2	0.1 a 1	0.1 a 1	até 50000	até 50000
Campo medida (C) [%]	-0.5	-0.5	-0.5	-2	-	-1	-1
Campo medida (T) [%]	1	1	0.75	-	2.5	1	1
Temp. func.:S (°C)	-50 a 110	-50 a 110	-40 a 110	-40 a 80	-20 a 80	-40 a 60	-55 a 300
Temp. func.:UL (°C)	0 a 110	0 a 50	0 a 50	-20 a 40	-55 a 85	0 a 40	0 a 40
Multiplexagem	STM	STM	STM WDM	STM	-	STM TDM	STM TDM
Facilidade inst.	*****	*****	*****	*****	*****	***	**
Custo: S.	+++	+++	+++++	+++++	+++	+++++	+++++
Custo: UL.	+++++	+++	+++	++	++	+++++	+++++

tanto de configurações embebidas como fixadas externamente. As limitações do sistema testado prendem-se com o facto de só possibilitarem aquisições estáticas e pelas reduzidas aptidões em termos de multiplexagem.

No que concerne ao sistema MuST, baseado na tecnologia de Bragg, salienta-se a sua elevada resolução, assim como a sua versatilidade relativamente a esquemas de multiplexagem em série. Tal como a solução anterior, sublinha-se a facilidade de instalação. As limitações prendem-se agora com a elevada sensibilidade a variações de temperatura.

Relativamente ao sistema FOD, integrando um interferómetro extrínseco de Fabry-Perot, evidencia-se o custo reduzido das unidades de leitura e a elevada resolução demonstrada. No entanto, a solução testada, limitada a aplicações externas, está concebida para medição de deslocamentos relativos, implicando algumas adaptações para medição de deformações. Esta configuração acabou por revelar um desempenho deficiente com sinais de histerese.

Ainda sobre as soluções em fibra óptica, referem-se os sensores distribuídos, representados pelas soluções SMARTprofile e SMARTape, baseados no fenómeno de espalhamento de Brillouin. Realça-se a aptidão das duas soluções para medição de perfis de deformação de uma forma praticamente contínua ao longo de comprimentos de podem chegar a 50 km. O SMARTprofile é contudo a solução mais evoluída permitindo a medição simultânea de deformação e temperatura através de um conjunto de quatro fibras distintas, sendo igualmente de assinalar a sua robustez para instalação em obra. Sobre estes sistemas, faz-se notar a sua baixa exactidão, nomeadamente quando comparada com todas as outras anteriores e o elevado custo das unidades de leitura.

Na parte final deste capítulo, demonstrou-se o sucesso da aplicação de uma monitorização estrutural baseada essencialmente em sensores de deformação de base longa de medida. Apresentou-se o caso da Ponte Ricciolo, uma ponte curva em betão armado pré-esforçado com secção transversal em caixão, servindo a Auto-Estrada A2 em Lugano, na Suíça. Os principais efeitos estruturais, designadamente o momento flector e o esforço transversal ao nível do tabuleiro, foram convenientemente quantificados durante a construção da ponte. Foi ainda possível traçar perfis deformados da estrutura, por dupla integração do referido diagrama de momentos flectores, cobrindo diferentes fases da sua construção. Ficou patente a sensibilidade desta metodologia em detectar diferentes solicitações na estrutura, revelada durante a aplicação do pré-esforço, retirada do cimbri e construção das guardas e separadores. Considera-se que a metodologia apresentada representa uma base sustentada, replicável em estruturas de tipologia idêntica.



## Capítulo 5

# Desenvolvimento de Novos Transdutores de Deformação para Embeber no Betão

Face ao panorama encontrado no capítulo anterior, relativamente às soluções comerciais existentes para medição de deformações médias, justificou-se a necessidade de desenvolver novos transdutores de deformação especificamente para embeber no betão baseados em sensores de Bragg. Neste capítulo, expõem-se os contornos do desenvolvimento e teste de novos transdutores que se pretendem mais fiáveis, robustos e económicos, para embeber em estruturas de betão. Valida-se as soluções desenvolvidas numa série de testes laboratoriais controlados e interpretam-se esses resultados à luz de modelos numéricos com recurso a análises não-lineares reflectindo a fendilhação do betão. Aborda-se, para terminar, a aplicação prática destes transdutores na monitorização estrutural.

### 5.1 Introdução

No que concerne à medição da deformação estrutural em elementos de betão, encontram-se características mecânicas que geralmente não estão presentes nos outros materiais utilizados na engenharia civil. Algumas destas particularidades revelam-se, logo à partida, porque, na sua composição, o betão está longe de ser um material homogéneo, conforme se vislumbra na Figura 5.1. A presença de bolhas de ar, defeitos ou inclusões, assim como a dimensão dos agregados são exemplos de descontinuidades e heterogeneidades sempre presentes em elementos de betão.

Em segundo lugar, a presença de armadura embebida, confere ao betão armado um comportamento compósito. A distribuição de tensões e extensões pelos dois materiais,

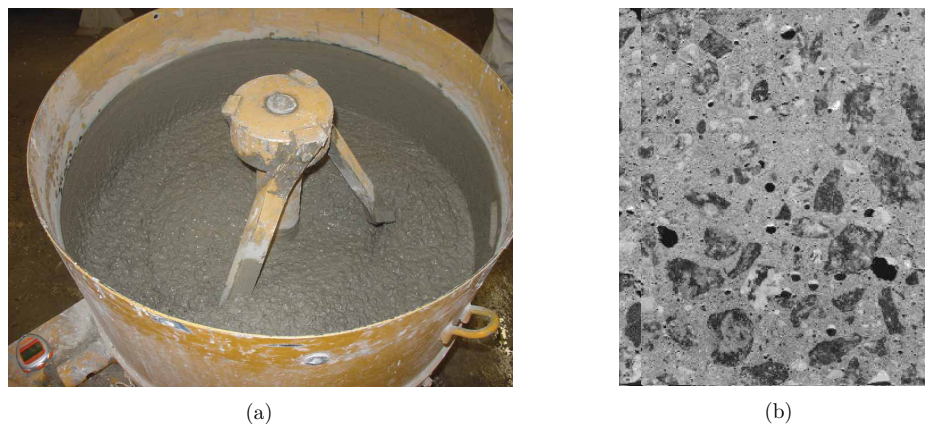


FIGURA 5.1: Macro-estrutura do betão onde são visíveis os diferentes constituintes: a) processo de amassadura; b) corte interior de um provete de betão.

pelo aço das armaduras e pelo betão, reflecte as respectivas propriedades mecânicas, notoriamente distintas. Como material compósito, dá-se o exemplo da distribuição interna de tensões associada às deformações diferidas, nomeadamente decorrentes da retracção e fluência do betão. Estes fenómenos actuam apenas sobre um dos materiais, o betão, funcionando a armadura como um restringimento interno ao seu livre desenvolvimento. Se analisados localmente, embora auto-equilibrados, isto é, sem impacto significativo no funcionamento global da estrutura, podem-se verificar esforços divergentes nos dois materiais.

Por último, é igualmente frequente o betão apresentar índices mais ou menos elevados de fendilhação. Quando presente, a fendilhação é naturalmente uma fonte de fortes descontinuidades nos campos de extensões internos no betão armado. Verifica-se uma variação da rigidez do elemento estrutural, associada a uma diminuição localizada da secção efectiva de betão, e conseqüente transferência de tensões do betão para a armadura. É complexa a transferência interna de tensões, sendo concomitantemente complexo o respectivo campo de extensões.

No capítulo anterior, apresentaram-se as potencialidades dos transdutores de deformação de base longa de medida com vista à caracterização do comportamento global das estruturas. Explorou-se a sua aptidão na avaliação do comportamento global duma ponte real. Do ponto de vista da avaliação do comportamento estrutural, o seu papel nas estruturas de betão armado é de maior relevo tendo em conta a sua capacidade em lidar e representar correctamente deformações médias na presença da heterogeneidade do betão e de eventuais estágios de fendilhação (Dotsenko e Gorodnichenko, 1984; Chung et al., 2008).

Tendo em conta o panorama reportado, justifica-se o desenvolvimento de novas soluções mais fiáveis, robustas e económicas que venham enriquecer o estado da arte. Neste particular, encontraram-se carências no espectro de soluções para embeber no betão e verificou-se que sensores de Bragg permanecem pouco explorados nesta área.

Apresenta-se, neste capítulo, o processo que levou ao desenvolvimento de novos transdutores de deformação para embeber em elementos estruturais de betão armado. Recorre-se à tecnologia de Bragg para alcançar esse objectivo. Procurou-se criar soluções válidas para um espectro vasto de estruturas que pode ir de edifícios, pontes, barragens ou túneis entre muitas outras. Apresentam-se duas soluções conceptualmente diferentes e procede-se à sua avaliação experimental e numérica. Afere-se a capacidade, destas soluções, em representar correctamente as deformações do betão, atendendo, de igual forma, à sua capacidade em lidar com a fendilhação do betão caso exista. Interpretam-se os resultados obtidos e validam-se as soluções desenvolvidas. Alguns aspectos práticos com vista à instalação destes transdutores nas estruturas da engenharia civil são por fim expostos.

## 5.2 Transdutores de deformação de embeber no betão

### 5.2.1 Sensores de embeber *versus* sensores superficiais

No que diz respeito à instalação de sensores de deformação em estruturas de betão armado, considera-se que são duas as técnicas que mais se adequam: aplicação de transdutores externos na superfície e a utilização de transdutores embebidos no betão. Na Figura 5.2 ilustram-se as supracitadas técnicas de instalação.

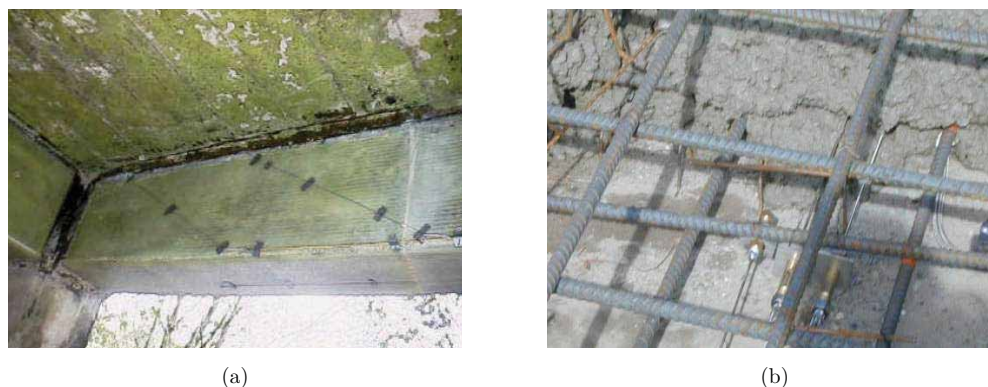


FIGURA 5.2: Sensores de deformação instalados em elementos de betão: a) instalação externa à superfície; b) instalação interna embebida no betão (Méndez e Graver, 2007).

A instalação de transdutores na superfície exterior de elementos de betão é a técnica que mais se adequa à instrumentação de estruturas já construídas. A instalação destes transdutores pode ocorrer em qualquer fase de exploração da estrutura, comportando essencialmente a fixação externa de ancoragens. As soluções exteriores são igualmente apelativas em instrumentações temporárias, visto que, quando associadas a fixações mecânicas, permitem a recuperação integral dos sensores no final do período de monitorização. A fixação dos transdutores na estrutura pode ocorrer tanto por colagem directa, como por fixação mecânica por intermédio de ancoragens aparafusadas. Encontram-se

processos relativamente expeditos de proceder à instalação destes sensores e diferentes estudos têm demonstrado resultados muito satisfatórios. As técnicas finais de protecção mecânica e química revelam ser essenciais, exigindo-se cuidados apropriados tendo em conta o período de vida útil que se pretende da instalação.

No entanto, nos casos da monitorização de estruturas instrumentadas durante a sua construção, inseridas em projectos de monitorização de longa-duração, torna-se normalmente mais interessante a utilização de transdutores de deformação embebidos directamente no betão. Constata-se que esta técnica permite uma transdução mais directa e representativa da extensão estrutural. Os transdutores embebidos permitem ainda medir perfis de deformação a diferentes profundidades do elemento estrutural, sem estarem limitados às suas fibras exteriores. Igualmente importante, revela-se o grau de protecção e a robustez exibida pelas soluções de embeber uma vez que o sensor fica totalmente inacessível após instalação.

### 5.2.2 Estado da arte e requisitos

O desenvolvimento de transdutores de deformação para embeber no betão tem sido objecto de análise de vários autores que têm observado o desempenho de diferentes soluções, concebendo diferentes transdutores com distintas formas, rigidez e dimensão (Quirion e Ballivy, 2000; Caussignac et al., 2002; Casas e Cruz, 2003; Félix, 2004). A capacidade em representar a deformação do betão, nomeadamente na presença de heterogeneidades e fendilhação tem suportado a maioria destes estudos experimentais.

Destacam-se algumas preocupações comuns. Neste particular, expressam-se os critérios estabelecidos por Félix (2004), sintetizando os principais requisitos que deverão estar presentes na concepção dos referidos transdutores:

- i) assegurar uma transmissão eficiente da deformação média do betão de forma que o elemento sensor possa experimentar as mesmas deformações do elemento estrutural;
- ii) deve ser mínima a intrusão que o transdutor provoca no campo de extensões que se pretende medir;
- iii) o encapsulamento deve conferir uma eficiente protecção à fibra óptica no que concerne aos ataques químicos do meio ambiente e do betão;
- iv) deve apresentar elevada resistência mecânica, ao choque e à abrasão, de forma a suportar as diferentes fases de exploração, tais como o processo de betonagem e a compactação do betão;
- v) deve ser prevista uma estratégia de reparação ou de substituição em caso de avaria;

- vi) deve ser de fácil execução, instalação e interrogação, reflectindo-se directamente na redução dos respectivos custos de utilização.

Além dos aspectos específicos supracitados, envolvendo a especificidade do betão armado, juntam-se naturalmente os aspectos básicos da instrumentação na sua perspectiva metrológica. Os requisitos gerais listados na Secção 3.2.2, nomeadamente no que se refere à sensibilidade, linearidade, resposta dinâmica, erros de medição e compensação dos efeitos da temperatura, devem também aqui ser aplicáveis.

Fazendo uma revisão dos principais transdutores em fibra óptica para embeber no betão, destaca-se o transdutor SOFO, abordado no capítulo anterior, que tem sido amplamente explorado pela SMARTEC. O caso da Ponte Ricciolo demonstra a sua versatilidade, reportando a instalação destes transdutores de forma embebida durante a construção. Múltiplos exemplos na bibliografia atestam o desempenho deste sensor interferométrico quer em aplicações laboratoriais, quer em projectos efectivos de monitorização (Glisic e Inaudi, 2007).

No que diz respeito às soluções baseadas na tecnologia de Bragg, alguns autores têm abordado a aplicação sensores de Bragg integrados em troços de varão de aço para posterior integração junto da malha de armadura. Faz-se referência à colagem de sensores de Bragg na face ou no interior de roços longitudinais em varões lisos de aço (Nellen et al., 2002; Chung e Kang, 2008), e no interior de tubos (Kister et al., 2005). Atendendo à sua fácil aplicação, este tipo de soluções está na base da generalidade dos produtos comerciais existentes.

Com particular interesse, Casas e Cruz (2003) descrevem uma solução baseada na colagem de uma rede de Bragg num varão nervurado de armadura ordinária corrente. Os autores referem a preparação da zona de colagem, centrada no varão, sendo esta rectificada com vista à destruição das nervuras e a colagem do sensor de Bragg por intermédio de um adesivo de cianoacrilato. Com vista à protecção química e mecânica da instalação final, esta zona é posteriormente protegida com várias camadas de borracha. A avaliação do seu desempenho é também referida (Perez, 2001).

Explorando outro tipo de soluções, faz-se igual referência ao trabalho desenvolvido por Sousa et al. (2006) que, no seio do LABEST, procedeu ao desenvolvimento de cabeças sensoras em material compósito, de resina e fibras de carbono, para embeber no betão. Os autores procederam à integração do próprio sensor de Bragg na estrutura compósita do transdutor. A realização de testes laboratoriais permitiu aferir o seu desempenho no betão e a sua aplicação na monitorização da Ponte sobre o Rio Sorraia foi explorada num projecto-piloto de monitorização da integridade estrutural (Figueiras et al., 2004). De forma conceptualmente idêntica, a integração de sensores de Bragg em barras de compósito para embeber no betão está também na base dos trabalhos de Uttamchandani et al. (1999), Majumder et al. (2008) e Kerrouche et al. (2008)

### 5.3 Concepção de novos transdutores de embeber com sensores de Bragg

Procedeu-se ao desenvolvimento de transdutores de embeber para medição de deformações em elementos estruturais de betão armado e pré-esforçado. Neste estudo, foram analisadas duas versões relativas a dois transdutores conceptualmente distintos. Procurou-se encontrar configurações eficientes, fiáveis, robustas, e fáceis de fabricar e instalar, que permitissem a sua integração efectiva em obra.

De forma sumária, ambas as soluções desenvolvidas passam por um corpo em aço inox maciço, munido de duas cabeças de ancoragem nas extremidades, instrumentado, na zona central, com sensores de Bragg pontuais. Fez-se porém variar a geometria dos transdutores e as respectivas condições de aderência nas diferentes versões. Contemplou-se, por esta via, um transdutor nervurado (transdutor N) onde se favorece a aderência entre o transdutor e o betão, e um transdutor liso (transdutor L) no qual se destrói por completo essa mesma aderência. Descreve-se cada uma destas soluções de seguida.

#### 5.3.1 Transdutor N

Na primeira versão desenvolvida, o corpo do transdutor é materializado por um varão de aço inox, com 16 mm de diâmetro e 1.0 m de comprimento. Este corpo está dotado de duas roscas, em ambas as extremidades, de forma a poderem ser acoplados dois discos, também em aço inox, com 40 mm de diâmetro e 2.5 mm de espessura, desempenhando o papel de cabeças de ancoragem, conforme se representa esquematicamente na Figura 5.3. Importa referir que foram adoptados comprimentos padrão de 1.0 m mas que podem ser ajustados face a novos requisitos.

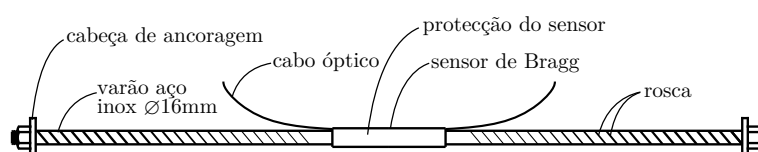


FIGURA 5.3: Configuração esquemática dos transdutores de deformação desenvolvidos: **transdutor N** (nervurado).

Na zona central do transdutor, onde foram instalados os sensores de Bragg, num segmento de aproximadamente 200 mm, manteve-se a superfície metálica rectificada e totalmente lisa. No entanto, de forma a conferir uma distribuição mais uniforme de tensões e extensões ao longo do restante desenvolvimento do transdutor, projectando uma aderência gradual entre o aço e o betão, idealizou-se uma rosca cónica de passo largo com cerca de 15 mm. A profundidade desta rosca, em ambos os segmentos extremos, cresce do centro, onde se inicia com cerca de 0.2 mm, para a extremidade do varão, onde termina com 1.2 mm. Mostra-se, na Figura 5.4, o aspecto final do transdutor.

Na zona central lisa, procedeu-se à colagem, por intermédio de resina epóxi de elevado desempenho, de um sensor de Bragg alinhado com o eixo longitudinal do transdutor. Este sensor, com uma base de medida de 10 mm, mede de forma pontual a extensão presente no corpo do transdutor que se pretende representativa do campo de extensões presente no betão.

O elemento sensor foi protegido de ataques químicos e mecânicos por intermédio de uma capa de resina epóxi não aderente ao sensor, por interposição de uma película de teflon, e posteriormente selada no interior de um tubo plástico. As extremidades da fibra, provenientes do sensor, e respectivos conectores, foram dispostos de forma a facilitarem a sua posterior condução no interior do betão como adiante se descreverá.

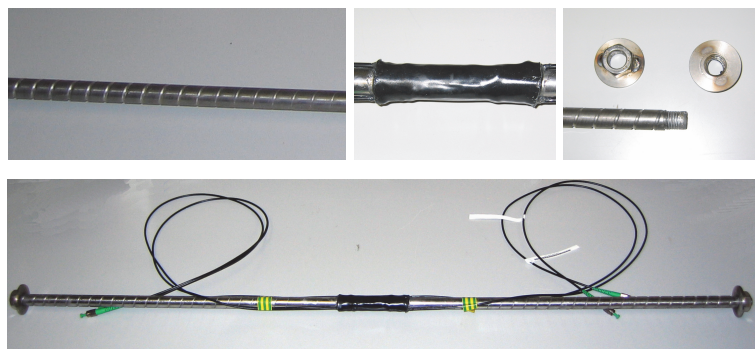


FIGURA 5.4: Perspectiva geral do transdutor N - varão nervurado com rosca de profundidade variável.

Tal como anteriormente exposto, na concepção do transdutor projectou-se a colagem de um único sensor de Bragg. Faz-se no entanto notar que, a título experimental, foi também testada com sucesso a possibilidade de integrar dois sensores de Bragg dispostos em posições diametralmente opostas numa secção comum do varão. Esta medida pode permitir aumentar a fiabilidade, robustez e consistência do transdutor. Em alguns dos protótipos utilizados nos ensaios experimentais que se seguem foram também utilizados dois sensores de Bragg para avaliar de forma integrada a resposta linear dos transdutores e despistar eventuais efeitos de flexão.

### 5.3.2 Transdutor L

Desenvolveu-se posteriormente uma nova versão, baseada numa geometria ligeiramente distinta, onde se procurou eliminar a aderência por completo entre o transdutor e o betão. Este novo transdutor passou então a ser constituído por um corpo em aço inox com 10 mm de diâmetro e, de igual forma, com 1.0 m de comprimento total. Relativamente à primeira versão, reduziu-se a espessura do varão de forma a diminuir a rigidez global do transdutor. Recorreu-se, de igual forma, a cabeças de ancoragem nas extremidades, mas, no presente caso, estas foram soldadas, em cordão, ao longo de todo o perímetro do varão conforme se apresenta na Figura 5.5.

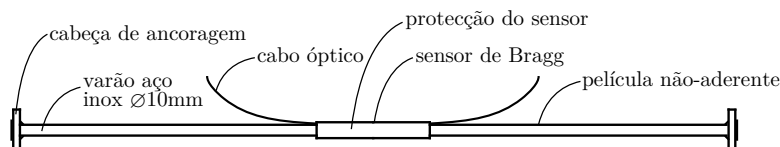


FIGURA 5.5: Configuração esquemática dos transdutores de deformação desenvolvidos:  
**transdutor L** (liso).

Ao contrário da primeira solução, neste caso procurou-se destruir por completo a aderência entre o transdutor e o betão circundante. Para o efeito foram preconizadas duas soluções. Numa primeira abordagem, prescreveu-se a cobertura do sensor, durante a instalação, com óleo descofrante. Este processo veio, no entanto, a revelar-se pouco prático nas aplicações em obra. Passou-se então, a fabricar logo à partida os transdutores revestidos, ao longo de todo o corpo, com uma fina película de manga de borracha, termo-retráctil não-aderente, conferindo-lhe o aspecto final presente na Figura 5.6. Em ambas as soluções, constatou-se estar garantida a total ausência de aderência entre o transdutor e o betão.

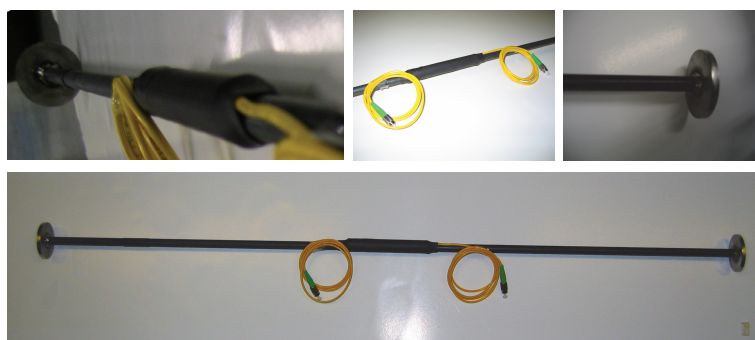


FIGURA 5.6: Perspectiva geral do transdutor L - varão liso revestido com película não-aderente.

A instrumentação deste varão, com sensores de Bragg, é em tudo idêntica à adoptada na primeira versão. Cada elemento sensor foi colado, por intermédio de uma resina epóxi, de forma alinhada com o eixo longitudinal do transdutor na sua posição média. Esta instalação foi posteriormente protegida por uma fina camada de resina e encapsulada no interior de um tubo convenientemente selado.

### 5.3.3 Materiais

Para construção dos transdutores, procurou-se um material com as propriedades mecânicas, físicas e químicas apropriadas para a função proposta, tentando alcançar elevados padrões de qualidade e durabilidade. Adoptou-se um aço inox ferrítico cuja designação e propriedades se reproduzem nas Tabelas 5.1, 5.2 e 5.3.

No aspecto da escolha deste material, pesou sobretudo a sua elevada tensão limite de proporcionalidade ( $R_{p0.2} > 560$  MPa) que permite, deste modo, comportar deformações

TABELA 5.1: Designação do aço inox ferrítico constituinte dos transdutores.

EuroNorm	AISI	SS	AFNOR	DIN	W.Nr.
X 20 Cr 13	420	2303	Z 20 C 13	X 20 Cr 13	1.4021

TABELA 5.2: Composição química essencial do aço AISI 420.

C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	W
0.21	≤ 1.00	≤ 1.00	13	-	-	-	-

TABELA 5.3: Principais propriedades mecânicas do aço AISI 420.

Estado	M.Vol (kg/m <sup>3</sup> )	E (GPa)	$R_m$ (MPa)	$R_{p0.2}$ (MPa)	A (%)	$\alpha$ ( $\times 10^{-6}$ ) °C <sup>-1</sup>
Tratado	7800	200	≥ 760	≥ 560	≥ 12	10.3

até 2800  $\mu\epsilon$ , com um comportamento perfeitamente elástico linear. Outro aspecto de vital importância e tido em conta na selecção deste material foi o respectivo coeficiente de dilatação térmica que se pretendeu o mais próximo possível do do betão. Ao encontrar um material com um coeficiente de dilatação térmica de  $10.3 \times 10^{-6}$  °C<sup>-1</sup> e, sendo o coeficiente de dilatação térmica do betão correntemente da ordem dos  $10 \times 10^{-6}$  °C<sup>-1</sup>, procurou-se minimizar o diferencial de deformações térmicas existente e deste modo as respectivas tensões/extensões residuais, sempre de difícil controlo.

### 5.3.4 Preparação dos protótipos

O fabrico destes sensores, nomeadamente dos primeiros protótipos e de algumas séries que vieram a ser instaladas em obra, decorreu em ambiente laboratorial. O corpo dos transdutores, naquilo que se relaciona com a preparação dos varões, foi realizado numa serralharia mecânica qualificada, compreendendo trabalhos de corte, maquinaria e soldadura. Procurou-se cumprir, na máxima medida, o controlo sobre os parâmetros geométricos atrás enunciados.

A instalação dos respectivos sensores foi executada pelo autor. Recorreu-se a sensores de Bragg do tipo III, apresentados na Secção 3.2.4, caracterizados pela integração da fibra óptica numa pequena base de poliamida. Para a colagem, utilizou-se um adesivo à base de resina epóxi, correspondendo ao Araldit<sup>®</sup> 2011, anteriormente testado. A partir dos resultados presentes nesta dissertação, pode-se validar o seu elevado desempenho, estabilidade e durabilidade.

Foram, em geral, adoptados os procedimentos desenvolvidos para instalação de sensores de Bragg descritos no Capítulo 2, recorrendo, sempre que possível, a formas de sistematizar os procedimentos repetitivos. Na Figura 5.7 apresentam-se algumas das principais

etapas do processo de instalação dos sensores de Bragg onde é possível distinguir diferentes etapas, desde a marcação do posição dos sensores (a), a preparação mecânica e o tratamento da superfície metálica (b), a pré-fixação do sensor de Bragg com fita-cola (c), a aplicação do adesivo (d), o isolamento do mesmo com fita de teflon (e) e a aplicação de pressão durante o processo de cura do adesivo durante 24 horas (f).

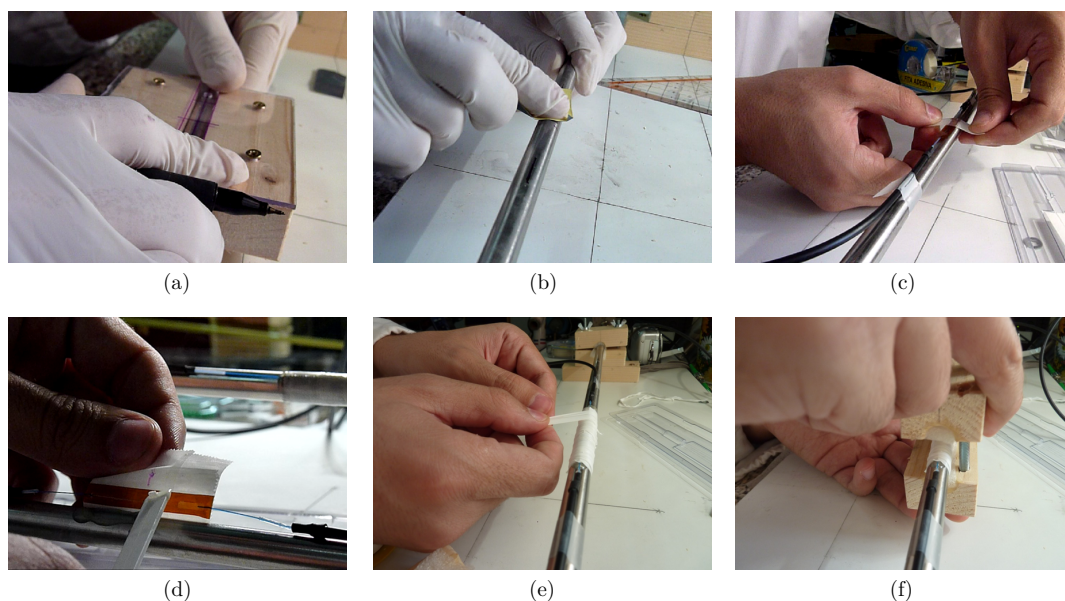


FIGURA 5.7: Várias etapas da instalação dos sensores de Bragg no corpo dos transdutores: a) marcação da posição do sensor; b) preparação mecânica e o tratamento da superfície metálica; c) pré-fixação do sensor de Bragg com fita-cola; d) aplicação do adesivo epóxi; e) isolamento do sensor com fita de teflon; f) aplicação de pressão durante o processo de cura do adesivo durante 24 horas.

## 5.4 Avaliação dos transdutores desenvolvidos

### 5.4.1 Ensaio de calibração sob tracção uniaxial

Apresenta-se uma primeira campanha experimental realizada sobre alguns transdutores, reportando um ensaio de tracção simples. Pretendia-se avaliar experimentalmente a sensibilidade efectiva de cada transdutor e aferir a sua repetibilidade. Este ensaio veio posteriormente a ser adoptado como forma de calibrar todos os transdutores ópticos realizados no LABEST/FEUP que vieram a ser instalados em estruturas reais, nomeadamente na Ponte da Lezíria e, mais recentemente, na Ponte do Corgo.

O ensaio de tracção simples decorreu num pórtico de ensaio, montado de forma a albergar transdutores com um comprimento máximo de 1.00 m, recorrendo-se a um actuador hidráulico, servo-controlado, para imposição controlada de forças de tracção. Cada transdutor foi fixado, em ambas as extremidades por intermédio de um sistema de garras biarticulado, cuja disposição se mostra na Figura 5.8. Sempre que oportuno, procurou-se

repetir o ensaio, para o mesmo transdutor, em fases distintas, de forma a validar a sua repetibilidade e assim aumentar a fiabilidade da calibração proposta.



FIGURA 5.8: Diferentes perspectivas do esquema de ensaio adoptado para calibração dos transdutores de deformação através da aplicação de uma carga cíclica de tracção uniaxial.

O carregamento consistiu, após uma primeira pré-carga posicionadora do varão de aproximadamente 2 kN, num conjunto de cinco ciclos de carga, de forma sinusoidal, numa gama de deformação que se considera representativa do funcionamento do sensor na estrutura a monitorizar, compreendida entre 250 e 1000  $\mu\epsilon$ . Procedeu-se ao registo contínuo das forças aplicadas pelo actuador através do sistema de aquisição dedicado e simultaneamente foram registados os comprimentos de onda dos sensores de Bragg processados através de uma unidade de leitura Micron Optics si425-250. Garantiu-se temperatura constante durante a realização dos ensaios.

#### 5.4.1.1 Resultados

Seleccionaram-se, em representatividade, os resultados obtidos num desses transdutores submetido a cinco ciclos de carga sinusoidais sob temperatura constante. Para efeitos de teste, instalaram-se dois sensores de Bragg no mesmo transdutor ocupando posições diametralmente opostas na secção média (Ext1 e Ext2). Pretendia-se aumentar a redundância da análise realizada, bem como despistar a presença de efeitos de flexão secundária eventualmente presentes no transdutor. Na Figura 5.9, apresenta-se o andamento da força e da respectiva extensão de referência, ExtR, calculada a partir do valor instantâneo da força aplicada e das propriedades geométricas e mecânicas médias do transdutor ( $A_s = 2.00 \text{ cm}^2$  e  $E = 200 \text{ GPa}$ ).

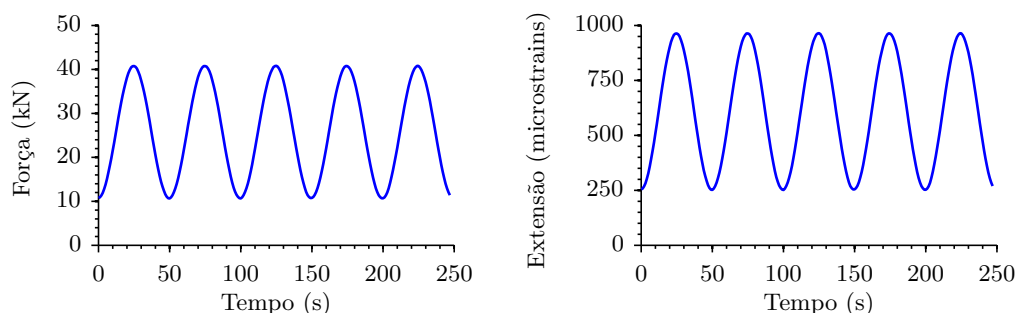


FIGURA 5.9: Ensaio de calibração: a) evolução da força; b) evolução da extensão de referência (ExtR).

De forma a determinar a sensibilidade do transdutor, representa-se, na Figura 5.10, a correlação entre a extensão de referência, ExtR, e a variação do comprimento de onda normalizado dos dois sensores de Bragg instalados no transdutor.

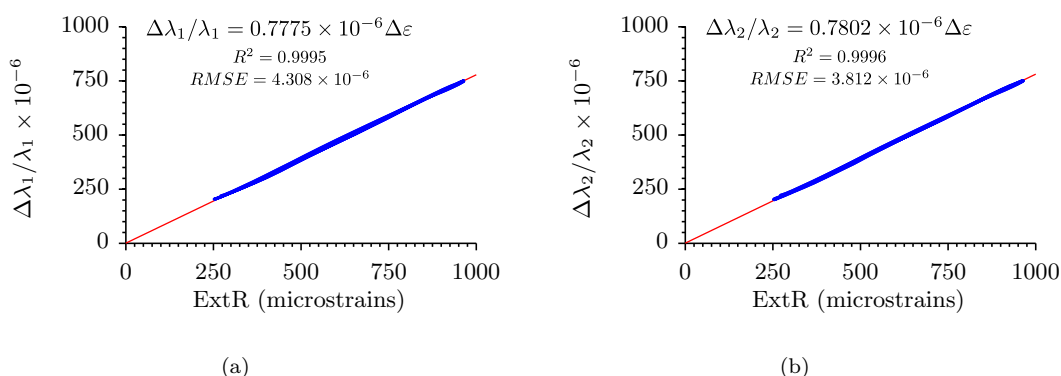


FIGURA 5.10: Calibração dos transdutores dada pela correlação entre a extensão de referência, ExtR, e a variação do comprimento de onda normalizado de cada um dos sensores de Bragg: a) Ext1; b) Ext2.

Sobre os resultados apresentados, realça-se a excelente linearidade patente na resposta dos dois sensores de Bragg quando correlacionados com a extensão de referência. Ambos os sensores apresentam indicadores  $R^2$  superiores a 0.999 tendo por base um modelo de ajuste linear. Através desse mesmo ajuste linear, determinaram-se as respectivas sensibilidades, dadas em termos normalizados, iguais a  $0.7775$  e  $0.7802 \times 10^{-6} \mu\epsilon^{-1}$ . Assinala-se a proximidade destes valores experimentais com o valor teórico referido no Capítulo 2 ( $P_e = 0.78 \times 10^{-6} \mu\epsilon^{-1}$ ). Tendo em conta a concordância poder-se-ia concluir que a assunção da sensibilidade teórica, dispensando a calibração, conduziria, neste caso concreto, a um erro de medição inferior a 0.3 %.

Na Figura 5.11, representa-se, para o mesmo ensaio, a extensão medida pelos dois sensores de Bragg instalados no transdutor, Ext1 e Ext2, determinadas a partir da sensibilidade anteriormente encontrada. Confrontam-se esses registos com a extensão de referência, ExtR, para determinação dos respectivos erros de medição.

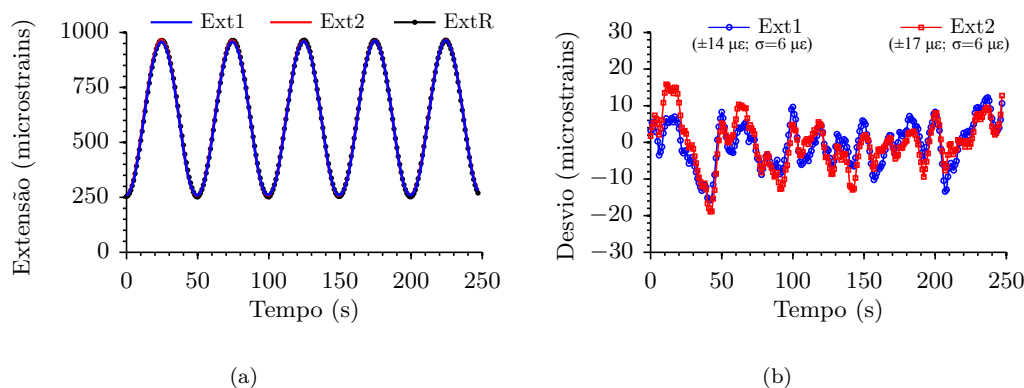


FIGURA 5.11: Erros de medição associados ao processo de calibração: a) representação das extensões medidas por cada um dos sensores (Ext1, Ext2 e ExtR); b) respectivos desvios em relação à extensão de referência (ExtR).

Tal como indicavam as correlações anteriores, constata-se que é excelente a concordância obtida entre os dois sensores de Bragg instalados no transdutor, assim como entre estes registos e a extensão de referência. No intervalo de extensões analisado, compreendido entre 250 e 1000  $\mu\epsilon$ , constata-se que o erro de medição ficou balizado entre  $\pm 17 \mu\epsilon$ . Este intervalo representa cerca de 4% do referido intervalo de extensões.

No cômputo geral, destaca-se não só a concordância obtida durante a realização deste ensaio, mas realça-se também a repetibilidade alcançada nos diversos ensaios a que se sujeitou o mesmo transdutor. Ficou também patente uma excelente repetibilidade entre os diferentes transdutores, sendo que, numa amostra ensaiada até à data, correspondente a cerca de 50 transdutores, os desvios observados, em termos de calibrações, foram sempre inferiores a 3% relativamente à sensibilidade teórica.

#### 5.4.2 Prisma submetido a ciclos de compressão

Pretendeu-se, neste segundo ensaio, avaliar a capacidade dos transdutores desenvolvidos traduzirem, efectivamente, a deformação de um elemento estrutural quando solicitado a acções cíclicas de compressão. Neste caso, integrou-se o sensor no interior de um prisma de betão ligeiramente armado que se sujeitou a vários ciclos de compressão numa prensa de carga.

Na Figura 5.12 representa-se, de forma esquemática, a geometria e a armadura do prisma de betão armado com dimensões de  $250 \times 250 \times 700 \text{ mm}^3$  utilizado neste ensaio.

##### 5.4.2.1 Materiais

No que diz respeito ao betão, recorreu-se a uma composição de betão auto-compactável produzido nas próprias instalações do LABEST. À data da realização do ensaio, o betão

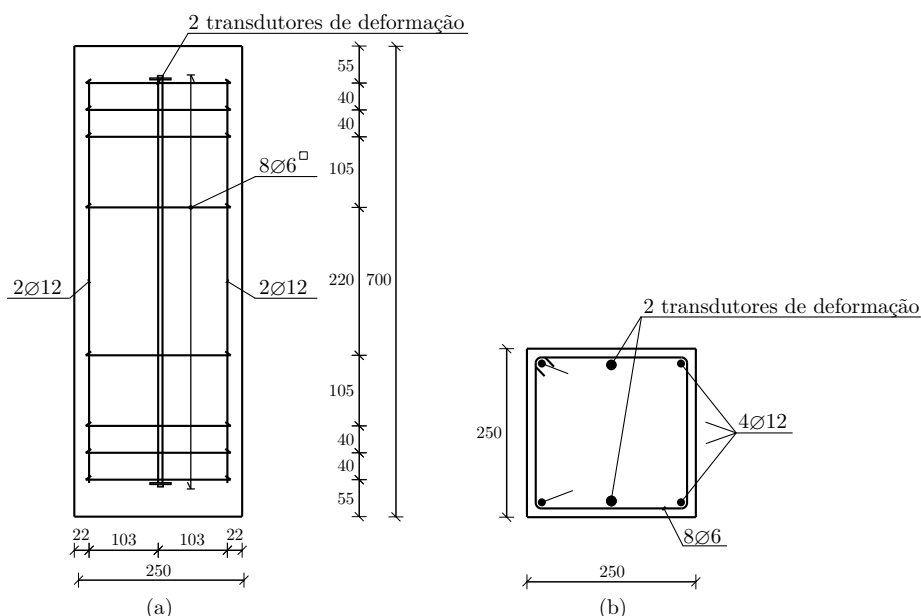


FIGURA 5.12: Geometria e armadura do provete de betão  $250 \times 250 \times 700 \text{ mm}^3$ : a) vista em corte por plano vertical; b) vista em corte por plano horizontal (nota: dimensões em mm).

apresentava 14 dias de idade. Realizaram-se ensaios de caracterização do betão, a partir dos quais foi possível estimar um módulo de elasticidade médio,  $E_{cm,14}$ , de 32.8 GPa e uma tensão de rotura à compressão,  $f_{cm,14d}$ , de 48.2 MPa.

Materializando a armadura ordinária, foram utilizados varões de 6 e de 12 mm de um aço enquadado na classe A400 NR. Tendo em conta a classe da armadura, assumiu-se um módulo de elasticidade médio,  $E_{sm}$ , igual a 200 GPa.

#### 5.4.2.2 Instrumentação

Concebeu-se um plano de instrumentação que, para efeitos de comparação, se pretendeu que conduzisse a uma situação de redundância na medição das deformações quer nos transdutores, quer no interior do bloco de betão.

A instrumentação interna foi realizada por intermédio de dois transdutores de deformação, correspondentes à versão N anteriormente apresentada, instalados no meio de duas faces opostas do prisma de acordo com o que se representa na Figura 5.12 e se mostra na Figura 5.13. Cada transdutor interno foi munido de dois sensores de Bragg, passando-se a designar estes sensores por FBG1.1 e FBG2.1, na face 1, e FBG1.2 e FBG2.2, na face 2. Instalou-se ainda um extensómetro eléctrico de cordas vibrantes, CVint, embebido no betão e colocado no centro do prisma para comparação. Pode ver-se a disposição relativa dos referidos transdutores na Figura 5.13.

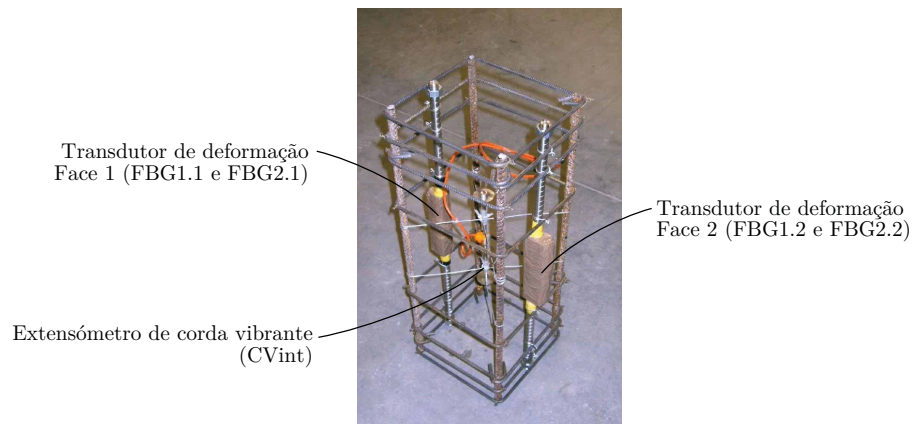


FIGURA 5.13: Vista geral da armadura e instrumentação interna adoptada no prisma de betão.

Para o ensaio de carga instalaram-se ainda, externamente, dois transdutores de deslocamentos, do tipo LVDT, nas mesmas duas faces já instrumentadas com os transdutores de deformação (LVDT1 na face 1 e LVDT2 na face 2), com uma base de referência de 250 mm. Estes sensores externos visavam a determinação das respectivas extensões médias na zona central do prisma.

#### 5.4.2.3 Resultados

O prisma foi submetido a ensaios de carga cíclica de amplitude constante numa prensa servo-controlada seguindo o esquema de ensaio presente na Figura 5.14.

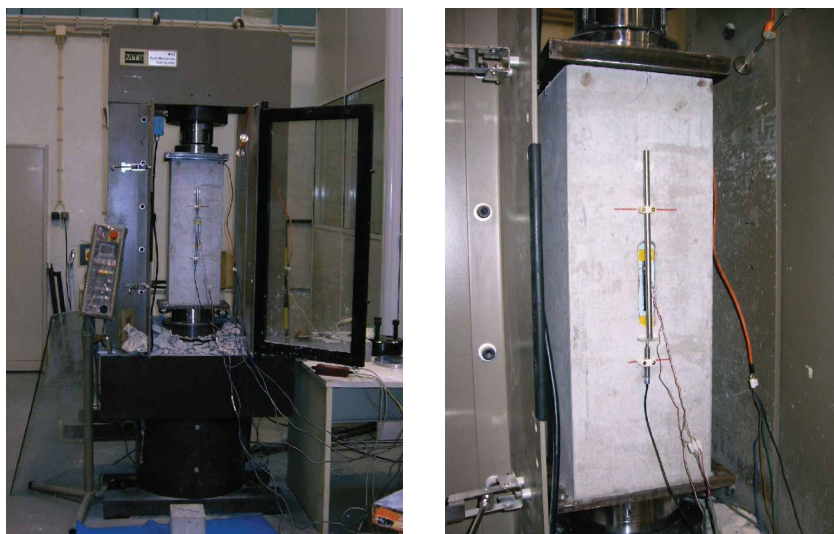


FIGURA 5.14: Vistas gerais do ensaio de compressão realizado sobre o prisma de betão armado instrumentado com dois transdutores de deformação.

Desta campanha experimental, mostra-se, na Figura 5.15, a evolução da força e a correspondente extensão de referência interna obtida a partir do transdutor convencional de

cordas vibrantes (CVint). Assinala-se uma amplitude de extensões de aproximadamente  $250 \mu\epsilon$ , a variar ciclicamente entre  $-250$  e  $-500 \mu\epsilon$ .

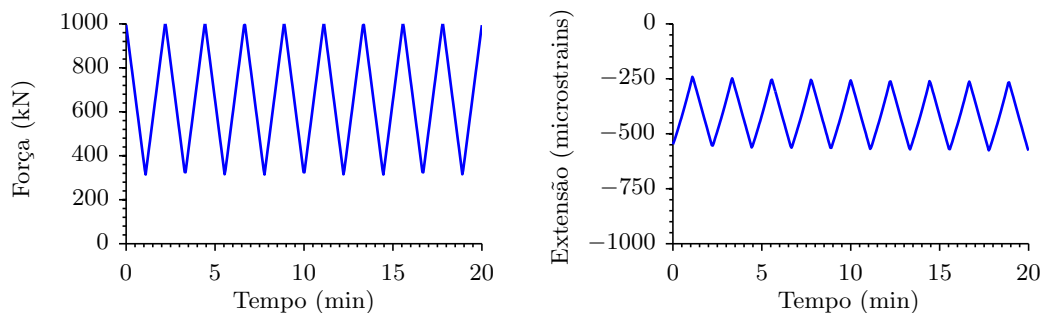


FIGURA 5.15: Ciclos de compressão: a) evolução da força; b) evolução da extensão de referência (CVint).

Na Figura 5.16 exhibe-se a correlação entre a extensão de referência, CVint, e correspondente extensão medida por cada um dos sensores de Bragg distribuídos pelos dois transdutores. Da análise destes resultados, verifica-se que, no conjunto de todos os sensores, para o estado de deformação atingido, há uma linearidade assinalável da resposta. Foram obtidos indicadores  $R^2$  a rondar os 0.998.

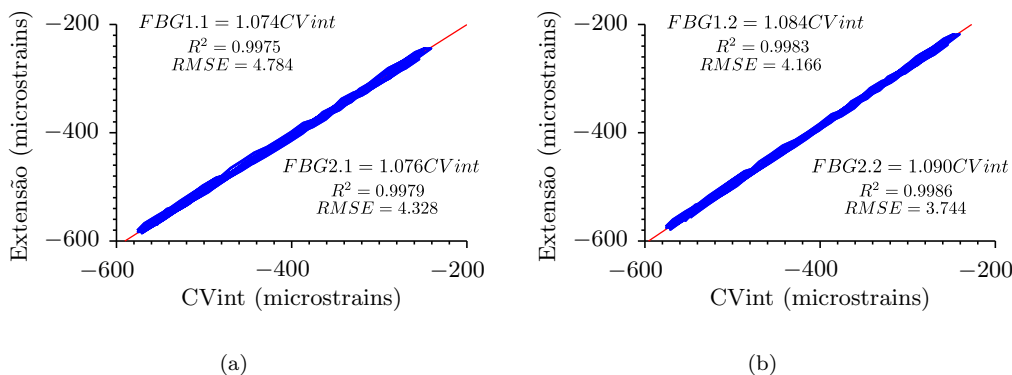


FIGURA 5.16: Correlações entre a extensão de referência, CVint, e a extensão medida em cada um dos sensores de Bragg: a) transdutor n.1; b) transdutor n.2.

Na Figura 5.17 sobrepõem-se os registos obtidos com cada sensor interno. Representam-se de igual modo os desvios obtidos considerando como referência o extensómetro de cordas vibrantes convencional. Contabilizando os transdutores ópticos, verifica-se um desvio de cerca  $\pm 21 \mu\epsilon$  relativamente ao transdutor de cordas vibrantes. Assinala-se que este representa cerca de 9% do intervalo de extensões experimentado.

Visto que o desvio registado segue o padrão dos ciclos de carga do ensaio, pode tentar-se justificar esse desvio sobretudo com a rigidez distinta dos transdutores e com a maior proximidade dos transdutores ópticos à superfície do provete. Procura-se, contudo, com a modelação numérica exposta na próxima secção avaliar de forma mais sustentada este efeito.

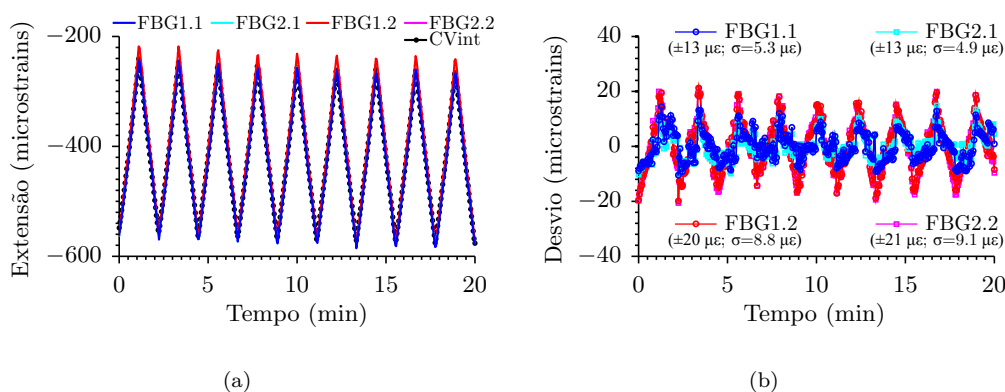


FIGURA 5.17: Erros de medição: a) representação das extensões medidas em cada um dos sensores; b) respectivos desvios em relação à extensão de referência (CVint).

Realça-se que, na comparação das deformações medidas em cada par de sensores colocados no mesmo transdutor, se observou uma variação máxima em torno da média não superior a 0.5%. Este resultado valida, uma vez mais, a possibilidade de representar, por via de um único sensor de Bragg, o estado de deformação instalado no transdutor. Tal convergência comprova ainda a ausência de efeitos de segunda ordem ou de flexão ao longo da região instrumentada.

#### 5.4.2.4 Análise numérica

De forma a completar as conclusões anteriores e procurando interpretar as diferenças verificadas entre as extensões medidas pelos transdutores ópticos relativamente ao extensómetro de cordas vibrantes, procedeu-se a uma modelação numérica do fenómeno em causa.

Efectuou-se uma modelação tridimensional com recurso a uma formulação de elementos finitos de volume representativos do comportamento do betão e elementos de barra representativos das armaduras principais. Mostra-se, na Figura 5.19, a geometria e a respectiva malha de elementos finitos para as condições de apoio mais representativas do ensaio de carga atrás descrito. Salienta-se, neste aspecto, a definição de condições de apoio que levaram à cintagem do betão em contacto com os discos da prensa de carga e à compatibilização como superfícies planas das respectivas faces de apoio.

Na Figura 5.19 apresentam-se os mapas de tensões e extensões representativos do elemento em estudo para uma força axial equivalente a 1000 kN. Analisando os resultados deste modelo, verifica-se um desvio, entre a extensão presente nos elementos de barra que simulam os transdutores ( $\varepsilon_t = 480\mu\varepsilon$ ) e o valor presente no interior do betão ( $\varepsilon_{CV} = 433\mu\varepsilon$ ), representativo do sensor de cordas vibrantes, da ordem dos 9.8%. Este valor aproxima-se com bastante realismo dos 9% obtidos experimentalmente.

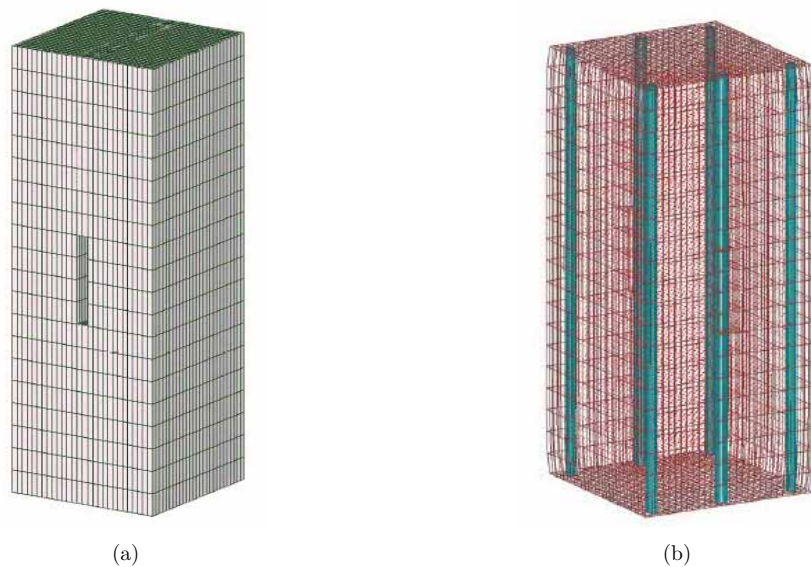


FIGURA 5.18: Modelo de elementos finitos: a) geometria e malha de elementos finitos de volume; b) malha deformada.

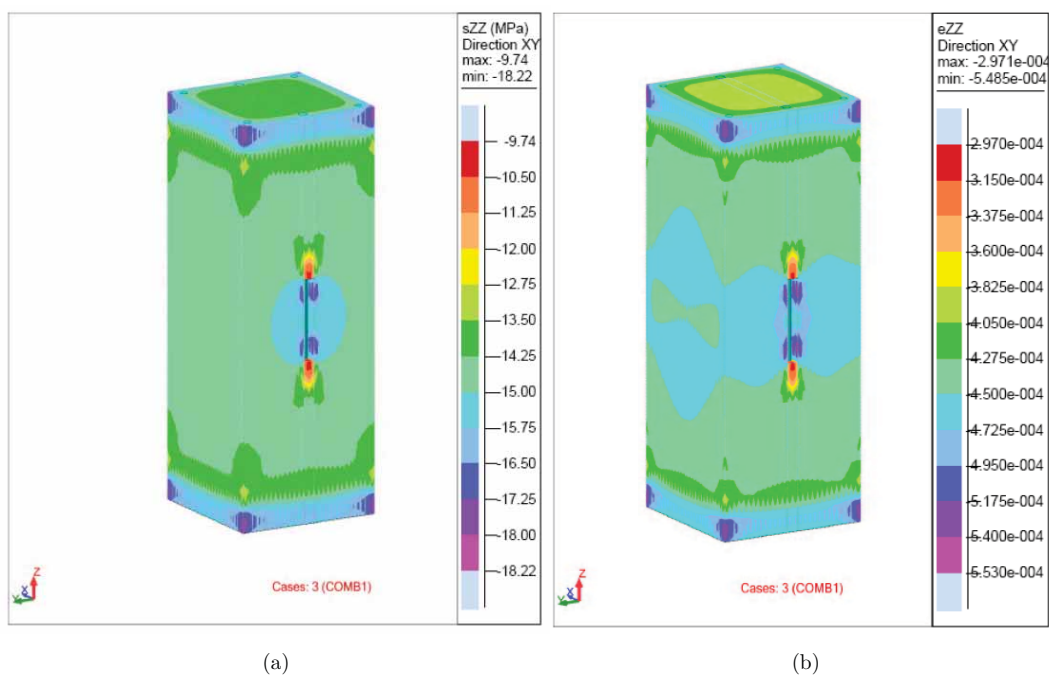


FIGURA 5.19: Resultados numéricos: a) mapa de tensões verticais; b) mapa de extensões verticais.

À luz dos resultados numéricos, consegue-se justificar a divergência observada entre os transdutores desenvolvidos e o extensómetro convencional com base na distribuição dos sensores, nas diferentes bases de medida, assim como na perturbação do campo de extensões associado à própria instrumentação e aos dois negativos laterais deixados no betão para acesso às cablagens. Entende-se no entanto, que toda esta perturbação tenderá a ser insignificante com a alteração da escala das peças e será praticamente irrelevante numa estrutura real.

### 5.4.3 Ensaio de aderência em flexão

Desenvolveu-se um novo ensaio experimental com o objectivo de avaliar o comportamento do transdutor aderente (tipo N) numa peça descontínua submetida a flexão circular. Pretende-se sobretudo avaliar as condições de aderência transdutor-betão e, em conformidade, a capacidade do transdutor se ajustar a uma fenda central activa sem plastificar. Recorde-se que nos transdutores do tipo N foi dimensionada uma rosca de profundidade crescente do centro para a periferia de forma a conferir condições de aderência gradual que visam o ajuste do transdutor a possíveis danos na estrutura por fendilhação.

A configuração geral do presente ensaio está ilustrada na Figura 5.20. Seguiu-se na generalidade o preconizado na norma EN10080 (cen, 2005), para caracterização da aderência de armaduras. Todavia e tendo em conta o propósito distinto da norma, procedeu-se aos ajustes necessários de forma a melhor atender aos objectivos propostos e ao elemento em estudo.

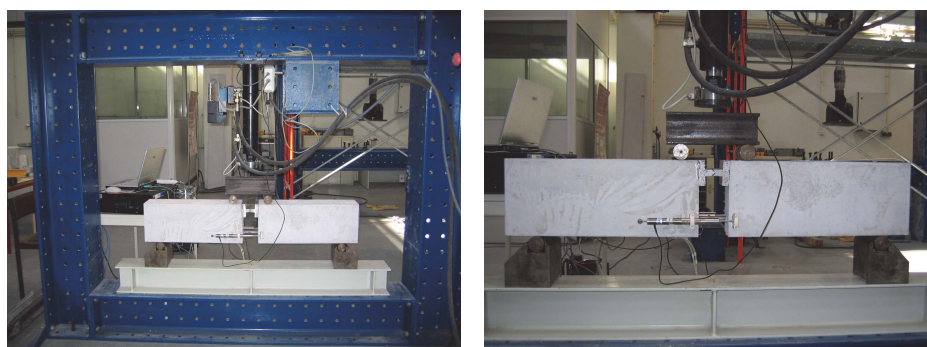


FIGURA 5.20: Vistas gerais do ensaio de aderência em flexão com um transdutor do tipo N.

A geometria do provete utilizado e as condições de ensaio estão representadas na Figura 5.21. Assinalam-se os dois blocos de betão armado ligados superiormente por uma rótula e inferiormente pelo transdutor embebido. Chama-se a atenção para a posição do transdutor, abrangido na zona central pela separação dos dois blocos, que está submetido a um estado de tracção uniaxial formando um binário com a força de transmissão da rótula.

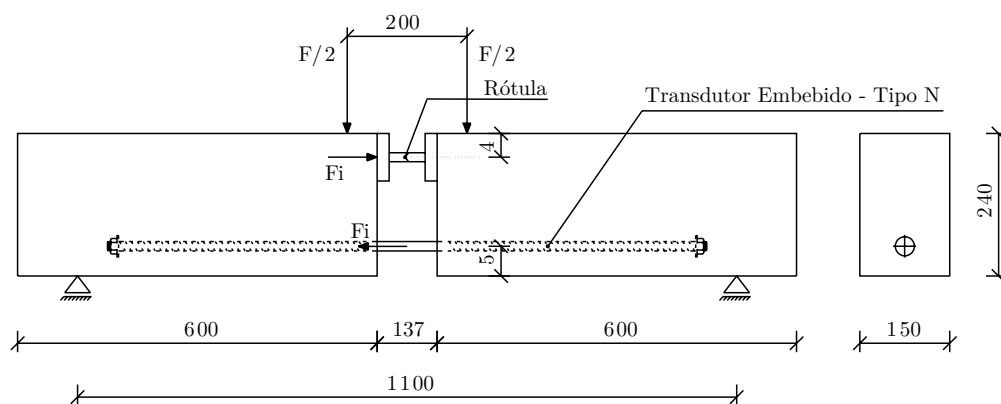


FIGURA 5.21: Representação esquemática das condições do ensaio de aderência.

Promoveu-se a aderência natural transdutor-betão ao longo de todo o comprimento embebido adoptando o esquema de nervuras de profundidade crescente anteriormente apresentado. Faz-se ainda referência ao facto de se ter ajustado a armadura ordinária do provete, relativamente à norma EN10080, de forma a permitir que este provete comportasse melhor as cabeças de ancoragem do transdutor, através do reforço da armadura transversal nesta zona, tal como ilustrado na Figura 5.22.

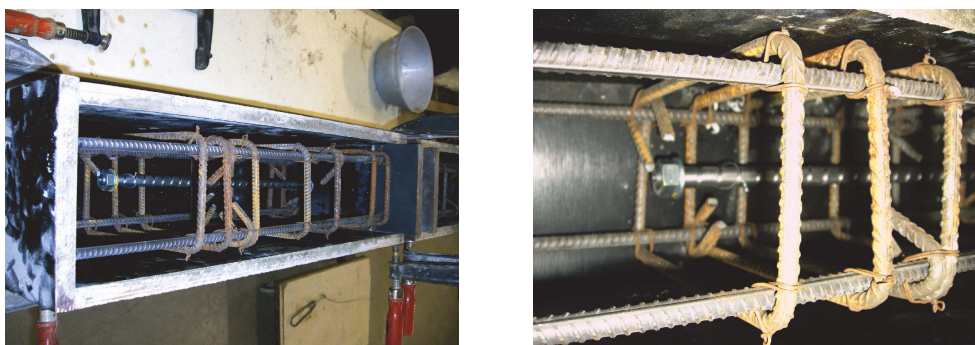


FIGURA 5.22: Vista geral da disposição de armaduras e da montagem do provete com o transdutor para betonagem.

Seguindo as condições de apoio preconizadas na referida norma, apoiou-se o provete junto às suas extremidades por intermédio de apoios rotulados com capacidade de deslizamento. Um esquema de carga bi-pontual, no centro, conforme representado, confere à zona central do transdutor, onde fica localizado o sensor de Bragg, um estado uniforme de extensão média longitudinal.

Testes de caracterização realizados à data dos ensaios permitiram determinar, para o betão, um módulo de elasticidade,  $E_{cm}$ , de 37.5 GPa, uma tensão de rotura à compressão,  $f_{cm}$ , de 50.6 MPa e uma tensão de rotura à tracção,  $f_{ctm}$ , de 3.8 MPa.

### 5.4.3.1 Instrumentação

Instrumentou-se o provete em apreço com a colocação, no tramo central do transdutor de deformação em estudo, de um sensor de Bragg. Mostra-se a zona central deste transdutor e o respectivo sensor de Bragg na Figura 5.23.

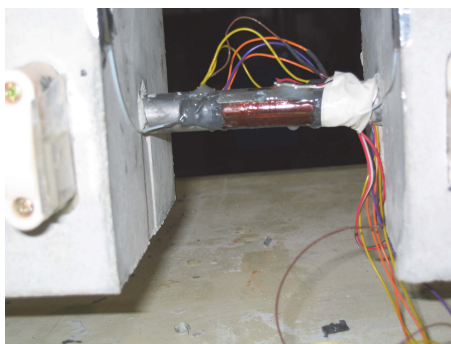


FIGURA 5.23: Sensor de Bragg instalado no transdutor tipo N presente no ensaio de aderência em flexão.

De forma a avaliar o comportamento do transdutor óptico e atendendo ao propósito deste ensaio, dispôs-se, ainda, externamente de dois transdutores de deslocamento, do tipo LVDT (ver vista geral na Figura 5.20). A partir do deslocamento médio medido pelos dois LVDTs externos e tendo por base o respectivo comprimento de referência característico, propõe-se calcular a deformação média aparente através de:

$$Ext_{LVDT,l_0} = \Delta l / l_0 \quad (5.1)$$

onde,  $\Delta l$  é a variação da abertura entre os dois blocos medida pelo par de LVDTs; e  $l_0$  é o comprimento de referência associado.

### 5.4.3.2 Resultados

Sujeitou-se o provete instrumentado a um conjunto de ciclos de carga de intensidade crescente com controlo realizado quer por via da força imposta, quer por via do deslocamento imposto. De salientar que, por razão de segurança e viabilidade do ensaio, e apesar de se ter começado o ensaio com ciclos de força, para valores de carga mais elevados o ensaio de carga teve de ser obrigatoriamente realizado com controlo de deslocamento.

Na Figura 5.24 representam-se duas fases de ensaio, compreendendo um conjunto de ciclos realizados com cargas distintas. A Figura 5.24.a) corresponde ao primeiro carregamento, sob imposição de ciclos de força trapezoidais de 13.5 kN. A Figura 5.24.b) corresponde à última fase do ensaio, representando ciclos de deslocamento de imposto, igualmente trapezoidais, com patamares de 5 mm. Confronta-se a extensão medida pelo

sensor de Bragg do transdutor em análise com a estimativa média obtida a partir dos LVDTs.

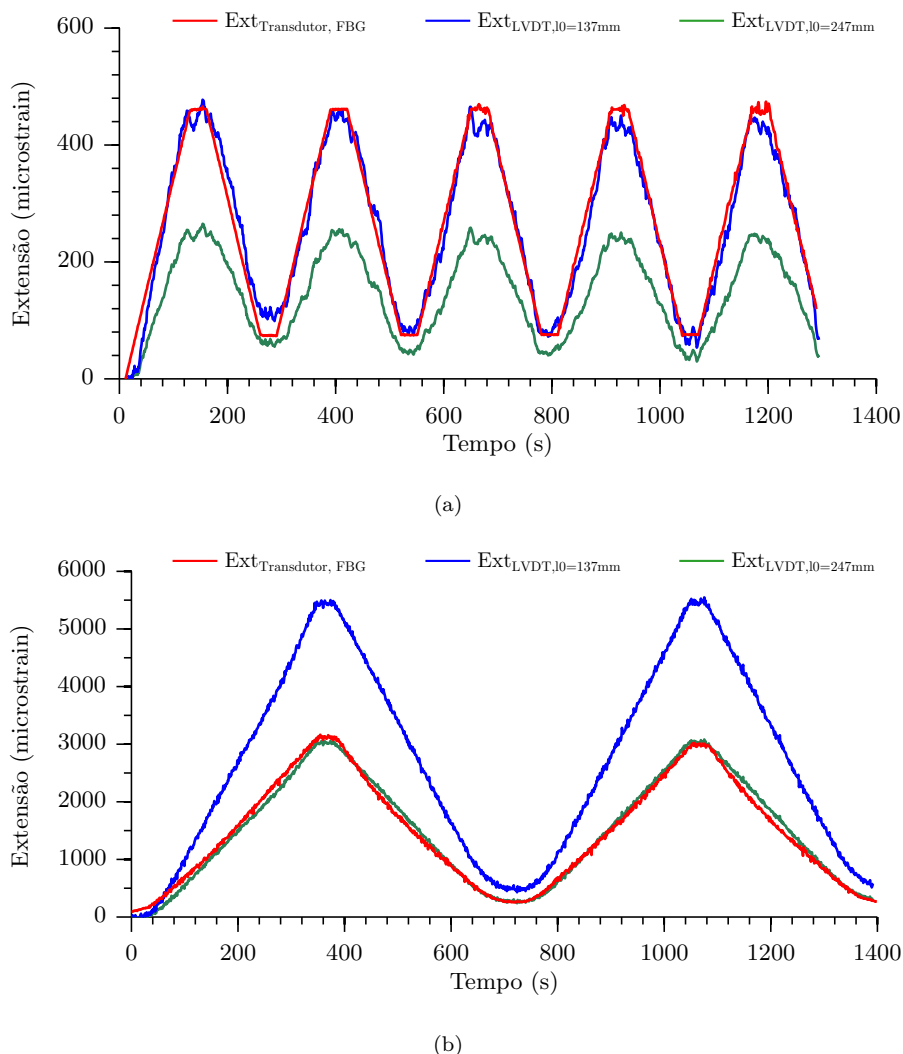


FIGURA 5.24: Resultados do ensaio de aderência à flexão: a) primeiro ciclo de carga correspondente a uma força imposta de 13.5 kN; b) último ciclo de carga correspondente a um deslocamento imposto de 5 mm.

Como forma de avaliar o comprimento livre do transdutor, isto é a porção central em que o transdutor está não-aderente ao betão, representam-se os resultados dos LVDTs considerando dois comprimentos de referência representativos. A azul, considera-se  $l_0$  igual a 137 mm, representado o afastamento real entre os dois blocos de betão. A verde, representa-se o caso de  $l_0$  ser igual a 247 mm, determinando-se ser este o melhor ajuste dos resultados do último ensaio (ver Figura 5.24.b)).

Verifica-se assim que no primeiro ensaio, para cargas muito baixas, a estimativa da deformação do transdutor com base num comprimento de referência igual ao afastamento entre blocos ( $l_0 = 137$  mm) é bastante razoável. Todavia, à medida que a carga vai crescendo e à medida que se vão repetindo os ciclos de carga, verifica-se um aumento crescente do comprimento de referência dos LVDTs, patente na crescente discrepância

entre os dois registos. Este efeito traduz o aumento do comprimento livre do transdutor por destruição da aderência. Para o último ensaio representado, estima-se que tenha sido atingido um comprimento de referência igual a cerca de 1.8 vezes do valor inicialmente considerado ( $l_0 = 247$  mm).

Pode estimar-se, tendo em conta os resultados obtidos, que o presente transdutor poderia acomodar no seu seio, sem plastificação da zona sensora, uma fenda que podia ir a cerca de 0.7 mm de abertura.

$$w_{ab,fendas} = \varepsilon_{sym} \cdot l_0 = 2800 \times 10^{-6} \times 247 = 0.7mm \quad (5.2)$$

Face aos resultados obtidos neste ensaio e tal como descrito na introdução deste sensor, destaca-se a sua capacidade em se adaptar à possível danificação do betão por fendilhação dentro do seu campo de medida. Ao contrário do que ocorreria num varão perfeitamente aderente, os resultados obtidos demonstram a adaptação do transdutor na presença de fendas, permitindo, com uma margem razoável, a sua ocorrência sem plastificação do aço constituinte. Acrescenta-se neste aspecto, que a fragilização localizada do corpo do sensor está também em todos os aspectos minimizada pela geometria das estrias de aderência concebidas.

#### 5.4.4 Viga fendilhada submetida a flexão circular

O quarto e último ensaio desenvolvido pretendeu ser o mais completo dos quatro. Procurou-se avaliar e comparar o comportamento das diferentes versões de transdutores, com e sem aderência, integrados em vigas de betão armado submetidas a flexão circular passando por diferentes estágios de fendilhação. Incidiu-se os ensaios sobre um par de vigas idênticas, avaliando a repetibilidade dos resultados, como garante da validade das conclusões alcançadas.

As duas vigas, conceptualmente semelhantes, apresentam um comprimento total de 2.9 m, materializado por uma secção transversal constante com largura de 0.30 m e altura de 0.35 m, conforme se representa nas Figuras 5.25, 5.26 e 5.27. Estas dimensões foram definidas tendo em conta o vão livre máximo do pórtico de ensaio, a capacidade de carga do actuador hidráulico e a capacidade de carga estimada da viga. Procurou-se, de igual forma, adoptar uma secção com dimensões consideráveis de forma a diminuir a rigidez relativa dos transdutores embebidos e assim minimizar a influência destes no comportamento da viga.

Foi adoptada uma distribuição de armadura criteriosamente estudada para potenciar a análise que se pretendia realizar nomeadamente com um padrão de fendilhação estável e regular atingindo os transdutores. Dispôs-se de uma armadura contínua nas fibras traccionadas constituída por 4Ø16 ( $A_{st,1} = 8.04$  cm<sup>2</sup>) e de uma armadura construtiva,

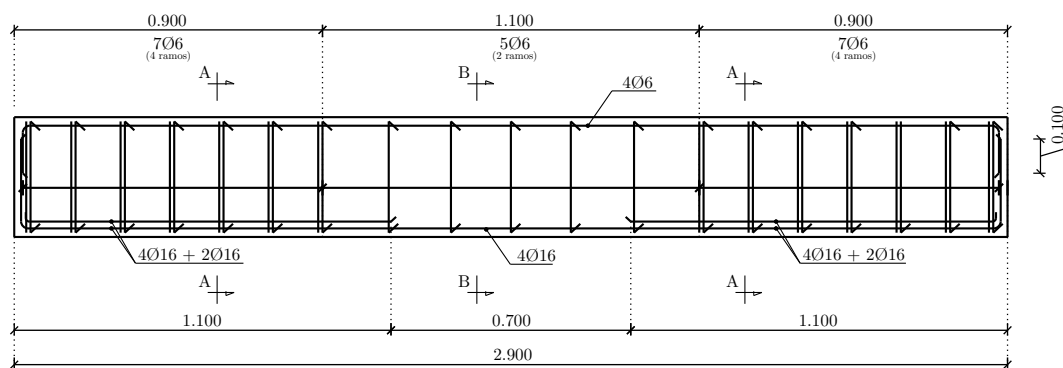


FIGURA 5.25: Geometria e disposição de armaduras nas duas vigas ensaiadas.

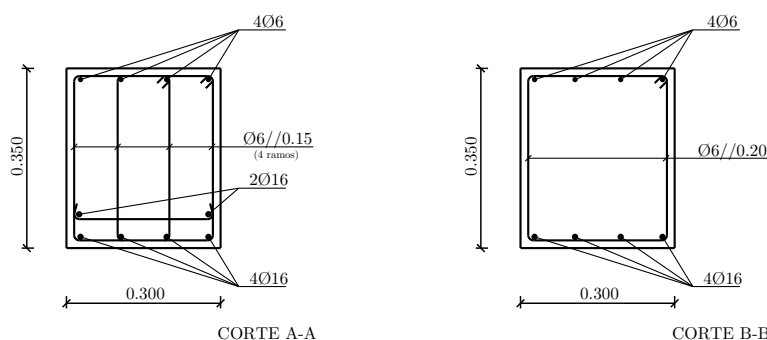


FIGURA 5.26: Cortes transversais representativos da geometria e da disposição de armaduras nas duas vigas ensaiadas (ver posição dos cortes na Figura 5.25).

também contínua, na face comprimida formada por  $4\varnothing 6$  ( $A_{sc} = 1.13 \text{ cm}^2$ ) (ver Figura 5.26). De modo a concentrar a fendilhação na zona central foi ainda previsto o reforço dos segmentos extremos com uma segunda camada de  $2\varnothing 16$  ( $A_{st,2} = 4.01 \text{ cm}^2$ ), na zona traccionada, cujas dispensas também se representam na Figura 5.25. Limitou-se a altura útil da viga a 0.32 m, condicionada por um recobrimento das armaduras de 0.03 m.



FIGURA 5.27: Vistas gerais da disposição de armadura na viga.

O esquema adoptado para condução do ensaio de carga está representado na Figura 5.28. Cada viga foi apoiada sobre dois roletes, cujo eixo ficou a 0.10 m da face, formando uma viga simplesmente apoiada, onde foram aplicadas duas cargas concentradas idênticas, centradas na estrutura e afastadas entre si de 0.90 m.

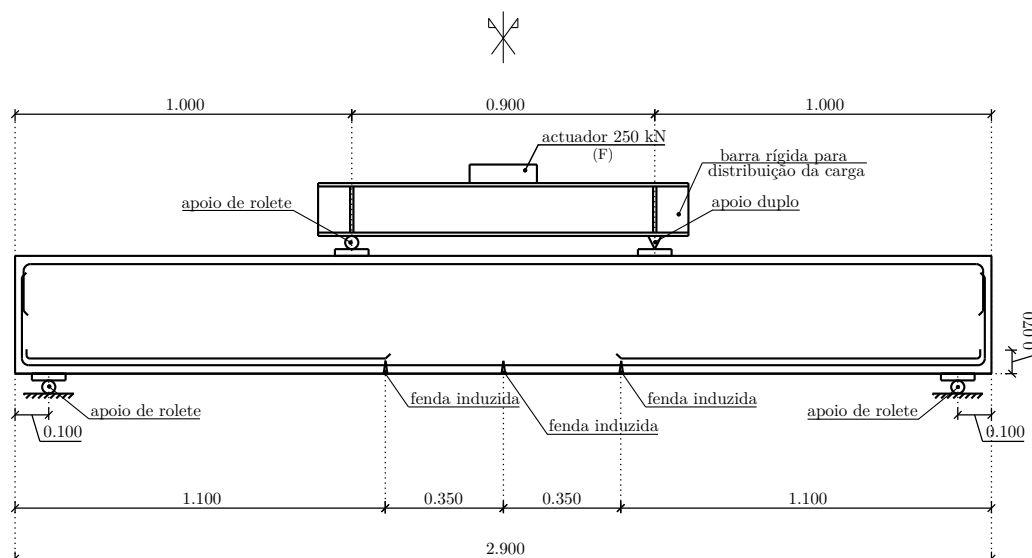


FIGURA 5.28: Representação esquemática do esquema de ensaio utilizado para carregamento da viga.

Antes do carregamento, foram induzidas três fendas transversais, em três posições críticas, nomeadamente a meio vão e a 0.350 m para cada lado desta, próximo do alinhamento de cada uma das cargas, de forma a fomentar um padrão inicialmente controlado de fendilhação. Estas fendas foram realizadas por corte directo da camada de recobrimento depois de se ter procedido à retirada da cofragem.

#### 5.4.4.1 Materiais

Foi utilizado um betão da classe C30/37, sob designação C30/37.S4.X0(P).D16.C10,4, fornecido pela Betão Liz, S.A (ver Figura 5.29). À data da realização dos ensaios de carga, realizaram-se testes de caracterização mecânica para avaliação das propriedades do betão. Este apresentava um módulo de elasticidade,  $E_{cm,41d}$ , de 28.0 GPa, uma tensão de rotura à compressão,  $f_{cm,41d}$ , de 32.9 MPa e uma tensão de rotura à tracção,  $f_{ctm,41d}$ , de 2.44 MPa. A armadura ordinária utilizada enquadra-se na classe de aço A500, caracterizada por um módulo de elasticidade médio de 200 GPa e uma tensão de cedência média de cerca de 550 MPa.

#### 5.4.4.2 Instrumentação

Durante a montagem das vigas, contemplou-se a instalação de diversos sensores internos conforme se apresenta na Figura 5.30. Em primeiro lugar foram instalados os transdutores ópticos cujo comportamento tem sido alvo de análise. Instalaram-se três configurações distintas correspondentes a:

- i) um transdutor N (Ex3);



FIGURA 5.29: Betonagem do par de vigas.

- ii) um transdutor L, aplicando uma película de óleo ao longo de todo o desenvolvimento de forma a eliminar completamente a aderência transdutor/betão (Ex2);
- iii) um transdutor L, em tudo idêntico ao anterior, mas mantendo a superfície de aço limpa, isto é sem óleo, não garantindo portanto a ausência de aderência (Ex1).

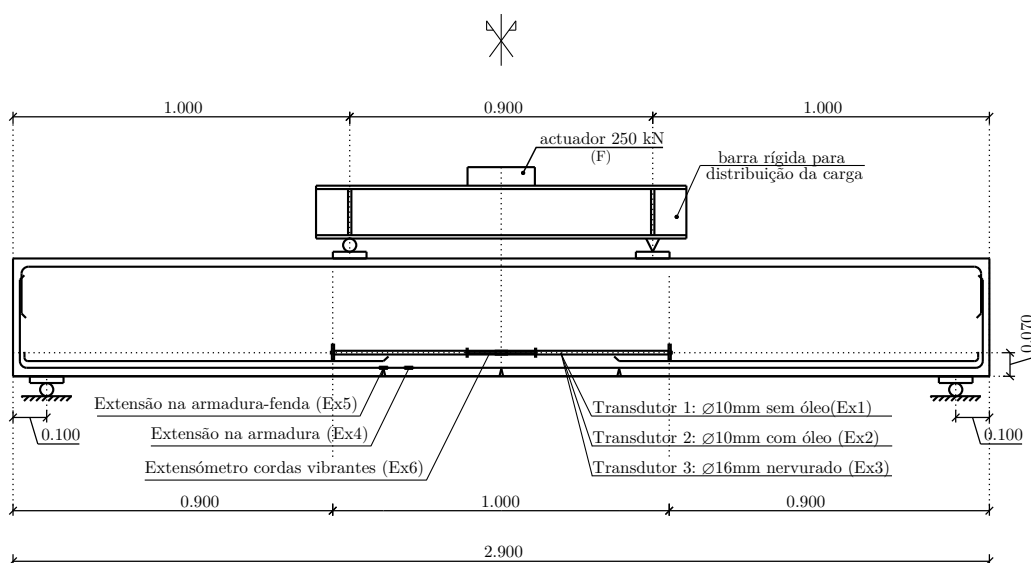
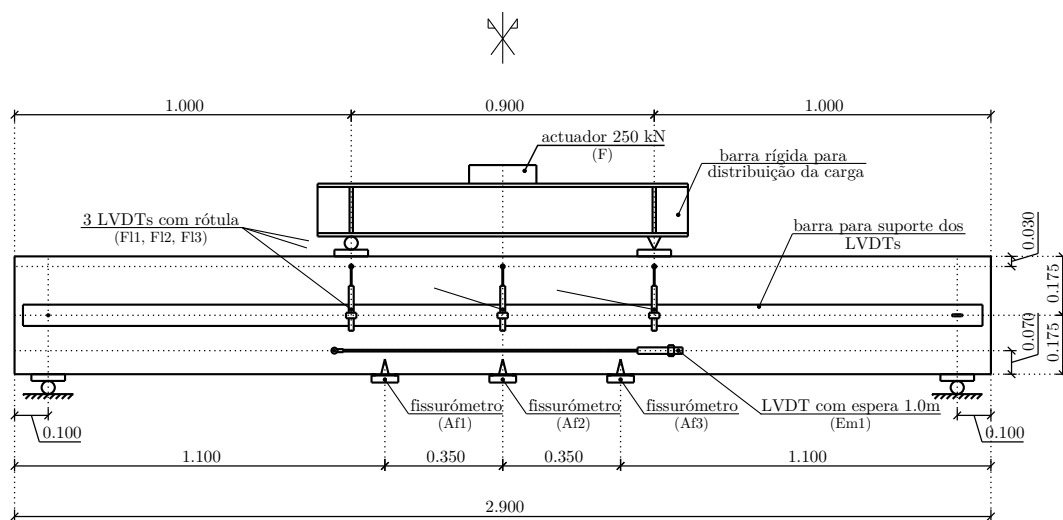


FIGURA 5.30: Posição da instrumentação interna adoptada e respectiva nomenclatura.

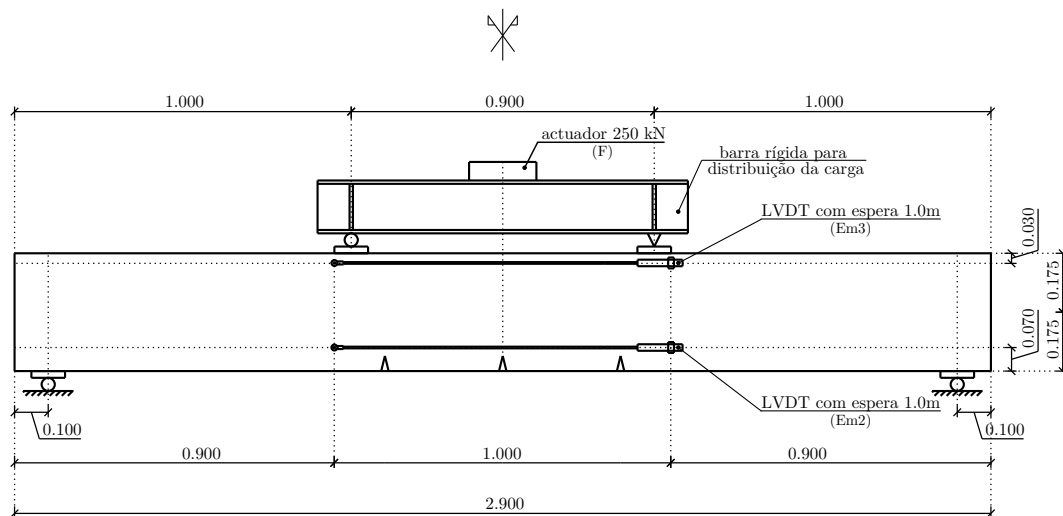
Inclui-se ainda a instalação de dois sensores de Bragg directamente na armadura ordinária, em posições criteriosamente calculadas de forma a apanhar directamente a localização de uma fenda induzida (Ex5) e a porção não fendilhada entre fendas (Ex4). Ainda internamente foi instalado um extensómetro de cordas vibrantes com uma base de medida de 200 mm (Ex6).

Externamente, adoptou-se um esquema complementar de instrumentação cobrindo várias grandezas significativas, cuja disposição geral se representa na Figura 5.31. Foram então instalados:

- i) uma célula carga incorporada no actuador hidráulico para medição da força aplicada (F);
- ii) três LVDT verticais, a meio vão e na posição das cargas, para medição dos respectivos deslocamentos verticais relativos (F11, F12 e F13);
- iii) três LVDT horizontais, com barra de extensão perfazendo 1.0 m entre pontos de fixação, de forma a medir externamente a deformação média na mesma zona onde se encontram os transdutores internos (Em1, Em2 e Em3);
- iv) três fissurómetros, instalados nas fendas induzidas inicialmente, para medição da respectiva abertura (Af1, Af2 e Af3).



(a) Face 1



(b) Face 2

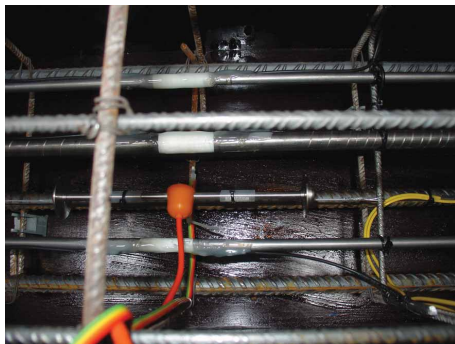
FIGURA 5.31: Posição da instrumentação externa adoptada e respectiva nomenclatura.



(a)



(b)



(c)

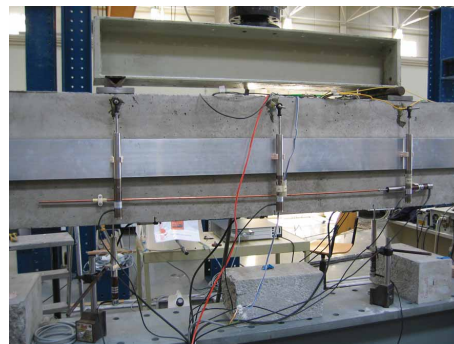


(d)

FIGURA 5.32: Vistas gerais da instrumentação interna.



(a)



(b)



(c)



(d)

FIGURA 5.33: Vistas gerais da instrumentação externa.

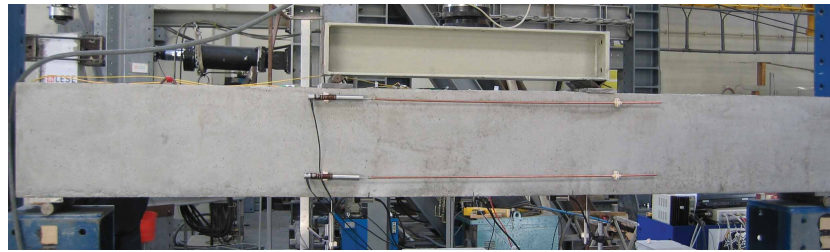
Algumas imagens ilustrativas dos transdutores aplicados internamente estão presentes na Figura 5.32. Pode também ver-se algumas imagens da instrumentação externa utilizada durante o ensaio de carga na Figura 5.33. Importa ainda referir que todos os sensores ópticos internos foram multiplexados e interrogados por uma unidade de leitura Micron Optics sm130-500. Toda a instrumentação externa de natureza eléctrica assim como o extensómetro de cordas vibrantes foram lidos por uma unidade de leitura independente (DataTaker 515).

#### 5.4.4.3 Resultados

##### **Ensaio monotónico:**

O primeiro ensaio de carga foi realizado sob controlo de deslocamento e consistiu em duas rampas de carga e descarga, executadas a uma velocidade constante e igual a 0.001 mm/s e -0.0025 mm/s, respectivamente. A menos dos efeitos em que se considera pertinente a confrontação dos resultados revelados por ambas as vigas, foca-se esta exposição numa das vigas que se considera representativa do conjunto de resultados.

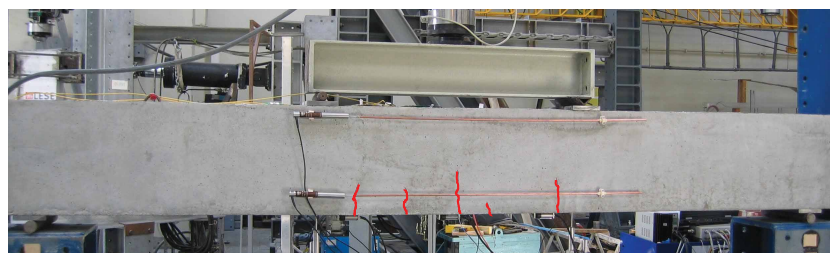
O padrão de fendilhação obtido na referida viga está presente na Figura 5.34, retratando diferentes fases do ensaio. Durante a crescente evolução da carga, observou-se a propagação primária das fendas previamente induzidas e o surgimento posterior de novas fendas intersticiais. O espaçamento médio final observado entre fendas foi de aproximadamente 11 cm.



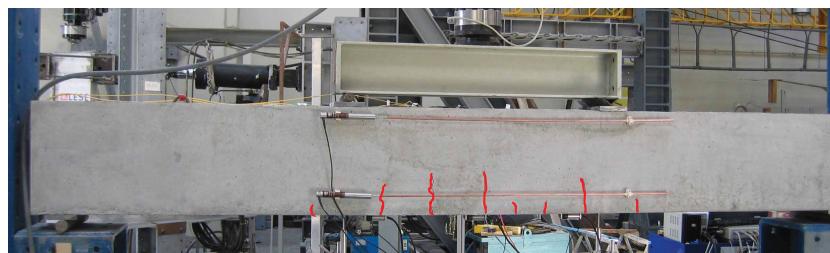
(a)



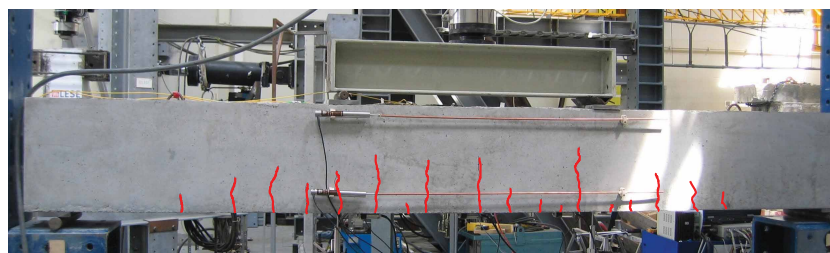
(b)



(c)



(d)



(e)

FIGURA 5.34: Evolução do padrão de fendilhação experimental: a)  $\delta_v \approx 0.3$  mm; b)  $\delta_v \approx 0.7$  mm; c)  $\delta_v \approx 1.0$  mm; d)  $\delta_v \approx 2.0$  mm; e)  $\delta_v = 3.0$  mm.

A Figura 5.35 representa a evolução da força (a) e os três deslocamentos verticais relativos nas posições do vão (b). Assinala-se que, neste ensaio, foi atingida uma carga máxima de 115 kN, correspondente a cerca de 20% da carga última estimada da viga.

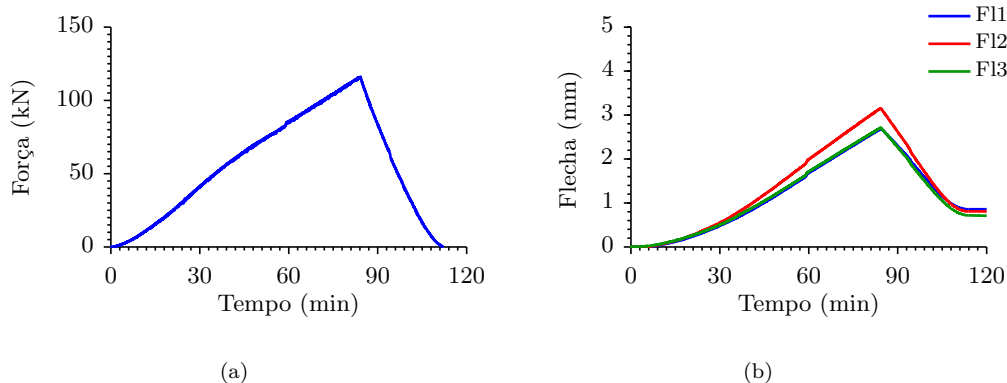


FIGURA 5.35: Ensaio monotónico (ver Figura 5.31 com nomenclatura dos sensores): a) evolução da força; b) evolução das flechas.

Na Figura 5.36, mostra-se a evolução da abertura de fendas e as correspondentes curvaturas médias determinadas a partir do par de LVDT externos.

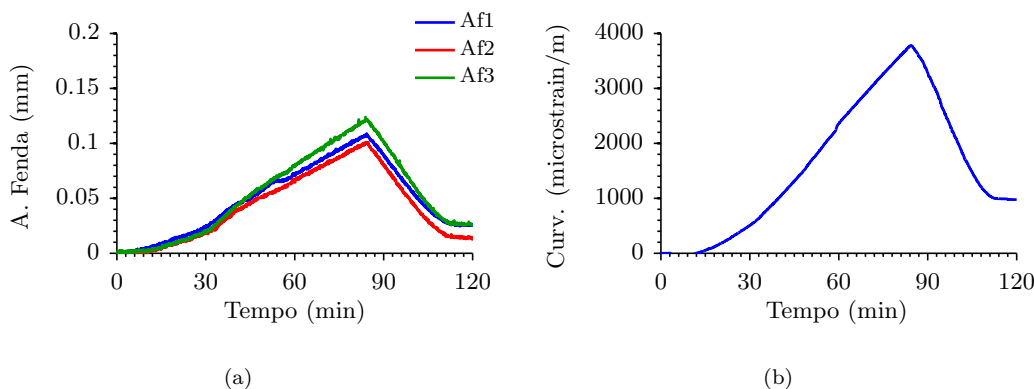


FIGURA 5.36: Ensaio monotónico (ver Figura 5.31 com nomenclatura dos sensores): a) evolução da abertura de fendas; b) evolução da curvatura média.

Na Figura 5.37.a), traça-se a evolução das extensões medidas nos diversos pontos atrás indicados. Desta forma, na Figura 5.37.a), sobrepõe-se os registos dos sensores internos, designadamente dos transdutores ópticos (Ex1, Ex2 e Ex3), dos extensómetros colados na armadura (Ex4 e Ex5) e do extensómetro de cordas vibrantes (Ex6). É assinalável a aproximação entre os transdutores ópticos e simultaneamente entre estes e o extensómetro de cordas vibrantes. Refere-se ainda as extensões medidas na armadura, Ex4 e Ex5, muito dependentes da posição relativa das fendas.

Representam-se as deformações médias medidas a partir dos LVDT externos considerando a sua base de medida também de 1.0 m na Figura 5.37.b). Encontra-se uma concordância igualmente significativa entre os transdutores de deformação internos e as deformações médias determinadas a partir dos LVDT. Destaca-se o desvio inferior a 4%

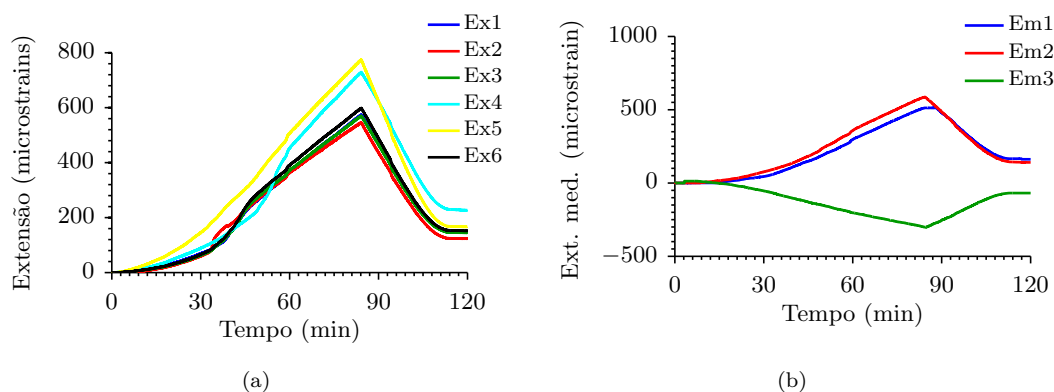


FIGURA 5.37: Ensaio monotónico (ver Figuras 5.30 e 5.31 com nomenclatura dos sensores): a) evolução das extensões medidas; b) evolução da deformação média.

observado entre a deformação média externa (Em1 e Em2) e o valor do transdutor L interno (Ex2).

De forma a analisar com maior detalhe o comportamento dos transdutores ópticos, mostra-se, na Figura 5.38, os resultados obtidos nas duas vigas ensaiadas. Nas Figuras 5.38.a) e c), isolam-se os resultados obtidos com os três tipos de transdutores contemplados. Estão comparadas as três soluções anteriormente apresentadas, designadamente o transdutor L com aderência natural (Ex1), o transdutor L com óleo descofrante (Ex2) e o transdutor N (Ex3). O comportamento observado nas duas vigas é em termos qualitativos muito semelhante. Para cada viga, a concordância entre as três curvas é também elevada, sendo de assinalar um desvio de pico máximo de cerca de 5%.

É no entanto de focar a demonstração de comportamentos divergentes aquando da formação das primeiras fendas. Atente-se às Figuras 5.38.b) e d) onde estão comparados com maior detalhe os registos de cada transdutor na fase de propagação das primeiras fendas. Em ambos os ensaios, é notório que o transdutor sem aderência, correspondente ao transdutor L com óleo descofrante (Ex2), se destaca dos demais. Justifica-se este comportamento através da sensibilidade do transdutor à abertura de todas as fendas compreendidas na sua base de medida. Considera-se que a influência das duas fendas iniciais, mais afastadas do plano médio da viga, é clara dentro da base de medida do transdutor não-aderente.

As diferenças assinaladas permitem concluir que o transdutor sem aderência (Ex2) revela uma maior aptidão para a caracterização da deformação média do betão fendilhado. Assinala-se a concordância entre o andamento do transdutor L com óleo descofrante e a grandeza homóloga medida externamente através dos LVDT caracterizadores da deformação média na mesma base de medida (Em1 e Em2). Faz-se, no entanto, notar a aproximação do comportamento dos transdutores à medida que a fendilhação foi progredindo e estabilizando.

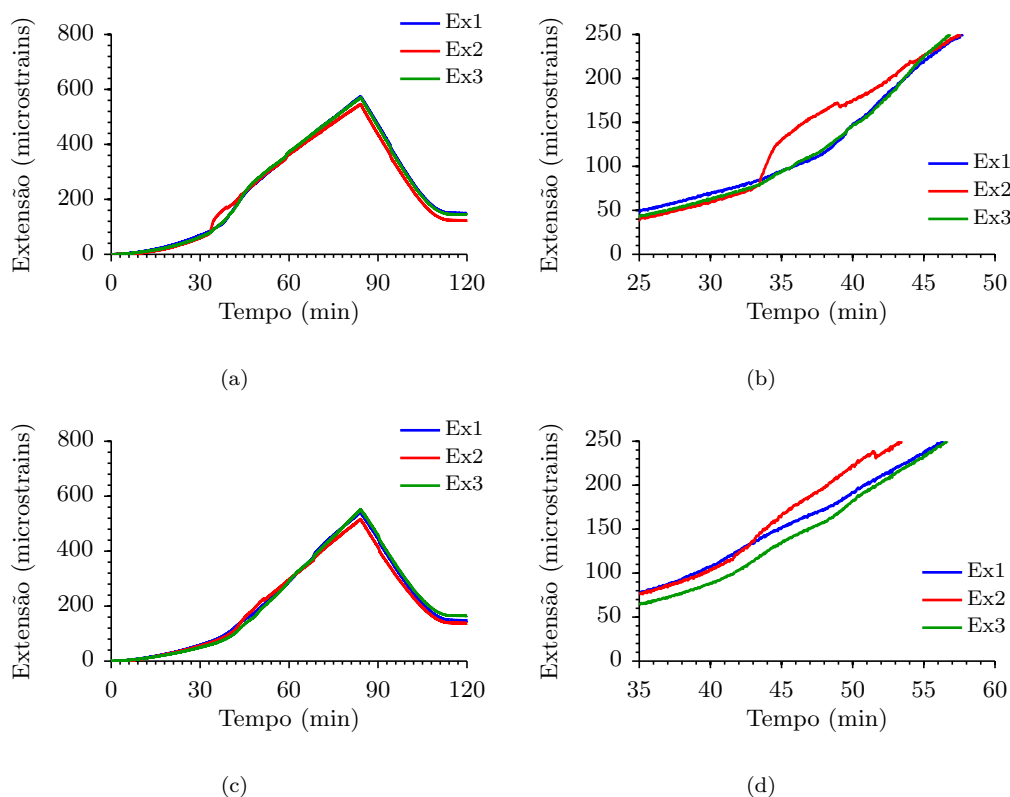


FIGURA 5.38: Ensaio monotónico (ver Figura 5.30.a) com nomenclatura dos sensores): a) extensão medida pelo conjunto de sensores (viga 1); b) pormenor relativo ao início da fendilhação (viga 1); c) extensão medida pelo conjunto de sensores (viga 2); d) pormenor relativo ao início da fendilhação (viga 2).

### Ensaio cíclico:

De forma semelhante à exposição anterior, considera-se igualmente importante caracterizar a resposta dos diferentes transdutores sujeitando a viga a um conjunto de ciclos de carga. Pretende-se avaliar a influência das cargas cíclicas na destruição das condições de aderência e conseqüentemente na alteração do comportamento dos transdutores.

Seguindo a ordem anterior, na Figura 5.39 representa-se a evolução da forma e das flechas estruturais ao longo deste ensaio cíclico realizado com controlo de força. A correspondente evolução da abertura de fendas e da curvatura média está também caracterizada na Figura 5.40.

Na Figura 5.41 confrontam-se as diferentes extensões medidas. Representam-se na Figura 5.41.a) os sensores instalados internamente no betão e na Figura 5.41.b) traçam-se os registos dos três LVDT externos utilizados para medir a deformação média.

Com maior grau de detalhe, isolam-se, mais uma vez, os registos dos transdutores ópticos na Figura 5.42. Comparam-se os três transdutores ao longo de todo o ensaio cíclico na Figura 5.42.a) e destacam-se, com maior pormenor, os ciclos de carga na Figura 5.42.b).

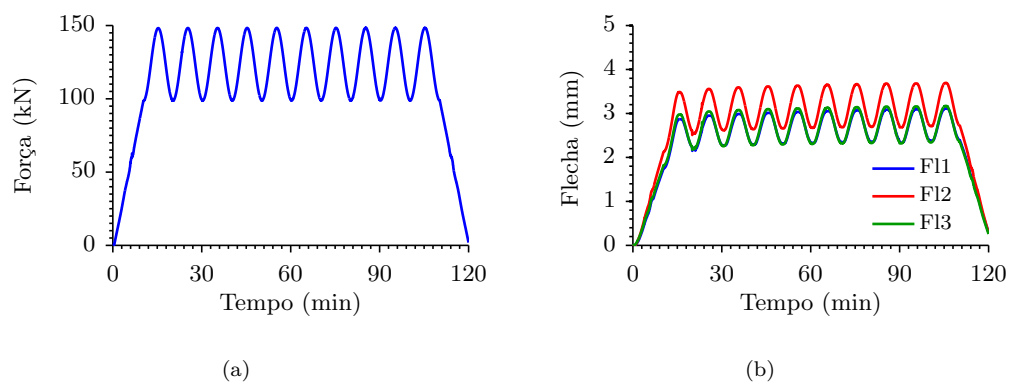


FIGURA 5.39: Ensaio cíclico (ver Figura 5.31(a) com nomenclatura dos sensores): a) evolução da força; b) evolução das flechas.

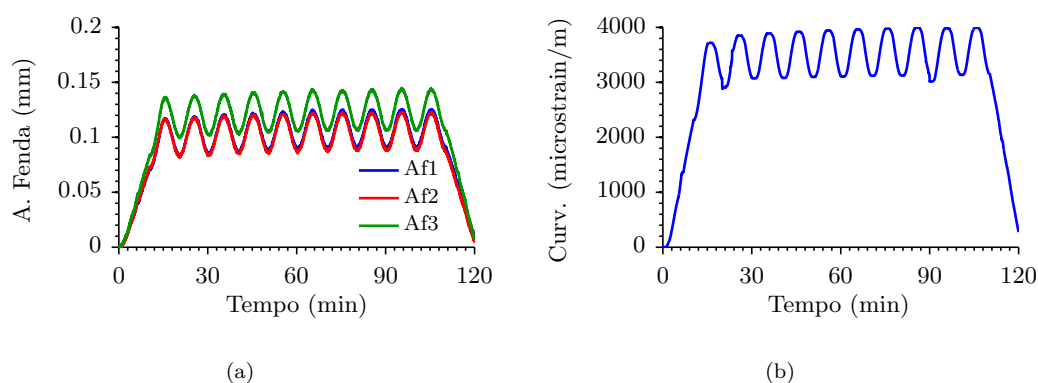


FIGURA 5.40: Ensaio cíclico (ver Figura 5.31(a) com nomenclatura dos sensores): a) evolução da abertura de fendas; b) evolução da curvatura média.

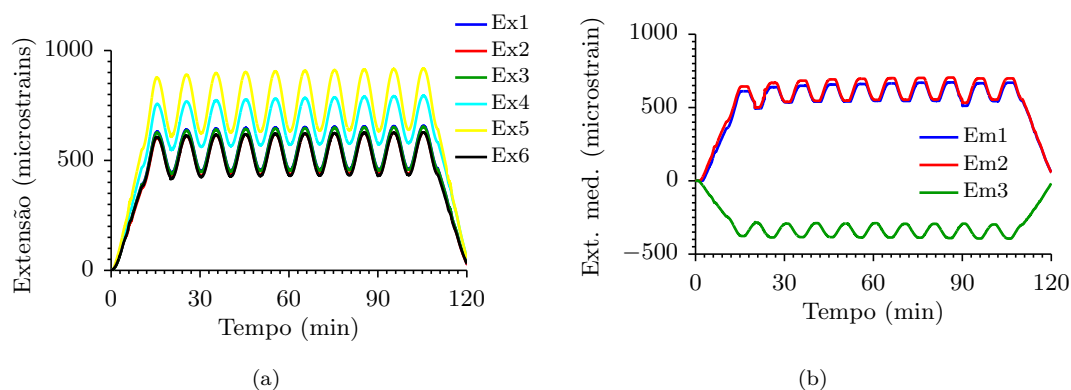


FIGURA 5.41: Ensaio cíclico (ver Figuras 5.30 e 5.31 com nomenclatura dos sensores): a) evolução das extensões medidas; b) evolução da deformação média.

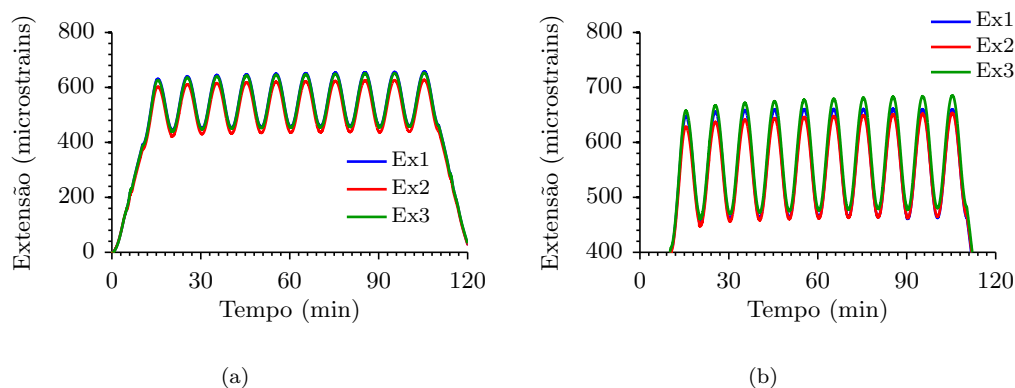


FIGURA 5.42: Ensaio cíclico (ver Figura 5.30 com nomenclatura dos sensores): a) extensão medida pelo conjunto de transdutores; b) pormenor relativo aos ciclos de carga.

Analisando os transdutores ópticos em estudo, verifica-se um incremento significativo da aproximação das suas respostas. Constata-se mesmo que esta aproximação é progressiva ao longo do ensaio. Constata-se que o transdutor L com a aderência natural (Ex1), isto é, sem óleo descofrante, tende a aproximar-se ligeiramente do transdutor sem aderência (Ex2). Justifica-se o comportamento descrito, nomeadamente com a aproximação do comportamento dos dois sensores lisos, com a destruição progressiva da fraca aderência existente entre o aço liso do transdutor e betão circundante à medida que se vai repetindo a aplicação da carga.

#### 5.4.5 Modelo numérico

O modelo experimental atrás exposto foi ainda avaliado à luz de uma análise numérica. Desenvolve-se para o efeito um modelo de elementos finitos, associado a uma formulação de estados planos de tensão, simulando a fendilhação do betão armado através de leis constitutivas apropriadas que resultaram numa análise não-linear material. Recorreu-se ao software comercial TNO Diana e aos respectivos modelos para análise mecânica de estruturas de betão (Manie e Kikstra, 2010).

A viga de betão foi discretizada numa malha de elementos finitos quadráticos de 4 nós, aproximadamente regular, com elementos com 1 cm de lado conforme se mostra na Figura 5.43.a). Procurou-se representar o mais realisticamente possível a geometria efectiva do modelo experimental tendo em conta o desenvolvimento do seu plano médio e respectiva espessura. Destaca-se, neste particular, a inclusão dos entalhes utilizados para indução de fendas, simulados através de três cortes equivalentes na malha de elementos finitos.

Procedeu-se à modelação das armaduras longitudinais e transversais representando, de forma discreta, o seu posicionamento efectivo. Estas foram simuladas através de elementos de barra embebidos nos elementos de betão, consideradas perfeitamente aderentes,

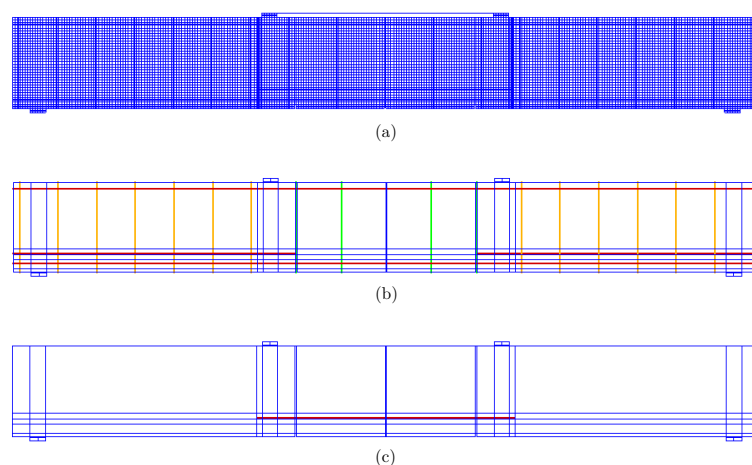


FIGURA 5.43: Modelo numérico: a) malha de elementos finitos; b) armadura ordinária; c) transdutores internos.

originando a disposição representada na Figura 5.43.b). Uma vez mais procurou-se definir o modelo numérico com as secções efectivas de aço presentes no modelo experimental.

Os sensores internos, nomeadamente os transdutores desenvolvidos, pela sua rigidez relativa, foram também introduzidos neste modelo (ver Figura 5.43.c)). Optou-se por modelar o transdutor aderente ao betão, isto é, o transdutor N, através de elementos de viga embebidos e compatibilizados com a malha de betão ao longo de todo o seu desenvolvimento. Contrariamente, os transdutores L, com aderência insignificante, foram simulados através de elementos de barra compatibilizados com a malha de betão apenas nos seus nós extremos. Neste último caso, foram ainda introduzidas no modelo, as respectivas cabeças de ancoragem, evitando assim uma concentração irrealista de tensões junto dos nós de ligação.

Foram definidas as propriedades médias dos diferentes materiais, cujos valores médios se resumem na Tabela 5.4, na sua maioria resultantes de ensaios de caracterização mecânica dos materiais já anteriormente referidos. Relativamente à fendilhação do betão, recorreu-se a um modelo *Multifix* representando uma fendilhação distribuída com decomposição de extensões, com possibilidade de formação de múltiplas fendas fixas. Limitou-se o ângulo mínimo entre duas potenciais fendas,  $\alpha$ , em  $30^\circ$ , seguindo as conclusões de Pimentel (2004).

Junto à armadura de tracção principal, numa altura de 8 cm a contar da base, foi adoptado um diagrama de retenção de tensões no betão, cuja definição se mostra na Figura 5.44.a). Na restante extensão de betão, recorreu-se a um diagrama de amolecimento linear conforme representado na Figura 5.44.b). Realça-se que os dois modelos utilizados para representar o comportamento do betão fendilhado, pese embora a sua simplicidade, têm dado provas de simular bem o fenómeno em causa, possibilitando simultaneamente a uma relativa economia do tempo de cálculo (Pimentel, 2004).

TABELA 5.4: Propriedades médias dos diferentes materiais envolvidos no modelo.

Betão	Módulo de elasticidade	$E_{cm}$	28 GPa
	Coefficiente de Poisson	$\nu$	0.2
	Resistência à tracção	$f_{ctm}$	2.2 MPa
	Resistência à compressão	$f_{cm}$	33 MPa
	Energia de fractura	$G_f$	60 N/m
Armadura	Módulo de elasticidade	$E_s$	200 MPa
	Tensão de cedência	$f_{sym}$	550 MPa

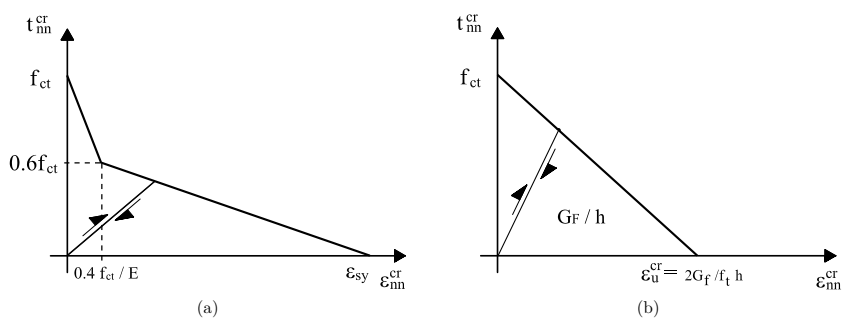


FIGURA 5.44: Modelos do comportamento do betão fendilhado: a) diagrama de retenção de tensões de tracção no betão; b) diagrama de amolecimento linear.

### 5.4.5.1 Resultados

Procedeu-se ao cálculo do modelo apresentado, sob imposição de uma carga incremental, crescente, com controlo de deslocamentos atingindo um valor máximo de 2.7 mm. Para este deslocamento, foi atingido um carregamento máximo de 120 kN. Na Figura 5.45 representa-se a malha deformada para a carga máxima contemplada. Representa-se, para a mesma configuração de carga, o respectivo mapa de tensões principais de compressão no betão.

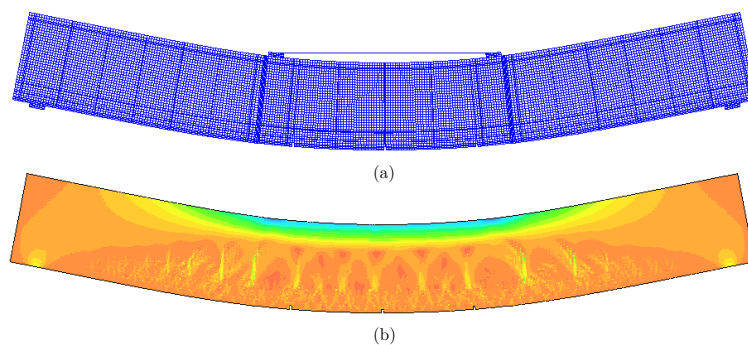


FIGURA 5.45: Resultados do modelo numérico: a) malha deformada; b) tensões principais de compressão no betão.

Na Figura 5.46, apresenta-se a evolução do padrão de fendilhação fornecido pelo modelo

numérico. Pode confrontar-se estes resultados com o equivalente experimental anteriormente ilustrado na Figura 5.34. É notória a semelhança entre o padrão numérico e o experimental, tendo em conta o número de fendas, seu espaçamento e orientação. Em todo o caso, detectam-se alguns desvios nomeadamente junto dos cortes utilizados para indução de fendas. Constatou-se que a inclusão da armadura transversal, nesta zona, altera o padrão de fendilhação e desvia ligeiramente a posição destas fendas no modelo numérico. Em todo o caso, considera-se que, em termos médios, o grau de aproximação é bastante bom.

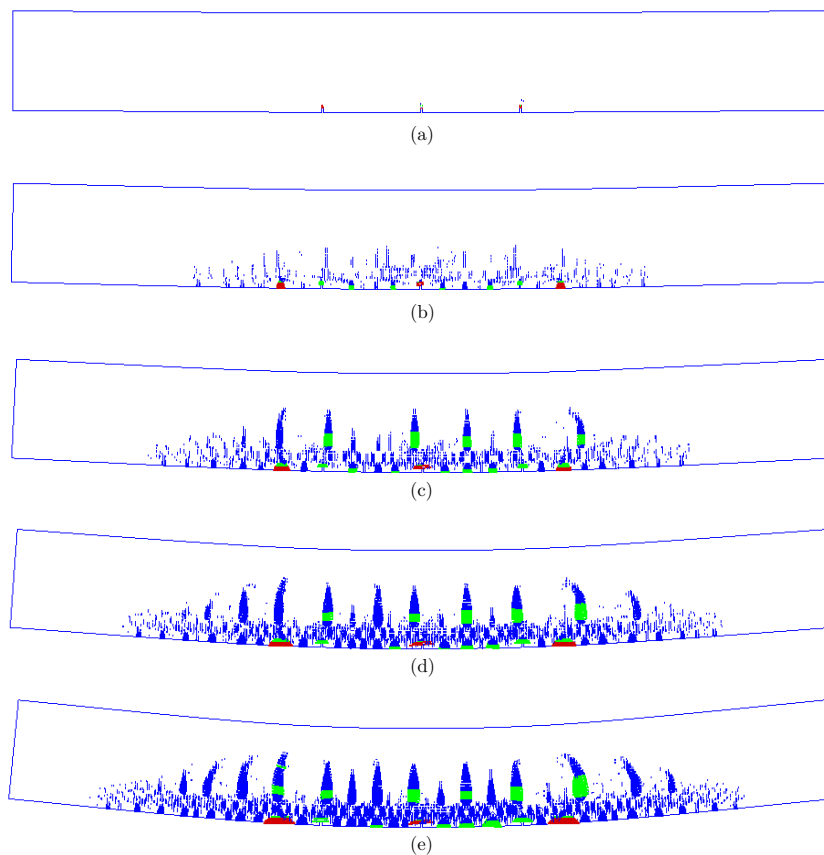


FIGURA 5.46: Evolução do padrão de fendilhação obtido por via numérica: a)  $\delta_v=0.3$  mm; b)  $\delta_v=1.0$  mm; c)  $\delta_v=2.0$  mm; d)  $\delta_v=3.0$  mm; e)  $\delta_v=4.0$  mm.

Representa-se o respectivo diagrama carga/deslocamento na Figura 5.47, mais uma vez confrontando-o com os resultados experimentais. Verifica-se uma excelente aproximação entre os resultados experimentais e numéricos representados na figura.

Procurando avaliar a diferença no comportamento dos transdutores internos com aderência perfeita ao betão face a outros sem aderência, mostra-se o perfil de extensões obtido ao longo destas duas soluções abordando diferentes estágios de fendilhação. Atente-se à Figura 5.48 onde estão representados os diagramas de extensão ao longo de dois transdutores modelados com e sem aderência perfazendo 1.0 m de desenvolvimento centrados na viga. É visível a diferença na distribuição de extensões nas duas soluções analisadas. Utilizando o princípio de medição atrás exposto, isto é assumindo como representativa

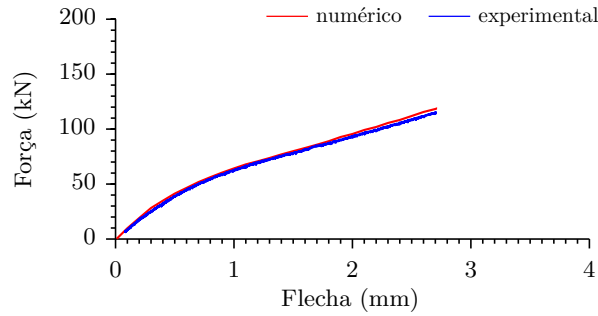


FIGURA 5.47: Diagramas carga/deslocamento vertical nos pontos de aplicação da carga (flecha): confrontação numérico *vs.* experimental.

a extensão localizada na região média do transdutor, verifica-se um desvio que pode chegar a 60% quando confrontadas as duas tipologias.

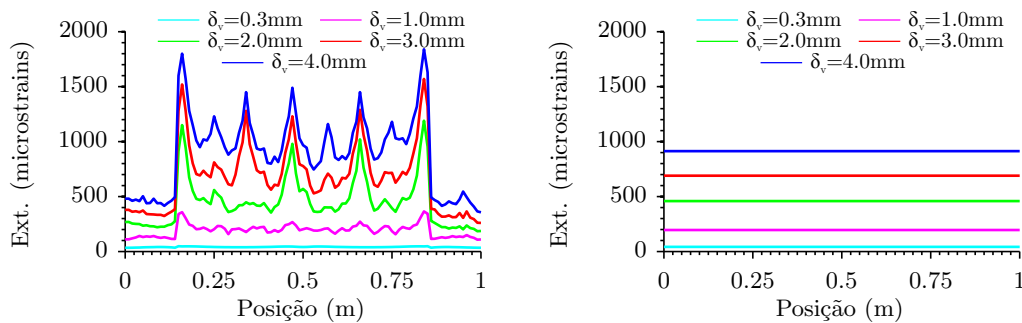


FIGURA 5.48: Diagramas de extensões nos transdutores: a) diagrama de extensões num transdutor com aderência; b) diagrama de extensões num transdutor sem aderência.

Tendo em conta os resultados apresentados, pode concluir-se que, no caso dos sensores perfeitamente aderentes, o comprimento do transdutor se torna irrelevante para a medição. Trata-se praticamente de uma medição pontual de extensões, onde se depreende que a extensão instalada no ponto de medição, assumido na posição média do corpo do transdutor, não é afectada pelo que ocorre nas imediações desta zona visto estar assegurada, em cada ponto, a total compatibilização do corpo do transdutor com o betão circundante. Desta forma, se a posição média do transdutor se encontra localizada no betão entre duas fendas, o transdutor vai medir a extensão de tracção instalada no betão que, como se verifica na Figura 5.48, pode ser significativamente inferior à deformação média. Por outro lado, se o transdutor está instalado precisamente na posição da fenda, será mormente influenciado pela sua abertura e desta forma representará um valor claramente superior à deformação média instalada no betão fendilhado.

No caso das estruturas fendilhadas, assume importância a consideração do comprimento não aderente do transdutor, que pode ser encarado como forma de uniformizar a deformação média e tornar o sensor mais independente da sua localização. Sobre estes resultados numéricos e para o caso em estudo, representa-se, na Figura 5.49, o desvio

entre a simulação de extensão medida,  $\varepsilon_m$ , obtida assumindo diferentes bases de medição, e a extensão média efectiva,  $\varepsilon_0$ , e mostra-se a sua evolução ao longo do carregamento incremental.

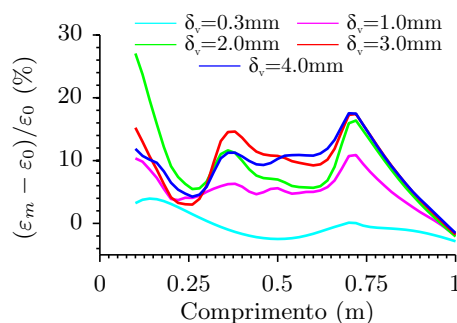


FIGURA 5.49: Variação do erro de medição em função do comprimento do transdutor não-aderente.

Verifica-se que quanto maior o comprimento do transdutor, ou seja, quanto maior a base de medida, maior é a aproximação entre a deformação medida pelo transdutor e a deformação média presente no elemento. Repare-se que para comprimentos relativamente pequenos, próximos do espaçamento entre fendas, o respectivo erro de medição é fortemente influenciado pela posição relativa das fendas e pela sua abertura. Nos casos em que é esperado um padrão de fendilhação generalizado ao longo da estrutura, reclamam-se então bases de medida suficientemente maiores do que o espaçamento médio espectável entre fendas.

## 5.5 Instalação e aplicações

Os transdutores que se acabam de testar foram desenvolvidos a pensar em aplicações práticas em estruturas reais. Neste contexto, foram adoptadas medidas que facilitam a sua instalação. Alimenta-se uma especial atenção para as condições particularmente agressivas presentes durante a instalação dos sensores na malha de armaduras e, mais ainda, durante a betonagem e vibração do betão.

Na Figura 5.50 mostram-se alguns contornos relacionados com a instalação destes transdutores em pontes de betão armado pré-esforçado. Nas duas imagens é possível visualizar a fixação dos transdutores à respectiva malha de armadura ordinária como garante do seu posicionamento durante as fases subsequentes da betonagem. Tem-se verificado que o corpo do transdutor é suficientemente robusto para suportar o espalhamento cuidadoso do betão e a sua vibração. Unicamente se recomenda que o betão não seja despejado directamente sobre os sensores e que os meios mecânicos de vibração não entrem em contacto directo com o transdutor e com os respectivos cabos.

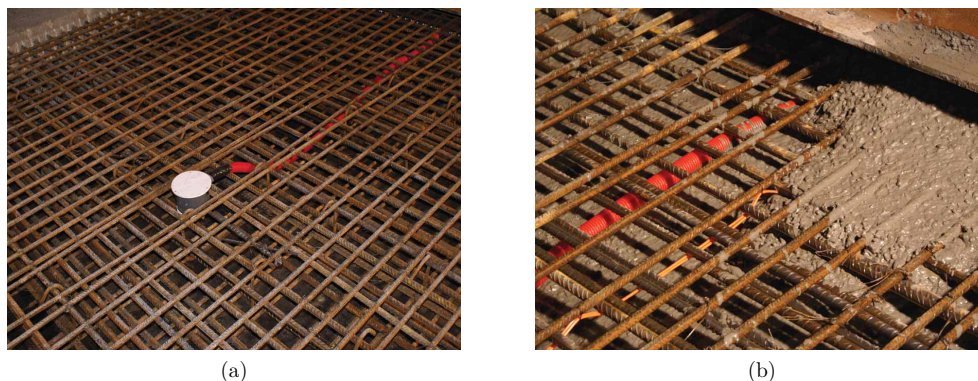


FIGURA 5.50: Instalação dos transdutores de deformação: a) integração do transdutor no meio da malha de armaduras; b) betonagem cuidada na proximidade do transdutor.

Um dos aspectos mais críticos para o sucesso da instalação prende-se com o modo como são conduzidas as fibras ópticas no interior do elemento estrutural e na forma como se procede à sua retirada do interior da massa de betão. No interior do betão recomenda-se que todos os cabos sejam conduzidos no interior de tubos para maior protecção mecânica e para controlar os raios de curvatura da fibra óptica. Neste particular, a utilização de tubo corrugado plástico permite grande flexibilidade na definição dos percursos, sendo suficientemente rígido para suportar qualquer contacto. A definição do percurso destes tubos segundo a disposição da malha de armadura confere ainda maior robustez à instalação.

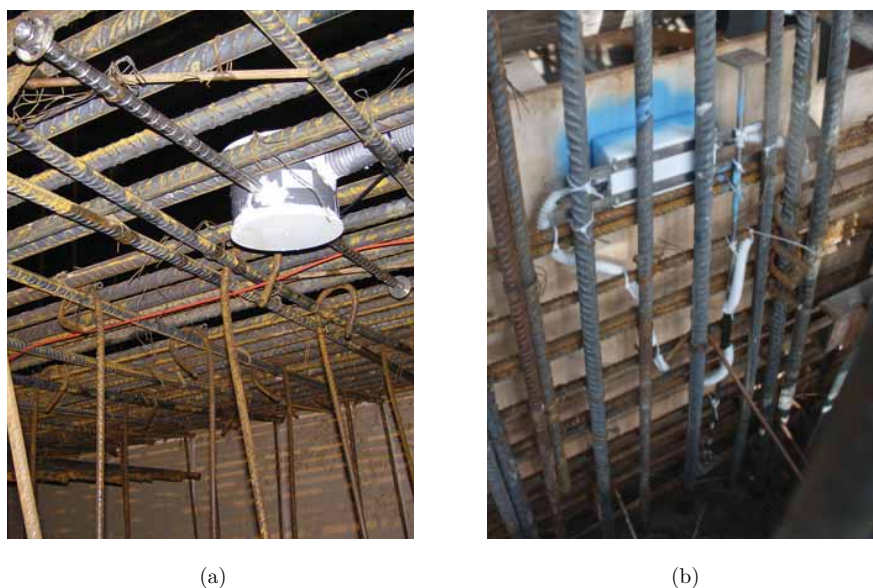


FIGURA 5.51: Instalação das caixas de acesso aos cabos dos transdutores: a) transdutor N e caixa circular de acondicionamento integrada no próprio transdutor; b) transdutor L e caixa rectangular de acondicionamento instalada na proximidade do transdutor.

A retirada do cabo do interior do betão, tendo em conta a existência de cofragens, implica normalmente a instalação de caixas de acesso. Estas caixas devem ser instaladas em contacto directo com os painéis de cofragem, permitindo o fácil acesso à mesma logo



FIGURA 5.52: Utilização das caixas de acesso para realização das ligações: a) acesso aos cabos ópticos após a betonagem; b) acondicionamento das emendas de fibra junto à caixa de acesso.

após a retirada dos respectivos painéis de cofragem conforme se ilustra na Figura 5.51. Deve recorrer-se a soluções estanques que impossibilitem a entrada de água e demais sujidade durante a fase de betonagem e exploração do sistema, compreendendo uma dimensão tal que permita alojar o comprimento de cabo em causa respeitando os raios de curvatura mínimos especificados. Estas mesmas caixas podem permitir, na montagem da rede de sensores, alojar os respectivos conectores e fusões de emenda tal como se mostra na Figura 5.52.

A condução dos cabos e a multiplexagem em série dos sensores deve ser realizada posteriormente assim que estejam garantidas as condições mínimas que deixem de ser um risco sério para a integridade da instalação. A condução directa de cabos com grau de protecção adequado no interior de calhas técnicas ou ductos revela ser adequada para a maioria das aplicações interiores.

No Capítulo 7 aborda-se com mais detalhe a integração de diferentes transdutores de deformação numa rede de sensores ópticos associada a projecto real de monitorização estrutural. Remetendo esta última aplicação prática para o sistema de monitorização estrutural instalado na Ponte da Lezíria analisado com particular detalhe em capítulo próprio.

## 5.6 Considerações finais

Apresentou-se, neste capítulo, o desenvolvimento de novos transdutores para embeber no betão. Procurou-se criar novas soluções, comparáveis em termos de desempenho às melhores soluções existentes no mercado, mas visando soluções mais robustas, mais fáceis de instalar e mais económicas.

Conceberam-se duas versões relativas a dois transdutores baseados na instrumentação de um corpo maciço em aço inox com sensores de Bragg. Fez-se variar o princípio

de funcionamento dos dois transdutores apresentados criando diferentes condições de aderência. Apresentou-se o designado transdutor L baseado num corpo liso isento de aderência com o betão, sendo a compatibilização realizada através de duas cabeças de ancoragem extremas. Simultaneamente, concebeu-se uma segunda solução, designada por transdutor N, baseada num corpo semelhante, mas aderente ao betão através de uma rosca de profundidade crescente gravada no corpo do transdutor.

Procurou-se avaliar o comportamento conjunto destas soluções em vários ensaios laboratoriais, apontando para a comparação do desempenho de cada solução. Neste âmbito, apresentaram-se ensaios de calibração de tracção pura com os transdutores isolados, ensaios de compressão pura com os transdutores embebidos num prisma de betão, um ensaio de aderência em viga à flexão e um ensaio final com os diferentes transdutores instalados numa viga de betão armado ensaiada à flexão com fendilhação induzida.

Destaca-se, em primeiro lugar, a linearidade da resposta destes transdutores revelada nos ensaios de calibração. Obteve-se ainda um desvio entre a calibração realizada e a sensibilidade teórica ( $0.78 \mu\epsilon^{-1}$ ) inferior a 0.3%. Realça-se igualmente a excelente repetibilidade entre diferentes transdutores calibrados que, numa amostra ensaiada de cerca de 50 transdutores, apresentou uma dispersão inferior a  $\pm 1.5\%$ . Ensaio realizados com os transdutores no interior do betão permitiram também validar a capacidade de transdução da deformação efectivamente presente no betão.

Salientam-se no entanto os resultados do último ensaio realizado sobre as vigas fendilhadas. Os resultados alcançados permitiram validar as soluções desenvolvidas respondendo a um dos requisitos iniciais relacionado com a influência da fendilhação. Destaca-se o papel revelado pela aderência entre o corpo do transdutor e o betão no comportamento dos referidos sensores aquando do surgimento da fendilhação. Neste regime, constatou-se uma maior aptidão dos transdutores lisos, sem aderência, na caracterização da deformação média do betão fendilhado. Das soluções propostas, o transdutor L com a aderência destruída, foi aquele que revelou um desempenho mais consistente na caracterização do betão fendilhado, tendo-se aproximado do comportamento médio pretendido ao longo de todo o ensaio.

Os resultados obtidos foram ainda cruzados e comprovados com base numa modelação numérica com recurso a um modelo de elementos finitos simulando os diferentes fenómenos de fendilhação do betão. Os resultados atingidos demonstram a concordância entre os resultados experimentais e os resultados numéricos. Abordando este caso concreto, analisou-se a sensibilidade dos resultados considerando diferentes comprimentos de medição no caso do transdutor não aderente. Concluiu-se que quanto maior a respectiva base de medida, menor o erro associado à localização real da fendilhação.

Ambas as soluções desenvolvidas revelaram um comportamento adequado para a monitorização estrutural. Faz-se no entanto uma distinção final. Os sensores não-aderentes (tipo L) passam a ser recomendados para estruturas com betão alvo de fendilhação,

podendo ser dimensionados de forma a ajustar a sua base de medida ao padrão de fendilhação espectável e assim melhor representar estados de deformação média. Por sua vez, os transdutores com aderência controlada (tipo N) podem ser aplicados na generalidade das estruturas não-fendilhadas, recomendando-se mesmo o seu uso no caso dos elementos estruturais naturalmente comprimidos ou pré-esforçados.

## Capítulo 6

# Desenvolvimento de um Transdutor para Medição de Flechas

Procedeu-se ao desenvolvimento de um transdutor de base óptica para medição de deslocamentos verticais, em obras de arte, com recurso ao método dos níveis líquidos. Apresenta-se aqui o transdutor desenvolvido e suas potencialidades no domínio da monitorização estrutural. Destacam-se os aspectos inovadores da corrente invenção com especial ênfase para o seu princípio de funcionamento e para a sua arquitectura interna. Analisa-se um conjunto de testes que visam a avaliação do desempenho deste transdutor e que aferem a sua aplicabilidade prática. Termina-se com a referência a aspectos práticos relacionados com a sua instalação na monitorização estrutural.

### 6.1 Estado da arte da medição de flechas em pontes

A flecha, ou seja o deslocamento vertical relativo associado à quantificação da deformada da estrutura perante as mais diversas solicitações, tem provado ser um dos indicadores directos mais representativos do comportamento global das estruturas (Jenkins et al., 1997). A capacidade de carga e a segurança (Wong et al., 2001), assim como os efeitos da temperatura (Roberts-Wollman et al., 2002), as perdas de pré-esforço (Chiu et al., 1996) e o comportamento diferido dos materiais (Kristek et al., 2006) são exemplos de aspectos estruturais que se tem verificado serem fortemente relacionáveis com a amplitude da respectiva flecha ao longo do tempo. Contudo, dada a sua natureza e atendendo à necessidade de se estabelecer uma referência independente da estrutura, a flecha continua a ser uma das grandezas de mais difícil e complexa medição na monitorização permanente de obras de arte.

Fazendo uma revisão dos processos tradicionalmente empregues na medição de deslocamentos em estruturas, a utilização de transdutores específicos, tais como, LVDT e deflectómetros, tem exibido excelentes resultados na monitorização estrutural, tanto em observações estáticas como dinâmicas em termos de precisão e fiabilidade (Bastos, 1997). Contudo, a medição de flechas com este tipo de transdutores obriga à contemplação de referências físicas sob os pontos de medida, designadamente no solo firme. No caso das pontes, esta ligação física está particularmente dificultada, restringindo a sua aplicabilidade aos casos em que é possível o recurso a fios verticais ligando os transdutores ao solo ou a estruturas auxiliares apoiadas no terreno (ver Figura 6.1.a)). Estes esquemas auxiliares são geralmente complexos e sensíveis a perturbações externas, levando naturalmente a erros de medição acrescidos e à correspondente perda de fiabilidade de todo o sistema de medição. Salienta-se que nas pontes sobre grandes rios ou estradas, ou nas estruturas de grande altura, esta técnica torna-se mesmo impraticável.

Para ultrapassar esta dificuldade, têm sido desenvolvidas técnicas que visam a medição de deslocamentos prescindindo da necessidade de haver contacto físico entre os pontos móveis da estrutura e as respectivas posições de referência.

As técnicas de monitorização topográfica, como é o caso dos nivelamentos, triangulações e alinhamentos com recurso a níveis ópticos, teodolitos e demais dispositivos ópticos, são há muito utilizadas na monitorização de importantes estruturas, nomeadamente de pontes e barragens, quer durante a sua construção, quer durante a posterior exploração. No passado, estas técnicas eram realizadas por equipamentos manuais, requerendo a intervenção de operadores especializados, tornando-se num processo lento e dispendioso, geralmente limitado a campanhas periódicas de observação. Mais recentemente o aparecimento de estações totais robotizadas (ver Figura 6.1.b)) veio automatizar estas

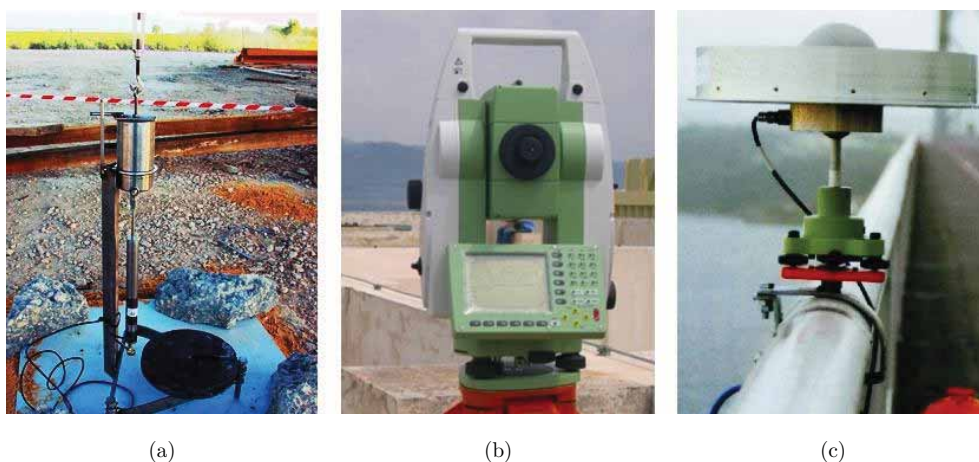


FIGURA 6.1: Técnicas e equipamentos utilizados para medição de flechas: a) LVDT ligado ao terreno com fio suspenso da estrutura (Rodrigues et al., 2007); b) Estação total robotizada (Roberts et al., 2006); c) Antena de GPS fixa à estrutura (Psimoulis e Stiros, 2007)

técnicas de medição, permitindo, por processos de orientação optoelectrónica, direccionar o aparelho de medida para os pontos alvo da estrutura e assim potenciar a sua aplicação em monitorizações autónomas e permanentes (Cook, 2006; Psimoulis e Stiros, 2007). Apesar dos avanços recentes que vieram incrementar a autonomia dos equipamentos e sua velocidade de leitura, os elevados custos do equipamento, a logística da sua instalação e protecção num ponto do terreno que permita a observação da estrutura, associado aos erros de medição da ordem dos  $\pm 3$  mm tem limitado a sua implementação prática na monitorização de pontes (Stanton et al., 2003).

Neste domínio e mais recentemente, têm também sido exploradas técnicas de medição remota de deslocamentos verticais por processamento de imagem (Lee e Shinozuka, 2006). A aplicação de técnicas de fotogrametria e de correlação de imagens aparece em muito associada ao advento das câmaras de captação de imagem digitais e das ferramentas de cálculo automático para processamento de imagem (Jauregui et al., 2003; Yoneyama et al., 2007; Valença et al., 2011). O desenvolvimento de técnicas de análise no domínio do sub-píxel, juntamente com a crescente resolução dos meios de captação de imagem, está a ser explorado em diversas aplicações que cruzam vários domínios da engenharia (Hild e Roux, 2006). Quando se passa para a monitorização de estruturas reais, com condições de campo adversas, nomeadamente com condições de visibilidade bastante exigentes dada a distância da câmara à estrutura, os erros de medição têm rondado os 2 mm (Valença et al., 2011). Continua-se a exigir o aperfeiçoamento das várias técnicas e meios para melhores desempenhos perante variações de temperatura, humidade e luminosidade.

As técnicas de medição remota têm também vindo a incorporar com significativo sucesso os meios de geolocalização GNSS, de onde se destaca o sistema GPS actualmente disponível na Europa. Esta técnica permite o acompanhamento das coordenadas tridimensionais dos pontos em observação relativamente a um sistema referencial absoluto e independente, determinado pela triangulação dos diversos satélites que compõem o sistema. Em termos de implementação prática, este torna-se um sistema particularmente apelativo uma vez que a instalação do sistema em campo passa maioritariamente pela instalação de antenas receptoras nos pontos onde se pretende medir os deslocamentos (ver Figura 6.1.c)). A capacidade de determinar deslocamentos tridimensionais é também um aspecto bastante atractivo nesta técnica. Várias publicações têm mostrado várias aplicações de curta e longa duração (Wong et al., 2001; Roberts et al., 2004; Nickitopoulou et al., 2006; Watson et al., 2007). Contudo, apesar do sistema GPS possuir potencialidades únicas para a monitorização estrutural, a sua reduzida precisão, os custos do equipamento e a necessidade de boas condições de visibilidade dos satélites continuam a ser obstáculos à sua aplicação prática efectiva. É de salientar que os respectivos erros de medição estão ainda balizados entre  $\pm 10$  mm nas direcções horizontais e  $\pm 20$  mm na direcção vertical (Nickitopoulou et al., 2006).

O recurso a sistemas baseados na propagação e reflexão de lasers e radares tem também sido explorado na monitorização de flechas (Nassif et al., 2005; Fuchs et al., 2004; Park et al., 2007). Algumas destas técnicas permitem, para além da medição de deslocamentos de pontos discretos da estrutura, a determinação de deformadas completas por varrimento de toda a estrutura (Park et al., 2007). São ainda escassas as aplicações na monitorização de estruturas reais, limitando-se a alguns projectos experimentais. As principais limitações que se têm vindo a verificar nesta técnica estão relacionadas com o custo dos equipamentos envolvidos e com o alcance limitado tendo em conta a necessária limitação da potência das fontes de radiação por questões de segurança.

A procura de técnicas de medição menos dispendiosas, fáceis de instalar e fiáveis tem ainda privilegiado as medições indirectas para determinar a deformada da estrutura. Destaca-se a medição de rotações (Hou et al., 2005), curvaturas (Inaudi et al., 1998; Cho et al., 2000) e acelerações (Park et al., 2005) para cálculo de deslocamentos estruturais por intermédio de inclinómetros, extensómetros e acelerómetros, respectivamente. Neste caso, estes transdutores são instalados em pontos-chave da estrutura que são seleccionados com base na sua potencial capacidade para reflectir o comportamento global da estrutura. Modelos numéricos e relações geométricas, suportados por ensaios experimentais para validação e calibração, são posteriormente utilizados para relacionar as grandezas medidas com os deslocamentos verticais de interesse.

No contexto exposto e apesar do recente desenvolvimento de várias técnicas associadas à medição remota potenciadas pelos avanços no domínio tecnológico, um dos métodos para medição de flechas mais eficaz e fiável continua a ser baseado no estabelecimento de níveis líquidos (Marecos, 1978; Zhu et al., 2006; Solomon et al., 2000; Burdet, 2010). Estes sistemas têm provado ser fáceis de instalar, económicos e suficientemente rigorosos para a monitorização da maioria das estruturas da Engenharia Civil em regime estático ou quase-estático, com aplicação frequente em pontes e obras geotécnicas (Marecos, 1978). A experiência na monitorização de estruturas tem demonstrado o potencial desta técnica através de um vasto rol de aplicações ao longo de mais de 40 anos. Destacam-se, em Portugal, os trabalhos realizados no LNEC (Marecos, 1978) e no LABEST-FEUP (p.ex. Figueiras et al. (2005); Rodrigues et al. (2007); Cavadas et al. (2009)) com a utilização de níveis líquidos na observação do comportamento de pontes em ensaios de carga.

## 6.2 Método dos níveis líquidos

### 6.2.1 Princípio de aplicação

O método dos níveis líquidos para medição de flechas assenta no princípio dos vasos comunicantes e permite conhecer a posição relativa de múltiplos pontos, viabilizando a medição de deslocamentos verticais relativamente a um ponto de referência, geralmente

imune a deslocamentos verticais, sem necessidade de qualquer ligação física ao solo ou ao meio exterior ao da própria estrutura.

O princípio dos vasos comunicantes está esquematizado na Figura 6.2, reflectindo um estado de equilíbrio hidrostático aplicado a um determinado líquido, idealmente incompressível e de viscosidade nula, confinado num dado circuito hidráulico. Verificando-se o estado de equilíbrio hidrostático, reflectido nas alturas de líquido  $h_1$  e  $h_2$ , torna-se possível estabelecer uma referência ao longo de toda a extensão do circuito hidráulico por intermédio da respectiva linha piezométrica, traduzida pela equação de Bernoulli (Novais-Barbosa, 1985):

$$(h_1 + \Delta H) + \frac{P_{0,1}}{\rho_1 g} = h_2 + \frac{P_{0,2}}{\rho_2 g} = c \quad (6.1)$$

onde  $P_{0,1}$  e  $\rho_1$ , assim como,  $P_{0,2}$  e  $\rho_2$  são a pressão atmosférica e a massa volúmica do líquido em dois quaisquer pontos considerados, respectivamente;  $g$  é a aceleração gravítica; e  $c$  corresponde a uma constante associada à energia de equilíbrio do sistema.

Ainda sobre a Figura 6.2, nos casos em que a pressão atmosférica e a densidade do líquido são constantes ao longo de toda a extensão do circuito, verifica-se que o equilíbrio hidrostático traduz uma perfeita horizontalidade da superfície livre do líquido, podendo ser traduzido de forma mais simples por:

$$h_1 + \Delta H = h_2 \quad (6.2)$$

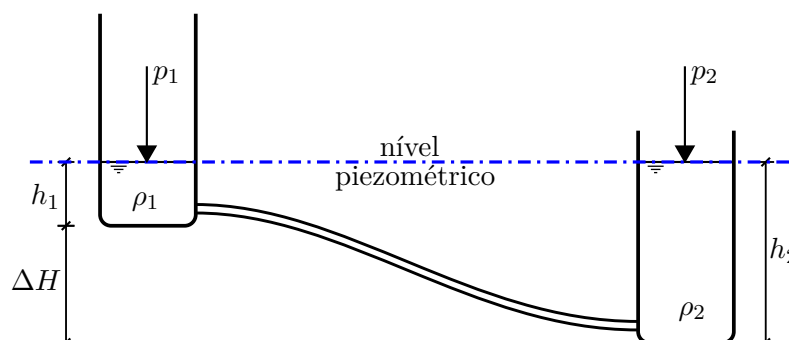


FIGURA 6.2: Princípio dos vasos comunicantes aplicado ao nivelamento hidrostático.

Tirando partido da referência vertical facultada pela superfície livre do líquido em equilíbrio, na medição de flechas com níveis líquidos recorre-se a um circuito hidráulico, solidário com a estrutura, que interliga todos os pontos onde se pretende medir o respectivo deslocamento vertical relativo. Este circuito estende-se ainda a um ponto, tido como referência, por exemplo sobre um encontro ou pilar, cujo deslocamento vertical pode ser assumido como desprezável.

Relativamente a um determinado estado de equilíbrio inicial, a deformação da estrutura e, conseqüentemente, o deslocamento vertical relativo dos diversos pontos do circuito hidráulico solidário com esta, conduzirá a uma nova situação de equilíbrio. A altura de líquido em cada ponto variará de acordo com a deformada da estrutura e com a nova configuração de equilíbrio hidrostático. Logo, o valor do deslocamento vertical pode ser obtido comparando a variação da altura de líquido em cada ponto de interesse com a variação análoga no ponto de referência.

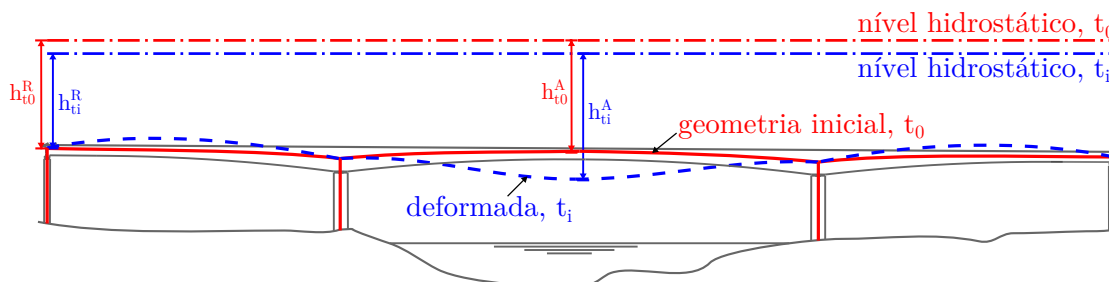


FIGURA 6.3: Representação esquemática da aplicação de níveis líquidos na determinação da flecha de uma ponte.

Traduzindo o postulado anterior, a aplicação da supracitada técnica na medição do deslocamento vertical de um ponto genérico,  $A$ , relativamente ao ponto de referência,  $R$ , está esquematizada na Figura 6.3. Matematicamente a variação da altura de líquido, nestes dois pontos, num determinado instante  $t_i$ , está relacionada com o respectivo deslocamento vertical relativo através de:

$$\Delta\delta_{v,t_i}^A = (h_{t_i}^A - h_{t_0}^A) - (h_{t_i}^R - h_{t_0}^R) \quad (6.3)$$

onde,

$\Delta\delta_{v,t_i}^A$  corresponde ao deslocamento vertical relativo entre  $A$  e  $R$ , também denominado por flecha;

$h_{t_i}^A$  e  $h_{t_0}^A$  são as alturas de líquido na secção  $A$ , no instante  $t_i$  e no instante inicial  $t_0$ , respectivamente; e

$h_{t_i}^R$  e  $h_{t_0}^R$  são as alturas de líquido na secção  $R$  (referência), no instante  $t_i$  e no instante inicial  $t_0$ , respectivamente.

A determinação do deslocamento vertical relativo ao longo da estrutura passa então pela medição das respectivas alturas de líquido nos pontos de interesse e pela aplicação, em cada estado de equilíbrio, da Equação 6.3. Destaca-se que múltiplos pontos do circuito podem ser avaliados simultaneamente utilizando a mesma posição de referência e o mesmo circuito hidráulico.

### 6.2.2 Fontes de erro

Em condições ideais, o nivelamento hidrostático tem exibido erros inferiores a 0.1 mm quando associado a instalações adequadas e a sensores apropriados. Contudo, alguns erros intrínsecos ao próprio nivelamento podem reduzir o rigor do método conforme descrevem Marecos (1978) e Sneddon (1979), de onde se destaca:

**Diferenças de pressão atmosférica** entre os diversos pontos de medição e o ponto de referência são passíveis de perturbar o rigor do nivelamento, conduzindo a situações de equilíbrio associadas a desníveis altimétricos na respectiva superfície livre (ver Equação 6.1). A origem de pressões diferenciais está em muitos casos relacionada com a incidência de vento na superfície livre do circuito. Para ventos correntes da ordem dos 20 km/h podem ser esperados erros de nivelamento da ordem dos  $\pm 2$  mm devido à variação da respectiva pressão dinâmica.

**Variações de temperatura** são passíveis de causar variações na densidade do líquido. Particularmente as variações diferenciais de temperatura conduzem a situações de equilíbrio hidrostático com desníveis altimétricos nas respectivas superfícies livres provocados pela não-uniformidade da densidade do líquido (ver Equação 6.1). Para variações diferenciais de temperatura máximas expectáveis de 2 °C, os erros de nivelamento podem ser da ordem dos 0.5 mm tendo em conta uma coluna vertical média de 1 m de líquido.

**Enchimento deficiente do circuito** nomeadamente com presença de bolhas de ar no seu interior é passível de comprometer seriamente o rigor do nivelamento uma vez que a permanência de um fluido compressível no interior do circuito conduz a configurações de equilíbrio imprevisíveis.

Marecos (1978) preconiza ainda uma série de medidas que se podem adoptar para minimizar os respectivos erros de medição. A adopção destas medidas é geralmente capaz de limitar os erros de medição afectos ao nivelamento para valores inferiores a 1 mm. Referem-se as seguintes práticas com vista à minimização dos problemas intrínsecos ao método:

**Circuito paralelo para transmissão da pressão atmosférica** pode ser necessário para garantir igual pressão externa em todos os pontos do sistema de níveis líquidos, eliminado assim erros devido a diferenças de pressão atmosférica.

**Utilização de um líquido invar** é recomendada para minimização dos erros de medição sempre que sejam esperadas grandes amplitudes térmicas. Recomenda-se igualmente a protecção do sistema da insolação directa.

**Técnicas que obriguem à circulação forçada do líquido** podem também ser utilizadas para uniformizar a temperatura do líquido no interior do circuito antes de cada leitura. Faz-se notar, no entanto, que estas técnicas são geralmente realizadas com meios mecânicos que procedem à circulação do líquido de difícil implementação prática.

**Enchimento cuidado do circuito** de forma a garantir a expulsão de bolhas de ar que se venha a acumular no interior do circuito. É recomendável prever-se troços inclinados e a um conjunto de purgas para uma mais fácil expulsão do ar. A circulação forçada do líquido durante o enchimento do circuito é também uma medida eficiente para expulsar todo o ar instalado no seu interior.

Face às suas propriedades naturais e à sua abundância, geralmente, é utilizada água no enchimento do circuito. Esta possui propriedades tais como densidade e viscosidade que a tornam adequada para a maioria das aplicações. Contudo, outros líquidos com propriedades específicas, tais como, densidade ajustada ou insensibilidade à temperatura podem ser justificados. Destaca-se ainda o caso em que o sistema funcionará em ambientes onde se esperam temperaturas negativas, sendo necessário recorrer a líquidos com temperatura de solidificação inferior ou, frequentemente, à adição de produtos anticongelantes na água.

## 6.3 Concepção do Transdutor

O transdutor de deslocamento desenvolvido está concebido para medir pequenas variações da altura do líquido e, apelando ao método dos níveis líquidos, medir o deslocamento vertical relativo dos pontos onde for instalado. Este transdutor constitui uma solução eficiente e de baixo custo, baseada em sensores de fibra óptica, alternativa aos sensores eléctricos normalmente utilizados para medir níveis líquidos, tais como as células de pressão e os sensores piezoresistivos, piezocapacitivos, ultra-sons, lasers ou cordas vibrantes.

### 6.3.1 Princípio de Funcionamento

O princípio de funcionamento do transdutor assenta na medição do peso aparente de um corpo parcialmente imerso no líquido e sujeito às variações da posição da respectiva superfície livre. Referem-se aqui os conceitos de força de impulsão e de peso aparente de um corpo imerso, postulados por Arquimedes (287–212 AC). Segundo o Princípio de Arquimedes, todo o corpo mergulhado num fluido experimenta uma impulsão vertical, dirigida de baixo para cima, cujo valor é dado pelo peso do volume de fluido deslocado. Logo, quando um corpo tem densidade superior à do fluido, a actuação da força de

impulsão,  $I$ , torna-se capaz de reduzir o seu peso real,  $W$ , para um peso aparente,  $W'$ , de menor magnitude (Halliday et al., 1997). A Figura 6.4 ilustra a base do Princípio de Arquimedes, traduzindo o equilíbrio interno e as forças de pressão sobre as superfícies imersas de um corpo cilíndrico.

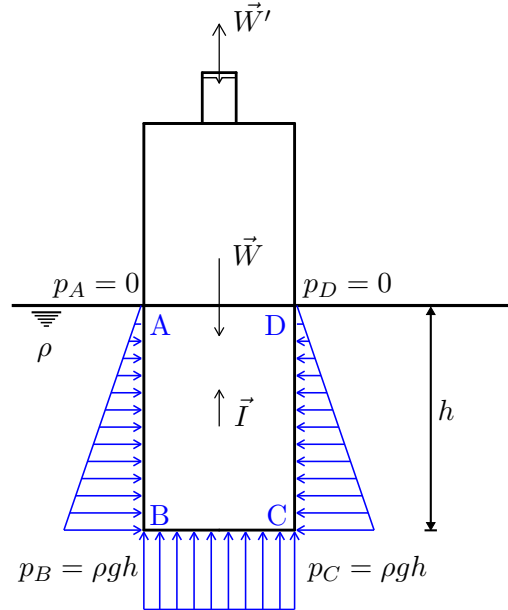


FIGURA 6.4: Esquema das pressões instaladas num corpo cilíndrico parcialmente imerso num fluido.

No caso do corpo cilíndrico representado, demonstra-se que o valor da força de impulsão,  $I$ , é directamente proporcional à altura de líquido,  $h$ , que parcialmente imerge o corpo. Logo, deduz-se, por equilíbrio de pressões internas, que o peso aparente do referido corpo é dado por

$$|\vec{W}'| = |\vec{W} + \vec{I}| = mg - \rho ghA \quad (6.4)$$

onde  $m$  e  $A$  são a massa e a secção transversal do corpo cilíndrico, respectivamente;  $h$  é a altura imersa do corpo;  $\rho$  é a massa volúmica do fluido; e  $g$  é a aceleração gravítica. Consequentemente, medindo a variação do peso aparente do corpo parcialmente imerso no fluido, torna-se possível obter a correspondente variação de altura de líquido, dada por

$$\Delta h = \frac{\Delta W'}{\rho g A} \quad (6.5)$$

### 6.3.2 Arquitectura

A representação esquemática da arquitectura interna do transdutor em apreço está presente na Figura 6.5.

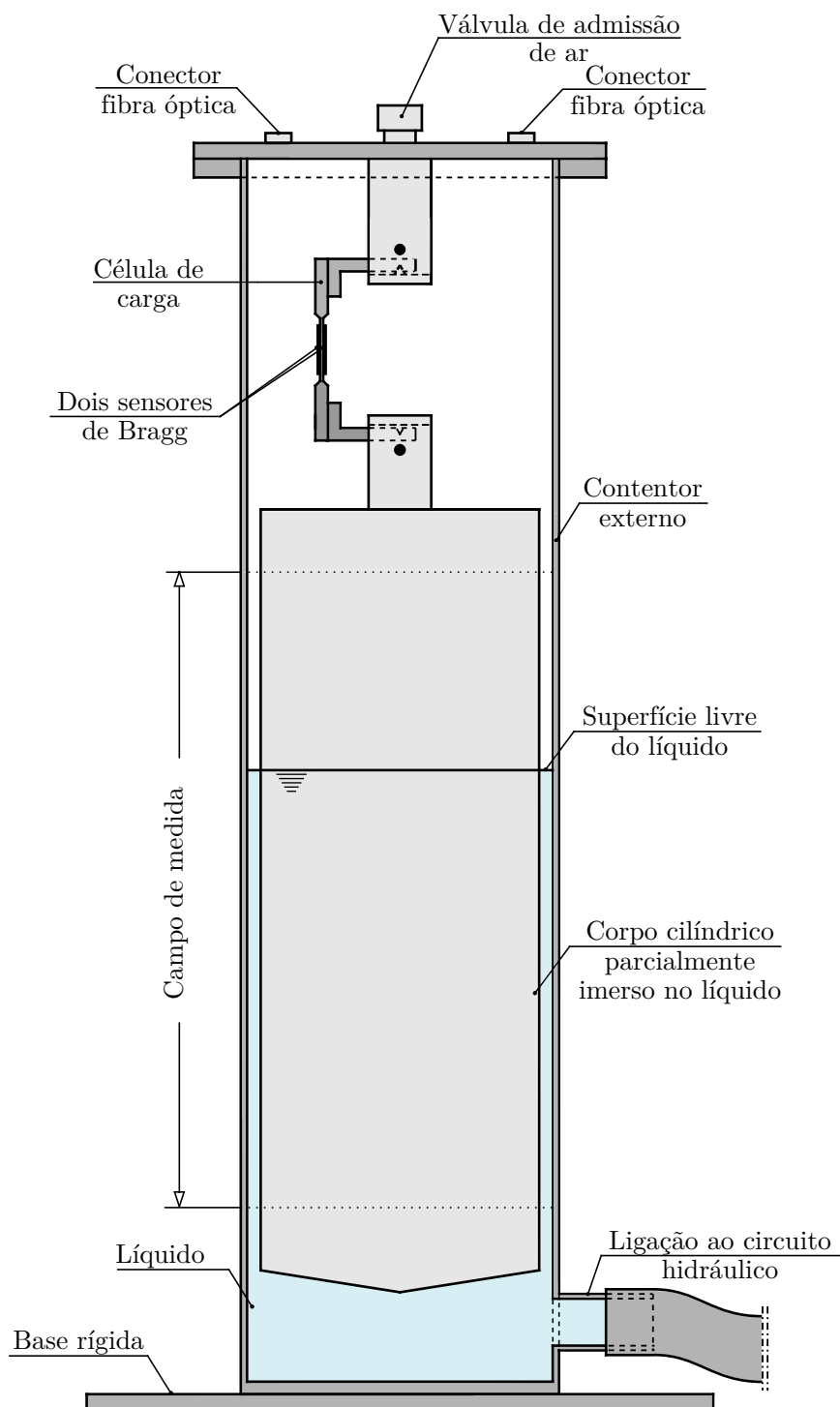


FIGURA 6.5: Arquitectura e constituição interna do transdutor para medição de flechas desenvolvido.

O corpo exterior do transdutor, estando ligado ao circuito hidráulico cujo nível hidrostático se pretende determinar, tem por função servir de contentor ao respectivo líquido. Pelo princípio de funcionamento do transdutor, exige-se que a respectiva superfície livre esteja no interior do mesmo. Este corpo rígido garante também a fixação conveniente de todos os componentes mecânicos internos, nomeadamente de uma célula de carga específica, suspendendo um corpo cilíndrico parcialmente imerso no volume de líquido interior.

A célula de carga foi desenvolvida especificamente para medir o peso aparente do corpo que suspende e, assim, indirectamente a altura de água. O peso aparente do corpo suspenso, assim como a força de reacção actuam como forças concentradas nas extremidades dos braços da célula de carga, deformando o elemento central de secção constante, designado por placa sensora, onde se alocam os elementos sensores. O recurso a dois sensores de deformação, neste caso recorrendo a sensores de Bragg, instalados nas duas faces da zona sensora permite converter a respectiva força numa grandeza mensurável.

A tecnologia do presente transdutor está estritamente relacionada com os sensores utilizados na célula de carga. Destaca-se, neste ponto, que apesar de este transdutor ter sido pensado e testado exclusivamente para uso com sensores de Bragg, nada impede que estes possam ser substituídos por sensores equivalentes de outra natureza como, por exemplo, extensómetros de resistência eléctrica, mantendo na íntegra o princípio funcional do transdutor.

### 6.3.3 Processamento dos sensores de Bragg

Os sensores de Bragg revelam características que os tornam particularmente vantajosos para esta aplicação concreta, na medida em que apresentam reduzidas dimensões e rigidez, elevada exactidão, capacidade de multiplexagem e capacidade para transmissão do respectivo sinal ao longo de distâncias consideráveis. É, no entanto, conhecida a resposta linear intrínseca dos sensores de Bragg tanto a variações de temperatura como a deformações. Tornou-se, por isso, necessário desenvolver uma técnica que permitisse a separação destes dois efeitos visto que se pretende avaliar a força instalada na célula de carga de forma independente das variações de temperatura que possam ocorrer. A previsão de um par de sensores de Bragg, segundo uma disposição criteriosa, foi a solução encontrada para compensar os referidos efeitos transversais associados à variação de temperatura.

A geometria da célula de carga, assemelhando-se a um "C", é tal que tanto o esforço axial como o momento flector são constantes em toda a zona central, conforme o esquema de esforços internos apresentado na Figura 6.6. Está-se perante um caso típico de flexão circular composta. Consequentemente, os campos de extensões e curvaturas são igualmente constantes na zona da placa sensora, tal como comprovam os resultados

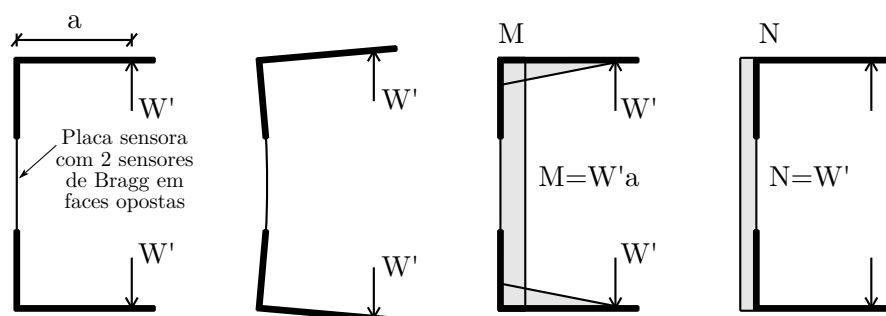


FIGURA 6.6: Diagramas de esforços instalados na célula de carga.

do modelo numérico apresentado na Figura 6.7, realizado através da discretização da célula de carga em elementos finitos de volume.

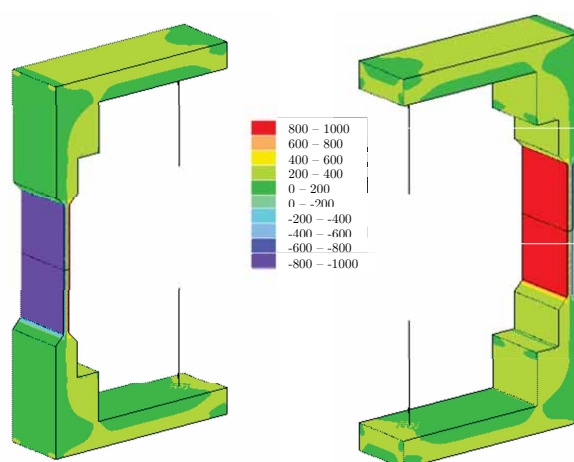


FIGURA 6.7: Distribuição de esforços na célula de carga obtidos a partir de um modelo de elementos finitos de volume.

Interessa fazer a separação das três componentes da deformação instalada na placa sensora associada a efeitos distintos inerentes ao esforço axial, à flexão e ao efeito da temperatura (ver Figura 6.6). Por separação de efeitos, torna-se possível expressar a deformação total a que se encontra a placa sensora,  $\varepsilon_{\text{total}}$ , como sendo o somatório das seguintes parcelas

$$\varepsilon_{\text{total}} = \varepsilon_m^N + \varepsilon_m^M + \varepsilon_T \quad (6.6)$$

Demonstra-se que tanto a extensão mecânica axial,  $\varepsilon_m^N$ , como a deformação de natureza térmica,  $\varepsilon_T$ , admitida uniforme face à reduzida espessura da peça, provocam variações de extensão idênticas nas duas faces opostas da placa sensora. Por outro lado, a deformação associada à parcela do momento fletor,  $\varepsilon_m^M$ , origina esforços de sentido contrário nessas mesmas faces.

A sensibilidade de cada sensor de Bragg à variação de extensão e temperatura está representada na Equação 2.6. Combinando então a variação dos comprimentos de onda,

$\Delta\lambda_1$  e  $\Delta\lambda_2$ , observada em cada um dos dois sensores de Bragg instalados em faces opostas da placa sensora resulta que:

$$\left(\frac{\Delta\lambda_1}{\lambda_1} - \frac{\Delta\lambda_2}{\lambda_2}\right) = 2P_e \varepsilon_m^M \quad (6.7)$$

Verifica-se que a diferença das respectivas variações do comprimento de onda normalizados é independente dos efeitos da temperatura. Por sua vez, a componente de deformação associada ao momento flector pode agora ser desenvolvida em função da força aplicada, ou seja, do peso aparente do corpo parcialmente mergulhado no líquido, e consequentemente em função da altura de líquido no interior do sensor, através de

$$\left(\frac{\Delta\lambda_1}{\lambda_1} - \frac{\Delta\lambda_2}{\lambda_2}\right) = 2P_e \frac{a \cdot t}{E \cdot I} \Delta W' \quad (6.8)$$

ou, em função da variação da altura de líquido

$$\left(\frac{\Delta\lambda_1}{\lambda_1} - \frac{\Delta\lambda_2}{\lambda_2}\right) = k \Delta h \quad (6.9)$$

onde,

$$k = \frac{2P_e \cdot a \cdot t}{\rho \cdot g \cdot A \cdot E \cdot I} \quad (6.10)$$

sendo,  $E$  o módulo de Young do material da célula;  $t$  e  $I$  a espessura e momento de inércia da placa sensora, respectivamente;  $a$  o braço da célula de carga;  $\rho$ ,  $g$  e  $A$  a massa volúmica do fluido, a aceleração gravítica e a área transversal do corpo cilíndrico imerso, respectivamente. Faz-se notar que  $k$  condensa todas as variáveis anteriores, representando a constante de conversão afecta ao elemento sensor que permite relacionar a variação normalizada do comprimento de onda dos dois sensores com a variação do nível de líquido associado.

Salienta-se que foi evidenciada uma relação linear entre a diferença do comprimento de onda normalizado dos dois sensores e o peso aparente do corpo,  $W'$ , que se mostrou proporcional à altura de líquido no interior do transdutor para uma determinada gama de medida. A possibilidade de assim isolar a parcela associada à flexão da placa sensora constitui a metodologia proposta para auto-compensar a influência da temperatura no transdutor.

## 6.4 Construção de protótipos

Foram realizados três protótipos idênticos para condução de testes laboratoriais com vista à avaliação do desempenho efectivo do presente transdutor. Estes protótipos foram

dimensionados para terem um campo de medida de 200 mm e uma resolução máxima aproximadamente igual a 0.1 mm. Mostra-se na Figura 6.8 os componentes principais desenvolvidos.

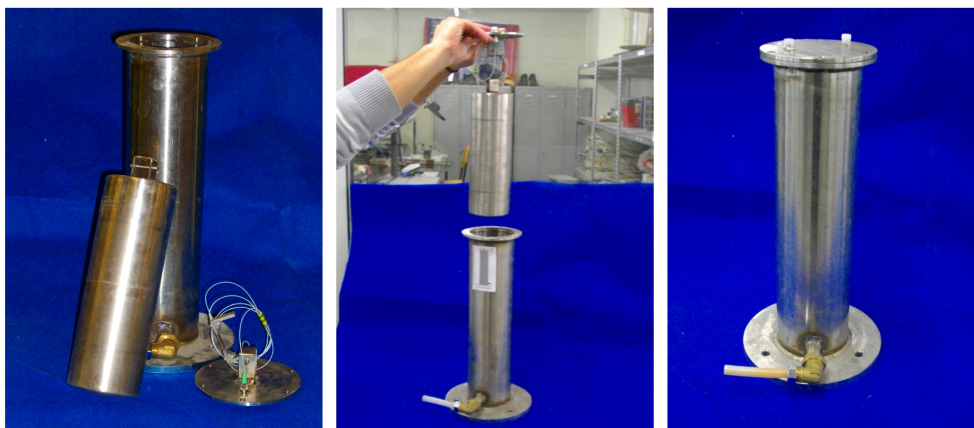


FIGURA 6.8: Configuração dos protótipos do transdutor desenvolvido.

Instalou-se em cada transdutor um par de sensores de Bragg possuindo diferentes comprimentos de onda de forma a permitir a sua multiplexagem em série no interior do sensor. Estes sensores foram colados à superfície de aço inox da célula de carga, convenientemente rectificada e tratada, por intermédio de um adesivo à base de cianoacrilato. Procedeu-se posteriormente à sua protecção dos agentes externos, nomeadamente da humidade, através de um filme de reduzida espessura à base de borracha de silicone conforme se mostra na Figura 6.9.

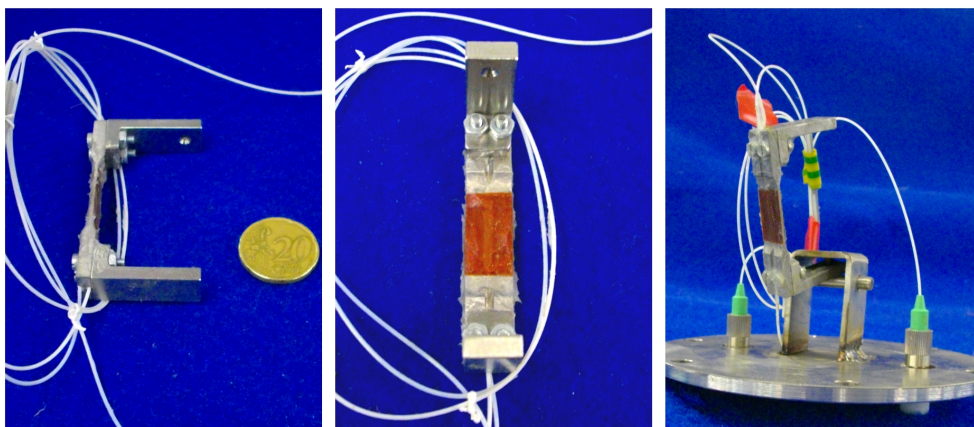


FIGURA 6.9: Pormenor da célula de carga, sensores e condições de apoio.

## 6.5 Caracterização e resultados

Com vista à caracterização metrológica dos transdutores foi realizado um conjunto de testes laboratoriais. Procurou-se avaliar a resolução, a precisão e o erro de medida num conjunto de testes concebidos especificamente para esse fim e realizados em condições

controladas no laboratório do LABEST. Face à sua potencial aplicação em monitorizações permanentes, avaliou-se também a estabilidade ao longo do tempo do transdutor e a sua sensibilidade a variações de temperatura e de humidade. Recorreu-se a uma unidade de leitura Micron Optics si425-250 para desmodulação dos sensores de Bragg.

### 6.5.1 Erro de medição

A primeira série de testes consistiu na imposição de um conjunto de deslocamentos verticais conhecidos e na sua comparação com os valores obtidos com instrumentação de referência de rigor consideravelmente superior ao do transdutor em teste.

Para a realização destes testes, preparou-se o esquema ilustrado na Figura 6.10 que passou pela instalação de um transdutor no prato móvel de uma prensa hidráulica MTS passível de ser controlada de forma programada. Um transdutor de referência semelhante, assim como, um pequeno reservatório foram instalados na proximidade mas rigidamente fixados a um ponto de deslocamento vertical nulo, independente da prensa. Estes dois transdutores e o respectivo reservatório foram interligados por intermédio de um conjunto de tubos acrílicos de 10 mm de diâmetro.

Procedeu-se ao enchimento do circuito com água, adoptando medidas com vista ao seu pleno preenchimento, sem bolhas de ar, através de um conjunto de purgas e descarregadores posteriormente fechados.

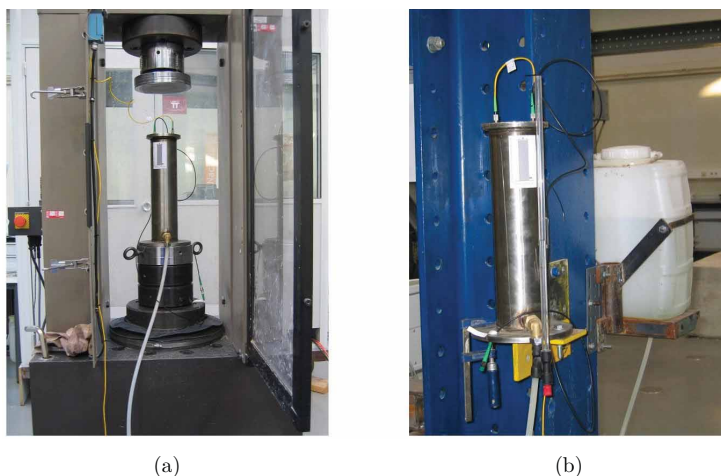


FIGURA 6.10: Ensaio de calibração realizado na prensa MTS com controlo de deslocamento: a) sensor activo no prato móvel da prensa; b) sensor de referência imune a deslocamentos verticais num pórtico anexo.

O actuador da prensa foi programado para operar com controlo de deslocamento, sem imposição de qualquer tipo de força. Utilizou-se como referência o seu sensor interno de deslocamento, do tipo LVDT, cujo erro pode ser assumido como sendo inferior a  $\pm 0.005$  mm conforme atesta o respectivo certificado de calibração.

Faz-se notar que o limite de actuação da prensa é em termos de deslocamento vertical inferior ao campo de medida do transdutor. Desta forma, de modo a avaliar na íntegra o campo de medida do transdutor, os testes realizados foram recorrentemente repetidos experimentando diferentes níveis de água iniciais de forma a simular deslocamentos de maior amplitude.

Durante este ensaio, os comprimentos de onda dos quatro sensores de Bragg, dois do transdutor activo e dois do transdutor de referência, foram registados com uma frequência de amostragem de 2 Hz e posteriormente combinados de acordo com o preconizado na Equação 6.9.

O primeiro teste realizado consistiu na imposição de uma série de patamares de deslocamento, dentro do campo de medida do transdutor, conforme se mostra na Figura 6.11. O deslocamento vertical aqui apresentado varia entre os 0 e os 70 mm correspondendo, como anteriormente referido, ao campo de actuação da prensa. Confrontam-se os valores obtidos a partir do sistema de níveis líquidos composto pelos novos transdutores com as medições do LVDT interno da prensa usado como referência. É desde logo visível nesta figura que os resultados se ajustam de forma excelente.

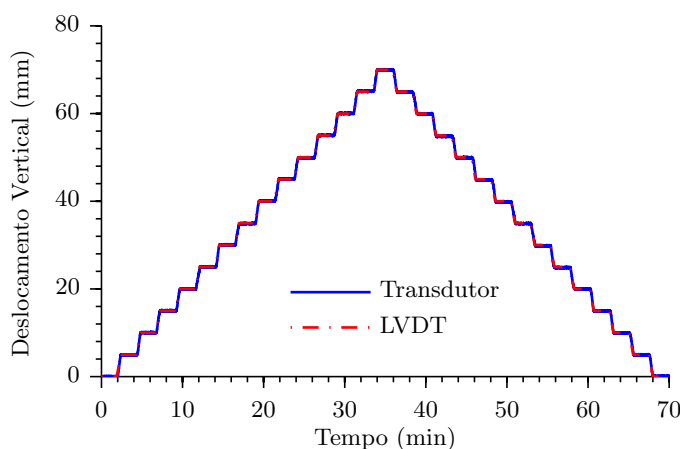


FIGURA 6.11: Ensaio laboratorial com imposição de patamares de deslocamento vertical.

Na Figura 6.12.a), apresenta-se a correlação entre o deslocamento imposto e a variação dos comprimentos de onda normalizados utilizada na Equação 6.9. Sublinha-se que é excelente o ajuste de resultados pelo modelo linear, traduzindo-se num coeficiente  $R^2$  a rondar 1.000. Obteve-se, nesta calibração, uma sensibilidade em termos de variação do comprimento de onda normalizado de  $7.021 \times 10^{-6} \text{ mm}^{-1}$ , o que corresponde a uma variação média do comprimento de onda de cada sensor de Bragg do transdutor aproximadamente igual a  $5.4 \text{ pm} \cdot \text{mm}^{-1}$ .

Na Figura 6.12.b), mostra-se, para o mesmo teste, a correlação entre o deslocamento obtido por intermédio da instrumentação de referência do actuador e o resultado obtido

com o sistema de níveis líquidos utilizando a calibração anterior. Destaca-se o declive unitário comprovando a eficiência da calibração realizada.

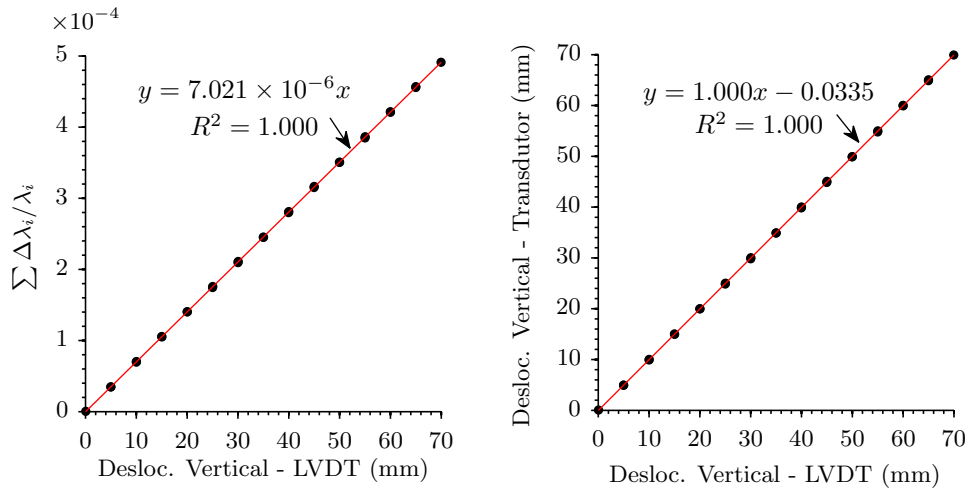


FIGURA 6.12: Correlações registadas entre os resultados da instrumentação de referência e os resultados obtidos com o transdutor desenvolvido.

Na Figura 6.13, representa-se, para o valor característico de cada patamar de deslocamento, definido pela sua média, a correspondente diferença entre os dois sistemas de medição. Atendendo ao rigor consideravelmente superior do LVDT de referência, considera-se que este corresponde ao erro de medição afecto ao sistema de níveis líquidos. Observou-se, desta forma, um erro máximo de  $\pm 0.15$  mm.

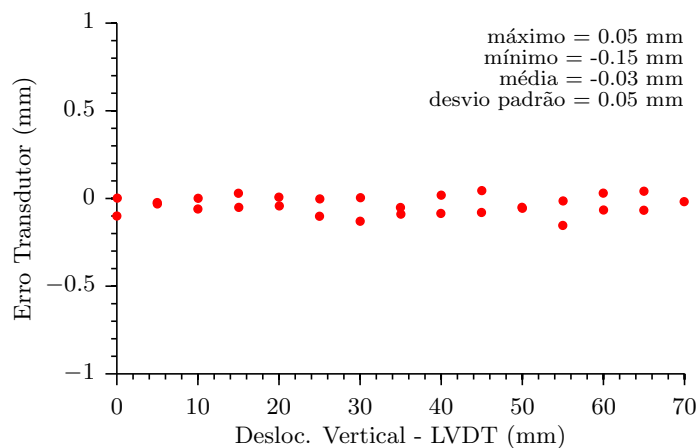


FIGURA 6.13: Erro observado no ensaio laboratorial com imposição de deslocamento vertical.

De forma análoga, foi ainda imposto um conjunto de ciclos de deslocamento vertical que se desenrolaram de forma muito lenta de modo a simular um regime de deslocamentos quasi-estático. Os ciclos foram definidos com uma forma sinusoidal com um período de 10 minutos e uma amplitude de  $\pm 35$  mm, conforme se apresenta na Figura 6.14. Pretendeu-se complementar o teste anterior, impondo agora um ciclo contínuo de deslocamento de

forma a avaliar a repetibilidade do sistema e despistar a possibilidade de eventuais erros de histerese.

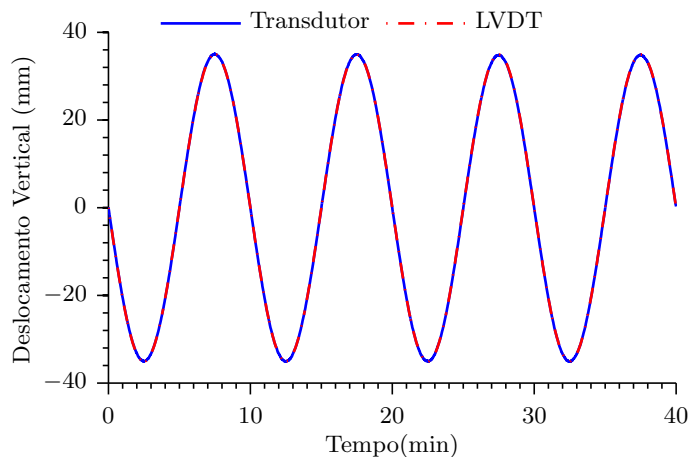


FIGURA 6.14: Ensaio laboratorial com imposição de ciclos de deslocamento vertical.

Na Figura 6.15, apresenta-se a correlação entre os registos do sistema em avaliação e o deslocamento de referência. Esta figura evidencia mais uma vez um comportamento perfeitamente linear do transdutor, sem qualquer indício revelador de erros de histerese significativos. Destaca-se igualmente a repetibilidade observada entre ciclos, traduzida pela diminuta dispersão de pontos em torno da recta de ajuste (RMSE igual a 0.1076 mm).

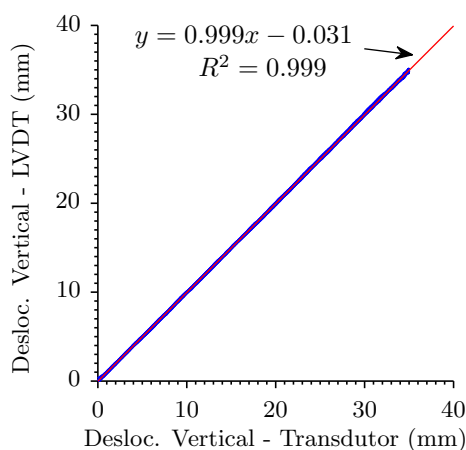


FIGURA 6.15: Correlação entre o deslocamento imposto e o deslocamento medido com o transdutor óptico durante ciclos de deslocamento.

Na Figura 6.16, representam-se os erros de medição registados durante este ensaio. Assinala-se a existência de valores máximos da ordem dos  $\pm 0.20$  mm correspondentes às transições mais bruscas no regime de deslocamento. Em média, este erro é no entanto idêntico ao observado nos testes anteriores.

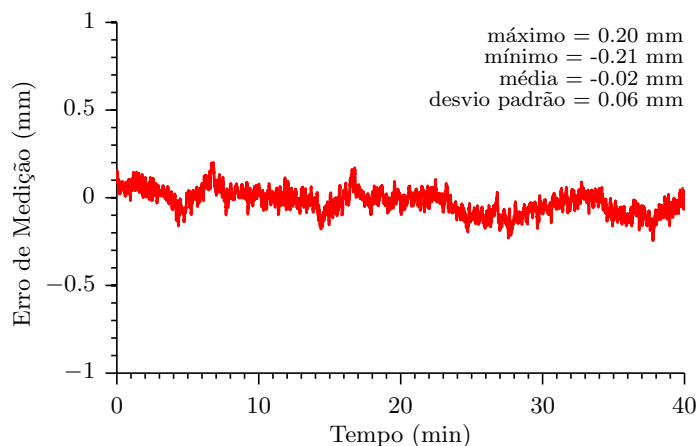


FIGURA 6.16: Erro observado no ensaio laboratorial com imposição de ciclos de deslocamento vertical.

### 6.5.2 Precisão

A precisão do sistema de níveis líquidos e respectivos transdutores foi avaliada em condições de repetibilidade, isto é, mantendo inalteradas as condições de medição e realizando um conjunto de leituras num curto período de tempo. Para um conjunto sequencial de 100 leituras, registou-se uma variação de amplitude (pico a pico) de  $\pm 0.17$  mm com um desvio-padrão de 0.073 mm.

### 6.5.3 Resolução

A resolução do presente sistema de níveis líquidos foi também avaliada, verificando-se a capacidade do mesmo em captar deslocamentos mínimos da ordem dos 0.05 mm, quando associado à unidade de leitura e ao procedimento atrás indicado.

### 6.5.4 Compensação dos efeitos da temperatura

Numa fase posterior à avaliação do comportamento mecânico e instantâneo do transdutor, procurou-se avaliar o seu desempenho perante variações ambientais, nomeadamente quando exposto a variações de temperatura e humidade. Os transdutores parcialmente cheios com água foram agora instalados no interior de uma câmara climática (ver Figura 6.17) e submetidos a uma série de ciclos com temperatura a variar de forma controlada entre 10 °C e 30 °C, conforme o procedimento que se ilustra na Figura 6.18. Nesta fase a humidade relativa foi mantida constante e igual a 50%. Garantiu-se a ausência de deslocamentos verticais relativos dada a proximidade dos transdutores e através das respectivas condições de apoio no interior da câmara.

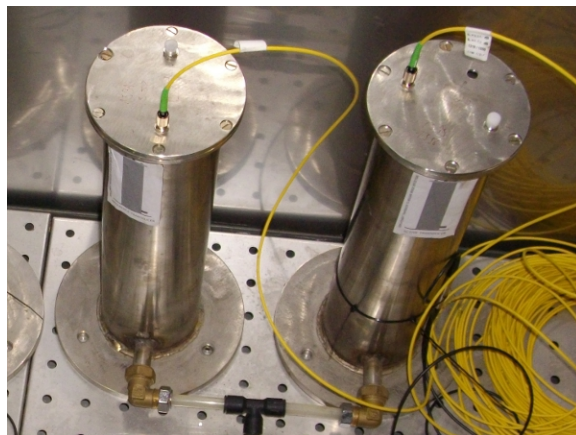


FIGURA 6.17: Ensaio de caracterização térmica com instalação dos transdutores no interior de uma câmara climática.

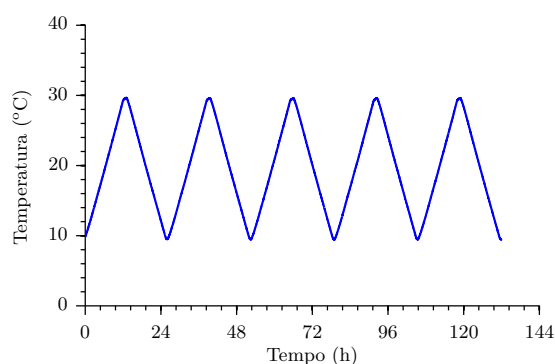


FIGURA 6.18: Variação da temperatura durante o ensaio de caracterização térmica.

Apresenta-se na Figura 6.19 os resultados do referido teste, confrontando os erros obtidos com e sem a compensação dos efeitos da temperatura. Realça-se que na eventualidade de não se proceder a qualquer compensação das variações de temperatura, utilizando apenas a variação do comprimento de onda de um sensor de Bragg e a respectiva sensibilidade a deslocamentos verticais, obtém-se um erro da ordem dos 70 mm. Prova-se também que o efeito da auto-compensação dos efeitos da temperatura, combinando agora os dois sensores de Bragg de acordo com a Equação 6.9, é igualmente notável. O procedimento proposto foi capaz de reduzir o respectivo erro de medição para valores inferiores a  $\pm 0.50$  mm nas condições descritas ( $T$  entre 10 e 30 °C).

Considera-se que, devido à elevada sensibilidade dos sensores de Bragg aos efeitos térmicos, o desempenho da metodologia de auto-compensação da temperatura é um aspecto vital para garantir uma exactidão satisfatória de todo o sistema de medição.

Avaliou-se ainda a possibilidade de otimizar a compensação da temperatura por intermédio de uma correcção complementar tendo por base a própria temperatura medida com um sensor adicional. Verificou-se neste caso que o erro de medição pode ser diminuído para valores compreendidos entre  $\pm 0.20$  mm, conforme se ilustra na Figura 6.20.

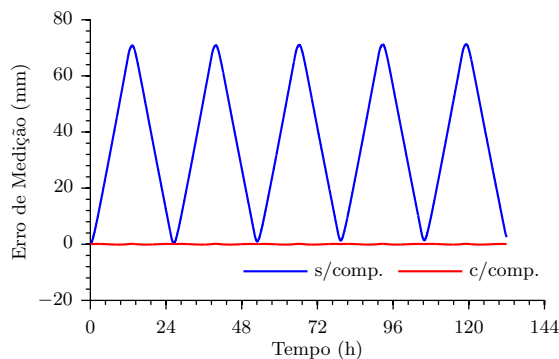


FIGURA 6.19: Efeito da temperatura e respectiva compensação.

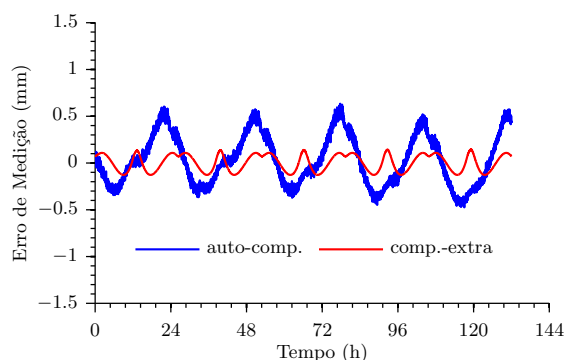


FIGURA 6.20: Erro associado à auto-compensação e à compensação otimizada com recurso a sensor adicional de temperatura.

Refere-se ainda que em ensaios complementares não se observou qualquer relação entre o comportamento do transdutor e a humidade relativa da câmara. Concluiu-se, desta forma, a aparente insensibilidade do sistema de medição a variações de humidade.

### 6.5.5 Estabilidade

A estabilidade do transdutor foi ainda avaliada com vista à caracterização do comportamento do transdutor em aplicações de longa duração. A Figura 6.21 mostra o comportamento do transdutor durante um período de monitorização de 72 horas. Este transdutor encontrava-se instalado no interior de uma câmara climática, em condições estáveis de temperatura e humidade, designadamente com temperatura igual a 18 °C e humidade relativa de 50%. Os resultados apresentados não revelam qualquer tendência no comportamento do transdutor ao longo do tempo. O valor inicial permanece, em termos médios, inalterável ao longo do ensaio. Estes registos são assim caracterizados por um valor médio de 0.005 mm e um desvio-padrão de 0.054 mm.

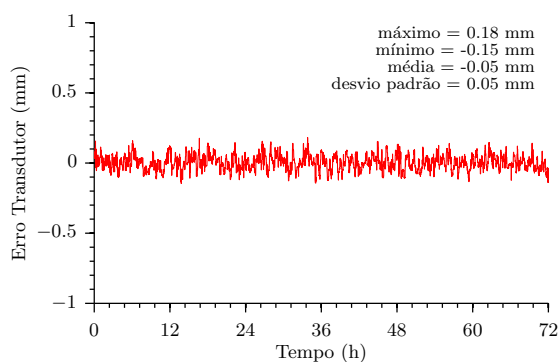


FIGURA 6.21: Avaliação da estabilidade do transdutor durante 72 horas sob temperatura e humidade constante.

## 6.6 Instalação e aplicações

Nesta última secção deste capítulo, pretende-se apresentar alguns aspectos gerais relacionados com a instalação do presente sistema de níveis líquidos. A título ilustrativo mostra-se o caso da instalação realizada na Ponte da Lezíria onde vários transdutores foram instalados em todos os meio-vãos no interior do caixão.

Considera-se que os transdutores desenvolvidos e até mesmo o próprio método dos níveis líquidos são particularmente aplicáveis em tabuleiros de pontes com secção em caixão. Atente-se, por isso, à configuração apresentada na Figura 6.22 com alguns pormenores da instalação realizada na Ponte da Lezíria.

Na Figura 6.22.a), é possível ver-se os designados sensores activos instalados nas secções onde se pretende medir os deslocamentos verticais. Trata-se de transdutores semelhantes aos utilizados nos ensaios laboratoriais que foram instalados no interior do tabuleiro em caixão por intermédio de suportes em aço rigidamente aparafusados às paredes laterais. Um sistema de três parafusos equidistantes na base do transdutor permite o seu rápido nivelamento.

Um reservatório de maior secção transversal, instalado num ponto idealmente fixo, conforme se mostra na Figura 6.22.b), garante a reserva de líquido necessária para compensar as perdas resultantes da evaporação. Nessa mesma secção, aqui sobre um apoio isento de deslocamentos verticais, um transdutor idêntico assegura a medição do nível de referência. Recorde-se que o deslocamento vertical será sempre calculado tendo por base não só a variação do nível de líquido na secção de interesse, mas também a variação desse mesmo nível na secção de referência. Qualquer variação instantânea ou diferida do volume de líquido será assim convenientemente compensada.

Nesta aplicação permanente, para materializar o circuito hidráulico que se estende longitudinalmente ao longo de todo o desenvolvimento da ponte interligando os pontos de medição, recorre-se a tubos de PEAD de 12 mm de diâmetro. Na Figura 6.22.c),

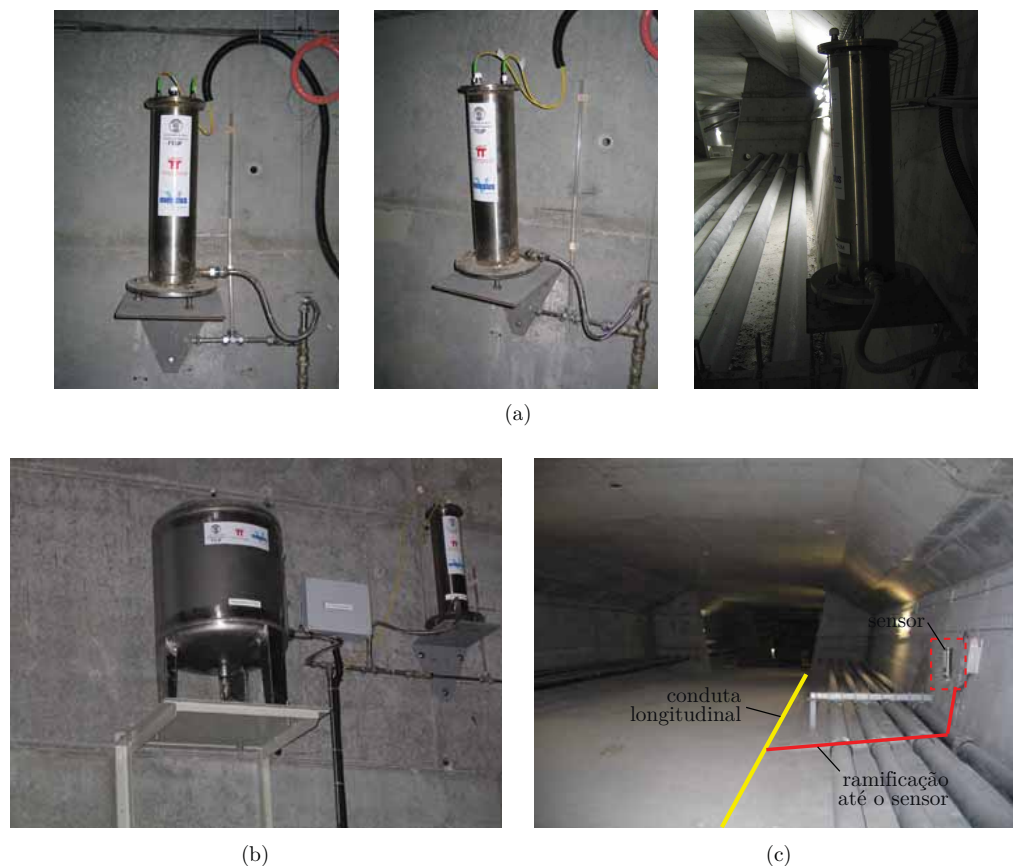


FIGURA 6.22: Instalação do sistema de níveis líquidos na Ponte da Lezíria: a) diferentes perspectivas de transdutores activos instalado em secções de meio-vão no interior do tabuleiro em caixão; b) reservatório e transdutor de referência; c) disposição na secção transversal do transdutor e respectivo circuito hidráulico na laje de fundo coberto com argamassa.

mostra-se o traçado deste circuito pela base da secção em caixão, ramificando para um transdutor. A ligação ao transdutor é depois realizada em tubos de aço inox e mangueiras flexíveis para maior robustez e versatilidade no posicionamento do transdutor.

Em aplicações temporárias, nomeadamente para condução de ensaios de carga, a utilização de tubos flexíveis tipo mangueira com acessórios de ligação de fácil montagem permite soluções mais expeditas e igualmente eficientes. Referem-se os tubos de acrílico com 10 mm de diâmetro com acessórios de encaixe utilizados pelo LABEST em inúmeros ensaios de carga.

Em qualquer dos casos, na montagem do circuito hidráulico torna-se conveniente integrar um conjunto de purgas de ar em todos os pontos altos e junto aos sensores para remoção de bolhas de ar. Válvulas de seccionamento regularmente espaçadas e junto à entrada dos transdutores podem ser igualmente úteis para a manutenção do sistema, nomeadamente permitindo isolar uma zona em caso de fuga de água. É também recomendável deixar-se tubos de prova, transparentes, junto aos sensores, para controlo visual do nível de líquido.

Para enchimento do circuito recomenda-se a utilização de água pré-tratada com hipoclorito de sódio. Esta apresenta reduzida viscosidade, estabilidade aceitável e é sem dúvida abundante. No caso de serem esperadas temperaturas negativas torna-se necessário adicionar anticongelante à água. Na aplicação na Ponte da Lezíria, não se esperando temperaturas negativas no interior do caixão foi utilizada apenas água tratada com hipoclorito de sódio.

É ainda necessário assegurar que, no interior do circuito, não fiquem alojadas bolhas de ar. O conjunto de purgas anteriormente referido facilita esta tarefa. A eficiência do processo de enchimento pode ainda ser incrementada forçando a circulação da água durante o enchimento por aumento de pressão através de uma bomba de água.

O desempenho efectivo do sistema de medição de níveis líquidos aqui retratado será alvo de análise no Capítulo 7 desta dissertação. Aí serão descritos pormenores adicionais relativos à rede de sensores e serão avaliados os principais resultados obtidos na Ponte da Lezíria. Desde já se adianta o excelente desempenho revelado ao longo de mais de dois anos de exploração.

## 6.7 Considerações finais

Ao longo do presente capítulo, apresentou-se o desenvolvimento de um transdutor baseado em sensores em fibra óptica, mais concretamente em sensores de Bragg, para medição de flechas em pontes com recurso a níveis líquidos. Focou-se com particular detalhe o princípio do funcionamento do transdutor, os aspectos inovadores e a sua arquitectura interna. Descreveu-se, com maior detalhe, o princípio inovador do transdutor, baseado no princípio de Arquimedes, e justificou-se a disposição dos elementos sensores que o torna insensível a variações de temperatura.

Procedeu-se ao desenvolvimento de um conjunto de protótipos, desenhados para um campo de medida de 200 mm e uma resolução máxima dentro desse mesmo campo. De modo a avaliar o desempenho destes protótipos, foi realizada uma campanha de ensaios laboratoriais procurando cobrir as características metrológicas mais relevantes do transdutor com vista a aplicações reais no domínio da monitorização estrutural. Resumem-se, na Tabela 6.1, os principais resultados alcançados.

Estes transdutores exibiram linearidade e repetibilidade excelentes na medição de um conjunto de deslocamentos verticais em condições controladas de temperatura e humidade. Nesta campanha de testes de curta-duração demonstrou-se uma sensibilidade aproximada de  $5.4 \text{ pm}\cdot\text{mm}^{-1}$  em cada sensor de Bragg, uma resolução de 0.05 mm e um erro de medição inferior a 0.20% do respectivo campo de medida.

Posteriormente, esses mesmos transdutores foram submetidos a uma série de ciclos de humidade e temperatura, procurando avaliar a eficiência do método de auto-compensação

TABELA 6.1: Resumo das principais características do transdutor

<b>Característica</b>	<b>Resultado</b>
Resolução	0.05 mm
Precisão	
<i>amplitude</i>	$\pm 0.017$ mm
<i>desvio padrão</i>	0.073 mm
Erro de medição	
<i>absoluto</i>	$\pm 0.20$ mm
<i>relativo</i>	0.2 % FS
Compensação da temperatura	
<i>erro de medição</i>	$\pm 0.50$ mm
Estabilidade	
<i>desvio padrão</i>	0.054 mm

dos efeitos térmicos proposto. Observou-se um erro máximo de medição de  $\pm 0.2$  mm na realização de um conjunto de ciclos com a temperatura a variar entre 10 e 30 °C com tratamento exclusivo do sinal dos dois sensores de Bragg do transdutor. Avaliou-se igualmente a estabilidade do transdutor para aplicações de longa-duração, sendo de salientar um desvio-padrão inferior a 0.054 mm.

O desempenho do presente transdutor no sentido de poder ser integrado na monitorização estrutural foi validado e preliminarmente caracterizado com resultados fortemente positivos em ambiente laboratorial. Procedeu-se então à implementação de um projecto-piloto de monitorização de flechas numa estrutura real, designadamente da Ponte da Lezíria, sobre o rio Tejo. Este sistema foi instalado em permanência na referida ponte visando a monitorização do deslocamento vertical relativo das oito secções de meio-vão. Neste momento, com este sistema, procura-se retirar informação relativamente ao comportamento da estrutura, em tempo real, nomeadamente da sua resposta aos efeitos térmicos, assentamentos de apoio e efeitos reológicos dos materiais, tais como, fluência, retracção e perdas de pré-esforço ao longo do tempo. Ao longo do capítulo que se segue, apresentam-se alguns dos resultados mais relevantes deste sistema de monitorização.

Entende-se que o transdutor desenvolvido representa já um importante contributo para a medição de flechas em pontes. Este transdutor é uma forma suficientemente exacta para a grande maioria das aplicações, verificando-se de rigor bastante superior às alternativas topográficas e aos meios GNSS actualmente disponíveis. Destaca-se ainda dos demais pela facilidade de instalação na maioria das condições presentes nas estruturas de engenharia civil e pelo seu custo de instalação e manutenção significativamente reduzido. O registo deste transdutor numa patente industrial visa por isso potenciar a sua exploração industrial (Rodrigues et al., 2008b, 2010a).

Em termos futuros, apresentam-se como potenciais desenvolvimentos a adaptação do transdutor para condições de transporte e montagem mais eficientes e menos especializadas. A adequação da ligação entre a célula de carga e o corpo suspenso terá de ser adaptada para condições que permitam o transporte do transdutor já assembled. A caracterização e certificação do comportamento deste transdutor deverá ainda ser alvo de atenção futura com vista à especificação metrológica completa do transdutor.

## Capítulo 7

# Sistemas de Monitorização em Fibra Óptica - A Ponte da Lezíria

Este capítulo centra-se na apresentação do sistema avançado de monitorização estrutural de base óptica da Ponte da Lezíria, sobre o Rio Tejo, no Carregado. O sistema em apreço permite a monitorização contínua e automática de flechas a meio-vão, de extensões e curvaturas, bem como de temperaturas representativas para a estrutura. Para o efeito, são instalados em obra os transdutores desenvolvidos nos capítulos anteriores. Descrevem-se os principais aspectos relacionados com a concepção do sistema e a arquitectura da rede de sensores baseada na solução dos sensores de Bragg. Compilam-se diferentes vertentes relacionadas com a implementação prática de um sistema de monitorização óptico. Ilustram-se, por fim, as potencialidades do sistema em funcionamento, explorando os resultados recolhidos desde o início da exploração do sistema de monitorização.

### 7.1 Introdução

Os sistemas de monitorização modernos, com elevada automação e autonomia, vieram potenciar novas abordagens na monitorização estrutural. Destacam-se as principais valências que se tornaram possíveis nos sistemas de monitorização avançada actuais (Marecos, 2008):

- possibilidade de proceder à monitorização sistemática e permanente das grandezas mais representativas do comportamento e da integridade da estrutura;
- validação, filtragem e conversão das grandezas medidas, em tempo real, através de meios computacionais presentes no local;
- envio dos resultados obtidos para bases de dados de forma a permitir o acesso remoto, em qualquer instante, a todos os dados recolhidos;

- análise automática dos resultados obtidos de forma a realizar o enquadramento destes com limites de alerta e vigilância previamente estabelecidos;
- capacidade de geração e envio de mensagens de alarme para as entidades competentes sempre que são detectados desvios comportamentais na estrutura;
- acesso remoto ao sistema de monitorização permitindo a interacção directa com o mesmo e a alteração dos protocolos de aquisição pelos administradores do sistema.

De forma a responder aos requisitos supra expostos, os sistemas de monitorização passaram a ser estruturas multifacetadas que se estendem muito para além da própria rede de sensores. Destaca-se um conjunto de subsistemas paralelos que devem assegurar a comunicação remota com o sistema de monitorização, o controlo da aquisição e tratamento de dados, os modelos de avaliação e detecção de dano e o sistema de gestão e decisão.

Seguindo os requisitos expostos, é objectivo deste capítulo desenvolver um sistema de monitorização que seja capaz de proceder ao acompanhamento das principais componentes da resposta da estrutura e das acções que lhe dão origem, de uma forma totalmente autónoma e automática, recorrendo para o efeito à tecnologia baseada em fibra óptica. Pretende-se igualmente que este sistema seja capaz de disponibilizar, remotamente, a respectiva informação, permitindo às entidades técnicas competentes ter acesso, em tempo real, a um diagnóstico permanente do estado da estrutura.

Apresenta-se, ao longo deste capítulo, os principais aspectos relacionados com a concepção e implementação de um sistema avançado de monitorização estrutural de base óptica na Ponte da Lezíria, no Carregado. Definem-se as grandezas medidas e descreve-se a arquitectura geral deste sistema de monitorização, dando-se a conhecer as potencialidades das redes de sensores em fibra óptica. Compilam-se diferentes aspectos práticos associados à sua instalação nesta grande estrutura. Revela-se um conjunto de resultados desta monitorização procurando ilustrar diferentes valências e potencialidades efectivas deste sistema em funcionamento. Termina-se este capítulo com a exposição da metodologia implementada para acompanhamento permanente desta estrutura que se espera que possa vir a incrementar a eficiência da sua exploração.

## 7.2 A Ponte da Lezíria

A Ponte da Lezíria, inaugurada em Julho de 2007, insere-se no Sublanço A1/Benavente da A10 - Auto-Estrada Bucelas / Carregado / IC3, da BRISA – Auto-Estradas de Portugal S.A., constituindo a mais recente travessia sobre o Tejo, junto ao Carregado. De forma a enquadrar esta estrutura é pertinente fazer referência conjunta aos seus viadutos de acesso ainda que estruturalmente distintos e independentes. O conjunto

representa a nona ponte mais extensa do Mundo e a segunda mais extensa da Europa depois da Ponte Vasco da Gama em Lisboa (Wikipedia - Ponte da Lezíria: , 2011).

Na Figura 7.1 mostra-se uma panorâmica global das referidas estruturas reflectindo o seu enquadramento geral. Na Tabela 7.1 resume-se a métrica essencial desta divisão.

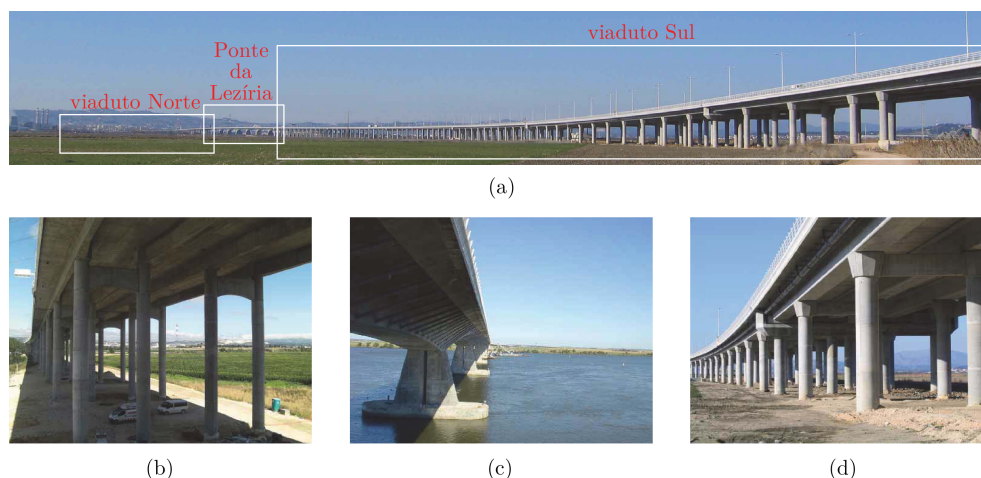


FIGURA 7.1: Vistas gerais da Ponte da Lezíria e dos respectivos viadutos de acesso: a) panorama geral com identificação das estruturas; b) Viaduto Norte (1472.85 m); c) Ponte da Lezíria (970 m); d) Viaduto Sul (9229.925 m).

TABELA 7.1: Enquadramento geral da Ponte da Lezíria e respectivos viadutos de acesso.

	Início	Final	Extensão total (m)
A. Viadutos Norte	km 0+30.200 (PTN0)	km 1+503.050 (PTN3)	1472.85
B. Ponte	km 1+503.050 (PTN3)	km 2+476.00 (PTS1)	970
C. Viadutos Sul	km 2+476.00 (PTS1)	km 11+705.925 (PTS22)	9229.925

A concepção, projecto e construção desta infra-estrutura esteve a cargo do consórcio empresarial TACE ACE, constituído pela associação das empresas MSF, Construtora do Tâmega, Lena, Novopca, Odebrecht BPC e Zagope. Na proposta apresentada por este consórcio, os respectivos projectos ficaram a cargo do agrupamento projectista constituído pela COBA, PC&A - Perry da Câmara e Associados Lda., Civilser e Arcadis.

Segundo os dados veiculados, a presente travessia teve um custo de construção a rondar os 220 milhões de euros. No total, estima-se que tenham sido utilizados cerca de 400 000 m<sup>3</sup> de betão, 45 000 toneladas de armadura ordinária, 3 000 toneladas de aço de pré-esforço e 52 300 metros lineares de estacas. O período de construção rondou os 23 meses.

### 7.2.1 Descrição da estrutura

De forma a atravessar o rio Tejo, a Ponte da Lezíria apresenta uma extensão total de 970 m dividida em vãos parciais aproximados de  $95 + 127 + 133 + 4 \times 130 + 95$  m, seguindo a configuração em planta e alçado representada nas Figuras 7.2 e 7.3, respectivamente (COBA-PC&A-CIVILSER-ARCADIS, 2006a; Portugal et al., 2006).

No que concerne à superestrutura, esta é constituída por um tabuleiro único em caixão monocelular de betão armado pré-esforçado, de altura variável segundo uma parábola do segundo grau entre 8.00 m no apoio a 4.0 m a meio-vão e junto aos pilares de transição.

Um corte-tipo correspondente à secção transversal do tabuleiro está representado na Figura 7.4. De forma a poder comportar  $2 \times 3$  vias de circulação, destaca-se a laje superior desta secção em caixão que se apoia nas duas almas laterais afastadas entre si de 10.00 m e se prolonga lateralmente através de duas consolas com aproximadamente 10.00 m para cada lado. Estas grandes consolas laterais são por sua vez apoiadas em escoras metálicas que descarregam na laje de fundo do caixão seguindo um espaçamento constante de 5.00 m.

Este tabuleiro é pré-esforçado longitudinalmente por cabos interiores e aderentes, complementados por quatro pares de cabos de pré-esforço exterior constituídos por monocórdões autoprotégidos,

Relativamente aos pilares distinguem-se dois grupos de tipologia diferente. Os pilares P1 a P5 são constituídos por duas lâminas esbeltas de betão armado com 1.20 m de espessura espaçadas de 5.00 m entre eixos conforme se representa na Figura 7.5. A ligação do tabuleiro a estes pilares é monolítica. Já nos pilares P6, P7 a ligação ao tabuleiro realiza-se por intermédio de aparelhos de apoio de panela guiados longitudinalmente. Desta forma, os pilares P6 e P7 são então formalmente idênticos aos restantes passando apenas o afastamento entre lâminas a ser de 7.40 m contemplando uma laje de encabeçamento com 2.00 m de espessura onde são instalados os aparelhos de apoio.

Os pilares de transição marcam a separação entre esta estrutura e os viadutos de ambas as margens. São constituídos por uma viga estribo com dimensão para acomodar os apoios e as folgas necessárias para os deslocamentos de ambos os tabuleiros. Esta viga estribo apoia em quatro fustes de secção hexagonal oca, cuja fundação é constituída por um maciço de encabeçamento em betão armado que liga 10 estacas de 1.50 m de diâmetro executadas por metodologia semelhante à das estacas dos viadutos contíguos com recurso a um encamisamento metálico integral.

Todas as fundações são indirectas e são materializadas por estacas de 2.20 m de diâmetro com profundidades médias a rondar os 40 m. Nos pilares P3 a P7 foram contempladas oito estacas agrupadas aos pares e encabeçadas por um maciço único de betão armado

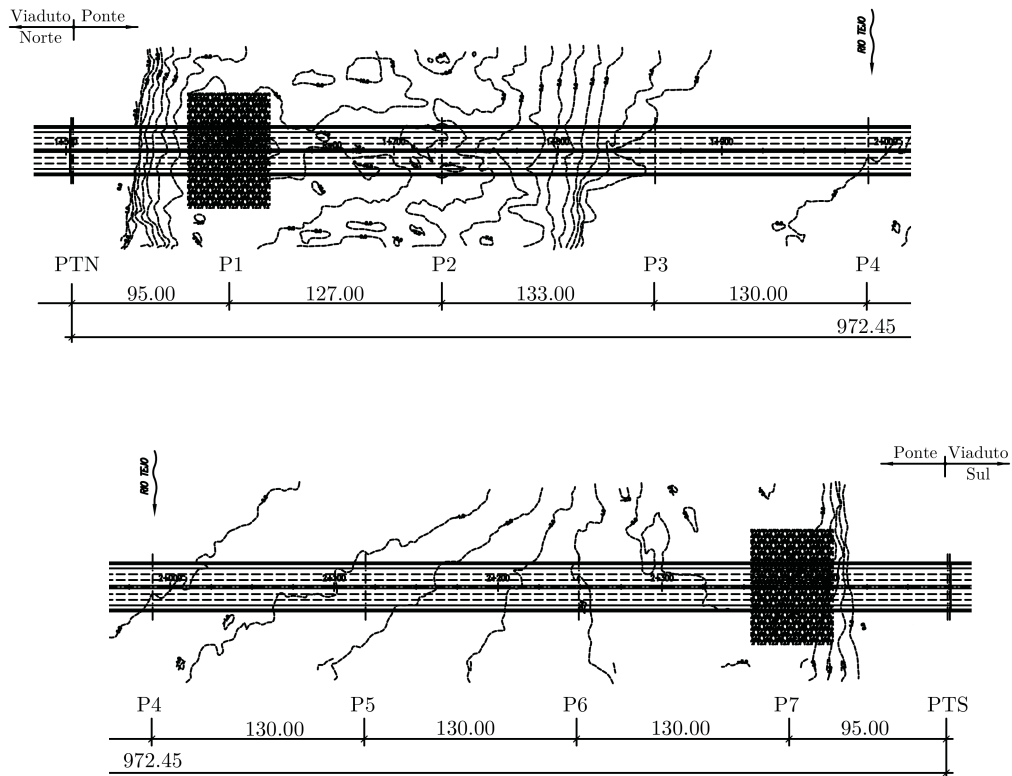


FIGURA 7.2: Traçado em planta da Ponte da Lezíria.

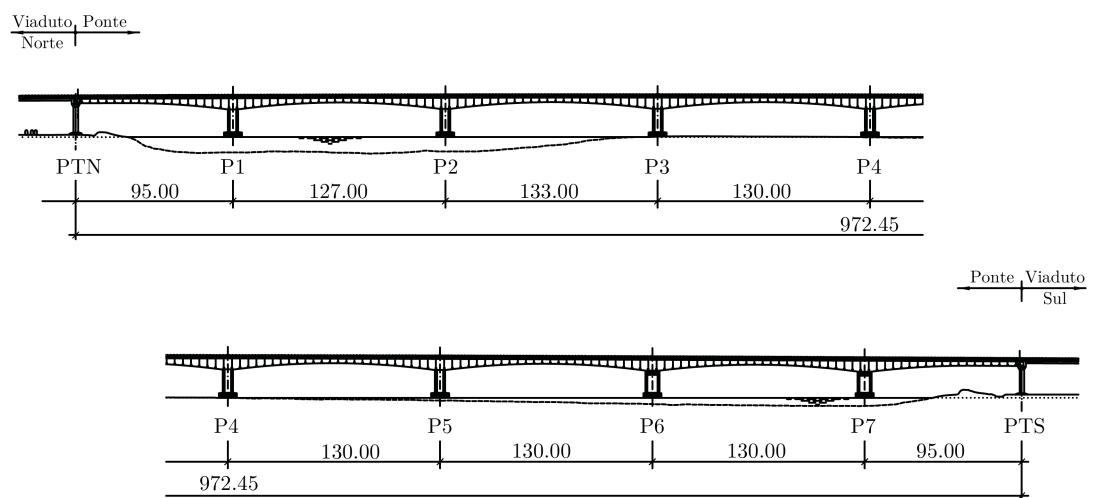


FIGURA 7.3: Alçado da Ponte da Lezíria.

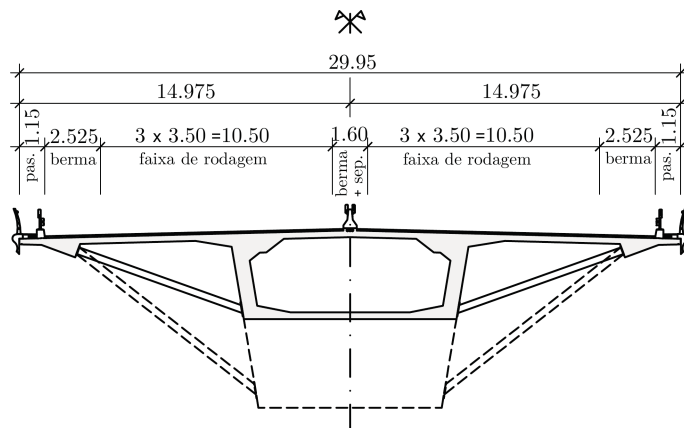


FIGURA 7.4: Secção transversal tipo do tabuleiro da Ponte da Lezíria.

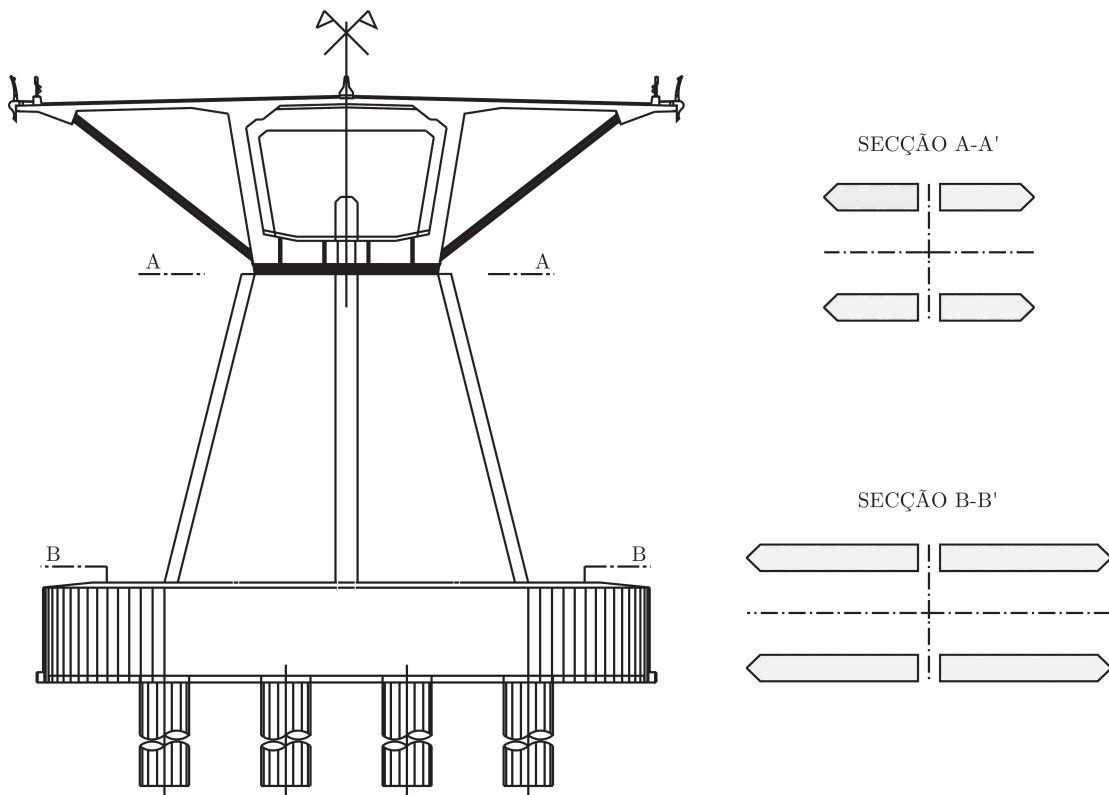


FIGURA 7.5: Secção transversal tipo dos pilares da Ponte da Lezíria.

apresentando elevada rigidez conforme se representa na Figura 7.5. Nos pilares P1 e P2 foi adoptada uma solução em tudo idêntica mas perfazendo grupos de dez estacas.

No que concerne ao processo construtivo, todos os pilares foram executados por métodos tradicionais, apresentando como principal aspecto inovador a pré-fabricação da respectiva armadura conforme se mostra na Figura 7.6.a).

Para o tabuleiro, o processo construtivo adoptado foi baseado no método de consolas sucessivas do núcleo em caixão, executadas simetricamente a partir de cada pilar (ver Figura 7.6.b)). Múltiplas frentes de obra foram criadas a partir de cada pilar até ao fecho final da estrutura perfazendo sete pares de carros de avanço. Neste processo, as aduelas de arranque foram realizadas com um comprimento de 13.00 m, sendo betonadas sobre um cimbre apoiado no maciço de estacas. As restantes aduelas foram executadas segundo um comprimento variável entre 3.00 a 7.00 m com as aduelas de fecho final a apresentarem comprimentos entre 2.50 e 4.00 m.



(a)



(b)

FIGURA 7.6: Vistas gerais da construção da Ponte da Lezíria: a) construção dos pilares; b) construção do tabuleiro por avanços sucessivos.

Ainda durante a construção, de forma a compensar parcialmente o encurtamento global resultante da retracção e fluência do betão, antes da betonagem das aduelas de fecho, entre os tramos P2-P3 e P4-P5, foram aplicadas forças de afastamento por intermédio de actuadores hidráulicos com vista ao afastamento das duas consolas de avanço. A construção da referida estrutura terminou com a betonagem das aduelas de fecho e com a execução das consolas laterais e respectivas escoras.

Ilustrando a presente descrição, as Figuras 7.7 e 7.8 apresentam duas perspectivas gerais da ponte onde se encontra retratada a solução estrutural contemplada. A Figura 7.7, reportando o final da construção da estrutura, dá uma panorâmica geral da obra de arte e da sua envolvente, sendo possível visualizar a configuração tanto do tabuleiro como dos pilares implantados no leito do rio. A Figura 7.8 remete para o interior do tabuleiro, sendo possível ver a configuração da secção transversal em caixão e o pré-esforço exterior.



FIGURA 7.7: Vistas gerais da Ponte da Lezíria.



FIGURA 7.8: Vistas interiores do tabuleiro em caixão da Ponte da Lezíria.

## 7.3 Sistema de monitorização estrutural

### 7.3.1 Aspectos Gerais

A obrigatoriedade da previsão de um sistema de monitorização estrutural na Ponte da Lezíria e nas suas estruturas de acesso fazia parte integrante do respectivo caderno de encargos (COBA-PC&A-CIVILSER-ARCADIS, 2006b). O referido documento, realizado em parceria entre o dono de obra e os projectistas das diferentes estruturas, contando ainda com o contributo de vários consultores externos na área da monitorização, especificava todos os aspectos essenciais dos respectivos sistemas de monitorização aquando do lançamento do concurso para o seu fornecimento e instalação.

Refere-se a necessidade de medir acelerações, rotações, deformações, deslocamentos de juntas, infra-escavação, retracção e fluência em prismas de compensação, bem como

temperaturas e humidades relativas (Figueiras et al., 2007; Sousa et al., 2008b, 2011). Segundo especificações do caderno de encargos era preconizada a medição das várias grandezas com recurso exclusivo a sistemas de monitorização convencionais de base eléctrica. Uma parceria entre o LABEST, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e a NewMensus, Lda veio a ficar responsável pelo fornecimento e instalação deste sistema de monitorização.

Fruto da intervenção directa do LABEST/FEUP foi no entanto admitido um sistema de monitorização baseado em fibras ópticas. Este foi encarado como uma iniciativa pioneira admitida pelo dono de obra face ao sucesso obtido num projecto-piloto, também em fibra óptica, realizado sobre a Ponte do Sorraia, igualmente da BRISA, em 2004 (Perdigão et al., 2006). A sensibilidade demonstrada pelo dono de obra relativamente ao potencial da fibra óptica e sobretudo para a tendência desta tecnologia vir a dominar o panorama futuro da monitorização estrutural foi, neste caso, crucial para a viabilização e execução deste sistema de monitorização.

O sistema de monitorização de base óptica veio a desenvolver-se em paralelo com os demais sistemas convencionais incidindo na medição das grandezas estruturalmente mais representativas relativas ao tabuleiro da Ponte da Lezíria. Ressalva-se que, pelo âmbito desta dissertação e pelo contributo do autor, em exclusivo, apenas o sistema óptico será abordado em detalhe ao longo do presente capítulo. Aspectos independentes relativos aos sistemas de monitorização estrutural e de durabilidade de base eléctrica são remetidos para a bibliografia (Sousa et al., 2008b, 2011).

### 7.3.2 Grandezas medidas e sensores utilizados

O sistema de monitorização estrutural de base óptica implementado baseia-se em sensores de Bragg e está concebido para acompanhar o comportamento da estrutura, de forma permanente, durante toda a fase de exploração. Proceda-se à medição directa de extensões no tabuleiro, flechas estruturais e temperaturas. De forma esquemática, indicam-se, na Figura 7.9, as grandezas monitorizadas e a sua posição relativa numa secção transversal tipo.

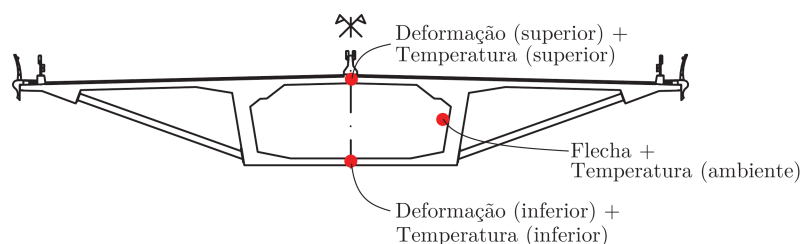


FIGURA 7.9: Localização esquemática, em corte transversal, da instrumentação óptica para medição de extensões no betão, flechas estruturais e temperaturas.

Mostra-se, na Figura 7.10, os transdutores utilizados para medição de flechas, extensões e temperaturas. Para o efeito, recorre-se aos transdutores de deformação N descritos no Capítulo 5 e aos transdutores de flechas desenvolvidos no Capítulo 6. Em ambos os casos trata-se de uma experiência pioneira da aplicação dos transdutores desenvolvidos numa estrutura real. A temperatura foi, no presente caso, medida através de termómetros baseados em sensores de Bragg comercializados pela FiberSensing (FiberSensing, 2010a).

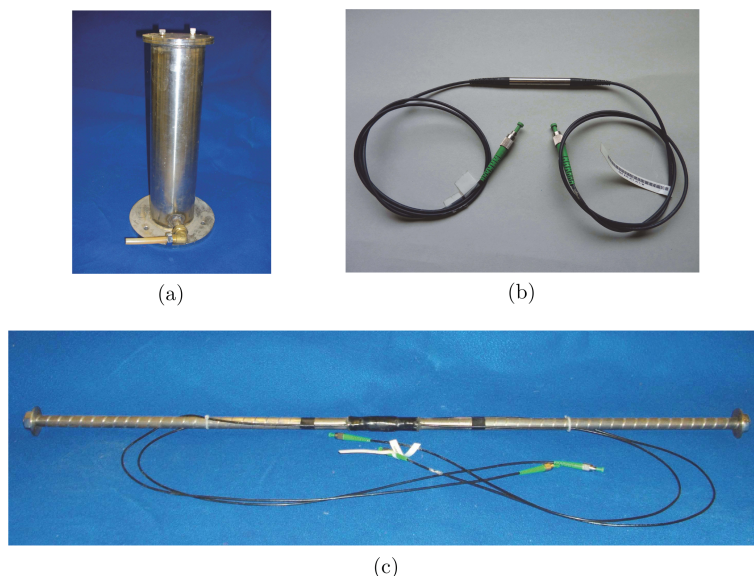


FIGURA 7.10: Transdutores de base óptica adoptados na Ponte da Lezíria: a) transdutor de flechas (Capítulo 5); b) sensor de temperatura (FiberSensing); c) transdutor de deformação-tipo N (Capítulo 6).

A medição de extensões no tabuleiro da ponte segue a distribuição presente na Figura 7.11. Este sistema de medição alberga um total de 15 secções críticas, estendendo-se a todos os meio-vãos e às secções junto aos pilares. Em cada secção instrumentada encontram-se instalados, pelo lado interior do caixão e alinhados longitudinalmente com a estrutura, dois transdutores de deformação, um localizado na laje superior e o outro na laje inferior do caixão conforme se indica no corte transversal da Figura 7.9. Esta disposição visa de forma integrada a avaliação da curvatura nessas mesmas secções. No total, são utilizados 30 transdutores de deformação de base óptica para caracterizar o tabuleiro da ponte.

A medição das flechas decorre sem qualquer referência física ao solo sustentando-se no nivelamento hidrostático e na aplicação do princípio dos vasos comunicantes a um circuito hidráulico interno, cheio de água, que percorre longitudinalmente toda a ponte e contempla todos os pontos interessados. Nas secções onde se pretende medir os deslocamentos verticais encontram-se, desta forma, instalados os transdutores de base óptica expostos no Capítulo 6. Com a metodologia exposta são medidas as flechas da estrutura a todos os meio-vãos, perfazendo oito pontos de medição conforme se identifica na Figura 7.12. São ainda utilizadas como referência e como meio de controlo do sistema as medições realizadas sobre o PTN, P2 e P7.

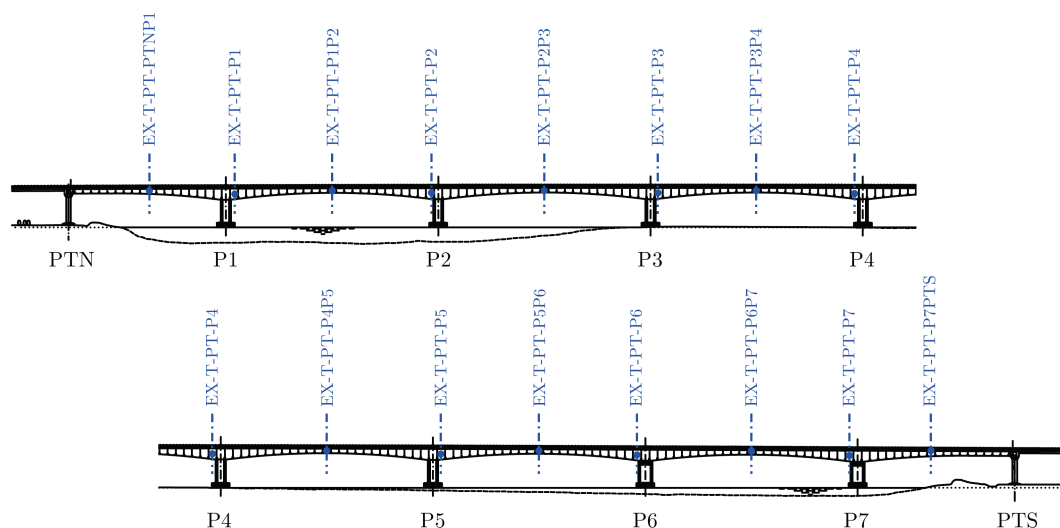


FIGURA 7.11: Localização esquemática em alçado das secções onde se procede à medição de extensões no betão (no total de 15 secções).

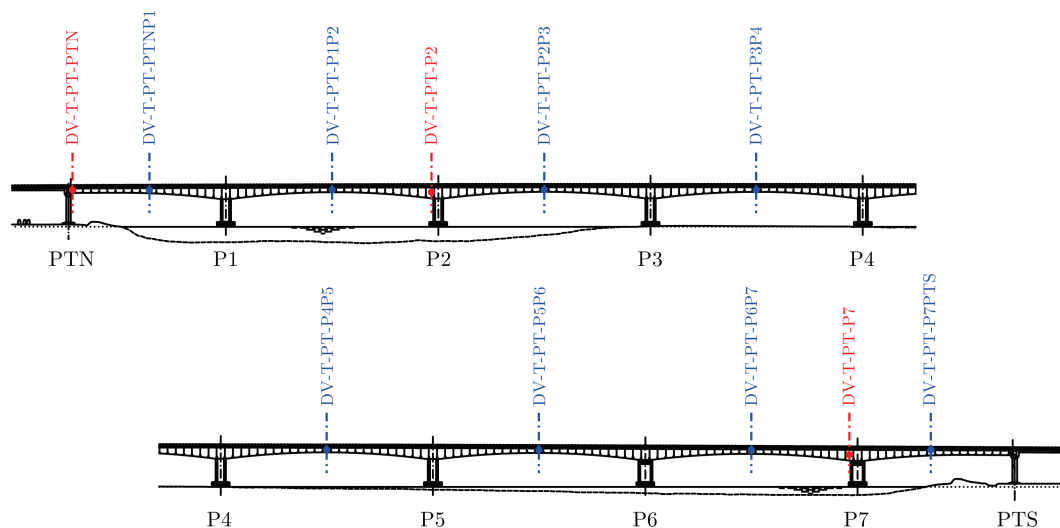


FIGURA 7.12: Localização esquemática em alçado das secções onde se procede à medição de flechas (no total de 8 secções activas mais 3 secções de referência).

São ainda medidas as temperaturas em 10 pontos criteriosamente seleccionados seguindo a distribuição presente na Figura 7.13. Cobre-se a medição da temperatura no betão na laje superior e na laje inferior do caixão, bem como da temperatura ambiente no interior do caixão. Esta informação visa, por um lado, caracterizar as condições ambientais a que a estrutura se encontra efectivamente sujeita e, por outro lado, permite a compensação da sensibilidade dos sensores de Bragg à temperatura. Este último aspecto revela-se essencial para a correcta avaliação da extensão mecânica obtida por via dos transdutores de deformação embebidos no betão.

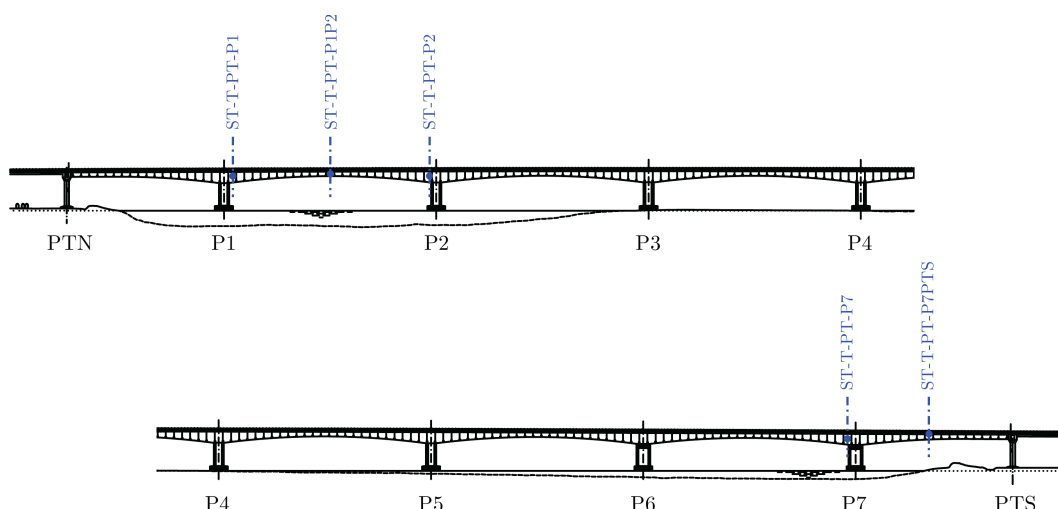


FIGURA 7.13: Localização esquemática em alçado das secções onde se procede à medição de temperaturas (no total de 5 secções).

### 7.3.3 Arquitectura da rede de sensores

De forma a integrar a distribuição de sensores apresentada, a rede de sensores ópticos da Ponte da Lezíria dispõe-se em estrela com ponto central sobre o pilar P2 onde se encontra alojado o equipamento de interrogação e armazenamento de dados de todo o sistema sensorial baseado em fibras ópticas. Permitindo otimizar o número de equipamentos, aumentar a capacidade de leitura e otimizar a economia e simplicidade no traçado da rede, adoptaram-se técnicas de multiplexagem híbrida baseadas na integração conjunta da multiplexagem espacial com a multiplexagem em comprimento de onda.

A arquitectura geral preconizada está esquematizada na Figura 7.14. Esta rede integra o total de 62 sensores de Bragg repartidos pelos 30 transdutores de deformação, pelos 11 transdutores de deslocamento vertical e pelos 10 sensores de temperatura. O conjunto de sensores encontra-se agrupado em sete fibras ópticas distintas integradas num cabo único que atinge uma extensão total de 1250 m associado a 16 pontos repartidos de ligação.

Os ramos com multiplexagem em comprimento de onda em série englobam um máximo de 10 sensores com comprimentos de onda de referência distintos. Para este propósito foram definidos comprimentos de referência afastados de cerca de 4 nm, o que resultou na utilização de sensores centrados em torno dos 1528 (i), 1532 (ii), 1536 (iii), 1540 (iv), 1544 (v), 1548 (vi), 1552 (vii), 1556 (viii), 1560 (ix) e 1564 (x) nm. Este tipo de multiplexagem permitiu agrupar todos os sensores afectando apenas três fibras para os transdutores de deformação e quatro fibras para os transdutores de flechas e para as temperaturas. Na Figura 7.15 representa-se a integração dos diferentes sensores e restantes componentes.

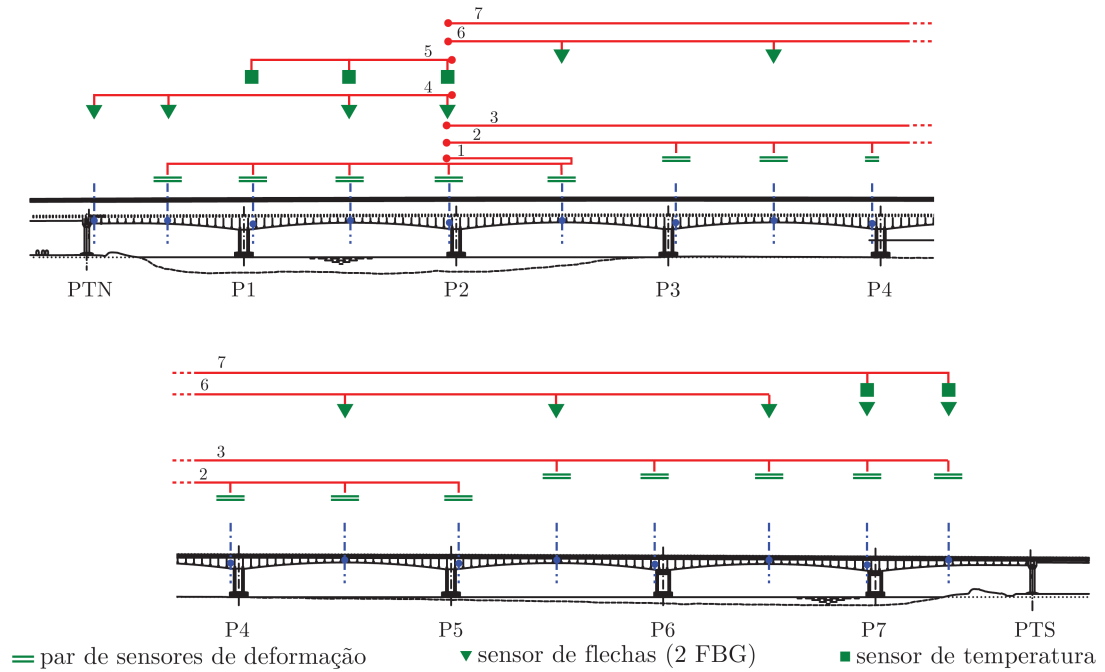


FIGURA 7.14: Distribuição da rede de sensores ópticos ao longo da Ponte da Lezíria.

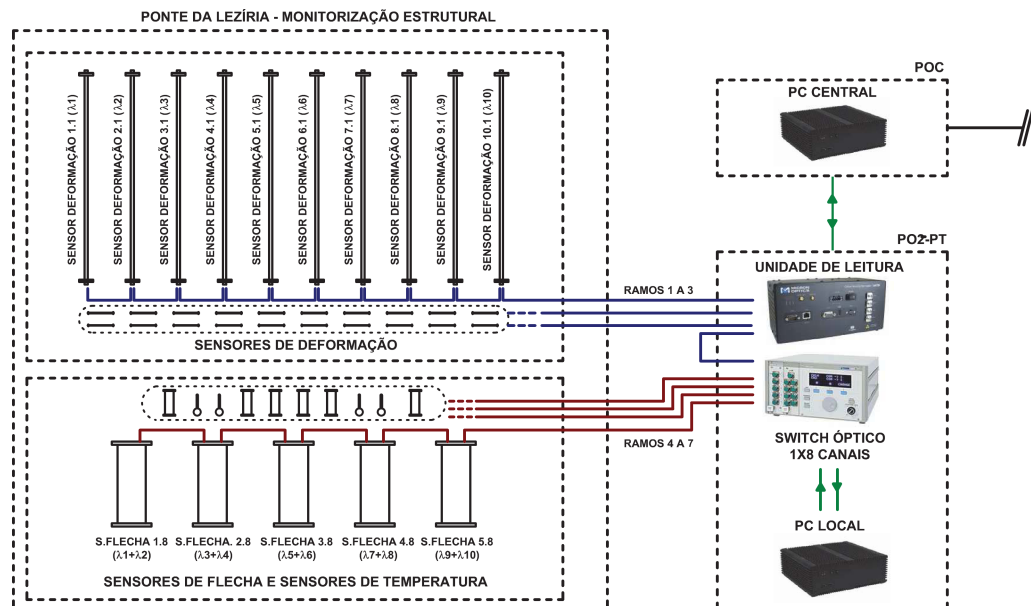


FIGURA 7.15: Arquitectura e configuração esquemática da rede de sensores ópticos e respectivos equipamentos instalados na Ponte da Lezíria.

No denominado Posto de Observação Óptico (POO), localizado junto do pilar P2, concentra-se todo o equipamento de leitura. A arquitectura preconizada implica o recurso a uma unidade óptica de leitura de 4 canais (Micron Optics sm130-500), um comutador óptico de 1×8 canais (Thorlabs PRO8 OSW8108), uma unidade UPS e um PC industrial. Todo este equipamento fica concentrado no interior de um armário técnico cuja disposição se ilustra na Figura 7.16.

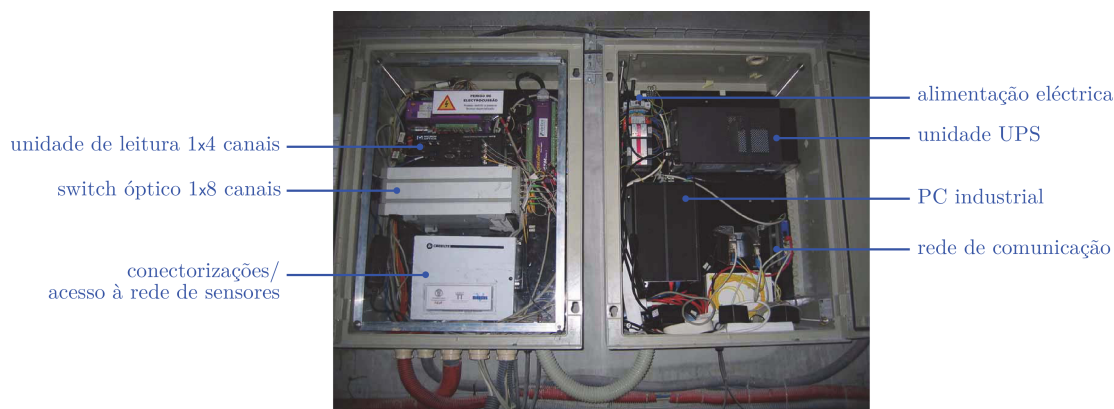


FIGURA 7.16: Composição interna do Posto de Observação Óptico (POO).

A composição apresentada conduz, neste caso concreto, a uma disponibilidade de três canais ópticos obtidos directamente na unidade de leitura para interrogação das três séries de transdutores de deformação, podendo atingir frequências de aquisição máximas de 500 Hz. Por intermédio da multiplexagem espacial do quarto canal da unidade de leitura, obtida com recurso a um comutador óptico de 1×8 canais, consegue-se multiplicar o número de canais ópticos aí disponível. Esta última divisão permite a ligação dos restantes transdutores, para medição de flechas e temperaturas, ficando limitado a frequências de aquisição significativamente mais baixas, no caso não superiores a 1 Hz.

Este sistema está ainda ligado ao denominado Posto de Observação Central (POC) através de uma rede de comunicação que partilha com os restantes sistemas distribuídos de aquisição e digitalização de dados provenientes dos sensores eléctricos. Esta rede de comunicação, também em fibra óptica, encontra-se instalada na ponte e estende-se aos viadutos de acesso, também monitorizados.

### 7.3.4 Instalação da rede de sensores

A instalação de uma rede de sensores durante a construção revela ser um processo sempre complexo que exige um apertado planeamento e uma forte interacção com a frente de obra. Algumas das questões de índole prática verificadas na Ponte da Lezíria merecem aqui ser realçadas e partilhadas.

No caso dos sensores embebidos, a instalação envolveu a interacção directa com a frente de obra. Tornou-se necessário instalar os transdutores logo após a montagem da malha de

armaduras e antes da betonagem. O processo de instalação adoptado foi então ajustado às características dos transdutores desenvolvidos procurando maximizar a sua robustez e desempenho e minimizar todas as operações a realizar em obra. Na Figura 7.17 destacam-se alguns pormenores do processo de instalação adoptado.

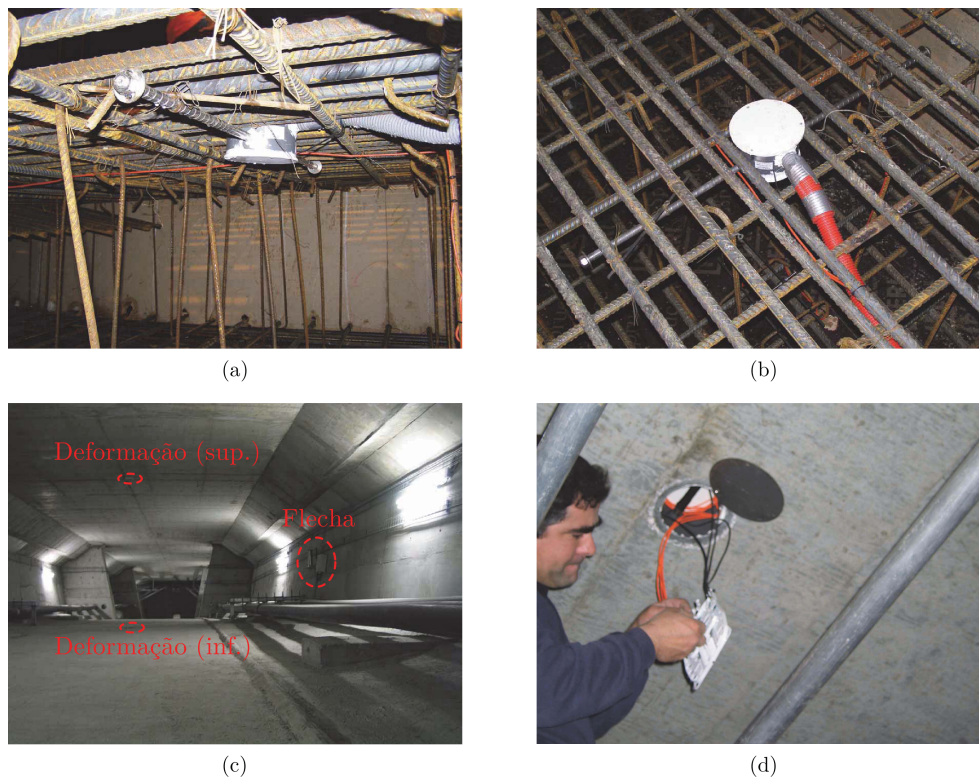


FIGURA 7.17: Alguns pormenores representativos da instalação dos transdutores de deformação no tabuleiro da ponte: a) e b) integração dos transdutores de deformação na respectiva malha de armaduras antes da betonagem; c) posição relativa dos vários transdutores numa secção transversal de meio-vão após betonagem; d) emenda das fibras ópticas na caixa de acesso junto ao transdutor de deformação.

Alguns dos cuidados particulares relativos à fixação e protecção dos sensores durante a referida betonagem foram detalhadamente expostos no Capítulo 5. Nas Figuras 7.17.a) e 7.17.b) mostra-se a integração destes sensores na malha de armadura e a sua amarração a esta última por intermédio de abraçadeiras de arame.

Mostra-se também a disposição da caixa de acesso às fibras deixadas junto aos transdutores antes da betonagem, sendo possível ver o tubo corrugado deixado no interior do betão para posterior reunião das fibras ópticas nas caixas de junção dispostas nas almas laterais do caixão. Nas Figuras 7.17.c) e 7.17.d) ilustra-se a posição e a abertura das caixas de acesso depois de removidos os painéis de cofragem.

Realça-se a robustez dos transdutores utilizados e da técnica de instalação associada que conduziu a uma taxa de sobrevivência de cem por cento. Todos os sensores instalados em obra encontram-se, neste momento, em perfeito funcionamento.

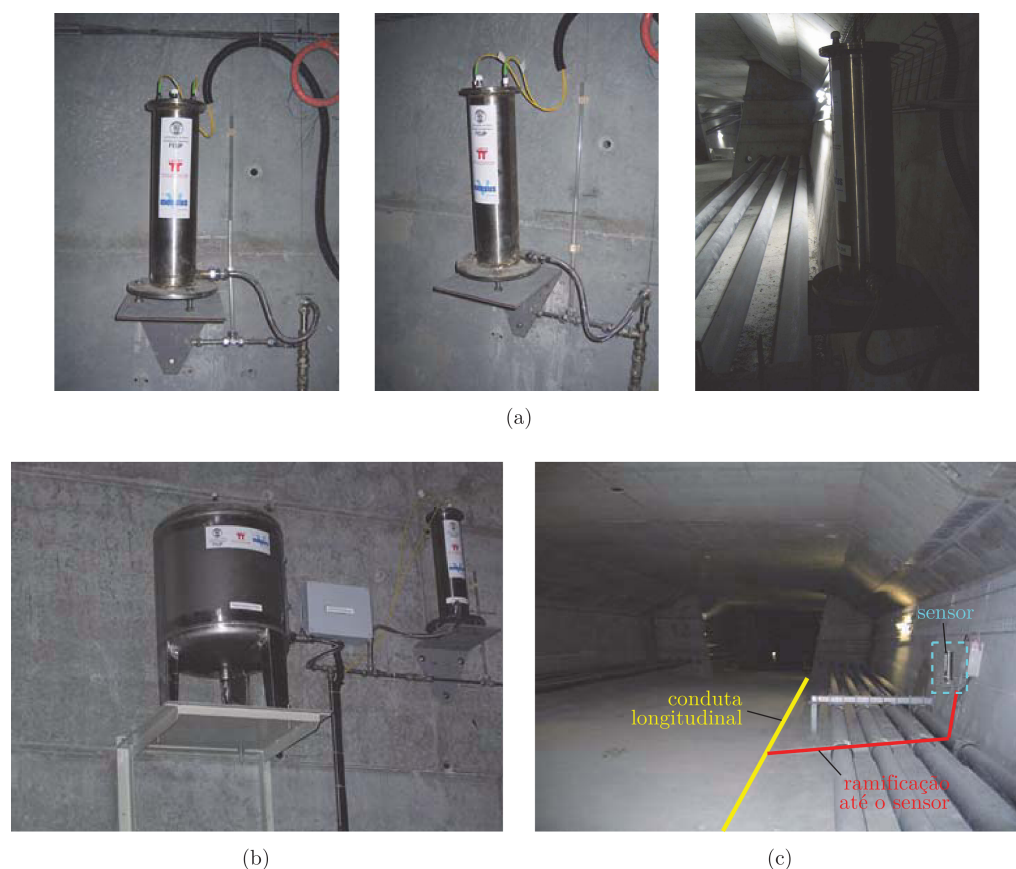


FIGURA 7.18: Instalação do sistema de níveis líquidos na Ponte da Lezíria: a) diferentes perspectivas de transdutores activos instalados a meio-vão; b) reservatório e transdutor de referência em cima de um pilar; c) disposição, numa secção de meio-vão, do transdutor e do respectivo circuito hidráulico coberto com argamassa na laje inferior.

Na Figura 7.18 dão-se também a conhecer os aspectos mais importantes relacionados com a instalação do sistema de medição de flechas. Neste particular, mostram-se diferentes perspectivas de vários transdutores instalados em secções de meio-vão na Figura 7.18.a). Estes estão fixos à alma lateral da secção por intermédio de uma base metálica rigidamente aparafusada e nivelada. De referir que se exigiu um pré-nivelamento de toda a ponte de modo a estabelecer em conformidade a posição de cada transdutor tendo em conta a necessidade de albergar a superfície livre do líquido utilizada como referência. A gama de medição dos transdutores, comportando deslocamentos verticais até 200 mm, permite o posicionamento facilitado das bases de medição. Em cada base, um esquema de nivelamento com afinação controlada de três parafusos potencia a garantia da sua verticalidade.

O circuito hidráulico foi inicialmente cheio com água pré-tratada com hipoclorito de sódio. Dois reservatórios de secção transversal considerável (ver Figura 7.18.b)) visam a manutenção prolongada do nível de líquido dentro do campo de medida dos transdutores permitindo compensar, por longos períodos, a lenta evaporação da água. Neste particular, a monitorização permanente do nível de líquido nos transdutores de referência alerta atempadamente para a necessidade de proceder à reposição do nível de líquido.

Ilustra-se ainda, na Figura 7.18.c), a disposição do circuito hidráulico. Este circuito, que percorre a ponte desde a secção PTN até à secção P7-PTS, é materializado por tubos de PEAD de 12 mm de diâmetro embebidos numa canelura de protecção em argamassa disposta na laje de fundo. A ramificação deste condutor longitudinal ocorre junto do respectivo transdutor por intermédio de acessórios adequados passando a ser constituída, até ao transdutor, por tubos de aço inox igualmente de 12 mm de diâmetro.

Um conjunto de válvulas de purga em todos os pontos altos e junto ao transdutores, bem como válvulas de seccionamento regularmente espaçadas visam a remoção das bolhas de ar e o seccionamento do circuito para manutenção, respectivamente. Tubos em acrílico transparente, deixados junto aos sensores, permitem ainda a aferição visual do nível de líquido.

Na face interior das almas laterais do caixão, em todas as secções instrumentadas, foram instaladas caixas de derivação, perfazendo um total 16 unidades distribuídas por outras tantas secções: 7 sobre os pilares da ponte (P1 a P7), 8 a meio de cada um dos vãos e outra junto do pilar de transição do lado Norte (PTN). Estas caixas comportam a interligação dos diferentes sensores, seguindo o esquema de ligação representado na Figura 7.19. Na Figura 7.20, mostra-se a montagem dessas caixas de derivação. Importa referir que para as ligações permanentes foram adoptadas emendas por fusão para uma maior eficiência óptica. Em alternativa, noutros casos foram utilizados conectores FC/APC para uma maior versatilidade.

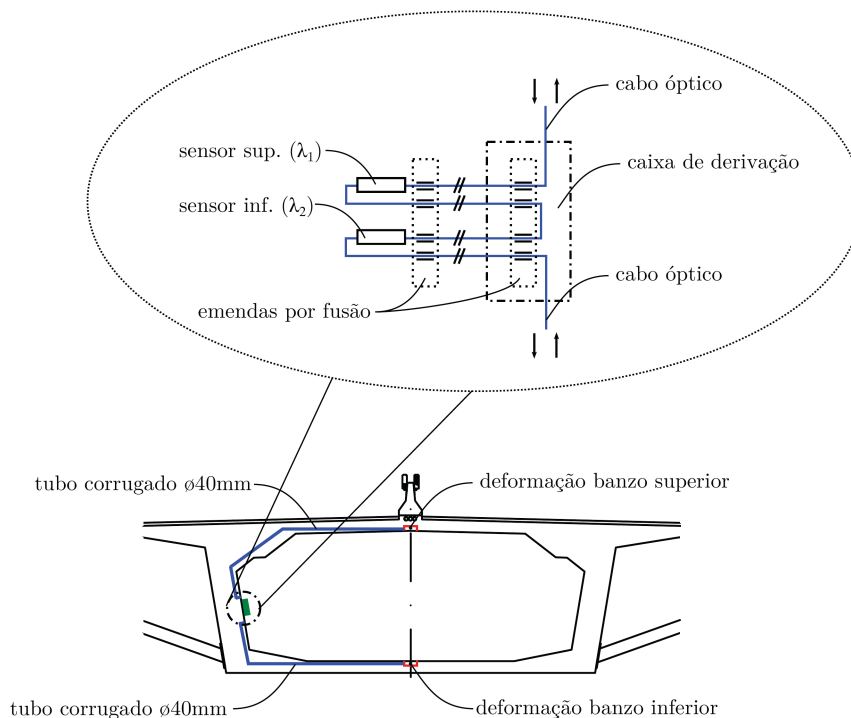


FIGURA 7.19: Esquema de ligação dos diferentes sensores distribuídos na secção transversal através de caixas de derivação.

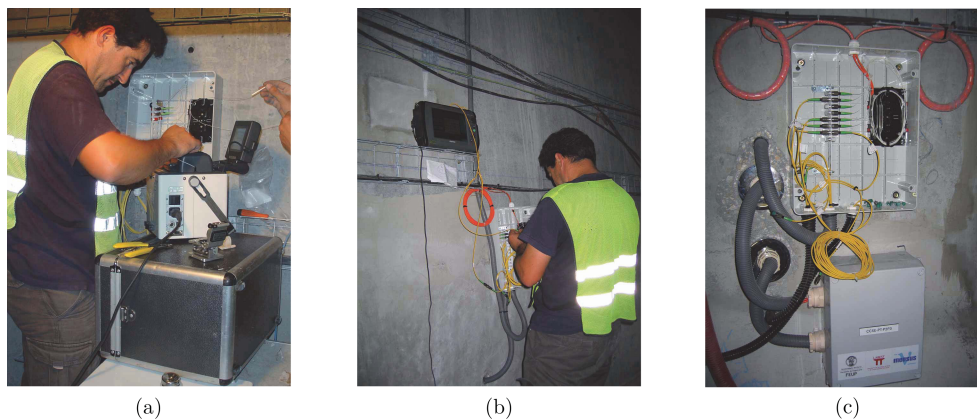


FIGURA 7.20: Montagem das caixas de derivação para interligação dos diferentes sensores formando uma rede global: a) realização de emendas por fusão; b) teste da integridade da rede por intermédio de um OTDR; c) interior de uma caixa de junção com emendas conectorizadas e por fusão.

## 7.4 Integração, pré-processamento e organização de dados

### 7.4.1 Configuração e controlo do sistema de aquisição

No POO encontra-se alojado um PC industrial que controla todo o processo de aquisição de dados do sistema óptico. A aplicação informática, cujo interface gráfico se mostra na Figura 7.21, é assim responsável pelo controlo do sistema de interrogação e pelo armazenamento dos dados recolhidos. Esta aplicação foi concebida para a especificidade desta rede de sensores, tendo sido desenvolvida em LabVIEW<sup>®</sup> de forma a operar em ambiente Windows<sup>®</sup>.



FIGURA 7.21: Aplicação informática para controlo do sistema de interrogação óptico.

O início deste sistema e da respectiva aplicação é automático e está associado ao arranque do sistema operativo do computador, carregando automaticamente todas as definições previamente guardadas. Salienta-se a sua capacidade em se inicializar automaticamente após qualquer quebra de energia ou interrupção involuntária.

Esta aplicação permite a visualização, em tempo real, da intensidade do sinal dos distintos sensores e do respectivo comprimento de onda quer sob a forma gráfica, quer através de tabelas.

O gestor do sistema tem ainda possibilidade de configurar os seguintes parâmetros relativos à aquisição de dados:

- frequência de aquisição dos canais M1 a M3, onde estão conectados todos os transdutores de deformação (limitada a 500 Hz);
- frequência de aquisição dos canais S1 a S8 do *switch*, onde estão conectados os transdutores de flechas e temperaturas (limitada a 1 Hz);
- selecção de modos de funcionamento pré-definidos;
- ganhos no sinal dos sensores para todos os canais;
- ponderação média do sinal, podendo definir o resultado como a média aritmética de múltiplas leituras consecutivas;
- selecção dos canais activos do *switch* óptico, ente S1 a S8.

De forma automática este aplicativo armazena as grandezas medidas no seu estado primitivo, isto é, o comprimento de onda de pico reflectido pelos distintos sensores ao longo do tempo. Estes dados são temporariamente armazenados em ficheiros de texto estruturados que são regularmente enviados e processados pelo servidor do sistema de monitorização.

Todo o interface é remotamente acessível através de uma ligação à rede, sob validação de credenciais de administrador do sistema de monitorização, permitindo a visualização e configuração remota do sistema.

#### 7.4.2 Indexação dos sensores

A partir dos ficheiros de dados gerados no computador do POO, a primeira operação relacionada com o processamento do sinal recolhido prende-se com a identificação dos comprimentos de onda de pico e pela sua atribuição aos respectivos sensores.

O esquema de multiplexagem utilizado, anteriormente representado na Figura 7.15, remete este processo para um caso de multiplexagem híbrida integrando um conjunto de

comprimentos de onda agrupados em distintos canais ópticos. A indexação de cada sensor processa-se então segundo a combinação de dois critérios diferentes:

- i) pelo canal físico de onde provém o sinal óptico;
- ii) pelo comprimento de onda obtido e pelo campo de actuação de cada sensor.

Relativamente ao primeiro critério, a sua identificação é imediata visto que na geração dos ficheiros de dados fica intrinsecamente identificado o canal de onde provém o sinal óptico. Mesmo no caso dos canais do comutador óptico, o seu posicionamento está perfeitamente controlado pela aplicação informática que opera de forma sincronizada com o equipamento de leitura, ficando igualmente registado no ficheiro de dados.

A segunda condição visa a identificação dos diferentes comprimentos de onda recebidos em cada canal óptico e a sua atribuição aos respectivos sensores. Esta atribuição é feita com base exclusiva no comprimento de onda medido e na banda de funcionamento de cada sensor.

Na concepção e materialização da rede de sensores garantiu-se que cada sensor integrado num canal comum operasse sempre numa banda do espectro de luz distinta dos demais sensores. Atente-se à Figura 7.22 onde se representa esquematicamente o espectro de luz proveniente de um determinado canal óptico integrando três sensores contíguos no espectro de luz.

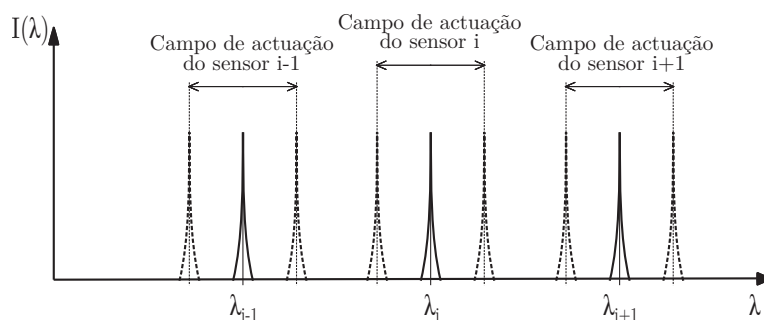


FIGURA 7.22: Representação esquemática do critério utilizado para indexação dos sensores com base no comprimento de onda.

A pré-definição da banda de funcionamento de cada sensor permite, em condições ideais, a indexação directa dos respectivos sensores através da aplicação do critério:

$$\lambda_{0,i-1} + \Delta\lambda_{0,i-1} < \lambda_{0,i} + \Delta\lambda_{0,i} < \lambda_{0,i+1} + \Delta\lambda_{0,i+1} : \forall \Delta\varepsilon, \forall \Delta T \quad (7.1)$$

onde,  $\lambda_{0,j} + \Delta\lambda_{0,j}$  corresponde à posição de pico do espectro de luz reflectido por cada sensor num qualquer instante associado a uma variação espectável de temperatura,  $\Delta T$ , e de deformação,  $\Delta\varepsilon$ .

Faz-se, no entanto, uma referência prática à necessidade encontrada em prever a ocorrência esporádica de distorções no espectro de luz reflectido. No funcionamento do sistema de leitura repercute-se na identificação esporádica de comprimentos de onda de pico adicionais que estão associados a perturbações temporárias do conteúdo espectral e que não correspondem a qualquer sensor efectivo. Estes comprimentos de onda parasitas podem coincidir com a gama de medição dos sensores, logo coexistindo, nessa gama, com o sinal efectivo dos sensores reais. Para obviar este problema, na programação realizada, sempre que são identificados dois picos dentro da gama de medição pré-estabelecida, é admitida a escolha do sinal que se aproxima mais, em valor absoluto, do comprimento de onda obtido na leitura válida imediatamente anterior.

### 7.4.3 Validação dos dados

No caso da monitorização permanente, o processamento do sinal óptico recolhido pressupõe ainda a validação dos dados primitivos de forma a eliminar criteriosamente todos os valores que possam ser assumidos como singularidades ou registos anormais logo à partida. Trata-se da detecção e eliminação de *outliers*. A ocorrência destes registos anormais é perturbadora para a análise dos resultados que se pretende realizar. Pode tratar-se, por exemplo, de uma medição errada, de uma falha no sistema de leitura, da ocorrência de uma solicitação de pico resultante do tráfego ou de qualquer interferência directa com o sistema de medição.

Uma primeira filtragem dos registos ópticos é realizada nos pressupostos da indexação abordada no ponto anterior. Repare-se que, com base nos critérios de indexação apresentados, apenas os registos contidos dentro do campo de medida pré-estabelecido para o sensor são admitidos. Todos os valores obtidos fora do campo de medida do sensor são automaticamente ignorados e não são introduzidos na base de dados.

Implementou-se, no entanto e em simultâneo, um outro critério para detecção de *outliers* baseado numa formulação estatística mais refinada. *A posteriori* é aplicado um algoritmo baseado na limitação da amplitude inter-quartis característico da última janela de amostras recolhida.

A regra utilizada é apresentada na bibliografia internacional sob a forma de *Interquartile Range Analysis (IQR)* (Posenato, 2009). Estudos comparativos realizados por Posenato (2009) atestam a robustez do método, a simplicidade de cálculo e a sua eficiência na detecção de *outliers* nomeadamente na análise de dados provenientes da monitorização estrutural.

Com base na regra adoptada, assume-se como *outlier* todo o valor que cai fora do intervalo definido por

$$[Q_1 - 1.5 \times IQR; Q_3 + 1.5 \times IQR] \quad (7.2)$$

onde,  $Q_1$  e  $Q_3$  são o primeiro e terceiro quartil, respectivamente do conjunto de amostras considerado; e  $IQR$  é o intervalo inter-quartis ( $Q_3 - Q_1$ ). Uma janela móvel centrada em cada ponto define a amostra considerada. Detectado um *outlier*, esse mesmo ponto é substituído pelo valor da mediana da amostra contemplada.

Para aplicar eficazmente este algoritmo, torna-se necessário abordar, em cada iteração, o ponto central da amostra. Só assim se consegue garantir que alterações no comportamento da estrutura possam persistir na amostra, evitando a detecção e substituição errada de falsos *outliers*. Desta forma, verifica-se que a avaliação da amostra não pode ser realizada de forma instantânea visto que carece da recolha de amostras posteriores para avaliar o ponto central. O procedimento adoptado e a dimensão escolhida para a janela móvel de amostras conduz a um atraso de duas horas no processamento dos *outliers*.

#### 7.4.4 Conversão de unidades

Posteriormente e terminado o processamento inicial das grandezas medidas, a obtenção das grandezas físicas finais é efectuada através da transformação do sinal óptico, ou seja do comprimento de onda, de um ou dos vários sensores de Bragg combinados no transdutor. Neste sistema, distinguem-se três expressões a aplicar em função da tipologia do respectivo transdutor e da grandeza física associada.

##### Temperaturas

O valor da temperatura,  $T_i$ , relativo a um determinado instante  $i$ , é obtido a partir do comprimento de onda medido de acordo com

$$T_i = T_0 + (\lambda_i - \lambda_0) \cdot K_T \quad (7.3)$$

onde,  $T_0$  é a temperatura de referência;  $\lambda_i$  e  $\lambda_0$  são os comprimentos de onda medidos no instante  $i$  e na temperatura de referência, respectivamente; e  $K_T$  representa a sensibilidade do sensor à temperatura. Refere-se que os valores de  $\lambda_0$ ,  $T_0$  e  $K_T$  foram determinados por calibração em laboratório para cada sensor e são admitidos constantes ao longo do tempo.

##### Deformações

O valor da variação da deformação,  $\Delta\varepsilon_i$ , compensando os efeitos da temperatura, é obtido a partir da variação do comprimento de onda do sensor de Bragg presente em cada transdutor e passa a ser determinado através da expressão

$$\Delta\varepsilon_i = (\lambda_i - \lambda_0) \cdot K_\varepsilon - (T_i - T_0) \cdot K_{T\varepsilon} \quad (7.4)$$

onde,  $\lambda_i$  e  $\lambda_0$  são os comprimentos de onda medidos no instante  $i$  e no instante de referência inicial, respectivamente;  $T_i$  e  $T_0$  são as temperaturas no instante  $i$  e no instante de referência, respectivamente; e  $K_\varepsilon$  e  $K_{T\varepsilon}$  correspondem à sensibilidade do transdutor à deformação e à temperatura, respectivamente.

O valor de  $K_\varepsilon$  foi obtido em laboratório para cada sensor antes da sua instalação. e  $K_{T\varepsilon}$  foi estimado com base no comportamento térmico do betão em causa. Os valores de  $\lambda_0$  e  $T_0$  foram obtidos no terreno no instante adoptado como referência aquando do arranque do sistema de monitorização.

## Flechas

Com recurso aos transdutores de flechas, a quantificação do deslocamento vertical relativo,  $\delta v_i$ , é determinada, de forma análoga, por aplicação da expressão

$$\begin{aligned} \delta v_i = & ((\lambda_i^A - \lambda_0^A) \cdot K_\delta^A - (\lambda_i^B - \lambda_0^B) \cdot K_\delta^B) - \\ & - ((\lambda_i^{ref,A} - \lambda_0^{ref,A}) \cdot K_\delta^{ref,A} - (\lambda_i^{ref,B} - \lambda_0^{ref,B}) \cdot K_\delta^{ref,B}) \end{aligned} \quad (7.5)$$

onde,  $\lambda_i^A$  e  $\lambda_0^A$  correspondem aos comprimentos de onda dos dois sensor de Bragg presentes no transdutor instalado na secção onde se pretende medir o deslocamento vertical;  $\lambda_0^A$  e  $\lambda_0^B$  correspondem aos comprimentos de onda homólogos no instante de referência considerado aquando do arranque do sistema de monitorização;  $\lambda_i^{ref,A}$ ,  $\lambda_0^{ref,A}$ ,  $\lambda_i^{ref,B}$  e  $\lambda_0^{ref,B}$  correspondem às mesmas variáveis no transdutor presente na secção de referência; e  $K_\delta^A$ ,  $K_\delta^B$ ,  $K_\delta^{ref,A}$ ,  $K_\delta^{ref,B}$  representam as sensibilidades de cada sensor para o efeito da medição do deslocamento vertical.

Seguindo os cuidados de calibração anteriores, as constantes  $K_\delta^A$ ,  $K_\delta^B$ ,  $K_\delta^{ref,A}$ ,  $K_\delta^{ref,B}$  foram determinadas em ensaios realizados em laboratório mediante condições controladas.

### 7.4.5 Base de dados

Todos os dados recolhidos na obra são enviados para um servidor sob alçada do dono de obra, sendo inseridos numa base de dados. Este servidor encontra-se fisicamente fora da estrutura, nas instalações da BRISA, acarretando a transmissão remota de dados através de uma rede de comunicação aberta ao exterior da ponte.

A estrutura esquemática deste sistema está esquematizada na Figura 7.23. Na ponte corre uma aplicação responsável por recolher os dados dos diferentes equipamentos de aquisição existentes e guardá-los em ficheiros de texto estruturados. No servidor exterior, corre uma aplicação que recebe esses dados, faz as conversões de acordo com as expressões anteriormente introduzidas e organiza esta informação na base de dados.

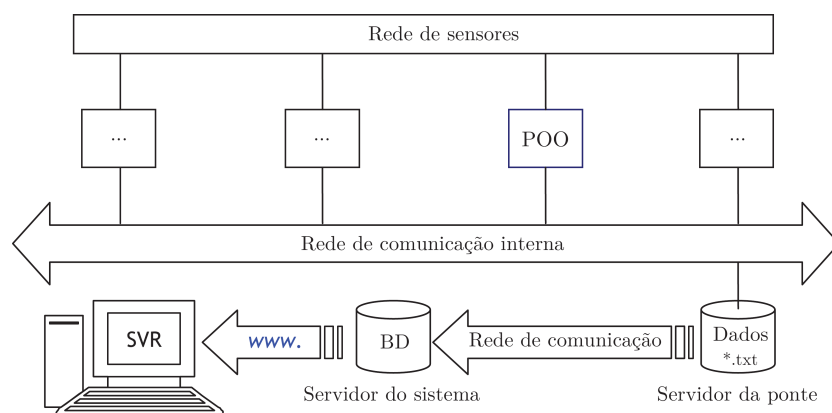


FIGURA 7.23: Estrutura geral do sistema de comunicação e da integração da base de dados.

A base de dados assenta na plataforma de desenvolvimento PostgreSQL<sup>®</sup>. Diferentes tabelas permitem guardar as características de todos os sensores, a sua localização, a hierarquia, as expressões de conversão e as respectivas constantes, bem como os valores brutos medidos em obra e os correspondentes valores convertidos correspondentes às grandezas físicas de interesse (NewMENSUS, LABEST, FEUP, 2008). A consulta desta base de dados processa-se sob a imposição de filtros e campos facultados pela plataforma de desenvolvimento, que podem ser implementados em qualquer linguagem de programação paralela.

#### 7.4.6 Interface de visualização e exploração remota

De forma integrada, foi desenvolvida uma página web que representa um interface final para visualização dos resultados do sistema de monitorização instalado na Ponte da Lezíria e respectivos viadutos de acesso. Esta aplicação permite consultar, em tempo quase-real, os resultados da monitorização sob a forma de gráficos e tabelas, permitindo confrontar esses registos com os respectivos limites de alerta e vigilância. A geração automática de relatórios, com vistas previamente definidas, e o seu envio por e-mail é também possível e programável a partir deste mesmo interface.

A aplicação desenvolvida tem uma estrutura em árvore que se processa em cinco níveis conforme se mostra na Figura 7.24. O primeiro nível (nível 0) corresponde à página de entrada, e o quinto e último nível (nível 5) materializa a visualização da evolução das grandezas seleccionadas sob a forma gráfica. Os níveis 1 a 4, que correspondem a outros tantos nós de navegação, são os que permitem a selecção da vista final, através

da seguinte sequência: selecção da grandeza (nível 1), selecção da estrutura (nível 2), selecção da secção da estrutura em corte longitudinal (nível 3) e selecção de sensores na secção transversal (nível 4).

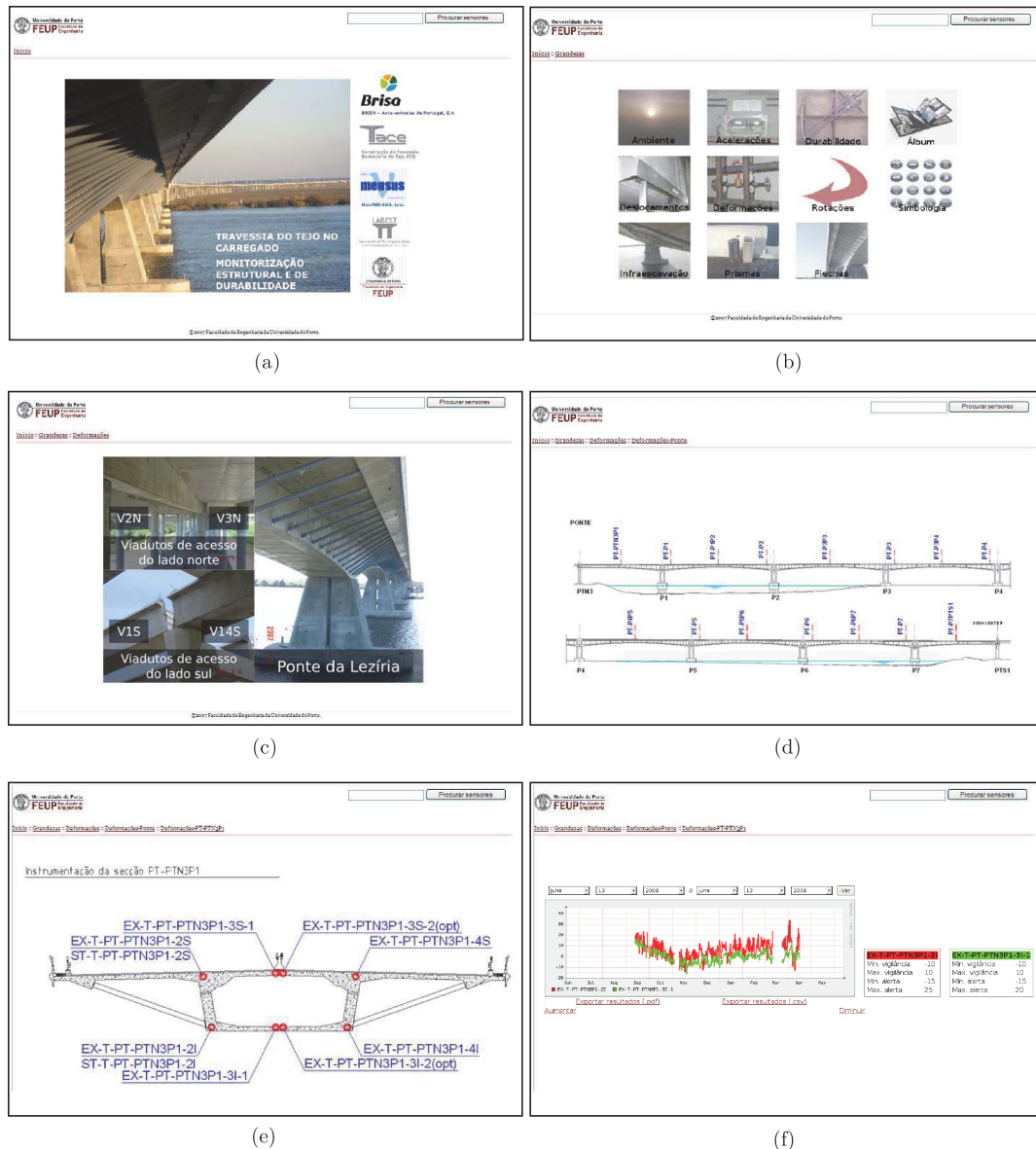


FIGURA 7.24: Níveis de navegação na aplicação web: a) página inicial (nível 0); b) selecção da grandeza física (nível 1); c) selecção da estrutura (nível 2); d) selecção da secção transversal (nível 3); e) selecção do sensor (nível 4); f) visualização gráfica da evolução dos sensores seleccionados (nível 5).

## 7.5 Modos de Funcionamento

Com o presente sistema de monitorização de base óptica consegue-se a medição directa de extensões, de flechas a meio-vão e de temperaturas de forma automática e permanente ao longo do tempo, bem como de forma indirecta, a medição de curvaturas do tabuleiro.

A monitorização decorre segundo dois modos de funcionamento previamente programados de acordo com o preconizado na Tabela 7.2.

TABELA 7.2: Modos de funcionamento do sistema de monitorização óptico da Ponte da Lezíria.

Grandeza	Frequência de aquisição	
	Modo I	Modo II
Deformação	1S./15 min	até 500 Hz
Flechas + Temperatura	1S./15min	até 1 Hz

Contempla-se a existência de um modo de aquisição normal (Modo I), correspondendo à monitorização permanente, segundo o qual o sistema procede à aquisição de dados de todos os sensores com uma periodicidade de 15 minutos. A monitorização prevista tem como objectivo a caracterização do comportamento diferido da estrutura, nomeadamente dos efeitos decorrentes da retracção e da fluência dos materiais estruturais, bem como a detecção de potenciais avarias permanentes. Estima-se que estes fenómenos ocorram de forma contínua e lenta, acarretando uma monitorização de longa duração com possibilidade de baixas frequências de aquisição.

Complementarmente e de forma programada, é possível accionar um modo de funcionamento rápido (Modo II), associado a campanhas de monitorização de curta duração, no qual a frequência de aquisição poderá ser incrementada para valores que poderão ir até 500 Hz na medição de extensões e 1 Hz na medição de flechas. Com este modo de funcionamento potencia-se a caracterização do comportamento estrutural durante a condução de eventuais ensaios de carga, bem como a medição desse mesmo comportamento decorrente de solicitações de tráfego corrente. Dada a natureza destas acções, justifica-se a adopção de frequências de aquisição significativamente superiores, compatíveis com a natureza dos fenómenos que se pretendem caracterizar.

## 7.6 Resultados

Nesta secção pretende-se mostrar os principais resultados da monitorização estrutural que se têm vindo a processar desde o início de 2009. Estes resultados serão convenientemente enquadrados tendo em conta o comportamento previsto da estrutura. Faz-se no entanto notar que a sua interpretação à luz de modelos numéricos de análise estrutural extravasa o âmbito desta dissertação. O propósito aqui reportado centra-se fundamentalmente na demonstração qualitativa da validade destes resultados do ponto de vista da avaliação do comportamento da estrutura e na potencial detecção de anomalias.

Na exposição que se segue abordar-se-á a avaliação do desempenho do presente sistema de monitorização tendo por base os dois modos de funcionamento supracitados (Modos I

e II). Seleccionou-se, em representatividade, o conjunto de resultados que se considera mais relevante face aos objectivos que juntamente se apresentam.

### 7.6.1 Resultados da monitorização permanente

Ao longo desta primeira secção apresentam-se os resultados mais significativos correspondentes à exploração do Modo I inerente à monitorização contínua e permanente do comportamento da estrutura de carácter estritamente estático.

#### 7.6.1.1 Evolução das temperaturas

##### Efeitos sazonais:

Na Figura 7.25 regista-se a evolução das temperaturas medidas ao nível dos banzos superior e inferior nas quatro secções transversais do tabuleiro relativas às secções junto dos apoios P1 (a) e P7 (c) e à posição média dos vãos P1-P2 (b) e P7-PTS (d).

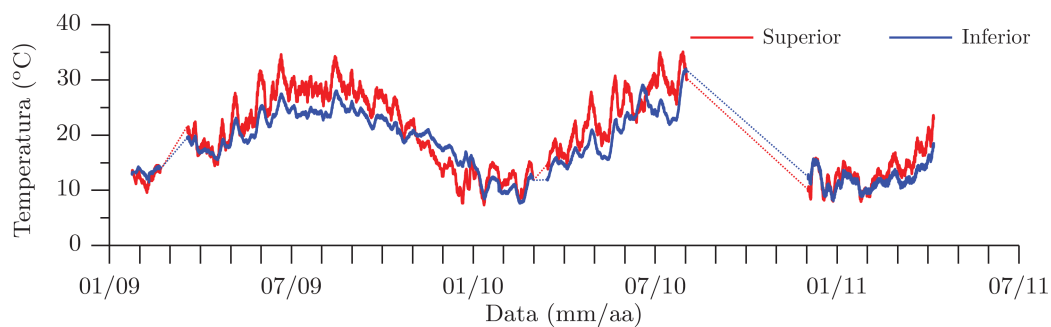
Cobre-se os registos obtidos em cada localização relativos à totalidade do período de observação disponível, compreendido entre Janeiro de 2009 e Julho de 2011. Desde já se assinalam algumas falhas de dados em períodos temporais bem definidos, aqui representados em traço pontilhado. A perda destes dados foi motivada por falhas prolongadas e anormais de alimentação eléctrica reportadas à exploração da própria estrutura.

De forma complementar, na Figura 7.26 traça-se ainda a evolução da temperatura ambiente no interior do caixão medida em duas localizações representativas próximas de cada uma das extremidades da ponte.

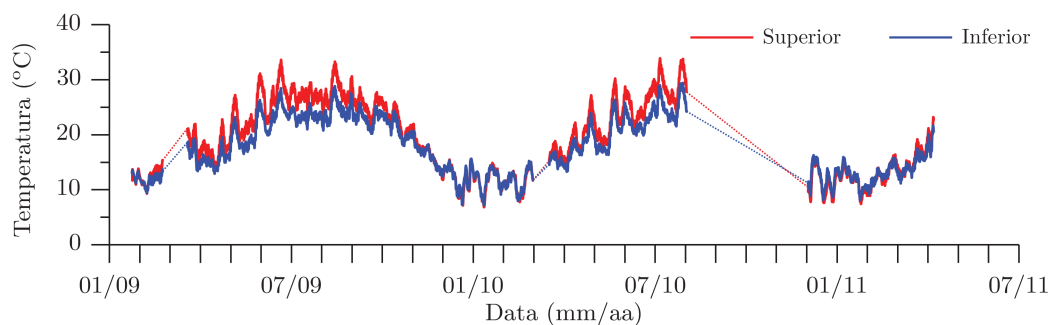
Em ambos os resultados apresentados é notória a presença do efeito sazonal da temperatura muito associado às suas variações anuais. Distingue-se claramente os meses quentes (Abril a Setembro) dos meses frios (Outubro a Março). Pese embora a resolução da figura não permita destringir claramente os ciclos diários, constata-se ainda, em termos gerais, uma maior amplitude da temperatura nos ciclos diários de Verão traduzida pela maior espessura aparente das linhas nos períodos quentes.

Do ponto de vista estrutural, é no entanto pertinente destringir as variações de temperatura na sua componente uniforme e na sua componente diferencial. Desta forma, representam-se as referidas componentes na Figura 7.27, seleccionando-se em representatividade os resultados obtidos nas secções P1 e P1-P2.

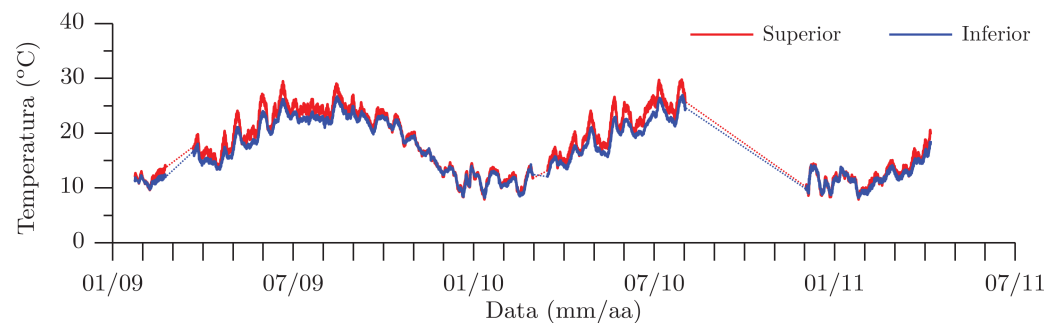
Para além da evidente variação uniforme da temperatura, chama-se a atenção para a componente diferencial anual da temperatura, verificada ao nível do banzo superior e inferior sobretudo nos meses de Verão. Fundamenta-se a maior temperatura sentida ao



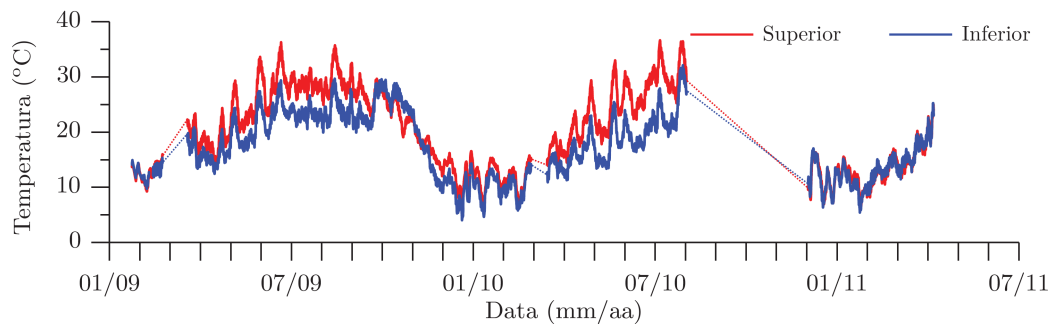
(a)



(b)



(c)



(d)

FIGURA 7.25: Evolução das temperaturas nas lajes superiores e inferiores do caixão ao longo do período de monitorização 2009-2011: a) secção P1; b) secção P1-P2; c) secção P7; d) secção P7-PTS.

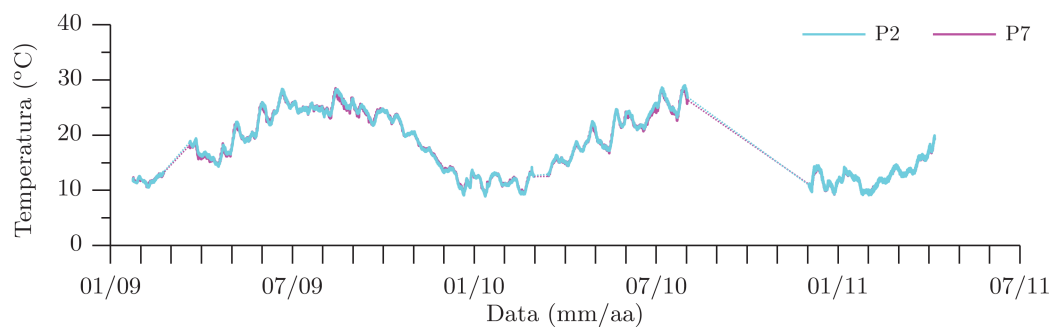


FIGURA 7.26: Evolução da temperatura ambiente medida nas secções P2 e P7, no interior do caixão, ao longo do período de monitorização 2009-2011.

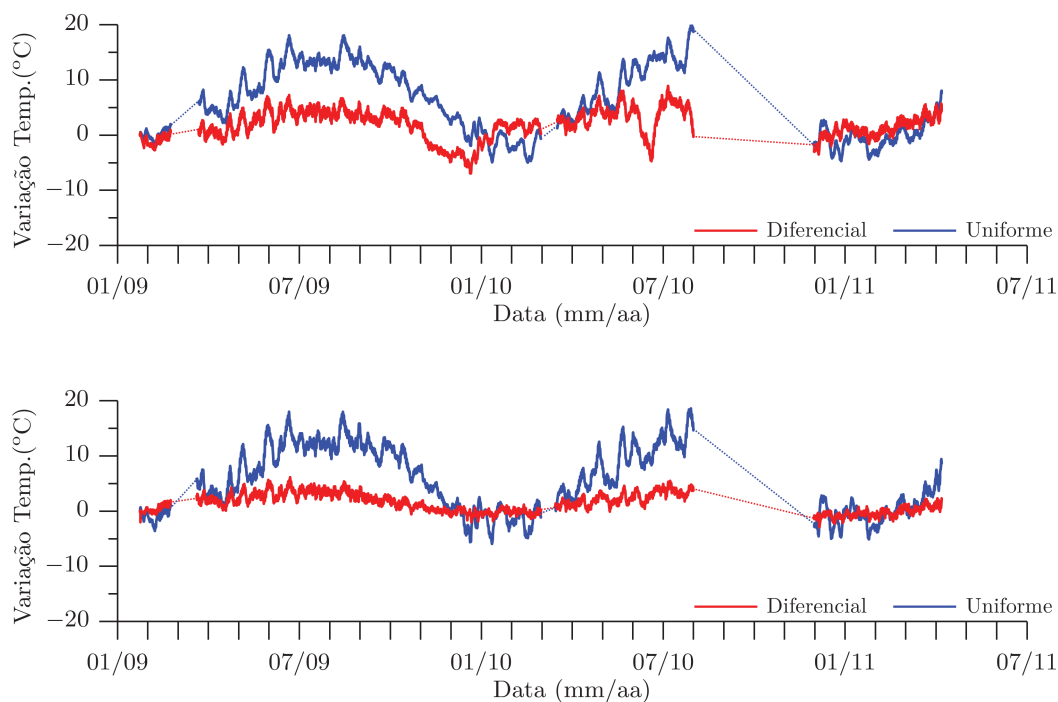


FIGURA 7.27: Evolução das variações da temperatura isolando as componentes uniforme e diferencial ao longo do período de monitorização 2009-2011: a) secção P1; b) secção P1-P2.

nível do banzo superior no Verão com a maior exposição directa deste à insolação, con-substanciada com a presença de uma camada de betuminoso, de espessura significativa, com forte absorção de radiação e elevada inércia térmica sobre o mesmo.

### Efeitos diários:

Ainda no que concerne às variações de temperatura, traça-se, na Figura 7.28, com maior grau de detalhe a variação dos mesmos registos evidenciando três dias representativos. Mais uma vez se isola a componente diferencial da componente uniforme da variação de temperatura.

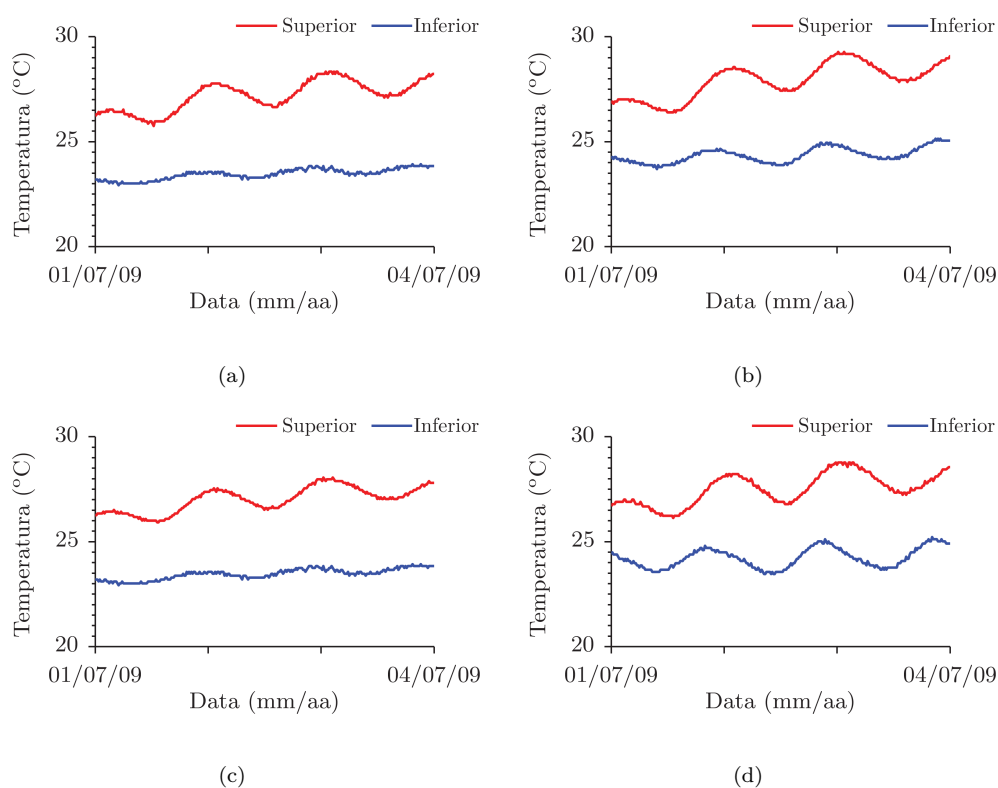


FIGURA 7.28: Evolução das temperaturas ao longo de um período representativo de 3 dias: a) secção P1; b) secção P1-P2; c) secção P7; d) secção P7-PTS.

Observa-se, agora com uma resolução mais conveniente, a ocorrência de ciclos diários de temperatura cujo período médio de 24 horas se encontra perfeitamente definido. Verifica-se que a ocorrência dos mínimos e máximos da temperatura no interior dos elementos estruturais ocorre regularmente para as 6 e 18 horas de cada dia, respectivamente.

Verifica-se igualmente que, ao longo dos ciclos diários, as duas componentes da temperatura não evoluem de forma sincronizada e em fase. Por exemplo, na Figura 7.29 é possível observar que as componentes uniforme e diferencial da temperatura atingem os seus picos em períodos distintos separados por um hiato que se verifica que pode chegar a 3 horas nos dias de maior insolação. Mais uma vez se pode associar a evolução

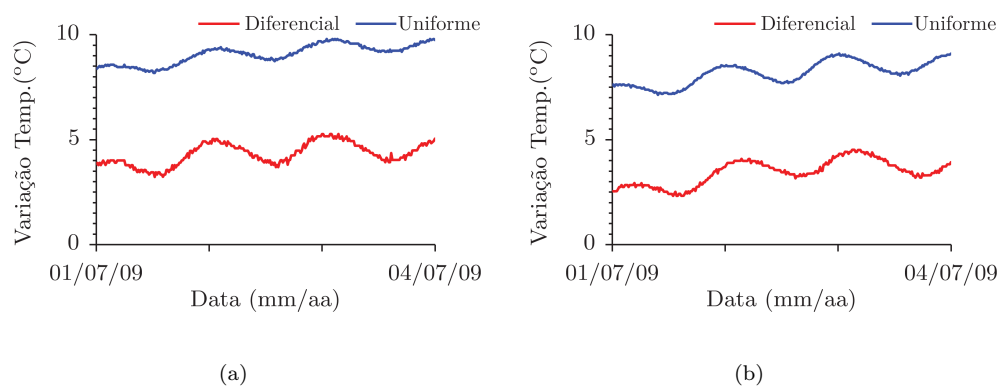


FIGURA 7.29: Evolução das variações da temperatura isolando as componentes uniforme e diferencial ao longo de um período representativo de 3 dias: a) secção P1; b) secção P1-P2.

desfasada com o efeito da insolação e da inércia térmica associada à volumetria e dimensão da estrutura. Repare-se que a componente diferencial está muito mais presente nas secções de apoio de maior inércia e de maior espessura relativa (ver Figura 7.29.a) *vs.* Figura 7.29.b)).

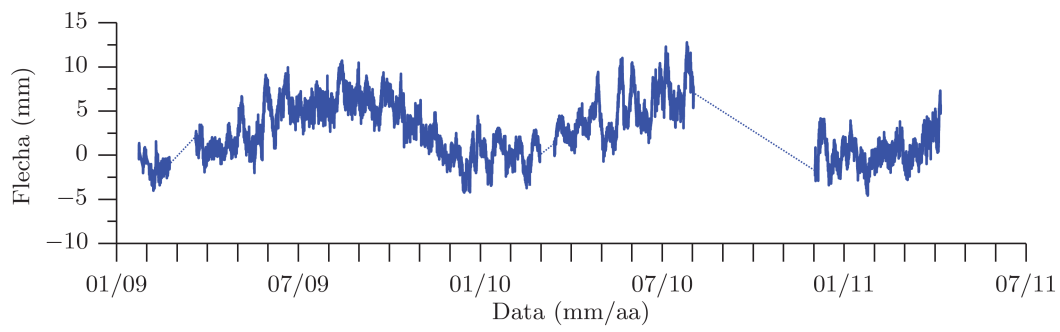
#### 7.6.1.2 Evolução das flechas

##### Efeitos sazonais:

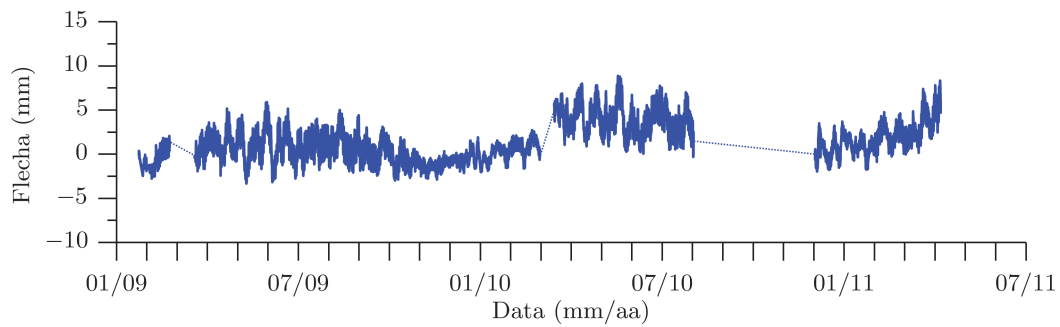
Na Figura 7.30 caracteriza-se a evolução das flechas registadas para o mesmo período de exploração do sistema. A título de representatividade foram seleccionados os registos obtidos na primeira metade da ponte, compreendida entre o pilar de transição PTN e o pilar P4. Faz-se porém notar que resultados perfeitamente coerentes foram obtidos na outra metade da ponte, apenas omitidos por contenção física de espaço nesta dissertação.

Nos resultados expostos, observam-se tendências cíclicas sazonais na resposta da estrutura em correspondência com a evolução das grandezas ambientais anteriormente reportadas. Verifica-se agora que a componente sazonal na evolução das flechas é acentuada no primeiro vão da estrutura, PTN3-P1, onde se verifica uma amplitude anual de deslocamentos que pode chegar a 15 mm. Nos restantes vãos interiores, este efeito aparece em comparação muito mais atenuado. A liberdade de rotação do primeiro vão, nomeadamente sem continuidade junto ao encontro, viabiliza a maior deformada deste tramo da estrutura.

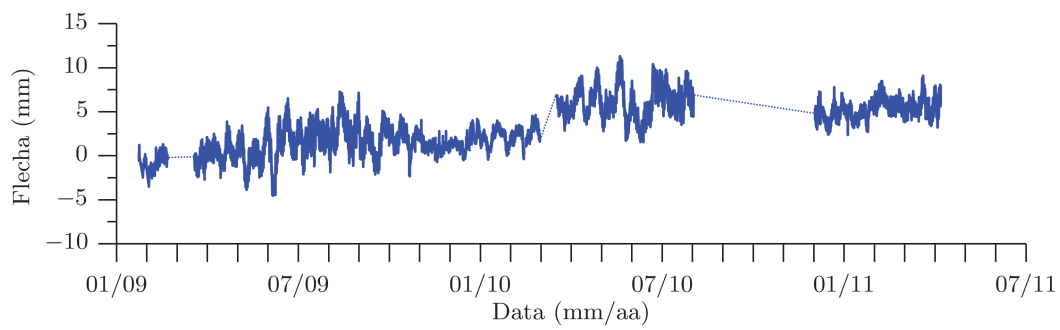
Regista-se ainda uma ligeira tendência correspondente ao aumento da deformada da estrutura ao longo do tempo. Associa-se esta tendência ao comportamento diferido dos materiais estruturais. Particularmente, o efeito conhecido da fluência do betão justifica o incremento lento e progressivo do deslocamento vertical do meio-vão.



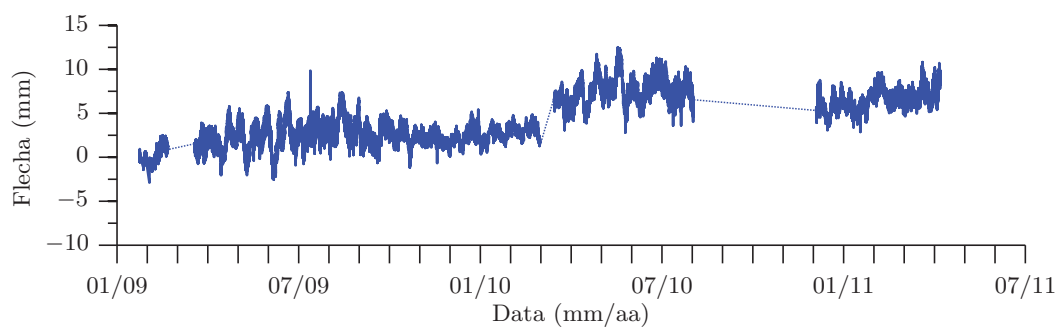
(a)



(b)



(c)



(d)

FIGURA 7.30: Evolução das flechas a meio-vão ao longo do período de monitorização 2009-2011: a) secção PTN-P1; b) secção P1-P2; c) secção P2-P3; d) secção P3-P4.

**Efeitos diários:**

Tal como se procedeu anteriormente, para uma melhor compreensão do comportamento diário da estrutura, representa-se com maior resolução a mesma evolução focada num período de três dias. Remete-se assim para a Figura 7.31 os resultados obtidos entre 1 e 3 de Julho de 2009.

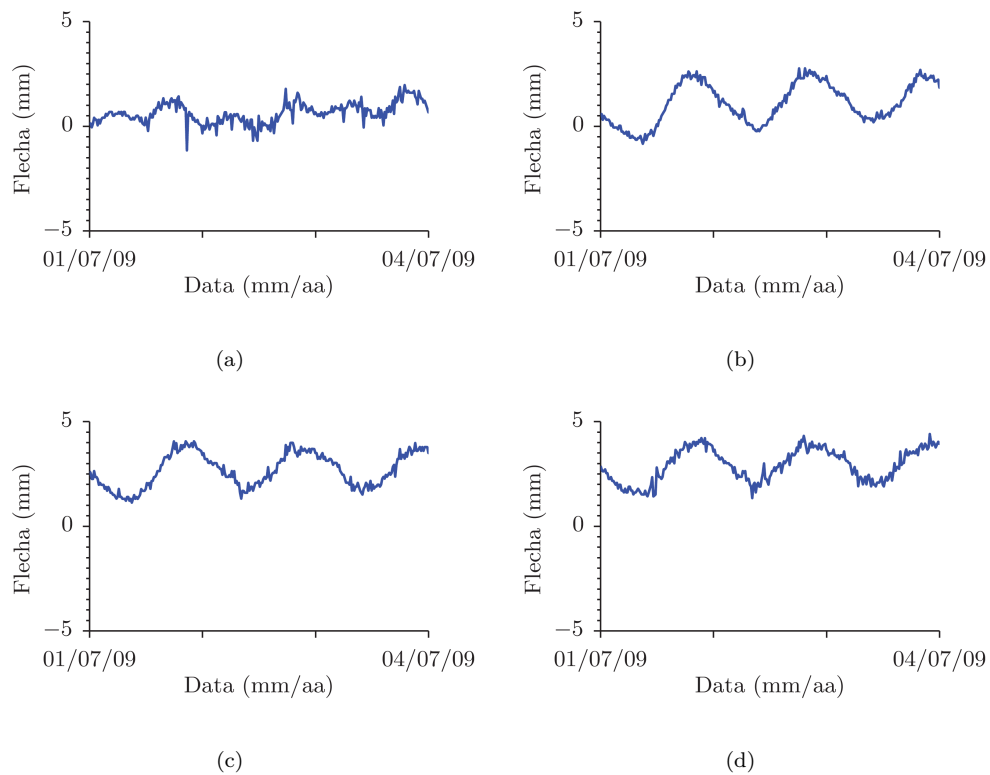


FIGURA 7.31: Evolução das flechas ao longo de um período representativo de 3 dias: a) secção PTN-P1; b) P1-P2; c) P2-P3; d) P3-P4.

Mais uma vez são nítidos os ciclos diários. A amplitude destes ciclos diários é comparável nos três vãos interiores representados. Assinala-se no entanto o diferente comportamento do primeiro vão quando confrontado com os restantes. Mais uma vez as condições fronteira particularmente distintas deste vão, sem continuidade num dos extremos, fundamenta as diferenças observadas.

**Correlação das flechas com as variações de temperatura:**

De forma a melhor compreender a relação entre a resposta estrutural representada e a variação de temperatura associada representam-se as duas correlações mais relevantes na Figura 7.32. Destaca-se a correlação das flechas estruturais no vão P2-P3 com as componentes diferencial e uniforme da variação da temperatura, isoladamente.

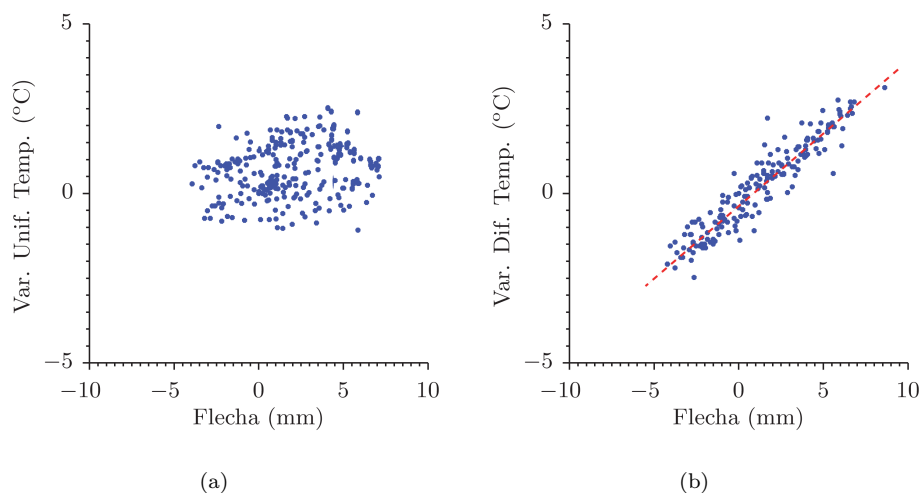


FIGURA 7.32: Correlação entre as flechas e a variação de temperatura para as 6:00h durante o período de um mês: a) flecha *vs.* variação uniforme da temperatura; b) flecha *vs.* variação diferencial da temperatura (vão P2-P3).

Nesta representação foram seleccionadas as amostras correspondentes às 6:00 h de cada dia durante o período de um mês. Procurou-se evitar, para o efeito, a inclusão dos efeitos resultantes da insolação directa sobre a estrutura, de complexa caracterização. Constatou-se que o desfasamento entre as variações de temperatura e a resposta da estrutura é nesta altura mínima e por isso melhor se podem correlacionar as referidas grandezas.

Evidencia-se a relação vincada entre a variação diferencial de temperatura e a flecha no vão em questão. Assinala-se a linearidade patente nestes resultados. Por outro lado, é praticamente impossível encontrar qualquer relação entre a flecha e a componente uniforme da temperatura.

Deixa-se uma nota final para os desvios significativos observados nos períodos de insolação directa. Resultados experimentais demonstram que a insolação cria complexos perfis de temperatura ao longo das secções transversais com consequências de difícil correlação com o comportamento da estrutura. Somente a avaliação dos gradientes térmicos em diferentes posições da secção transversal poderia incrementar a previsão linear do comportamento da estrutura.

### Registos de referência:

Mormente para a avaliação do desempenho da instrumentação adoptada, nomeadamente dos transdutores de flechas desenvolvidos, torna-se de igual forma pertinente avaliar a variação do nível de líquido no sensor de referência considerado sobre o pilar P2, bem como o deslocamento de um encontro que se presume isento de deslocamentos verticais.

Na Figura 7.33 mostra-se a variação do nível de líquido na secção do pilar P2, junto ao reservatório, considerado de referência para determinação dos demais deslocamentos

verticais relativos. É notória a descida lenta do nível do líquido associada à evaporação da água. Assinala-se uma reposição do nível de líquido efectuada em Março de 2010, aquando da manutenção do sistema com o acrescento de 30 mm de água. Em todo o caso, ao longo dos mais de dois anos representados verifica-se uma descida acumulada de aproximadamente 27.6 mm de água. Deixei-se claro que esta descida não tem qualquer consequência no rigor da medição das restantes flechas uma vez que este mesmo resultado é utilizado para compensar a variação do nível de líquido dos demais. O acompanhamento da evolução representada é ainda utilizado para programar correctamente a manutenção do sistema.

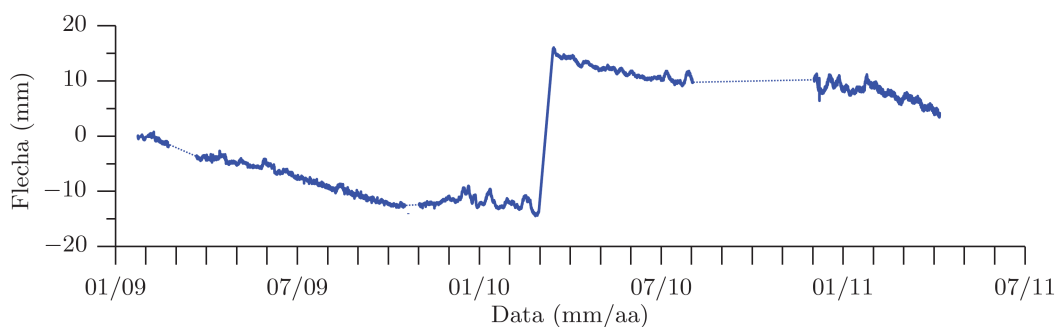


FIGURA 7.33: Evolução do nível aparente de líquido medido na secção de referência P2 ao longo do período de monitorização 2009-2011.

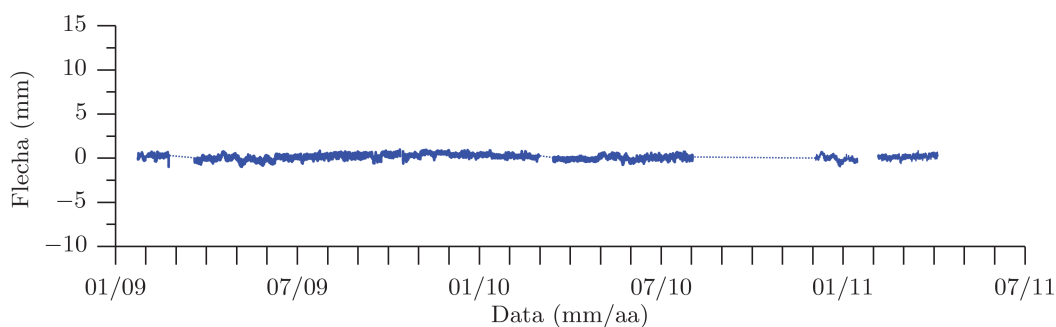


FIGURA 7.34: Evolução do deslocamento vertical relativo medido na secção do apoio PTN ao longo do período de monitorização 2009-2011.

Tal como introduzido, apresenta-se, na Figura 7.34, o deslocamento vertical relativo da secção do tabuleiro sobre o encontro PTN. Assinala-se, neste caso, a constância do sinal obtido. Como seria espectável são insignificantes os deslocamentos observados neste local. Assumindo a imobilidade do apoio, os resultados revelados comprovam a existência prática de erros de medição compreendidos entre  $\pm 1$  mm perante as condições físicas e ambientais efectivamente presentes no local.

### 7.6.1.3 Evolução das extensões

#### **Efeitos sazonais:**

Na Figura 7.35 apresenta-se a evolução do par de extensões de forma combinada no banzo superior e no banzo inferior de quatro secções transversais. Mais uma vez, foram seleccionados os registos obtidos na primeira metade da ponte, compreendida entre o pilar de transição PTN e o pilar P4, alegando total representatividade.

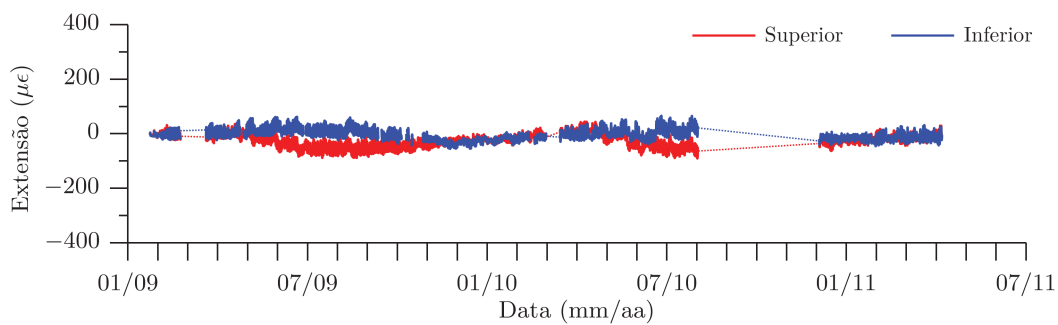
Utilizando a abordagem que se tem vindo a expor ao longo deste documento no que concerne à compensação dos efeitos da temperatura, refira-se que as extensões representadas são o resultado da compensação dos efeitos de natureza térmica quer sobre os sensores, quer sobre a componente de deformação térmica livre dos materiais estruturais. Logo, esta representa exclusivamente a extensão mecânica presente na estrutura acrescida de eventuais variações volumétricas associadas à retracção e fluência do betão. Os efeitos da temperatura surtem assim efeito exclusivo através da sua componente de deformação hiperestática.

Seguindo a lógica anterior é registada a sazonalidade da resposta da estrutura. Neste caso, verifica-se que nos meses quentes as fibras inferiores tendem a ficar traccionadas, enquanto as fibras superiores ficam comprimidas. De forma natural, nos meses frios as extensões registadas nas duas camadas referidas tendem a ser coincidentes. O efeito da insolação e da variação da temperatura revela mais uma vez ser determinante.

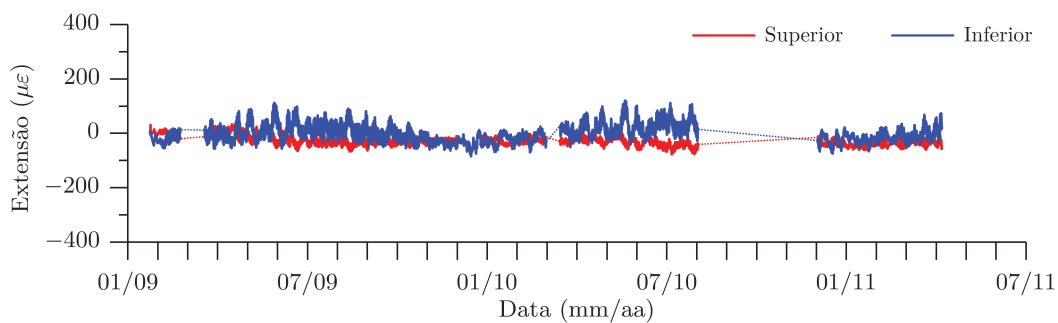
#### **Efeitos diários:**

Com maior resolução, analisando os ciclos diários de deformação, distingue-se na Figura 7.36 a mesma evolução focada num pormenor de três dias (1 e 3 de Julho de 2009). Seleccionaram-se os quatro vãos representativos que têm vindo a ser analisados.

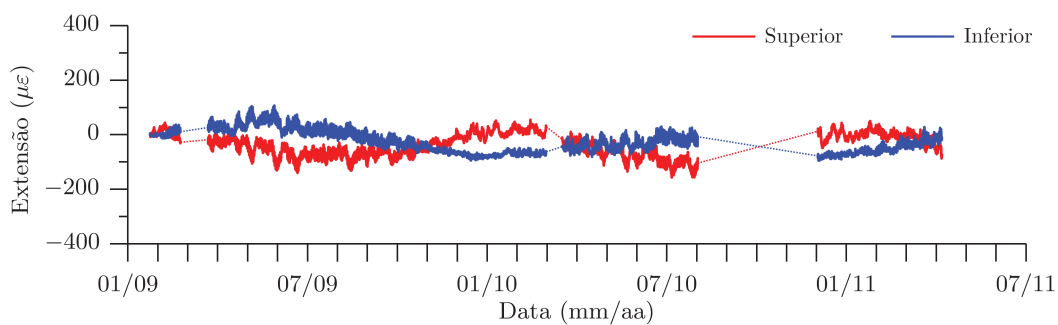
Estão perfeitamente definidos os ciclos diários de extensão assinalando-se a maior amplitude das extensões verificadas nos banzos inferiores. A posição relativa do eixo neutro justifica este comportamento uma vez que este se encontra significativamente mais próximo do banzo superior da secção transversal.



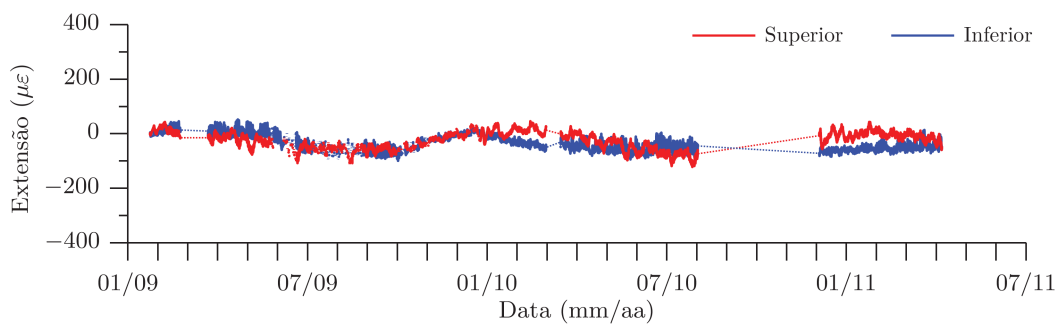
(a)



(b)



(c)



(d)

FIGURA 7.35: Evolução das extensões a meio-vão ao longo do período de monitorização 2009-2011: a) secção PTN-P1; b) secção P1-P2; c) secção P2-P3; d) secção P3-P4.

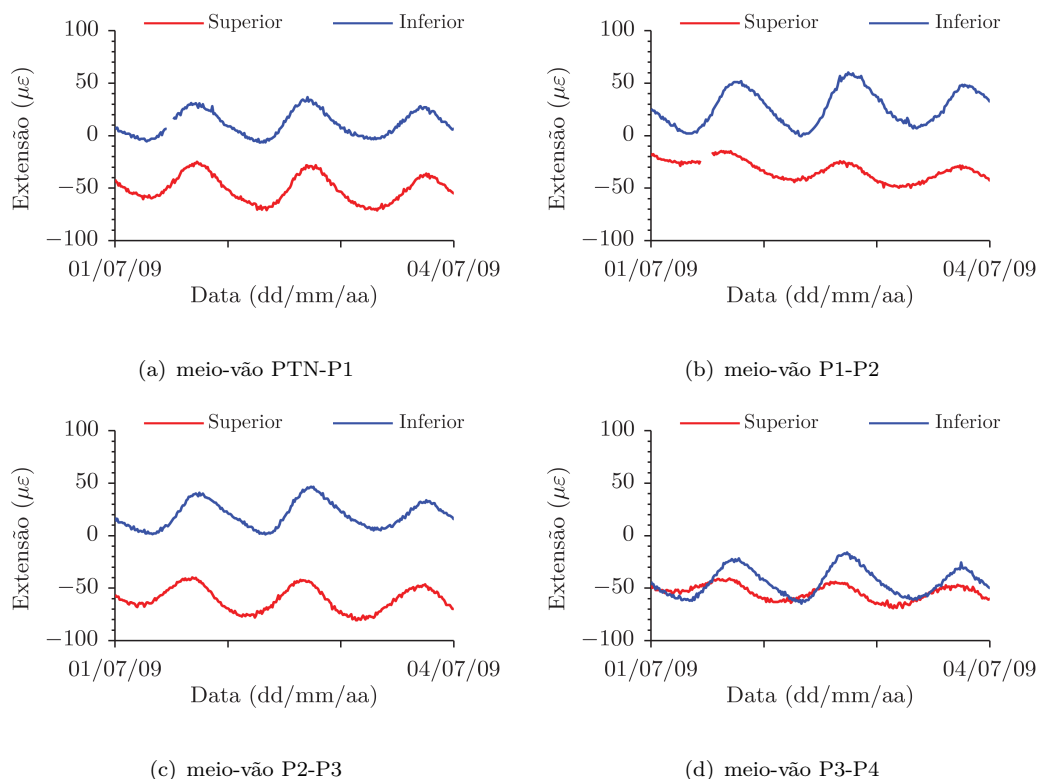
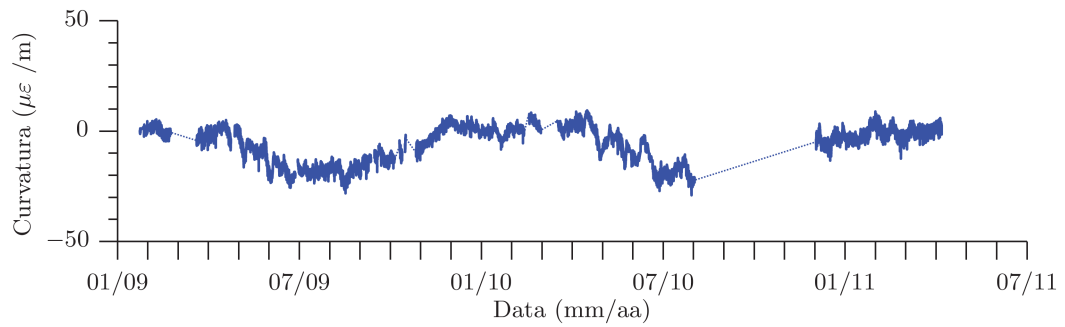


FIGURA 7.36: Evolução das extensões ao longo de um período representativo de 3 dias nas secções de meio-vão.

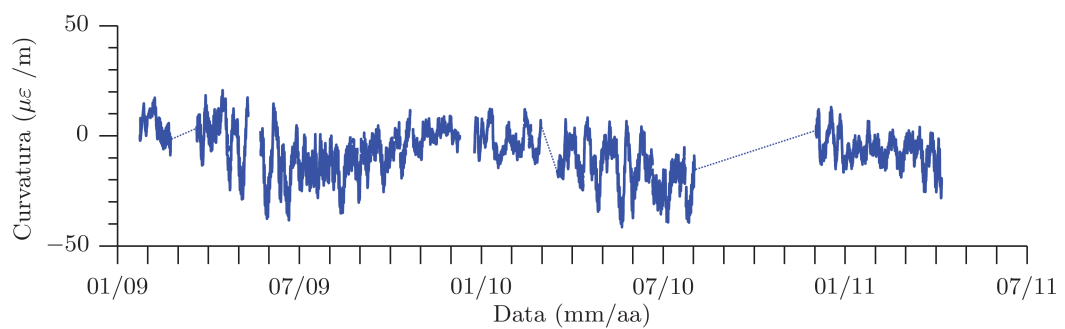
### Curvaturas:

Com a disposição de transdutores implementada é possível utilizar a informação dada pelo par de extensões, medidas em paralelo no banzo superior e no banzo inferior da secção transversal, de forma a determinar a curvatura média dessa mesma secção. As relações geométricas da secção transversal, nomeadamente resultantes do conhecimento do braço que medeia as duas fibras instrumentadas, definem a relação entre as extensões medidas e a referida curvatura. Nas Figuras 7.37 e 7.38 representa-se em conformidade a evolução da curvatura observada nos dois primeiros vãos conferindo-lhe dois níveis de resolução.

Os resultados representados atestam uma evolução das curvaturas em tudo idêntica à evolução observada nas flechas anteriormente apresentadas. A capacidade de representar a deformada global da estrutura a partir da integração numérica das curvaturas médias foi já objecto de estudo no Capítulo 4. Assinala-se, mais uma vez, o grau de correlação entre estas duas grandezas mecânicas.

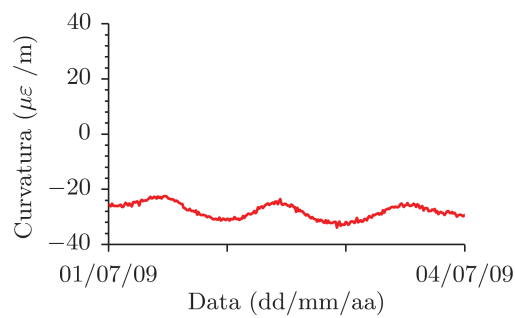


(a)

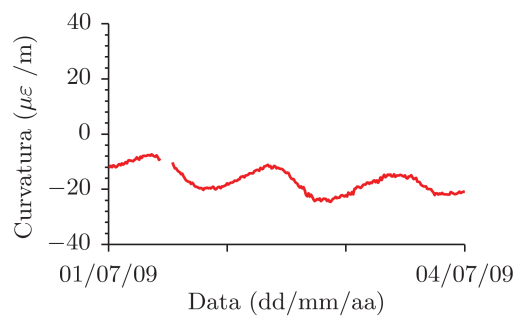


(b)

FIGURA 7.37: Evolução das curvaturas a meio-vão ao longo do período de monitorização 2009-2011: a) secção PTN-P1; b) secção P1-P2.



(a)



(b)

FIGURA 7.38: Pormenor com a evolução das curvaturas a meio-vão ao longo de 3 dias: a) secção PTN-P1; b) secção P1-P2.

## 7.6.2 Resultados de campanhas de monitorização de curta duração

Apresentam-se, de seguida, os resultados mais relevantes relativos à exploração do Modo II corresponde a campanhas de monitorização de curta duração e elevadas taxas de amostragem.

### 7.6.2.1 Acções do tráfego rodoviário

Associado a frequências de aquisição mais elevadas, remete-se para as Figuras 7.39 e 7.40 a caracterização da resposta estrutural, nos dois primeiros vãos, PTN-P1 e P1-P2, induzida pelo tráfego rodoviário durante o período de 1 hora. Nestas figuras, os efeitos da temperatura foram filtrados, encontrando-se destacados os picos de extensão associados à passagem de veículos relevantes.

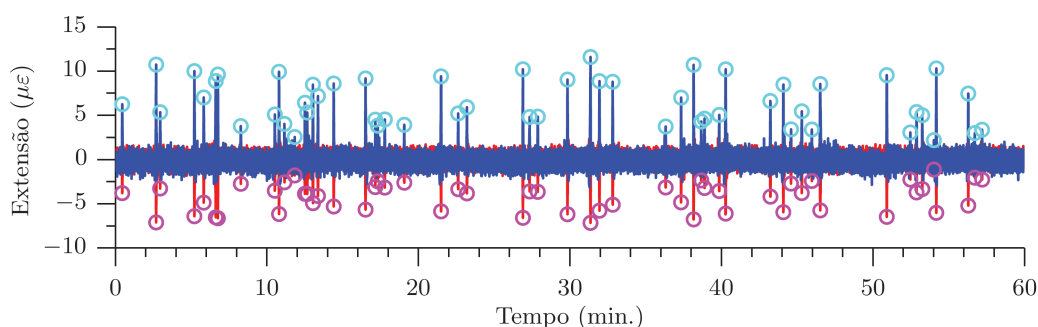


FIGURA 7.39: Observação da passagem de veículos associados aos efeitos do tráfego rodoviário no vão PTN-P1 durante um hora de observação.

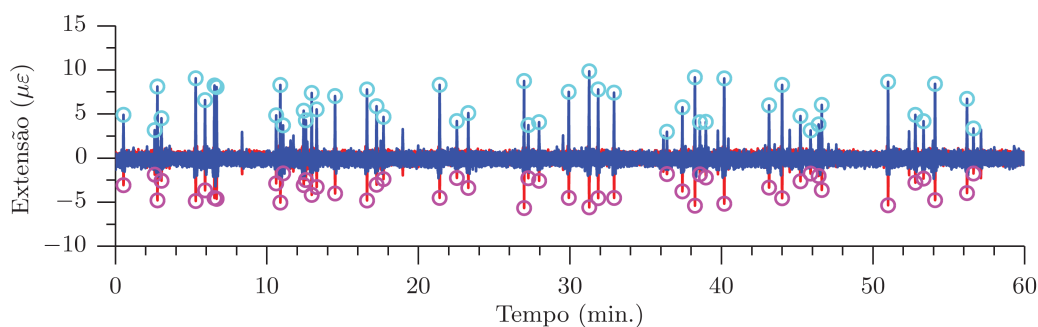


FIGURA 7.40: Observação da passagem de veículos associados aos efeitos do tráfego rodoviário no vão P1-P2 durante um hora de observação.

São notórios os efeitos da passagem de alguns veículos. Constata-se que se trata sobretudo de veículos pesados de mercadorias e passageiros. A sensibilidade do sistema, associada aos diminutos efeitos do tráfego ligeiro, demonstra dificuldades em representar com resolução adequada a passagem desses mesmos veículos. Refira-se ainda que a avaliação dos efeitos do tráfego está associada a um algoritmo que permite a detecção automática de eventos, procurando por mínimos e máximos locais, e processa o seu tratamento estatístico.

No geral, importa assinalar que a amplitude de extensões induzidas pelo tráfego rodoviário revela ser significativamente menor do que a referida amplitude associada aos ciclos térmicos diários. Assinala-se a importância da acção térmica na avaliação do desempenho estrutural, particularmente quando comparada com a solicitação rodoviária corrente na estrutura.

Na Figura 7.41, apresenta-se, para os dois registos anteriores, os respectivos histogramas de extensões. Nela se reflectem os efeitos do tráfego rodoviário detectado traduzido na amplitude de pico das extensões registadas durante a sua passagem.

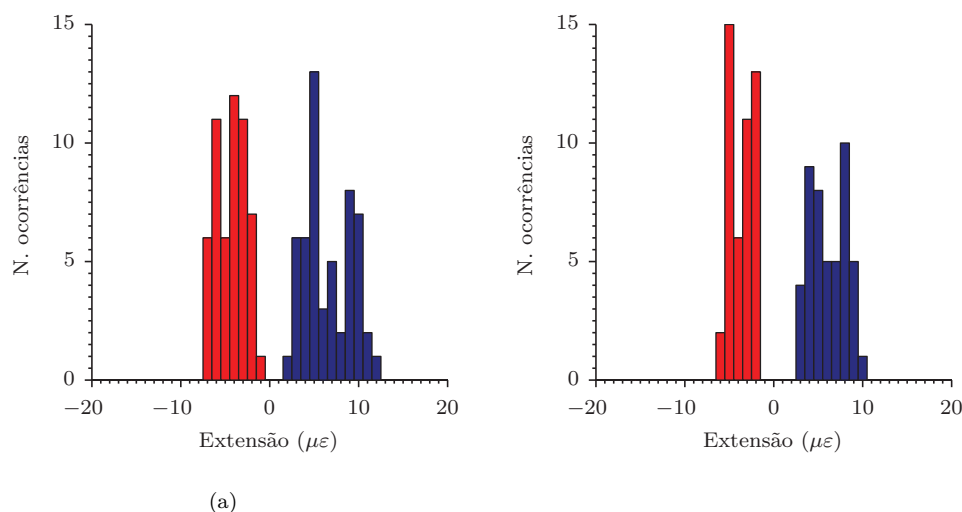


FIGURA 7.41: Histogramas de efeitos caracterizando a resposta da estrutura perante o tráfego rodoviário corrente: a) secção PTN3-P1; b) secção P1-P2.

Conhecida a distância entre as secções instrumentadas e o respectivo desfasamento entre picos associados ao mesmo veículo em diferentes linhas de influência é ainda possível estimar a velocidade média dos veículos e o respectivo sentido de circulação. A Figura 7.42 representa agora os histogramas de velocidades e sentidos de circulação obtidos na amostra em apreço.

A realização de ensaios de calibração, por exemplo com a passagem controlada de veículos perfeitamente caracterizados, será necessária para relacionar a amplitude das extensões medidas com o peso real dos veículos. A influência da posição do veículo transversalmente ao tabuleiro necessita, para o efeito, de ser igualmente calibrada e determinada em cada passagem. A condução de campanhas de caracterização neste âmbito poderá facultar a avaliação dos efeitos da acção rodoviária de forma regular e sistemática.

### 7.6.2.2 Traçado de linhas de influência

Abordando-se ainda as potencialidades deste sistema de monitorização quando associado a campanhas de aquisições de maior frequência, assinala-se ainda a possibilidade de se

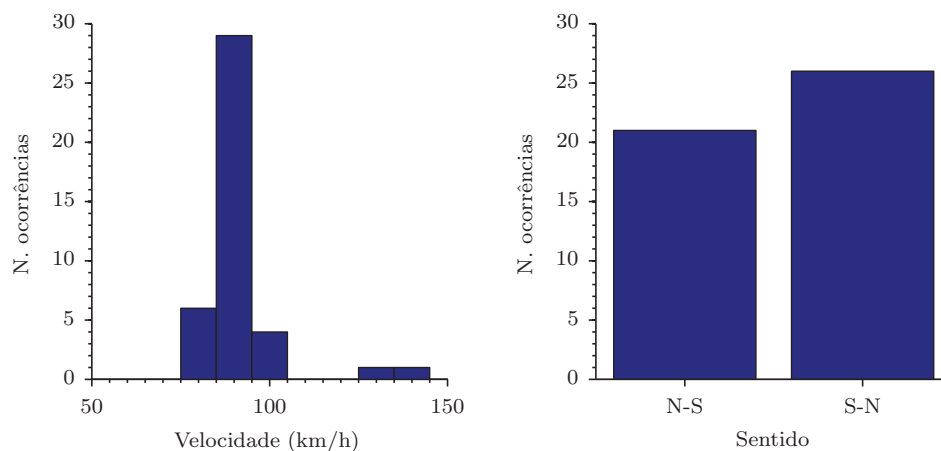


FIGURA 7.42: Caracterização do tráfego rodoviário: a) histogramas de velocidades; b) sentidos de circulação.

obter o traçado de linhas de influência de extensões nas várias secções instrumentadas. Na Figura 7.43 ilustra-se o registo de linhas de influência, sobrepondo as extensões das oito secções de meio-vão (fibra superior e fibra inferior), obtidas durante a passagem de dois veículos pesados de mercadorias a circular em sentidos opostos na estrutura. Em ambos os casos foram estimadas velocidades médias de circulação a rondar os 75 km/h.

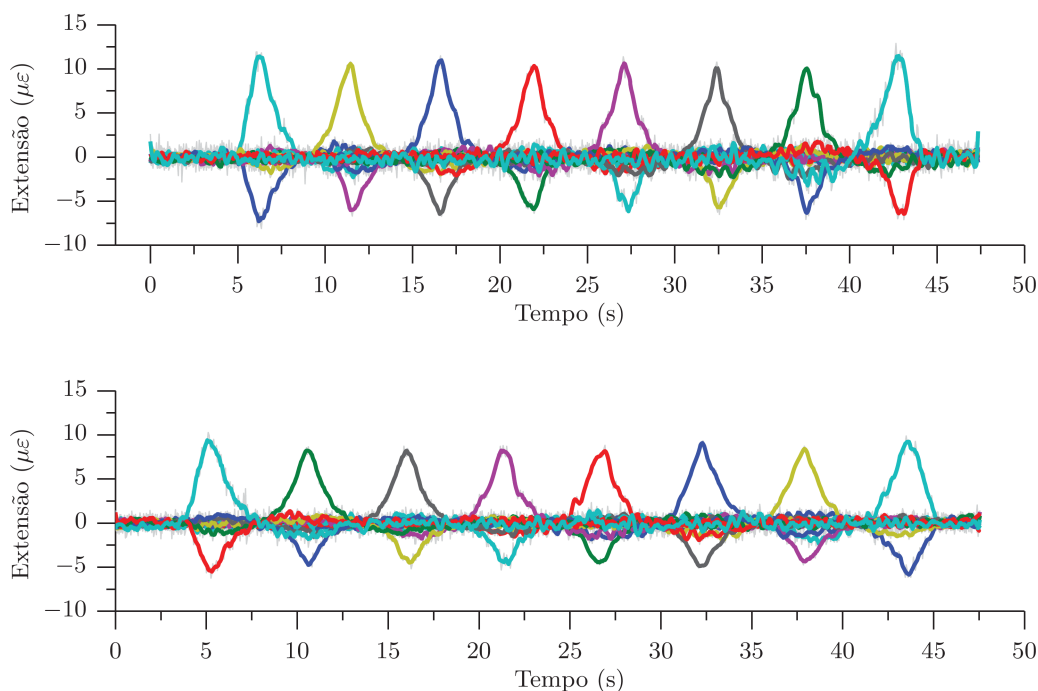


FIGURA 7.43: Traçado de linhas de influência das extensões nas 8 secções de meio-vão: a) passagem de veículo sentido N-S; b) passagem de veículo sentido S-N. (nota: trata-se da passagem de veículos distintos seleccionados ao acaso).

No que concerne à potencialidade exposta, preconiza-se a avaliação periódica da resposta

estrutural perante a passagem regular e criteriosa de um veículo convenientemente caracterizado. A passagem deste veículo poderá mesmo ocorrer sem necessidade de perturbar as condições normais de funcionamento desta infra-estrutura. A caracterização desta resposta e a avaliação da sua evolução será um aspecto fortemente enriquecedor e intrinsecamente eficiente na aferição do correcto desempenho da estrutura ao longo da sua exploração.

### 7.6.2.3 Correlação das linhas de influência dos diferentes vãos

A correlação das extensões de pico associadas ao tráfego rodoviário corrente e a análise da sua evolução relativa fornece outro indicador relevante relativamente à condição da estrutura. Para diferentes períodos de referência, propõe-se a determinação do modelo que ajusta as extensões de pico verificadas nos diferentes vãos da estrutura para um conjunto representativo de passagens de veículos ordinários. Pretende-se que o acompanhamento dos coeficientes de ajuste possa ser capaz de detectar fendilhação no campo de medida de cada transdutor ou mesmo alterações na rigidez relativa dos diferentes vãos associada a danos com impacto global.

Ilustrando o procedimento proposto, na Figura 7.44, relaciona-se as extensões de tracção observadas nas secções mais representativas. Sobrepõe-se, para comparação, os resultados obtidos em dois períodos distintos de campanhas de observação afastadas de aproximadamente um ano. Tal como anteriormente preconizado, os pontos assinalados correspondem ao conjunto indiferenciado de veículos avaliado em circulação na ponte, entre as 10:00 e 11:00 h, dos dias assinalados.

A linearidade e a repetibilidade exibida em ambos os períodos de observação, para os diferentes vãos, é assinalável. Destaca-se a consistência verificada durante a passagem de diferentes veículos de tipologia e dimensões distintas. Para os dois períodos de referência, a variação relativa dos declives apresentados situa-se abaixo de 1.0%.

Os resultados obtidos indicam a possibilidade de se poder vir a utilizar esta metodologia para avaliar a evolução da resposta da estrutura e da sua condição. Neste caso, a repetibilidade obtida comprova que a condição estrutural não se alterou ao longo do tempo. Recomenda-se, de forma análoga, a repetição regular deste procedimento como forma de despistar eventuais alterações no comportamento da estrutura. Considera-se que qualquer perda de rigidez diferenciada ao longo dos distintos vãos poderá ser oportunamente detectada seguindo regularmente o procedimento indicado.

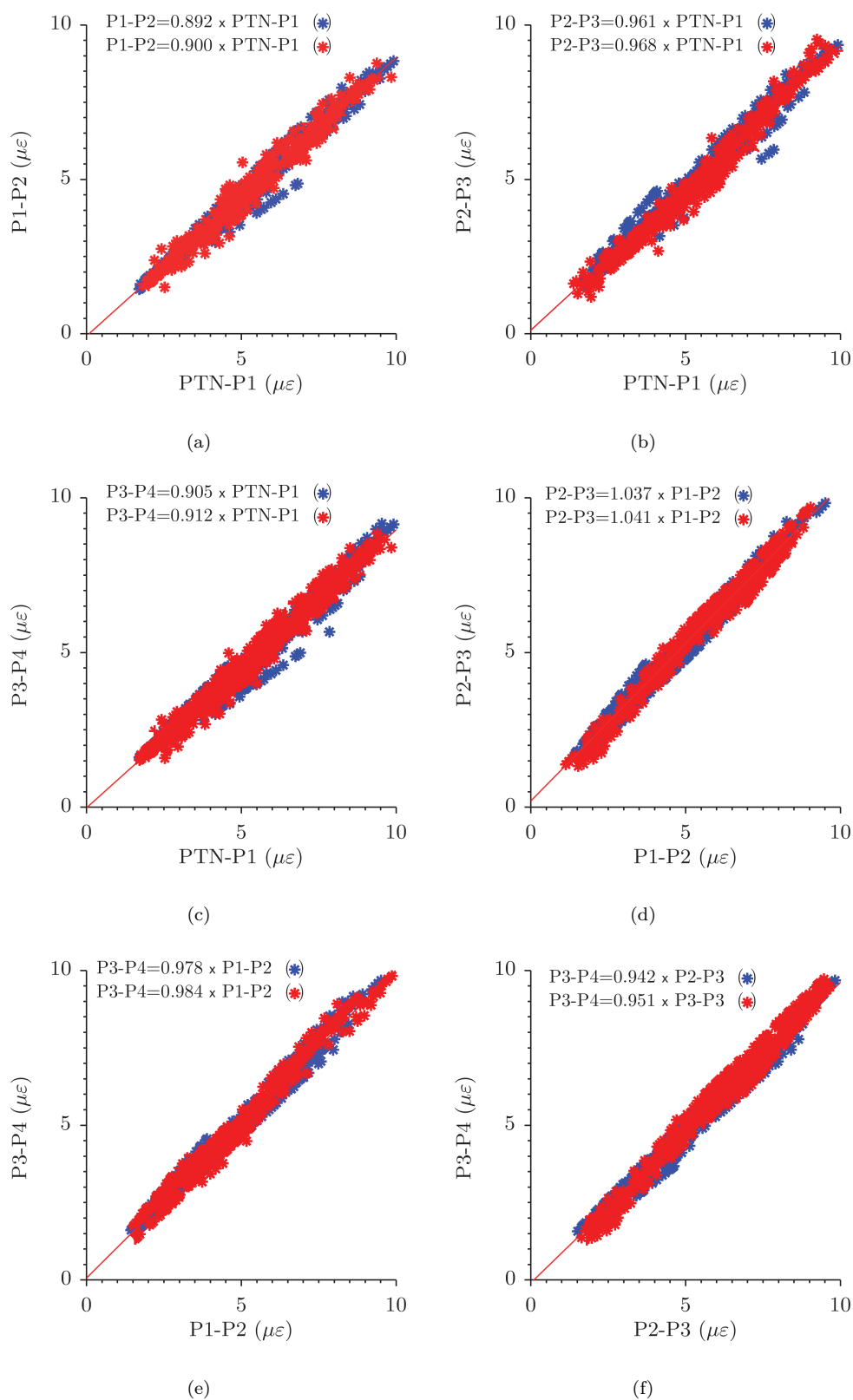


FIGURA 7.44: Correlação entre os valores de pico observados em cada vão relativos a dois dias distintos de observação (01/07/2009 e 19/07/2010): a) PTN-P1 vs. P1-P2; b) PTN-P1 vs. P2-P3; c) PTN-P1 vs. P3-P4; d) P1-P2 vs. P2-P3; e) P1-P2 vs. P3-P4; f) P2-P3 vs. P3-P4.

## 7.7 Implementação de um sistema de alarmes de vigilância e alerta

A monitorização do comportamento estrutural da Ponte da Lezíria visa a detecção oportuna de comportamentos anómalos e por essa via o diagnóstico permanente da condição da estrutura. Implementou-se, para o efeito, uma metodologia automática destinada à identificação de desvios no comportamento da estrutura, tendo-se seleccionado algumas das grandezas globais mais representativas em regime estático.

Seguindo a abordagem proposta por Marecos (2008), a metodologia adoptada, tendo por base as diferentes solicitações conhecidas, assenta na construção de um modelo capaz de representar o comportamento da estrutura no seu estado de referência. A ocorrência de desvios significativos relativamente a esse modelo calibrado origina a geração de alarmes definidos em diferentes níveis.

Neste trabalho propõe-se dois níveis de alarme correspondentes às situações de vigilância e alerta. O alarme de vigilância representa um desvio ligeiro do comportamento da estrutura relativamente ao estado de referência. A evolução do comportamento da estrutura após a ocorrência deverá pois ser acompanhada com grau crescente de atenção e criticismo. Em todo o caso, não é previsível que, a curto prazo, esse evento, por si só, venha a ter consequências para a integridade e para segurança da estrutura.

Já o nível de alerta reflecte, em princípio, alterações significativas no comportamento da estrutura. Este deve implicar a realização de estudos complementares com vista à avaliação da condição efectiva da estrutura. Quando persistente, projectam-se então análises complementares do comportamento da estrutura, nomeadamente com a avaliação direccionada dos modelos estruturais, realização de inspecções visuais, ensaios complementares não-destrutivos e testes de carga. Validada a gravidade do aviso, compete ao dono de obra tomar medidas adequadas que levem à reparação e minimização dos riscos resultantes.

Na Figura 7.45 exemplifica-se a abordagem implementada através de um pictograma. Traduzindo uma situação hipotética, o amarelo está representada uma situação de um limite de vigilância e o vermelho um limite de alerta em dois vãos distintos da estrutura. Os dois níveis de alarme reflectem diferentes graus de desvio e obrigam naturalmente à adopção de medidas distintas.

As medidas a tomar em caso de alarme seguem um protocolo definido em conjunto com o dono de obra. Este protocolo visa dar conhecimento aos técnicos responsáveis da ocorrência de desvios comportamentais assim como informar sobre a localização e natureza desses desvios. Em função do nível de alarme despoletado, correspondente a uma situação de vigilância ou alerta, estabelecem-se, nesse protocolo, procedimentos distintos.



FIGURA 7.45: Pictograma com representação esquemática de alarmes de vigilância (amarelo) e alerta (vermelho).

Uma equipa técnica com formação adequada deverá ser responsável por interpretar a informação proveniente da monitorização e acompanhar os alarmes activos. A identificação de avarias em sensores, danos ou deficiências estruturais deve ser eficientemente avaliada. O desempenho e a segurança optimizada da estrutura é, desta forma, permanentemente avaliada e questionada. Pretende-se que qualquer anomalia detectada precocemente seja alvo de um programa eficiente com vista à sua resolução.

### 7.7.1 Modelo estatístico representativo do comportamento da estrutura

Para previsão do comportamento normal da estrutura foi desenvolvido um modelo estatístico. Com este modelo, procura-se estimar o comportamento presente da estrutura admitindo a validade e consistência do comportamento de referência inicial. Considera-se portanto que o período de referência é representativo da condição perfeita da estrutura reflectindo um estado isento de danos.

Para construção do modelo reportado, considerou-se então um intervalo de tempo inicial de seis meses durante o qual se admitiu que não ocorreram alterações significativas no comportamento da estrutura. Analisaram-se para este período as relações funcionais entre as variáveis independentes conhecidas que actuam sobre a estrutura e a resposta estrutural associada. As principais dependências entre as temperaturas, flechas e curvaturas medidas foram já abordadas nas secções anteriores deste capítulo e estão portanto na base deste modelo.

Como variáveis de saída do modelo comportamental desenvolvido, ou seja como variáveis de controlo, foram seleccionados os deslocamentos verticais relativos de cada vão (flechas). Das grandezas medidas, considera-se que esta é aquela que melhor reflecte o comportamento global da estrutura (Bergmeister e Santa, 2001). Projecta-se que o controlo directo da flecha possua por isso condições para detectar alterações no desempenho da estrutura com impacto global nomeadamente que se façam sentir no incremento da sua deformada.

Como variáveis de entrada foram consideradas as componentes uniforme e diferencial da variação da temperatura. Estas duas variáveis têm em conta a relação entre as temperaturas medidas nos banzos superiores e inferiores das secções transversais do tabuleiro monitorizadas. Demonstrou-se já nas secções anteriores a importância destas duas grandezas na deformação diária e sazonal da estrutura e consequentemente na magnitude instantânea da flecha.

Contudo, fruto do desfasamento observado entre as duas componentes das variações de temperatura e mesmo destas com resposta da estrutura traduzida no deslocamento vertical dos vãos (ver Figuras 7.29 e 7.31), considerou-se necessário ter em conta esse efeito também na definição do modelo. Deste modo, consideram-se para determinação da resposta da estrutura em cada instante, não só a temperatura nesse momento, mas também o contributo ponderado da temperatura registada até três horas antes. Todas as variáveis de natureza térmica são contabilizadas de forma linear no modelo em apreço.

Contemplou-se ainda a variável tempo procurando representar a evolução da reposta diferida da estrutura fruto do comportamento diferido dos seus materiais. Analisando a evolução independente dos efeitos diferidos, designadamente as parcelas da fluência e da retracção do betão, considerou-se conveniente utilizar uma lei genérica que combina um polinómio do segundo grau com uma função racional dependente do tempo.

Na Figura 7.46 esquematiza-se a filosofia do modelo desenvolvido identificando uma vez mais as suas variáveis de entrada e de saída.

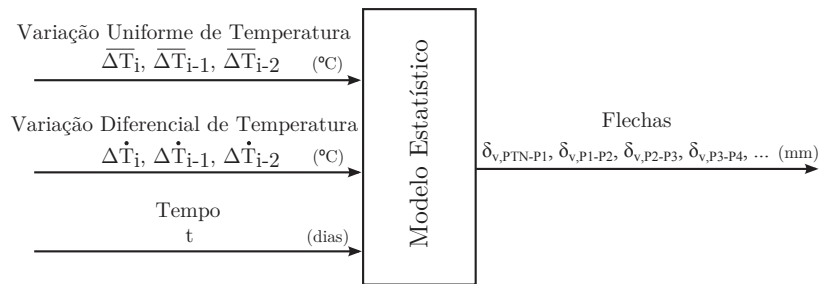


FIGURA 7.46: Representação do modelo estatístico desenvolvido indicando as respectivas variáveis de entrada e de saída.

A formulação matemática que representa este modelo estatístico pode então ser traduzida sob a forma da seguinte expressão geral relativa a cada flecha estrutural,  $\Delta\delta_{v,i}$ ,

$$\begin{aligned} \Delta\delta_{v,i} = & a_0\Delta\bar{T}_i + a_1\Delta\bar{T}_{i-1} + a_2\Delta\bar{T}_{i-2} + a_3\Delta\bar{T}_{i-3} \\ & + b_0\Delta\dot{T}_i + b_1\Delta\dot{T}_{i-1} + b_2\Delta\dot{T}_{i-2} + b_3\Delta\dot{T}_{i-3} \\ & + c_0(t_i - t_0) + c_1(t_i - t_0)^2 + c_2\frac{t_i - t_0}{t_i - t_0 + c_3} + r \end{aligned} \quad (7.6)$$

onde  $\Delta\bar{T}_i$ , são as variações de temperatura consideradas uniformes na secção transversal no instante considerado, uma, duas e três horas antes, respectivamente;  $\Delta\dot{T}_i$ , são as variações de temperatura diferenciais também no instante considerado, uma, duas e três horas antes, respectivamente; e  $t$  é o tempo decorrido desde o instante de referência.

As constantes  $a_0, a_1, a_2, a_3, b_0, b_1, b_2, b_3, c_0, c_1, c_2, c_3$  e  $r$  definem o modelo estatístico utilizado. Estes parâmetros foram obtidos para o período considerado minimizando os desvios existentes entre o modelo estatístico e os resultados experimentais. As relações obtidas visam a utilização deste modelo na previsão do comportamento futuro da estrutura e assim permitirão balizar os dados experimentais que continuamente se vão acrescentando.

Refere-se que as extensões medidas no betão não estão contempladas nesta análise automática. A difícil correlação da deformação com as restantes grandezas medidas, nomeadamente com a temperatura, põe em evidência a complexidade das tensões auto-equilibradas no betão. Em alternativa, propõe-se a avaliação cuidada da mesma sempre que se questiona o comportamento da estrutura e particularmente em caso de alerta.

### 7.7.2 Limites de vigilância e alerta

Definido o modelo comportamental e para aplicação prática da metodologia em causa, tornou-se necessário pré-estabelecer limites de desvio relativamente a este modelo. Em alternativa a uma abordagem determinística baseada em modelos analíticos, utilizou-se mais uma vez um procedimento estatístico.

Para definição dos limites de vigilância, de forma a minimizar e controlar o levantamento de falsos alarmes, após um processo iterativo de ajuste, considerou-se admissível a ocorrência de um desvio máximo correspondente a 50% da amplitude máxima registada nos ciclos diários observados durante o período de referência inicial. Nos vãos correntes, esta consideração traduz-se na definição de um intervalo geral com uma amplitude de  $\pm 5$  mm relativamente ao ajuste do modelo. A violação repetida deste intervalo dinâmico despoleta por si só um estado de vigilância.

Na definição dos limites de alerta procurou-se contudo ser mais criterioso. O conhecimento dos limites do comportamento da estrutura remete para a estimativa das flechas a tempo infinito. Num estudo realizado pelo projectista da estrutura, para a deformada a tempo infinito (10000 dias), são apontados deslocamentos adicionais da ordem dos 25 mm relativamente ao estado de referência após o fecho da construção da ponte (COBA-PC&A-CIVILSER-ARCADIS, 2006a). Considerou-se então 25 mm como o tecto máximo correspondente ao limite de alerta para a estrutura em repouso no que diz respeito ao valor da flecha absoluta.

Adicionalmente, procurando tornar mais restritivo este limite, combina-se a evolução regular da flecha no tempo estimada pelo modelo estatístico já calibrado. Relativamente à previsão do modelo, baliza-se o estado de alerta considerando a flecha adicional máxima correspondente à máxima amplitude diária observada no período de referência. A análise realizada conduziu assim à consideração de uma faixa de  $\pm 11$  mm relativamente ao modelo de ajuste, até ao máximo absoluto de 25 mm, para definição do estado de alerta nos vãos correntes.

### 7.7.3 Resultados

Na Figura 7.47 mostra-se a envolvente obtida para os dois primeiros vãos da estrutura, onde se sobrepõe o registo experimental com os respectivos limites considerados. Alguns detalhes particulares, destacando os ciclos diários e a respectiva envolvente para um período de 15 dias representativos, estão também presentes na Figura 7.48.

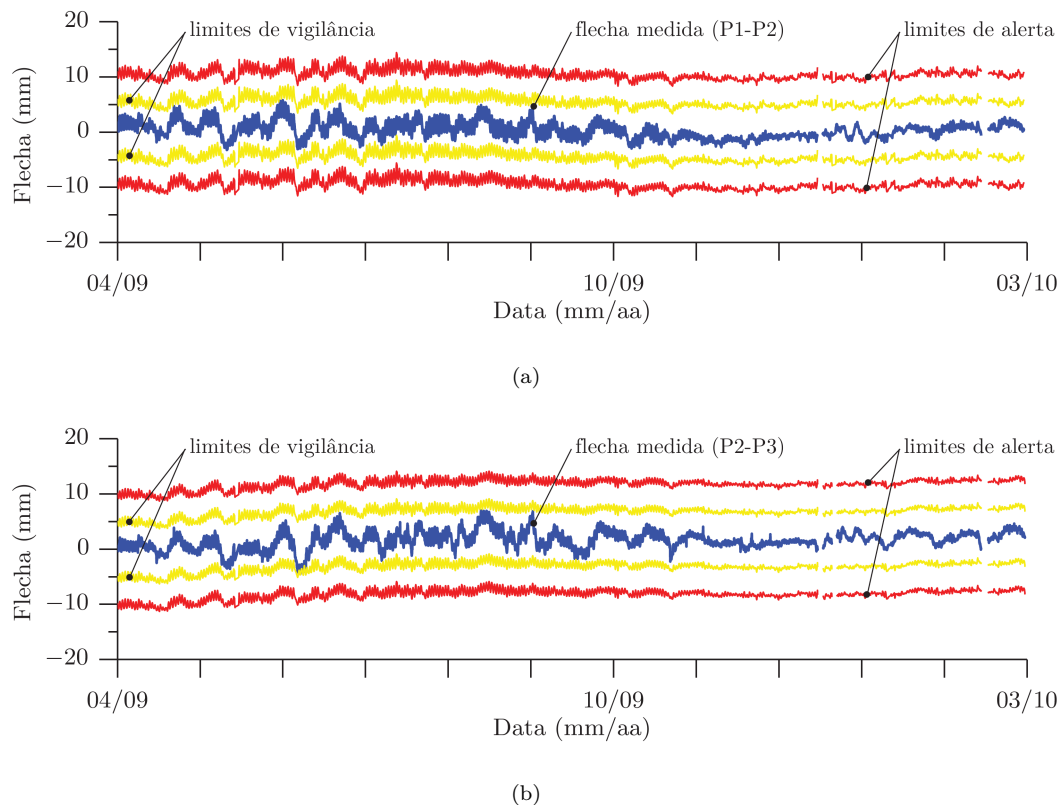


FIGURA 7.47: Representação dos limites obtidos a partir do modelo estatístico correspondentes às zonas de vigilância e alerta relativas a um ano de observação: a) flecha P1-P2; b) flecha P2-P3.

Do cômputo geral dos resultados obtidos, é assinalável a faculdade deste modelo estatístico se ajustar aos registos experimentais. Verifica-se que o modelo desenvolvido consegue representar de forma satisfatória quer os ciclos diários quer a tendência sazonal observada na estrutura. Os principais desvios obtidos estão contudo associados a

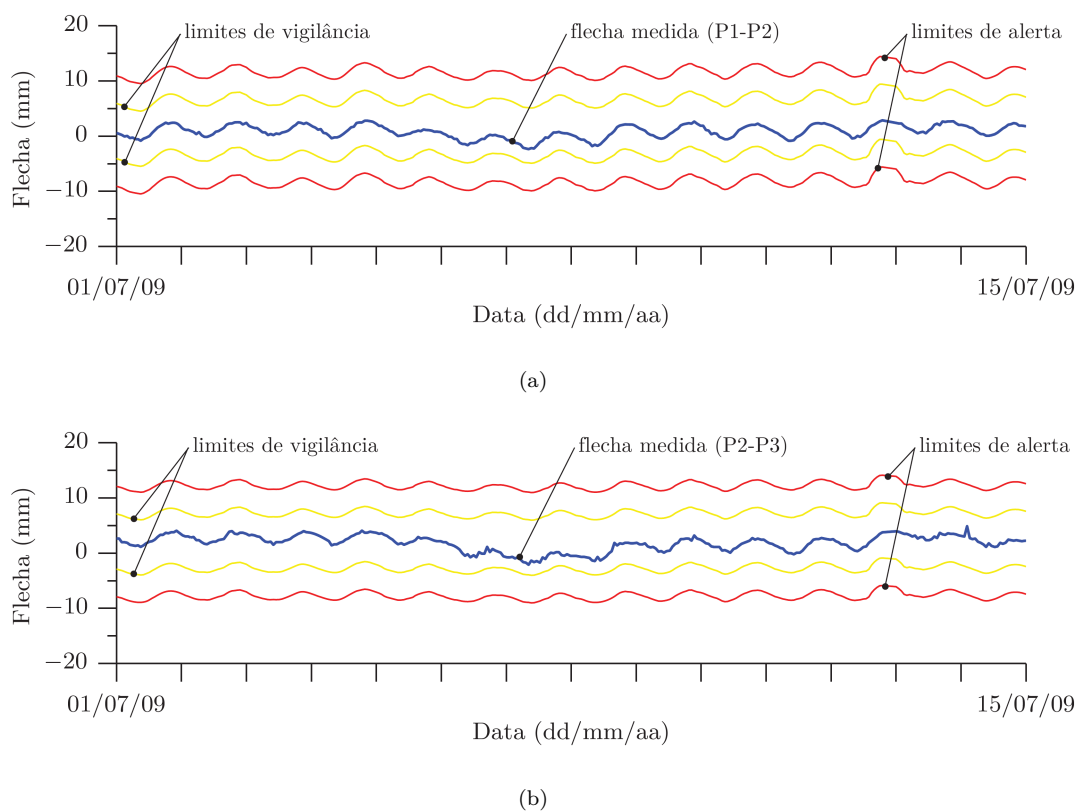


FIGURA 7.48: Pormenor com limites de vigilância e alerta para um período de 15 dias:  
a) flecha P1-P2; b) flecha P2-P3.

mudanças rápidas de temperatura e a dias de maior insolação. Esta última revela-se preponderante na definição da amplitude dos ciclos diários com dificuldade intrínseca do modelo na sua captação.

Fazendo um balanço dos dois anos e meio de exploração do sistema de monitorização, é pertinente fazer referência que até ao momento os referidos alarmes foram despoletados de forma muito esporádica. Os alarmes de vigilância foram activados em cerca de 2.5% dos dias contemplados, verificando-se a sua ocorrência sobretudo em dias de maior insolação. De forma consequente, os desvios observados foram rapidamente recuperados sem se justificar qualquer intervenção. Até ao momento, os limites de alerta estabelecidos nunca foram atingidos.

## 7.8 Considerações finais

Apresentou-se o sistema de monitorização de base óptica instalado na Ponte da Lezíria focando aspectos específicos associados à instrumentação estrutural baseada em sensores em fibra óptica, designadamente em redes de Bragg. O sistema apresentado permite

a medição contínua e automática de extensões médias, flechas e temperaturas. A integração dos transdutores desenvolvidos nos Capítulos 5 e 6 assumiu aqui um papel central.

São medidas as extensões estruturais ao nível das lajes superior e inferior do tabuleiro da ponte, em todos os meios vãos e junto às secções de apoio. Recorreu-se a pares de transdutores de deformação embebidos no betão localizados no seu alinhamento médio, seleccionando-se os transdutores de deformação N expostos no Capítulo 5.

As flechas estruturais, isto é, o deslocamento relativo de todos os vãos da ponte são igualmente medidos de forma automática. Adoptaram-se os transdutores desenvolvidos no Capítulo-6 para esse fim. Um circuito hidráulico percorrendo a ponte permite o estabelecimento de um referencial comum para determinação do deslocamento relativo. O nível de líquido nas secções dos pilares P2 e P7 foram utilizados como referência admitindo-se a sua imobilidade.

Complementarmente, foram instalados sensores de temperatura igualmente recorrendo a redes de Bragg para medição de temperaturas em pontos gerais da estrutura. Procedeu-se à medição da temperatura no interior do betão no banzo superior e no banzo inferior de quatro secções transversais representativas. Mediu-se ainda a temperatura ambiente no interior do caixão da ponte em duas secções próximas dos extremos.

Apresentou-se a arquitectura geral desta rede de sensores. Uma configuração em estrela, convergindo para o pilar P2, permite a ligação de todos os sensores a um único posto de observação centralizado. Recorreu-se a multiplexagem dos vários sensores em sete grupos distintos albergando, em cada grupo, conjuntos até 10 sensores de Bragg multiplexados em série. A condução longitudinal das fibras ópticas ocorre ao longo de um único cabo óptico integrando as várias fibras ópticas.

Referiram-se várias disposições práticas visando uma instalação de sucesso e procurando aumentar a longevidade e robustez de todo o sistema de monitorização. Refira-se a taxa de sucesso alcançada que permitiu que todos os sensores instalados durante a construção permanecessem, passados cerca de quatro anos, em perfeito funcionamento.

O desempenho dos transdutores previamente desenvolvidos foi mais uma vez validado e comprovado. Destaca-se a elevada estabilidade demonstrada na caracterização da resposta da estrutura correspondente a um período de exploração que ultrapassa já os dois anos.

Com este capítulo demonstrou-se a qualidade da tecnologia óptica evidenciando alguns dos seus aspectos mais relevantes. Salientam-se os seguintes aspectos:

- a capacidade de multiplexagem revelada na flexibilidade e ligeireza da rede de sensores;

- a estabilidade dos sensores, sendo um aspecto essencial para acompanhamento da resposta da estrutura a longo prazo;
- as elevadas frequências de resposta e aquisição que permitem a avaliação dos efeitos do tráfego corrente;
- a elevada resolução e o reduzido ruído que permite a avaliação dos efeitos dos veículos circulantes na ponte apesar da sua reduzida significância (em geral, inferior a  $15 \mu\epsilon$ )

No que concerne à monitorização permanente de carácter estritamente estático, mostrou-se o acompanhamento da evolução da deformada global da estrutura por medição directa de flechas a meio-vão. Apresentou-se ainda a evolução das extensões, curvaturas e temperaturas. Embora se considere que a análise detalhada do comportamento da estrutura ultrapassa o propósito desta dissertação, é de referir que os resultados apresentados estão em conformidade com o comportamento esperado para este tipo de estruturas. Estes resultados apresentam perfeita consistência e estão de acordo com os resultados do modelo numérico utilizado em projecto e que permitiu aqui aferir qualitativamente a resposta da estrutura induzida por variações de temperatura.

Com o sistema avançado de monitorização exposto, atendendo ao facto da frequência de aquisição poder ir até 500 Hz, demonstrou-se ser possível obter o traçado de linhas de influência quer de extensões quer de curvaturas, com a passagem de veículos em circulação normal. A exploração desta propriedade poderá permitir a avaliação regular da condição da estrutura através da caracterização da sua resposta perante a passagem de veículos de referência. A análise apresentada mostra ainda a possibilidade de poder ser avaliada a rigidez relativa dos diferentes vãos em condições de tráfego corrente.

Foi depois introduzida e implementada uma metodologia para acompanhamento automático do comportamento da estrutura baseada na definição de limites de vigilância e alerta. Expôs-se um modelo estatístico baseado na consideração dos efeitos da temperatura, diferencial e uniforme, e na variável tempo. Este modelo pretende ser de fácil implementação em qualquer ferramenta informática e demonstra ser suficientemente robusto para balizar o comportamento da estrutura em causa.

Os resultados obtidos demonstram a capacidade deste modelo representar o comportamento global da estrutura. A consideração da temperatura em pontos adicionais da estrutura, igualmente medidas, ou mesmo das extensões no betão também medidas e das curvaturas assim obtidas não foi aqui abordada. Contudo, refira-se que refinamentos a este modelo podem ser implementados em qualquer fase nomeadamente com a consideração de variáveis de entrada adicionais.

Foram apresentados dois limites correspondentes aos estados de vigilância e alerta. Para definição do estado de vigilância, são balizados os desvios admissíveis relativamente ao

modelo de previsão. Procurou-se limitar a sua ocorrência a situações muito esporádicas considerando o comportamento de referência da estrutura. Para definição do estado de alerta, considerou-se a previsão da deformada adicional da estrutura a tempo infinito resultante da análise numérica. Relativamente à previsão do modelo, limitou-se ainda o desvio admissível a uma banda da ordem da amplitude diária máxima observada durante o período de referência.

Em suma, espera-se que este sistema de monitorização estrutural venha a contribuir para prolongar a vida útil desta importante infra-estrutura rodoviária e sustentar a sua utilização otimizada em condições de máxima segurança e economia. O contributo dado pela tecnologia óptica é para já evidente. A avaliação da evolução da deformada da estrutura associada a técnicas avançadas de detecção de dano poderá, no futuro, vir a ser essencial para detectar avarias estruturais e antecipar eficientemente a sua reparação.



## Capítulo 8

# Considerações Finais

### 8.1 Enquadramento final

As estruturas da engenharia civil sejam elas pontes, túneis, barragens, edifícios, etc., são imprescindíveis nas sociedades actuais. Contudo, ao longo da sua vida útil, vão envelhecendo, os seus materiais vão sendo atacados por agentes químicos e físicos, começam a revelar danos e avarias, vão sofrendo acidentes, vão sendo solicitadas por acções cada vez mais severas. Os custos afectos à manutenção e reforço do parque construído são cada vez mais pesados e urge encontrar formas mais eficientes e racionais de realizar a sua gestão.

Para uma gestão mais eficiente do parque construído, a permanente recolha de informação específica sobre o estado efectivo das estruturas revela ser fundamental. Só assim pode ser racionalmente avaliada a condição das obras, traçado o seu diagnóstico e projectadas, em consonância, as intervenções necessárias. Ultrapassando as inspecções periódicas, a monitorização estrutural vem incrementar o nível de vigilância sobre as estruturas, sendo capaz de fornecer informação contínua e permanente sobre o comportamento efectivo da estrutura, logo sobre a sua condição e segurança.

O desenvolvimento de sistemas de monitorização estrutural tem sido objecto de estudo de uma grande variedade de autores, grupos e indústrias. Os avanços tecnológicos têm permitido um melhoramento contínuo do desempenho da monitorização estrutural, fomentando a sua proliferação e aumentando a confiança nela depositada. Hoje em dia, os sistemas de monitorização permitem o acompanhamento das principais componentes da resposta da estrutura e das acções que lhe dão origem de uma forma totalmente autónoma e automática. Associados a meios de comunicação, disponibilizam, remotamente, a respectiva informação, permitindo às entidades técnicas competentes ter acesso, em tempo real, a um diagnóstico permanente da integridade da estrutura.

Do ponto de vista tecnológico, a instrumentação estrutural foi dominada durante muitos anos pelos sensores de natureza eléctrica. Destaca-se a importância dos extensómetros de resistência eléctrica, dos extensómetros de cordas vibrantes, das células de carga extensométricas, dos LVDT, dos PT100, entre muitos outros utilizados na medição das mais diversas grandezas estruturais ao longo de mais de 50 anos. O conhecimento das potencialidades das tecnologias eléctricas convencionais e a sua aplicação na engenharia civil está neste momento bem sedimentado, testado e validado.

Ao longo das últimas três décadas, várias tecnologias começaram a ser abordadas para avaliação de diferentes grandezas com recurso à medição de variações nas propriedades da luz transportada nas fibras ópticas. Demonstra-se a sua relação com a intensidade, a frequência, o comprimento de onda, a fase ou a polaridade da luz. Os sensores em fibra óptica têm então demonstrado excelentes atributos para a medição de parâmetros mecânicos, físicos e químicos. Do ponto de vista metrológico, sublinha-se a sua elevada estabilidade, precisão e resolução. Do ponto de vista da durabilidade, distingue-se o facto de serem constituídos por um material não corrosível e quimicamente estável. Para aplicações em campo, torna-se relevante o facto de apresentarem total imunidade a interferências electromagnéticas, o que resulta na prática na total ausência de ruído eléctrico, bem como o facto de permitirem a transmissão do sinal ao longo de grandes distâncias sem qualquer degradação ou interferência.

A aplicação dos sensores em fibra óptica na engenharia mecânica, aeroespacial e industrial tem crescido de forma acelerada. A sua entrada na monitorização das estruturas da engenharia civil é ainda um tema emergente. As exigências são únicas devido às grandezas que se pretendem medir, às condições da sua instalação e ao ambiente onde ficam inseridas. Torna-se premente a melhoria da tecnologia óptica de forma a melhor se ajustar os requisitos específicos da monitorização das estruturas de engenharia civil. Exige-se uma aplicação mais expedita, robusta, versátil e eficiente.

Nesta dissertação abordaram-se diversos aspectos relacionados com o desenvolvimento, teste e aplicação de soluções em fibra óptica na engenharia civil. Procurou-se combinar conhecimentos técnicos específicos da tecnologia dos sensores em fibra óptica com valências em torno da engenharia civil e, em particular, no que se relaciona com o comportamento das estruturas.

No término desta dissertação, fazendo um enquadramento com os objectivos estabelecidos no Capítulo 1 considera-se que todos os objectivos inicialmente propostos foram claramente atingidos, nomeadamente:

1. Foi realizado um estado da arte das tecnologias em fibra óptica visando a sua aplicação na monitorização estrutural. Identificaram-se as técnicas, as metodologias, os equipamentos e os dispositivos mais apropriados para esse fim (Capítulo 2, 3 e 4);

2. Desenvolveram-se novas soluções, baseadas em sensores ópticos com características de robustez e de durabilidade ajustadas aos principais requisitos colocados pela engenharia civil. Alcançaram-se soluções mais fiáveis, robustas e economicamente mais competitivas do que as disponíveis no mercado (Capítulo 5 e 6);
3. Compilou-se um conjunto de técnicas, procedimentos e especificações que podem ser encarados como um manual de boas práticas no que concerne à instalação e exploração de sensores em fibra óptica nas obras de engenharia civil. Ilustraram-se esses procedimentos em três casos práticos (Capítulos 3, 4 e 7);
4. Integraram-se diferentes sensores em redes de sensores capazes de proceder de forma combinada à avaliação do comportamento das estruturas. Procurou-se tirar partido das vantagens e valências da fibra óptica estabelecendo novos procedimentos. Conseguiu-se incrementar o desempenho e a fiabilidade dos sistemas de monitorização (Capítulo 7);
5. Explorou-se um sistema de monitorização aplicado a um caso real. Abordou-se não só a apresentação estrita dos resultados da monitorização, mas também a sua compreensão e análise do ponto de vista do comportamento da estrutura (Capítulo 7).

Ao longo da próxima secção faz-se então um resumo das principais conclusões deste trabalho.

## 8.2 Conclusões

Nos **Capítulos 1 e 2**, introduziu-se o tema central desta dissertação. Começou-se por contextualizar e destacar a importância da monitorização estrutural e o processo para a sua implementação. Introduziu-se, com particular detalhe, a tecnologia óptica e especificamente os tipos de sensores mais comuns na monitorização estrutural. Utilizou-se uma abordagem que se procurou que fosse conceptualmente acessível à engenharia civil. Ainda neste preâmbulo introdutório, foram identificados os principais constituintes de uma rede de sensores em fibra óptica e especificadas as suas principais características técnicas.

Ao longo do **Capítulo 3** abordou-se a aplicação de sensores de Bragg para medição de extensões em estruturas metálicas. Desenvolveu-se este estudo em torno das soluções para colagem superficial, abordando três soluções comerciais distintas para as quais se desenvolveu uma técnica expedita de instalação. Recorreu-se a várias análises numéricas e experimentais com vista à avaliação efectiva do desempenho destes sensores. No cômputo geral pode concluir-se que:

- O desenvolvimento de um modelo numérico simples, baseado numa formulação de elementos finitos de volume, permitiu avaliar diferentes aspectos relacionados com a eficiência da transmissão de extensões para o elemento sensor. Analisaram-se as características do *recoatings* da fibra, do comprimento de colagem, da espessura e da rigidez do adesivo;
- Dos tipos de *recoatings* mais comuns analisados, as fibras com revestimento de poliamida foram aquelas que revelam melhores resultados em termos da correcta transmissão da extensão ao núcleo da fibra devido à superior rigidez da camada de protecção primária;
- Verificou-se que a eficiência do sensor depende da configuração geométrica da colagem. Demonstrou-se a necessidade de colar o sensor não só ao longo do seu comprimento estrito, mas prolongando-se criteriosamente para além do seu limite. De igual forma, deve ser minimizada a espessura de adesivo sob o sensor;
- O desempenho do sensor depende também, em peso equivalente, das características do adesivo usado na instalação. A partir do estudo realizado recomenda-se a adopção de adesivos com módulos de elasticidade superiores a 4 GPa. Quanto mais elevada a rigidez do adesivo, melhor se processa a transmissão da extensão mecânica até ao núcleo da fibra;
- Outros aspectos devem no entanto ser tidos em conta na selecção do adesivo. O seu coeficiente de dilatação térmica deve ser tão próximo quanto possível do coeficiente do respectivo material estrutural a fim de evitar elevadas tensões internas. Deve ainda ser avaliada a sua resistência ao corte, a capacidade de resistir às diferentes solicitações químicas e ambientais, a durabilidade, o tempo de cura, assim como a sua elevada estabilidade ao longo do tempo com reduzida fluência e retracção;
- Analisou-se, através de vários testes laboratoriais, a resolução, precisão, linearidade, erro de medição, fadiga e resposta dinâmica dos sensores de Bragg. Neste estudo comparou-se o desempenho de dois adesivos distintos, utilizando uma resina epóxi e um adesivo à base de cianoacrilato;
- Destaca-se a repetibilidade obtida em termos de sensibilidade à deformação num conjunto de 20 sensores ensaiados com os dois adesivos visados. A sensibilidade média obtida foi de  $0.781 \pm 0.01 \times 10^{-6} \mu\epsilon^{-1}$  com uma dispersão de resultados inferior a 2 %. Obtiveram-se resultados idênticos com os dois adesivos testados;
- Relativamente às variações de temperatura, a sensibilidade média dos sensores colados em provetes de aço fixou-se em torno dos  $15.31 \pm 1.28 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ . O adesivo de cianoacrilato foi, neste caso, aquele que revelou um comportamento mais uniforme patente na maior repetibilidade alcançada nos diversos sensores testados;

- Os resultados obtidos alertam para a elevada sensibilidade à temperatura deste tipo de sensores, nomeadamente quando instalados em elementos metálicos. Ficou vincada a necessidade de compensar os efeitos térmicos sempre que ocorram variações de temperatura com significado;
- As técnicas de instalação desenvolvidas revelaram ser mais eficientes do que as recomendações presentes na bibliografia, sublinhando-se a simplicidade de processos, a taxa de sucesso da instalação e o desempenho final dos sensores.

Apresentou-se, posteriormente, a monitorização realizada sobre a Ponte Eiffel, onde foram instalados um total de 80 sensores de Bragg durante a sua reabilitação e reforço. Realizaram-se campanhas de monitorização em diferentes fases da empreitada, nomeadamente antes do início da reabilitação, durante as fases mais críticas que se seguiram, durante um ensaio de carga final e, posteriormente, durante a reabilitação do piso rodoviário. Deste caso de estudo pode concluir-se que:

- Foi possível demonstrar a viabilidade e a utilidade prática da metodologia e das técnicas desenvolvidas num contexto real;
- A imunidade a interferências electromagnéticas, a ausência de ruído eléctrico, as elevadas frequências de aquisição, assim como a existência de um referencial absoluto associado ao comprimento de onda da luz reflectida revelaram ser aspectos determinantes nesta aplicação. Estima-se que com recurso a extensómetros de resistência eléctrica não se poderiam alcançar desempenhos equivalentes, neste tipo de aplicação;
- A capacidade de multiplexar em série, múltiplos sensores, ao longo de uma fibra comum foi também um aspecto determinante nesta aplicação de curta-duração. Pretendia-se, acima de tudo, grande simplicidade e versatilidade na instalação;
- A qualidade dos resultados obtidos foi excelente não só do ponto de vista metrológico, mas também na utilidade que revelaram no auxílio prático ao reforço estrutural;
- As soluções apontadas revelaram ser técnica e economicamente vantajosas;
- A utilidade deste tipo de monitorização, intervindo durante a reabilitação e reforço estrutural, é assinalável e, neste caso, reconhecida pelo dono de obra, projectista e construtor.

No **Capítulo 4** abordou-se a medição de deformações médias visando a avaliação do comportamento global das estruturas. Destacou-se a natureza heterogénea de alguns materiais, bem como diversos constrangimentos geométricos que perturbam, de forma

natural, os campos de extensões mecânicas levando a concentrações de extensões significativas. Neste contexto e no que se relaciona com a monitorização estrutural, onde importa conhecer o comportamento global de uma estrutura mais do que a distribuição local de extensões, salienta-se a adequação dos sensores de deformação com base longa de medida.

Apresentou-se um estudo laboratorial, contemplando uma campanha de ensaios que permitiram validar, quantificar e comparar o desempenho de diferentes sensores de deformação de base longa de medida. Foram analisadas sete soluções existentes no mercado, com aplicação alternativa, baseados em princípios de medição distintos, englobando uma rede de Bragg, um interferómetro de Fabry-Perot, dois interferómetros de Michelson, dois sensores baseados no espalhamento de Brillouin e um sensor convencional baseado numa corda vibrante. No geral pode concluir-se que:

- Avaliaram-se quatro importantes características metrológicas: a exactidão dos sistemas, a precisão dos sistemas, a sensibilidade à temperatura das unidades de leitura e, por último, a sensibilidade à temperatura do conjunto constituído pelos sensores e pelas respectivas unidades de leitura. Os resultados obtidos estão resumidos nas Tabelas 8.1 e 8.2.

TABELA 8.1: Comparação do desempenho dos transdutores de deformação de base longa de medida (1/2).

	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>
Sensor	SOFO	SOFO	MuST	FOD
Unidade leitura	SOFO VI	MuST Light	MuST Light	UMI-4
Erro declive [%]	-1.6	-1.7	5.7	-0.4
RMSE [ $\mu\epsilon$ ]	9.3	6.2	9.7	35.9
Repetibilidade [ $\mu\epsilon$ ]	1.4	0.2	0.5	0.6
Erro medição [ $\mu\epsilon$ ]	$\pm 2.1$	$\pm 0.5$	$\pm 0.9$	$\pm 1.0$
S. temp.:UL-RMSE [ $\mu\epsilon$ ]	2.6	0.2	0.6	2
S. temp.:S [ $\mu\epsilon/^\circ\text{C}$ ]	N/A	N/A	10.8	-12.2

- No geral, todas as soluções exibiram um comportamento adequado para a monitorização estrutural, respondendo muito satisfatoriamente às especificações necessárias para aplicações em campo;
- Considera-se porém que, de forma a aumentar a exactidão das medições, deveriam ser adoptados, pelos fabricantes, procedimentos mais rigorosos de calibração tanto no que se relaciona com a medição directa da deformação, como no que diz respeito à compensação dos efeitos cruzados da temperatura. As dependências lineares evidenciadas na resposta dos sensores, tanto à deformação, como à temperatura, demonstram que esta melhoria seria possível e relativamente simples de

TABELA 8.2: Comparação do desempenho dos transdutores de deformação de base longa de medida (2/2).

	<b>E</b>	<b>F</b>	<b>G</b>
Sensor	VW-JM	SMART profile	SMART Tape
Unidade leitura	AVW 200	DiTeSt	DiTeSt
Erro declive [%]	4.9	2.7	-1.6
RMSE [ $\mu\epsilon$ ]	22.5	31.4	35.5
Repetibilidade [ $\mu\epsilon$ ]	0	13.9	N/A
Erro medição [ $\mu\epsilon$ ]	$\pm 0.1$	$\pm 28.6$	N/A
S. temp.:UL-RMSE [ $\mu\epsilon$ ]	N/A	18.9	N/A
S. temp.:S [ $\mu\epsilon/^\circ\text{C}$ ]	-18.7	18.1	20.6

ser processada. Face às deficiências encontradas e na ausência de regulamentação e controlo sobre as especificações dos fabricantes, recomenda-se, ao utilizador, a calibração dos sensores antes da sua instalação em obra;

- Relativamente aos sistemas SOFO, baseado no interferómetro de Michelson, destaca-se a sua aptidão intrínseca para medição de deformações integradas, bem como a imunidade a variações de temperatura, a elevada precisão e a facilidade de instalação tanto de configurações embebidas como fixadas externamente. As limitações do sistema testado prendem-se com o facto de só possibilitarem aquisições estáticas e pelas reduzidas aptidões em termos de multiplexagem;
- No que concerne ao sistema MuST, baseado na tecnologia de Bragg, salienta-se a sua elevada resolução, assim como a sua versatilidade relativamente a esquemas de multiplexagem em série. Tal como a solução anterior, sublinha-se a facilidade de instalação. As limitações prendem-se agora com a elevada sensibilidade a variações de temperatura;
- Relativamente ao sistema FOD, integrando um interferómetro extrínseco de Fabry-Perot, evidencia-se o custo reduzido das unidades de leitura e a elevada resolução demonstrada. No entanto, a solução testada, limitada a aplicações externas, está concebida para medição de deslocamentos relativos, implicando algumas adaptações para medição de deformações. Esta configuração acabou por revelar um desempenho deficiente com sinais de histerese;
- Os sensores distribuídos, representados pelas soluções SMARTprofile e SMARTape, baseados no fenómeno de espalhamento de Brillouin tornam possível a medição de perfis de deformação de uma forma praticamente contínua ao longo de comprimentos de podem chegar a 50 km. O SMARTprofile revela ser a solução mais evoluída permitindo a medição simultânea de deformação e temperatura através de um conjunto de quatro fibras distintas, sendo igualmente de assinalar a sua robustez para instalação em obra. Sobre estes sistemas, faz-se, no entanto, notar a sua baixa

exactidão, nomeadamente quando comparada com todas as outras anteriores, bem como é de realçar o elevado custo das unidades de leitura;

- A selecção da solução mais adequada para um determinado projecto deve ser um aspecto a ponderar de forma integrada. Do ponto de vista metrológico, os indicadores apresentados podem ser determinantes. Chama-se também a atenção para outros aspectos não menos relevantes, tais como a gama de bases de medida disponível, o campo de medida, as respectivas temperaturas de funcionamento tanto dos sensores como das unidades de leitura, bem como alguns aspectos mais subjectivos, tais como a facilidade de instalação e o custo do sistema.

Na parte final deste capítulo, demonstrou-se o sucesso da aplicação de uma monitorização estrutural baseada essencialmente em sensores de deformação de base longa de medida. Apresentou-se o caso da Ponte Ricciolo, uma ponte curva em betão armado pré-esforçado com secção transversal em caixão, servindo a Auto-Estrada A2 em Lugano, na Suíça. Deste caso prático, concluiu-se que:

- Os principais efeitos estruturais, designadamente os momentos flectores, o esforço transversal e a torção podem ser convenientemente quantificados com base exclusiva nos resultados dos transdutores de deformação de base longa de medição;
- Torna-se possível traçar deformadas da estrutura, por dupla integração do diagrama de curvaturas médias obtidas experimentalmente;
- Ficou patente a sensibilidade desta metodologia em detectar diferentes solicitações na estrutura, revelada durante a aplicação do pré-esforço, retirada do cimbri e construção das guardas e separadores;
- Considera-se que a metodologia apresentada representa uma base sustentada, facilmente extensível a outras estruturas de tipologia idêntica.

No **Capítulo 5** abordou-se o desenvolvimento de novos transdutores para embeber no betão. Criaram-se novas soluções, comparáveis em termos de desempenho às melhores soluções existentes no mercado, mas visando soluções mais robustas, mais fáceis de instalar e mais económicas.

Conceberam-se duas versões relativas a dois transdutores baseados na instrumentação de um corpo maciço em aço inox maciço com sensores de Bragg. Fez-se variar o princípio de funcionamento dos dois transdutores apresentados criando diferentes condições de aderência. Neste âmbito, apresentou-se o designado transdutor L baseado num corpo liso isento de aderência com o betão, sendo a compatibilização realizada através de duas cabeças de ancoragem extremas. Simultaneamente, concebeu-se uma segunda solução, designada por transdutor N, baseada num corpo semelhante, mas aderente ao betão através de uma rosca de profundidade crescente gravada ao longo do corpo do transdutor.

Avaliou-se o comportamento conjunto destas soluções em vários ensaios laboratoriais, apontando para a comparação do desempenho de cada solução. Neste âmbito, apresentaram-se ensaios de calibração de tracção pura com os transdutores isolados, ensaios de compressão pura com os transdutores embebidos num prisma de betão, um ensaio de aderência em flexão e um ensaio final com os diferentes transdutores instalados numa viga de betão armado ensaiada à flexão com fendilhação induzida. Do conjunto de ensaios realizados pode concluir-se que:

- Foi obtida uma excelente linearidade e repetibilidade da resposta destes transdutores revelada nos ensaios de calibração. Neste particular, o desvio observado entre a calibração apresentada e a sensibilidade teórica foi inferior a 0.3%;
- Constatou-se uma excelente repetibilidade entre diferentes transdutores calibrados que, numa amostra ensaiada de cerca de 50 transdutores, apresentou uma dispersão inferior a  $\pm 1.5\%$ ;
- Ensaios realizados com os transdutores no interior de um prisma de betão permitiram também validar a capacidade de transdução da deformação efectivamente presente no betão. Apesar da dimensão limitada do provete, os resultados obtidos aproximaram-se de forma considerável dos resultados obtidos com instrumentação de referência externa e do extensómetro de cordas vibrantes disposto no centro do prisma de betão, justificando-se os desvios obtidos também à luz de uma análise numérica do provete;
- Avaliando o comportamento do transdutor N numa ensaio de aderência à flexão comprovou-se a sua aderência controlada e inerentemente a capacidade deste transdutor acomodar fendilhação significativa dentro do seu campo de medida sem plastificação localizada;
- Ensaios realizados em duas vigas de betão armado permitiram validar as soluções desenvolvidas respondendo a um dos requisitos iniciais relacionado com a influência da fendilhação;
- Constatou-se que a aderência entre o corpo do transdutor e o betão influencia o comportamento dos referidos sensores aquando do surgimento da fendilhação. Ligeiras diferenças foram obtidas confrontando os resultados dos transdutores não-aderentes com aqueles providos de aderência;
- Com o betão fendilhado, verificou-se que os transdutores lisos, sem aderência, revelam melhores resultados para a caracterização da deformação média. Das soluções propostas, o transdutor L com a aderência destruída, foi aquele que revelou um desempenho mais consistente na caracterização do betão fendilhado, tendo-se aproximado do comportamento médio pretendido ao longo de todo o ensaio.

Os resultados obtidos foram ainda cruzados e comprovados com base numa modelação numérica com recurso a um modelo de elementos finitos simulando os diferentes fenómenos de fendilhação do betão. Os resultados atingidos demonstram a concordância entre os resultados experimentais e os resultados numéricos, permitindo validar os resultados alcançados com os transdutores desenvolvidos.

Ao longo do **Capítulo 6** apresentou-se o desenvolvimento de um transdutor baseado em sensores em fibra óptica, mais concretamente em sensores de Bragg, para medição de flechas em pontes com recurso a níveis líquidos. Abordou-se, com particular detalhe, o princípio do funcionamento do transdutor, os aspectos inovadores e a sua arquitectura interna. Descreveu-se o princípio inovador do transdutor, baseado no princípio de Arquimedes, e disposição dos elementos sensores que o torna insensível a variações de temperatura.

Procedeu-se ao desenvolvimento de um conjunto de protótipos, desenhados para um campo de medida de 200 mm e resolução máxima dentro desse mesmo campo. De modo a avaliar o desempenho destes protótipos, foi realizada uma campanha de ensaios laboratoriais procurando cobrir as características metrológicas mais relevantes do transdutor com vista a aplicações reais no domínio da monitorização estrutural.

Sobre os resultados alcançados isolando diferentes variáveis em ambiente laboratorial, concluiu-se que:

- Foram obtidas as características metrológicas resumidas na Tabela 8.3;

TABELA 8.3: Resumos das principais características do transdutor

<b>Característica</b>	<b>Resultado</b>
Resolução	0.05 mm
Precisão	
<i>amplitude</i>	$\pm 0.017$ mm
<i>desvio padrão</i>	0.073 mm
Erro de medição	
<i>absoluto</i>	$\pm 0.20$ mm
<i>relativo</i>	0.2 % FS
Compensação da temperatura	
<i>erro de medição</i>	$\pm 0.50$ mm
Estabilidade	
<i>desvio padrão</i>	0.054 mm

- Os transdutores desenvolvidos revelam linearidade e repetibilidade excelentes na medição de um conjunto de deslocamentos verticais em condições controladas de temperatura e humidade;

- Obteve-se uma sensibilidade aproximada de 5.4 pm/mm em cada sensor de Bragg, uma resolução de 0.05 mm e um erro de medição inferior a 0.20% do respectivo campo de medida;
- Através de ciclos de humidade e temperatura, comprovou-se a eficiência do método de auto-compensação dos efeitos térmicos proposto. Os resultados obtidos revelaram um erro máximo de medição de  $\pm 0.2$  mm na realização de um conjunto de ciclos com a temperatura a variar entre 0 e 30 °C com tratamento exclusivo do sinal dos dois sensores de Bragg do transdutor;
- Ensaaios de estabilidade ao longo de 72 horas revelaram um desvio-padrão inferior a 0.054 mm

O potencial do presente transdutor para ser integrado na monitorização estrutural foi validado e preliminarmente caracterizado com resultados muito positivos. Entende-se que o transdutor desenvolvido representa já um importante contributo para a medição de flechas em pontes. Este transdutor é uma forma suficientemente exacta para a grande maioria das aplicações, apresentando um rigor bastante superior às alternativas topográficas e aos meios GNSS actualmente disponíveis.

Este transdutor destaca-se ainda dos demais pela facilidade de instalação na maioria das condições presentes nas estruturas de engenharia civil e pelo seu custo de instalação e manutenção significativamente reduzido. Segundo se conhece é também o único transdutor que permite a medição directa de flechas baseado em sensores de Bragg.

No **Capítulo 7**, apresentou-se o sistema de monitorização de base óptica instalado na Ponte da Lezíria focando aspectos específicos associados à instrumentação estrutural baseada em sensores em fibra óptica, designadamente em redes de Bragg. A integração dos transdutores desenvolvidos nos Capítulos 5 e 6 assumiu aqui um papel central.

Com o sistema apresentado são monitorizadas de forma permanente:

- i) extensões estruturais ao nível das lajes superior e inferior do tabuleiro da ponte, em todos os meio-vãos e junto às secções de apoio;
- ii) flechas estruturais em todos os meio-vãos da ponte;
- iii) temperaturas em pontos representativos da estrutura.

Apresentou-se a arquitectura geral desta rede de sensores. Uma estrutura em estrela, centrada sobre o pilar P2, permite a ligação multiplexada de todos os sensores a um único posto de observação centralizado. Recorreu-se à multiplexagem dos vários sensores em sete grupos distintos albergando, em cada grupo, conjuntos até 10 sensores de Bragg multiplexados em série. A condução longitudinal das fibras ópticas foi realizada

através de um único cabo óptico integrando 16 fibras ópticas. Destaca-se a economia do comprimento do cabo e a simplicidade da instalação.

Com este capítulo demonstrou-se a qualidade da tecnologia óptica evidenciando alguns dos seus aspectos mais relevantes. Salienta-se:

- A capacidade de multiplexagem revelada na flexibilidade e ligeireza da rede de sensores;
- A estabilidade dos sensores, sendo um aspecto essencial para acompanhamento da resposta da estrutura a longo prazo;
- As elevadas frequências de resposta e aquisição que permitem a avaliação dos efeitos do tráfego corrente;
- A elevada resolução e o reduzido ruído que permite a avaliação dos efeitos dos veículos circulantes na ponte apesar da sua reduzida magnitude (em geral, inferior a  $15 \mu\epsilon$ );

Revelaram-se várias disposições práticas visando uma instalação de sucesso e procurando ao máximo fomentar a longevidade e robustez de todo o sistema de monitorização. Refira-se a taxa de sucesso alcançada que permitiu que todos os sensores instalados durante a construção permaneçam, passados cerca de quatro anos, em perfeito funcionamento.

No que concerne à monitorização permanente de carácter estritamente estático, mostrou-se o acompanhamento da evolução da deformada global da estrutura por medição directa de flechas a meio-vão. Apresentou-se ainda a evolução das extensões, curvaturas e temperaturas. Do conjunto de resultados exposto, conclui-se que:

- A correlação entre estas diferentes grandezas demonstra de igual forma ser um indicador robusto relativamente à condição da estrutura;
- A avaliação da evolução da deformada da estrutura associada a técnicas avançadas de detecção de dano deverá, no futuro, vir a ser essencial para detectar alterações no comportamento diferido da estrutura;
- O desempenho dos transdutores previamente desenvolvidos foi mais uma vez validado e comprovado. Destaca-se a sua elevada estabilidade demonstrada na caracterização da resposta da estrutura, num período de exploração que ultrapassa já os dois anos.

Com o sistema avançado de monitorização exposto, atendendo ao facto da frequência de aquisição poder ir até 500 Hz, demonstrou-se ainda ser possível:

- O traçado de linhas de influência quer de extensões quer de curvaturas, com a passagem de veículos em circulação normal;
- Caracterizar os efeitos do tráfego rodoviário sobre a estrutura, nomeadamente pela quantificação dos ciclos de extensão e sua amplitude;
- Caracterizar o próprio tráfego rodoviário, designadamente a sua velocidade, sentido de circulação e potencialmente o seu peso;
- Avaliar a rigidez relativa dos diferentes vão em condições de tráfego corrente de forma a detectar alterações de rigidez associadas a eventuais avarias;
- Avaliar regularmente a condição da estrutura através da caracterização da sua resposta perante a passagem de veículos de referência, com peso e dimensão conhecidos;

Espera-se que este sistema de monitorização estrutural venha a contribuir para prolongar a vida útil desta importante infra-estrutura rodoviária e sustentar a sua utilização em condições óptimas de segurança e de economia. O contributo dado pela tecnologia óptica é para já evidente.

No que diz respeito ao trabalho realizado, vários testes de validação complementares e instalações adicionais foram realizados para consolidar o conhecimento desta tecnologia. Embora não estejam aqui directamente representados, os resultados obtidos na Casa da Música no Porto (Rodrigues e Figueiras, 2009), na Ponte Ferroviária de Trezói (Dimande et al., 2008; Costa et al., 2009) e mais recentemente na nova Ponte sobre o Rio Corgo foram igualmente positivos e encorajadores.

Em suma, destaca-se a viabilidade técnica patente nos sensores em fibra óptica. Muitas das suas vantagens vieram abrir e vão continuar a abrir novos horizontes na monitorização estrutural. O seu desempenho ficou retratado neste estudo. A viabilidade económica é também já uma realidade. Importa referir que entre o tempo que medeia o início deste trabalho e a sua conclusão, alguns dos principais equipamentos, nomeadamente as unidades de leitura, viram o seu preço reduzido a metade. Com a grande flexibilidade e capacidade de multiplexagem facilmente se encontram vantagens económicas nos sistemas de monitorização em fibra óptica.

Por tudo que foi aqui apresentado, espera-se a muito breve prazo uma rápida expansão da tecnologia da fibra óptica na monitorização estrutural. As suas potencialidades são únicas e tecnicamente apelativas. O seu futuro é promissor e pensa-se que venha a assumir uma importância única no seio dos sistemas de monitorização estrutural.

### 8.3 Sugestões para desenvolvimentos futuros

Por tudo que foi aqui dito, não restam dúvidas de que a fibra óptica terá um papel de destaque na monitorização das estruturas da engenharia civil. Prevê-se que continuarão a aparecer novas tecnologias, novos produtos, novos equipamentos e novos dispositivos com características cada vez mais adequadas para o fim proposto. Os seus custos serão cada vez mais competitivos acompanhando a massificação e optimização desta tecnologia. Exige-se por isso um acompanhamento estreito da sua evolução a fim de antecipar e optimizar a sua utilidade para a engenharia civil.

Relativamente aos transdutores desenvolvidos, designadamente para medir deformação no betão e para medir flechas em pontes, segue-se a sua adaptação para exploração comercial. As soluções apresentadas estão validadas e os resultados obtidos até ao momento são bastante positivos. Pensa-se que haverá lugar no mercado para as soluções apresentadas. Para exploração comercial, o processo de fabrico dos transdutores necessita contudo de ser optimizado e sistematizado. Alguns detalhes podem ainda ser melhorados com vista à instalação e exploração dos transdutores por terceiros, incluindo simplificações ao nível da montagem, transporte e ligação. A compilação das características técnicas dos transdutores precisa também de ser apresentada num formato mais comercial.

O desenvolvimento, teste e validação de novos transdutores para aplicação específica na engenharia civil continuará também a ser perseguido. Haverá lugar para a exploração de soluções vocacionadas para a medição de grandezas diversas daquelas aqui apresentadas. A título de exemplo, considera-se que o estado da arte carece de soluções válidas para medir rotações, acelerações, deslocamentos, pressão e força entre outras grandezas há muito resolvidas pela instrumentação convencional. Novos transdutores e novas técnicas de medição terão de ser desenvolvidas e exploradas para aumentar o número de soluções válidas. Competirá sempre aos engenheiros civis definir os requisitos e validar as novas soluções.

Um novo mundo começa também a emergir com os sensores em fibra óptica, sem paralelo na instrumentação convencional. Refere-se os sensores distribuídos de Brillouin e Raman introduzidos e testados neste trabalho. Apesar da perspectiva da sua utilidade ser muito promissora e merecer a atenção de toda a comunidade, a sua exploração efectiva é ainda escassa. Pensa-se contudo que se poderá estar perante uma nova forma de projectar a monitorização estrutural, conferindo-lhe uma dimensão muito mais extensa e global para avaliação do comportamento estrutural e para a detecção e localização de danos. Será necessário acompanhar de perto os avanços desta tecnologia que se espera que venham a aumentar em muito o desempenho destes sensores e diminuir os respectivos custos.

Num outro nível, a instalação de redes de sensores em fibra óptica foi um assunto sempre presente neste trabalho. Apesar dos avanços alcançados, este continua a ser

um processo crítico e delicado acarretando requisitos técnicos bastante acima daqueles encontrados na tecnologia eléctrica. Os avanços na indústria da fibra óptica apontam para novas soluções com menores perdas de luz e insensíveis curvaturas apertadas sobre as quais será necessário estar atento. Os processos para a realização de emendas em obra terão também de ser mais expeditos no futuro com conectores mais eficientes e com equipamentos de fusão mais acessíveis. Pretende-se continuar a melhorar todo o processo de instalação de forma a tornar esta tecnologia perfeitamente acessível a qualquer instalador mais indiferenciado.

Ultrapassando a questão dos meios de medição, a realização de ferramentas de pré-processamento precisa ainda de ser otimizada. Fala-se, por exemplo, da automatização da recolha de dados, da filtragem e validação desses dados, da conversão de unidades e da filtragem dos efeitos ambientais. Neste trabalho desenvolveram-se ferramentas informáticas adequadas para este processo e procedeu-se à sua integração na Ponte da Lezíria. Contudo as aplicações desenvolvidas carecem de generalização para futuras aplicações. Torna-se ainda pertinente prever a sua combinação com outro tipo de instrumentação nomeadamente de natureza eléctrica. De igual forma, a construção de bases de dados devidamente organizadas revela ser fundamental para o acesso futuro a esses dados. A sua eficiência mostra ser crítica para toda a exploração que se segue e merece, por isso, ser completada.

No âmbito da análise de resultados, o desenvolvimento e exploração de modelos comportamentais é um tema também a desenvolver mais profundamente. Neste trabalho fez-se uma referência aos modelos estatísticos e à sua utilidade na previsão e balizamento do comportamento das estruturas. Noutra perspectiva, propõe-se agora uma via determinística com recurso a modelos numéricos de elementos finitos que não fez parte dos objectivos propostos para este trabalho. Assina-se no entanto a sua importância na perspectiva de se compreender o comportamento das estruturas e assim analisar integralmente os resultados da monitorização. Esta valência deverá, por isso, ser integrada nos próximos desenvolvimentos.

No desenvolvimento de modelos numéricos para avaliação da monitorização estrutural, torna-se necessário explorar e simular o comportamento dos materiais, nomeadamente no seu aspecto diferido, as condições de apoio reais, os processos construtivos, o pré-esforço e as respectivas perdas, o aparecimento de fendilhação e os eventuais danos presentes na estrutura, entre outros fenómenos específicos. As ferramentas de modulação não-linear com recurso a modelos de elementos finitos com comportamento visco-elástico revelam ser adequadas para esse fim. Torna-se, no entanto, necessário implementar técnicas para calibrar esses modelos de forma a poderem acompanhar os resultados experimentais. Os métodos de optimização aplicáveis são temas a explorar. Considera-se que somente com um modelo numérico bem calibrado será possível identificar racionalmente os limites comportamentais da estrutura e assim interpretar os resultados experimentais.

Integrado ainda na análise de resultados, a capacidade de detecção de danos estruturais é um assunto perfeitamente actual e em desenvolvimento na engenharia civil. A introdução dos sensores em fibra óptica aumenta a precisão dos sistemas de medição, diminuindo os respectivos erros, o que revela ser significativamente vantajoso para as técnicas de análise aplicáveis. A aplicação de técnicas de detecção e localização de danos nos casos em estudo apresentados será um tema a abordar num futuro breve.

A disponibilização de toda a informação dada pela monitorização estrutural de uma forma acessível, de fácil e rápida consulta e em tempo efectivo é o último tema proposto. Neste trabalho abordou-se já o desenvolvimento de uma página web para esse fim. Torna-se no entanto necessário dotá-la de indicadores mais eficientes com vista à consulta expedita do estado efectivo das estruturas. Pretende-se que numa consulta regular de poucos minutos, as entidades técnicas responsáveis consigam ter uma indicação clara do diagnóstico experimental realizado a todas as suas obras monitorizadas. O desenvolvimento de ferramentas e interfaces informáticos com integração de ferramentas informáticas específicas é, neste contexto, vital para aumentar o alcance e o impacto da monitorização estrutural.

## 8.4 Publicações

Termina-se esta dissertação com a listagem das principais publicações realizadas no âmbito deste trabalho:

### Patentes:

- RODRIGUES, C.; FÉLIX, C.; FIGUEIRAS, J. – **Transdutor para medição de deslocamentos verticais / Transducer for measuring vertical displacements**. Universidade do Porto, Instituto Politécnico do Porto. Patente Portuguesa PCT/PT2009/000058, 2009. Patente Internacional, WO/2010/053392, 2010.

### Artigos em revistas indexadas JCR:

- RODRIGUES, C.; FÉLIX, C.; LAGE, A.; FIGUEIRAS, J. – **Development of a long-term monitoring system based on FBG sensors applied to concrete bridges**. *Engineering Structures*. 32:8 (2010), p. 1993–2002.
- RODRIGUES, C.; FÉLIX, C.; FIGUEIRAS, J. – **Fiber-optic-based displacement transducer to measure bridge deflections**. *Structural Health Monitoring - International Journal*. 10:2 (2011), p. 147–156.

- RODRIGUES, C.; CAVADAS, F.; FÉLIX, C.; FIGUEIRAS, J. – **FBG based strain monitoring in the rehabilitation of a centenary metallic bridge.** (*em processo de revisão*)

#### Artigos em revistas não indexadas:

- SOUSA, H.; DIMANDE, A.; RODRIGUES, C.; HENRIQUES, A.; FIGUEIRAS, J. – **'MENSUSMONITOR' - Programa informático de tratamento e interpretação de resultados experimentais.** Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas. 6:2 (2009), p. 55–64.
- RODRIGUES, C.; INAUDI, D.; JUNEAU, F.; PINET, E. – **Miniature fiber-optic MOMS piezometer.** Geotechnical Instrumentation News. September (2010), p. 10–13.
- RODRIGUES, C.; INAUDI, D.; GLISIC, B. – **Long-gauge fiber optic sensors: performance comparison and applications.** International Journal of Lifecycle Performance Engineering. (*aguarda publicação*)

#### Artigos em congressos internacionais:

- RODRIGUES, C.; FÉLIX, C.; LAGE, A.; FIGUEIRAS, J. – **Monitorização Estrutural com Base em Fibra Óptica: o Exemplo da Ponte da Lezíria.** In: CLME'2011 - 6º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia. Moçambique, 2011.
- RODRIGUES, C.; INAUDI, D. – **Laboratory and field comparison of long-gauge strain sensing technologies.** In: 5th European Workshop on Structural Health Monitoring. Sorrento, 2010.
- INAUDI, D.; PINET, E.; JUNEAU, F.; RODRIGUES, C. – **Miniature fiber-optic MOMS piezometer.** In: 5th European Workshop on Structural Health Monitoring. Sorrento, 2010.
- COSTA, B.; RODRIGUES, C.; DIMANDE, A.; FIGUEIRAS, J.; CUNHA, A. – **Monitoring of an old metallic bridge by using of electric and optic technologies.** In: SMART'09: IV ECCOMAS Thematic Conference on Smart Structures and Materials. Porto, 2009.
- RODRIGUES, C.; CAVADAS, F.; FÉLIX, C.; FIGUEIRAS, J. – **Assessment of the structural behaviour of a centenary double-deck steel bridge via a FBG monitoring system.** In: 4th European Workshop on Structural Health Monitoring. Krakow, 2008.

**Artigos em congressos nacionais:**

- RODRIGUES, C.; FÉLIX, C.; LAGE, A.; PERDIGÃO, V.; BISCAIA, C.; FIGUEIRAS, J. – **O sistema de monitorização em fibra óptica da ponte da Lezíria**. In: BE2010 - Encontro Nacional Betão Estrutural. Lisboa, 2010.
- RODRIGUES, C.; FÉLIX, C.; LAGE, A.; FIGUEIRAS, J. – **O sistema de monitorização de base óptica da ponte da Lezíria**. In: 1º Congresso de Segurança e Conservação de Pontes ASCP. Lisboa, 2009.
- CAVADAS, F.; RODRIGUES, C.; FÉLIX, C.; FIGUEIRAS, J. – **Monitorização da Ponte Eiffel durante e após as obras de substituição e alargamento do tabuleiro rodoviário**. In: 1º Congresso de Segurança e Conservação de Pontes ASCP. Lisboa, 2009.
- SOUSA, H.; DIMANDE, A.; RODRIGUES, C.; HENRIQUES, A.; FIGUEIRAS, J. – **'MENSUSMONITOR' - Ferramenta de cálculo para tratamento e interpretação de resultados experimentais em engenharia civil**. In: BE2008 - Encontro Nacional Betão Estrutural. Guimarães, 2008.

# Bibliografia

- AKTAN, A. E.; CATBA, F. N.; GRIMMELSMAN, K. A.; PERVIZPOUR, M. – **Development of a model health monitoring guide for major bridges**. Drexel Intelligent Infrastructure and Transportation Safety Intitute, 2002.
- AKTAN, A. E.; CATBAS, F. N.; GRIMMELSMAN, K. A.; TSIKOS, C. J. – **Issues in infrastructure health monitoring for management**. Journal of Engineering Mechanics-Asce. 126:7 (2000), p. 711–724.
- AKTAN, A. E.; HELMICKI, A. J.; HUNT, V. J. – **Issues in health-monitoring for intelligent infrastructure**. Journal of Smart Materials and Structures. 7:5 (1998).
- ALAVIE, A. T.; MAASKANT, R.; STUBBE, R.; OTHONOS, A.; OHN, M.; SAHLGREN, B.; MEASURES, R. M. – **Characteristics of fiber grating sensors and their relation to manufacturing techniques**. Smart Sensing, Processing, and Instrumentation - Smart Structures and Materials 1995. 2444 (1995), p. 528–535.
- ALVES, J. – **Monitorização de estruturas de engenharia baseada em redes de bragg em fibra óptica: Contribuição para a optimização de dois sistemas de interrogação**. Tese de doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2007.
- ANG, J.; LI, H. C. H.; HERSZBERG, I.; BANNISTER, M. K.; MOURITZ, A. P. – **Tensile fatigue performance of surface mounted Bragg grating optical fibres for use in structural health monitoring**. In: Fourth European Workshop on Structural Health Monitoring. Krakow, 2008.
- ANSARI, F. – **State-of-the-art in the applications of fiber-optic sensors to cementitious composites**. Cement and Concrete Composites. 19:1 SPEC. ISS. (1997), p. 3–19.
- ANSARI, F. – **Fiber optic sensors for construction materials and bridges**. Lancaster: Technomic Publishing Co., 1998.
- ANSARI, F. – **Sensing issues in civil structural health monitoring**. Dordrecht: Springer, 2005.

- ANSARI, F. – **Practical implementation of optical fiber sensors in civil structural health monitoring**. Journal of Intelligent Material Systems and Structures. 18:8 (2007), p. 879–889.
- ANSARI, F.; LIBO, Y. – **Mechanics of bond and interface shear transfer in optical fiber sensors**. Journal of Engineering Mechanics-Asce. 124:4 (1998), p. 385–394.
- ANSARI, F.; STURE, S. – **Application of fiber optic sensors in engineering mechanics**. New York: American Society of Civil Engineering, 1993.
- APPLETON, J.; SARAIVA, J.; MOURA, R.; RODRIGUES, F. – **A utilização do aço inox na reabilitação das infraestruturas da Ponte Eiffel sobre o Rio Lima, em Viana do Castelo - Inspeção e reabilitação**. In: ASCP'09 - 1º Congresso Nacional de Segurança e Conservação de Pontes. Lisboa, 2009.
- ARTUNDO, I.; TYMECKI, A.; ORTEGO, E.; ORTEGA, B. – **Cost forecasting of passive components for optical fiber network deployments**. Optical Fiber Technology. 17:3 (2011), p. 218–226.
- ASCE – **Guidelines for instrumentation and measurements for monitoring dam performance**. American Society of Civil Engineers, 2000.
- BAI-OU, G.; HWA-YAW, T.; SIU-LAU, H.; WENG-HENG, C.; XIAO-YI, D. – **Simultaneous strain and temperature measurement using a single fibre Bragg grating**. Electronics Letters. 36:12 (2000), p. 1018–1019.
- BAILEY, D. AND WRIGHT, E. – **Practical fiber optics**. Newnes, 2003.
- BAO, X.; DHLIWAYO, J.; HERON, N.; WEBB, D.; JACKSON, D. – **Experimental and theoretical studies on a distributed temperature sensor based on Brillouin scattering**. Journal of Lightwave Technology. 13:7 (1995), p. 1340–1348.
- BARBOSA, C.; COSTA, N.; FERREIRA, L. A.; ARAUJO, F. M.; VARUM, H.; COSTA, A.; FERNANDES, C.; RODRIGUES, H. – **Weldable fibre Bragg grating sensors for steel bridge monitoring**. Measurement Science and Technology. 19:12 (2008).
- BARNOSKI, M. K.; JENSEN, S. M. – **Fiber waveguides: a novel technique for investigating attenuation characteristics**. Applied Optics. 15 (1976), p. 2112–2115.
- BASTOS, A. M. – **A experimentação como metodologia de interpretação do comportamento de estruturas de betão**. Tese de doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1997.

- BERGMEISTER, K.; AKTAN, A.; BUCHER, C.; DORFMANN, L.; FEHLING, E.; FREY, R. P.; GEIER, R.; HUTH, O.; INAUDI, D.; MAIER, J. E.; SANTA, U.; SCHWESINGER, P.; SLOWIK, V.; WENZEL, H. – **Monitoring and safety evaluation of existing concrete structures**. fib Task Group 5.1, 2003.
- BERGMEISTER, K.; SANTA, U. – **Global monitoring concepts for bridges**. Structural Concrete. 2:1 (2001), p. 29–39.
- BHATTACHARYA, B.; LI, D.; CHAJES, M.; HASTINGS, J. – **Reliability-based load and resistance factor rating using in-service data**. Journal of Bridge Engineering. 10:5 (2005).
- BRANDES, M.; JOHANNES, H.; KOWALSKY, W.; MAKEDONSKI, P.; WICHERN, J.; WIESE, S.; GRAHN, W. – **Fibreoptical in-situ evaluation of corrosion processes in reinforced concrete**. In: First European Workshop on Structural Health Monitoring. France, 2002.
- BRIME – **Bridge management in Europe - Deliverable D14 Final report**. European Commission DG VII 4th Framework Programme, 2001.
- BRONNIMANN, R.; NELLEN, P.; ANDEREGG, P. – **Packaging of fiber optic sensors for civil engineering applications**. In: Symposium DD, Reliability of Photonics Materials and Structures. San Francisco, 1998.
- BRUCK, H. A.; MCNEILL, S. R.; SUTTON, M. A.; PETERS III, W. H. – **Digital image correlation using Newton-Raphson method of partial differential correction**. Experimental Mechanics. 29:3 (1989), p. 261–267.
- BURDET, O. – **Experience in the long-term monitoring of bridges**. In: 3rd fib International Congress, vol.663, p.108-113. Washington D.C., USA: fib, 2010.
- BUTTER, C. D.; HOCKER, G. B. – **Fiber optics strain gauge**. Applied Optics. 17:18 (1978), p. 2867–2869.
- CAMPBELL SCIENTIFIC, INC.: <http://www.campbellsci.com> (2011).
- CAMPOS, P. M. – **A conservação das pontes da Rede Ferroviária Nacional**. In: ASCP'09 - 1º Congresso Nacional sobre Segurança e Conservação de Pontes. Lisboa, 2009.
- CASAS, J. R.; CRUZ, P. J. S. – **Fiber optic sensors for bridge monitoring**. Journal of Bridge Engineering. 8:6 (2003), p. 362–373.
- CAUSSIGNAC, J.; DUPONT, J.; CHAU, B. – **Design of optical fibre sensors for smart concrete structures**. In: First European Workshop of Structural Health Monitoring (SHM2002). pp. 585–591. Cachan, France, 2002.

- CAVADAS, F. – **Monitorização e análise do comportamento de pontes metálicas antigas**. Tese de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008.
- CAVADAS, F.; RODRIGUES, C.; FIGUEIRAS, J.; FÉLIX, C.; RODRIGUES, F. – **Monitorização da Ponte Eiffel durante e após as obras de substituição e alargamento do tabuleiro rodoviário**. In: ASCP09-1º Congresso de Segurança e Conservação de Pontes. Lisboa, Portugal: ASCP, 2009.
- CAVADAS, F.; RODRIGUES, C.; FÉLIX, C.; FIGUEIRAS, J. – **Relatório dos ensaios de recepção da Ponte Eiffel, Viana do Castelo (após as obras de alargamento e reabilitação do tabuleiro rodoviário)**. LABEST/FEUP, 2008.
- CAVALEIRO, P. M.; ARAUJO, F. M.; FERREIRA, L. A.; SANTOS, J. L.; FARABI, F. – **Simultaneous measurement of strain and temperature using Bragg gratings written in germanosilicate and boron-codoped germanosilicate fibers**. IEEE Photonics Technology Letters. 11:12 (1999), p. 1635–1637.
- CEN – **En 10080 - Steel for the reinforcement of concrete - Weldable reinforcing steel - General** (2005).
- CHAN, T. H. T.; YU, L.; TAM, H. Y.; NI, Y. Q.; CHUNG, W. H.; CHENG, L. K. – **Fiber Bragg grating sensors for structural health monitoring of Tsing Ma bridge: Background and experimental observation**. Engineering Structures. 28:5 (2006), p. 648–659.
- CHANG, P. C.; FLATAU, A.; LIU, S. C. – **Review paper: Health monitoring of civil infrastructure**. Structural Health Monitoring. 2:3 (2003), p. 257–267.
- CHIU, H. S.; CHERN, J. C.; CHANG, K. C. – **Long-term deflection control in cantilever prestressed concrete bridges. i: Control method**. Journal of Engineering Mechanics. 122:6 (1996), p. 489–494.
- CHO, N.; KIM, N.; JANG, J.; CHANG, S. – **Estimation of deflection curve of bridges using fiber optic strain sensors**. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 3988 (2000), p. 339–348.
- CHU, D. – **Development of innovative optical fiber sensors suitable for civil engineering applications**. Tese de doutoramento, University of California, 1999.
- CHUNG, W.; KANG, D. – **Full-scale test of a concrete box girder using FBG sensing system**. Engineering Structures. 30:3 (2008), p. 643–652.
- CHUNG, W.; KIM, S.; KIM, N. S.; LEE, H. U. – **Deflection estimation of a full scale prestressed concrete girder using long-gauge fiber optic sensors**. Construction and Building Materials. 22:3 (2008), p. 394–401.
- CITYU, EMPA, OU, UMINHO, USTUTT – **Evaluation of monitoring instrumentation and techniques**. Sustainable Bridges, 2004.

- COBA-PC&A-CIVILSER-ARCADIS – **Construção da Travessia do Tejo no Carregado, Sublanço A1/Benavente, da A10 Auto-Estrada Bucelas/Carregado/IC3; Volume II - Ponte sobre o Rio Tejo. Projecto de Execução da Ponte sobre o Rio Tejo e dos Viadutos de Acesso.** COBA-PC&A-CIVILSER-ARCADIS, 2006a.
- COBA-PC&A-CIVILSER-ARCADIS – **Construção da Travessia do Tejo no Carregado, Sublanço A1/Benavente, da A10 Auto-Estrada Bucelas/Carregado/IC3; Volume XV - Plano de Monitorização Estrutural e de Durabilidade. Empreitada de Concepção, Projecto e Construção da Travessia do Tejo no Carregado.** COBA-PC&A-CIVILSER-ARCADIS, 2006b.
- COOK, D. – **Robotic total stations and remote data capture: Challenges in construction.** *Geotechnical News*. 24:4 (2006), p. 42–45.
- COSTA, B.; FÉLIX, C.; FIGUEIRAS, J. – **Concepção, arquitectura e instalação do sistema de monitorização de base óptica aplicado à Ponte Luiz I.** In: JPEE 2006: 4as Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas. Lisboa, 2006a.
- COSTA, B.; FÉLIX, C.; FIGUEIRAS, J. – **Relatório do ensaio de carga da Ponte Luiz I.** LABEST/FEUP, 2006b.
- COSTA, B.; RODRIGUES, C.; DIMANDE, A.; FIGUEIRAS, J.; CUNHA, A. – **Monitoring of an old metallic bridge by using electric and optic technologies.** In: SMART'09: IV ECCOMAS Thematic Conference on Smart Structures and Materials. Porto, 2009.
- CRUZ, P. J. S. – **Inspecção, diagnóstico, conservação e monitorização de pontes.** In: Congresso Rodoviário Português: Estrada 2006. Estoril, 2006a.
- CRUZ, P. J. S. – **Linhas orientadoras de uma política de manutenção, conservação e inspecção de pontes.** In: JPEE2006: 4as Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas. Lisboa, 2006b.
- CULSHAW, B. – **Smart structures and materials.** Boston: Artech House, 1996.
- CULSHAW, B.; KERSEY, A. – **Fiber-optic sensing: A historical perspective.** *Journal of Lightwave Technology*. 26:9-12 (2008), p. 1064–1078.
- DAKIN, J. P. – **Distributed Optical Fiber Sensors,** In: Udd, E. (Ed.), *Fiber Optic Smart Structures.* Wiley-Interscience, pp. 371–408, 1995.
- DAKIN, J. P.; PRATT, D. J.; BIBBY, G. W.; ROSS, J. N. – **Distributed optical fiber Raman temperature sensor using a semiconductor light-source and detector.** *Electronics Letters*. 21:13 (1985), p. 569–570.

- DAKIN, J. P.; VOLANTHEN, M. – **Distributed and multiplexed fibre grating sensors**. In: Ofs-13: 13th International Conference on Optical Fiber Sensors. Vol. 3746, pp. 134–140. 1999.
- DALLY, J. W.; RILEY, W. F. – **Experimental stress analysis (3rd edition)**. McGraw-Hill, Inc., 1991.
- DELGREGO, M. R.; CULMO, M. P.; DEWOLF, J. T. – **Performance evaluation through field testing of century-old railroad truss bridge**. Journal of Bridge Engineering. 13:2 (2008), p. 132–138.
- DENG, L.; CAI, C. S. – **Applications of fiber optic sensors in civil engineering**. Structural Engineering and Mechanics. 25:5 (2007), p. 577–596.
- DEWOLF, J. T.; LAUZON, R. G.; CULMO, M. P. – **Monitoring bridge performance**. Structural Health Monitoring. 1:2 (2002), p. 129–138.
- DIMANDE, A. – **Análise experimental de pontes durante a construção e em serviço**. Tese de doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2010.
- DIMANDE, A.; RODRIGUES, C.; COSTA, B.; FIGUEIRAS, J. – **Monitorização do comportamento da ponte ferroviária de Trezói sob a acção do tráfego ferroviário**. LABEST/FEUP, 2008.
- DOORNINK, J. D. – **Monitoring of structural condition of fracture-critical bridges using fiber optic technology**. Tese de doutoramento, Iowa State University, 2006.
- DOTSENKO, A. M.; GORODNICHENKO, V. I. – **Errors of measuring crack length with foil crack gauges and the method of taking the errors into account in analysis of the results of cracking resistance tests on materials**. Strength of Materials. 16:5 (1984), p. 757–763.
- DUCK, G.; LEBLANC, M. – **Arbitrary strain transfer from a host to an embedded fiber-optic sensor**. Smart Materials and Structures. 9:4 (2000), p. 492–497.
- DUNNICLIFF, J. – **Geotechnical instrumentation for monitoring field performance**. New York: Wiley, 1988.
- DUPLAIN, G.; BELLEVILLE, C.; BUSSIÈRE, S.; BÉLANGER, P. – **Absolute fiber-optic linear position and displacement sensor**. In: Optical Fiber Sensors. Virginia, USA, 1997.
- ELGAMAL, A.; CONTE, J. P.; MASRI, S.; FRASER, M.; FOUNTAIN, T.; GUPTA, A.; TRIVEDI, M.; ZARKI, M. E. – **Health monitoring framework for bridges and civil infrastructure**. In: 4th International Workshop on Structural Health Monitoring. pp. 123–130. 2004.

- EP – **Plano e orçamento 2006**. Estradas de Portugal, E.P.E., 2006.
- ERMOPOULOS, J.; SPYRAKOS, C. C. – **Validated analysis and strengthening of a 19th century railway bridge**. *Engineering Structures*. 28:5 (2006), p. 783–792.
- FARHEY, D. N. – **Bridge instrumentation and monitoring for structural diagnostics**. *Structural Health Monitoring*. 4:4 (2005), p. 301–318.
- FARRAR, C. R.; WORDEN, K. – **An introduction to structural health monitoring**. *Philosophical Transactions of the Royal Society a-Mathematical Physical and Engineering Sciences*. 365:1851 (2007), p. 303–315.
- FERNANDES, J. A. – **A observação do comportamento estrutural de pontes: desenvolvimento actual e perspectivas futuras**. In: *ASCP'09 - 1º Congresso Nacional sobre Segurança e Conservação de Pontes*. Lisboa, 2009.
- FERNANDES, J. A.; SANTOS, L. O. – **A experiência do LNEC no âmbito da monitorização de pontes de betão**. In: *Seminário Segurança e Reabilitação das Pontes em Portugal*. FEUP, Porto, 2001.
- FERNANDEX, M.; TAPENES, E.; ZELITSKAYA, P. – **Pipeline hydrocarbon transportation: some operating concerns and R&D trends**. *Proceedings of ASME International Pipeline Conference (1996)*, p. 95–102.
- FHWA – **Deficient bridges by state and highway system**. Federal Highway Administration, 2010.
- FIBERSENSING – **Products & solutions**. <http://www.fibersensing.com> (2010a).
- FIBERSENSING – **Strain sensor installation guide**. <http://www.fibersensing.com> (2010b).
- FIGLIOLA, R. S.; BEASLEY, D. E. – **Theory and design for mechanical measurements (5th Ed.)**. Wiley, 2011.
- FIGUEIRAS, J.; FÉLIX, C.; COSTA, B. A. – **Testing and monitoring of a centenary arch bridge**. *Structure and Infrastructure Engineering*. 1:1 (2005), p. 63–73.
- FIGUEIRAS, J.; FÉLIX, C.; MATOS, J. C.; SOUSA, H. – **An integrated system for structural health monitoring - application to the Sorraia River Bridge**. In: *IABMAS'04*. Kyoto, Japão, 2004.
- FIGUEIRAS, J.; FÉLIX, C.; SOUSA, H.; FIGUEIRAS, H. – **Construção da Travessia do Tejo no Carregado, Sublanço A1/Benavente, da A10 Auto-Estrada Bucelas/Carregado/IC3. Projecto Executivo Monitorização Estrutural e de Durabilidade A - Memória Descritiva**. LABEST, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2007.

- FIGUEIRAS, J.; JUVANDES, L.; MARQUES, A. T.; MENDES, A. – **Análise da solução de revestimento do pavimento rodoviário da Ponte Eiffel em Viana do Castelo**. LABEST-FEUP, 2011.
- FÉLIX, C. – **Monitorização e análise do comportamento de obras de arte**. Tese de doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2004.
- FRANGOPOL, D. M.; KONG, J. S.; GHARAIBEH, E. S. – **Reliability-based life-cycle management of highway bridges**. *Journal of Computing in Civil Engineering*. 15:1 (2001), p. 27–34.
- FRANGOPOL, D. M.; STRAUSS, A.; KIM, S. – **Bridge reliability assessment based on monitoring**. *Journal of Bridge Engineering*. 13:3 (2008), p. 258–270.
- FROVEL, M.; CARRIÓN, G.; GUTIERREZ, C.; MORAVEC, C.; PINTADO, J. M. – **Temperature and humidity dependent performance of FBG - strain sensors embedded in carbon/epoxy composites**. *Proceedings of SPIE: Smart Sensor Phenomena, Technology, Networks, and Systems*. 7293 (2009).
- FUCHS, P.; WASHER, G.; CHASE, S.; MOORE, M. – **Laser-based instrumentation for bridge load testing**. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 18:4 (2004), p. 213–219.
- FUHR, P. L.; HUSTON, D. R.; NELSON, M.; NELSON, O.; HU, J.; MOWAT, E.; SPAMMER, S.; TAMM, W. – **Fiber optic sensing of a bridge in Waterbury, Vermont**. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 10:4 (1999), p. 293–303.
- GEBREMICHAEL, Y. M.; LI, W.; BOYLE, W. J. O.; MEGGITT, B. T.; GRATAN, K. T. V.; MCKINLEY, B.; FERNANDO, G. F.; KISTER, G.; WINTER, D.; CANNING, L.; LUKE, S. – **Integration and assessment of fibre Bragg grating sensors in an all-fibre reinforced polymer composite road bridge**. *Sensors and Actuators a-Physical*. 118:1 (2005), p. 78–85.
- GHEORGHIU, C.; LABOSSIÉRE, P.; PROULX, J. – **Fiber optic sensors for strain measurement of CFRP-strengthened RC beams**. *Structural Health Monitoring*. 4:1 (2005), p. 67–80.
- GHOLAMZADEH, B.; NABOVATI, H. – **Fiber optic sensors**. *World Academy of Science, Engineering and Technology*. 42 (2008), p. 297–307.
- GIALLORENZI, T. G.; BUCARO, J. A.; DANDRIDGE, A.; SIEGEL, G. H.; COLE, J. H.; RASHLEIGH, S. C.; PRIEST, R. G. – **Optical fiber sensor technology**. *IEEE Journal of Quantum Electronics*. QE-18:4 (1982), p. 626–665.
- GLISIC, B. – **Fibre optic sensors and behaviour in concrete at early age**. Tese de doutoramento, École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), 2000.

- GLISIC, B. – **Influence of the gauge length on the accuracy of long-gauge sensors employed in monitoring of prismatic beams.** Measurement Science and Technology. 22:3 (2011).
- GLISIC, B.; BADOUX, M.; JACCOUD, J.; INAUDI, D. – **Monitoring of a subterranean structure with the SOFO system.** Tunnel Management International. 2:8 (2000).
- GLISIC, B.; INAUDI, D. – **Fibre optic methods for structural health monitoring.** Chichester: John Wiley and Sons, Inc., 2007.
- GLISIC, B.; INAUDI, D.; KRONENBERG, P.; VURPILOT, S. – **Dam monitoring using long SOFO sensor.** In: Hydropower into the Next Century. Gmunden, Austria, 1999.
- GLISIC, B.; INAUDI, D.; LAU, J. M.; MOK, Y. C.; NG, C. T. – **Long-term monitoring of high-rise buildings using long-gage fiber optic sensors.** In: 7th International conference on multi-purpose high-rise towers and tall buildings. Dubai, UAM, 2005.
- GLISIC, B.; INAUDI, D.; POSENATO, D. – **Monitoring method for curved concrete bridge girders using long-gauge deformation sensors.** In: IABMAS2010 - The Fifth International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management. Philadelphia, USA, 2010.
- GLISIC, B.; POSENATO, D.; INAUDI, D.; FIGINI, A. – **Structural health monitoring method for curved concrete bridge box girders.** In: Smart Structures & NDE. San Diego, California, 2008.
- GOLDBERG, L.; DANDRIDGE, A.; MILES, R. O.; GIALLORENZI, T. G.; WELLER, J. F. – **Noise characteristics in line-narrowed semiconductor-lasers with optical feedback.** Electronics Letters. 17:19 (1981), p. 677–678.
- GRATTAN, K. T. V.; MEGGITT, B. T. – **Optical fiber sensor technology.** Kluwer Academic Publishers, 1998.
- GRATTAN, K. T. V.; SUN, T. – **Fiber optic sensor technology: an overview.** Sensors and Actuators, A: Physical. 82:1 (2000), p. 40–61.
- GRAVER, T.; INAUDI, D.; DOORNINK, J. – **Growing market acceptance for fiber-optic solutions in civil structures.** In: Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. Vol. 5589, pp. 44–55. 2004.
- GRIVAS, D. A.; GARLOCK, M. – **Sensing systems for bridges: an assessment of the state-of-the-art.** Recent Developments in Bridge Engineering (2003), p. 269–284.
- GUPTA, B. D. – **Fiber optic sensors: Principles and applications.** New India Publishing, 2006.

- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. – **Fundamentals of physics**. Chichester: Wiley, 1997.
- HARAN, F. M.; REW, J. K.; FOOTE, P. D. – **A strain-isolated fibre Bragg grating sensor for temperature compensation of fibre Bragg grating strain sensors**. *Measurement Science and Technology*. 9:8 (1998), p. 1163–1166.
- HARTOG, A. H.; LEACH, A. P.; GOLD, M. P. – **Distributed temperature sensing in solid-core fibers**. *Electronics Letters*. 21:23 (1985), p. 1061–1062.
- HAYES, J. – **Fiber optics technician’s manual**. 3<sup>a</sup> ed. Thomson/Delmar Learning, 2006.
- HEARN, G.; PUCKETT, J.; FRIEDLAND, I.; EVERETT, T.; HURST, K.; ROMAC, G.; CHRISTIAN, G.; SHEPARD, R.; THOMPSON, T.; YOUNG, R. – **Bridge preservation and maintenance in Europe and South Africa. Report No. FHWA-PL-04-007**. International Technology Exchange Program, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, 2005.
- HECHT, E. – **Óptica (2<sup>a</sup> ed.)**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2002.
- HER, S.; HUANG, C. – **Effect of coating on the strain transfer of optical fiber sensors**. *Sensors*. 11 (2011).
- HERSZBERG, I.; BANNISTER, M. K.; LI, H. C. H.; QI, B.; MARSDEN, J. – **Durability under fatigue loading of optical fibres applied to fibre reinforced plastic composites**. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. 6619 (2007).
- HILD, F.; ROUX, S. – **Digital image correlation: from displacement measurement to identification of elastic properties - a review**. *Strain*. 42:2 (2006), p. 69–80.
- HILL, K. O.; FUJII, Y.; KAWASAKI, B. – **Photosensitivity in optical fiber waveguides: application to reflection filter fabrication**. *Applied Physics Letters*. 32:10 (1978), p. 647–649.
- HILL, K. O.; MALO, B.; BILODEAU, F.; JOHNSON, D. C.; ALBERT, J. – **Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask**. *Applied Physics Letters*. 62:10 (1993), p. 1035–1037.
- HILL, K. O.; MELTZ, G. – **Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview**. *Journal of Lightwave Technology*. 15:8 (1997), p. 1263–1276.
- HORIGUCHI, T.; KURASHIMA, T.; TATEDA, M. – **Tensile strain dependence of Brillouin frequency shift in silica optical fibers**. *IEEE Photonics Technology Letters*. 1:5 (1989), p. 107–108.

- HORIGUCHI, T.; SHIMIZU, K.; KURASHIMA, T.; TATEDA, M.; KOYAMADA, Y. – **Development of a distributed sensing technique using Brillouin scattering.** *Journal of Lightwave Technology.* 13:7 (1995), p. 1296–1302.
- HORTA, C.; LOPES, E. – **O sistema de gestão de conservação de obras de arte da Estradas de Portugal, S.A.** In: ASCP'09 - 1º Congresso Nacional sobre Segurança e Conservação de Pontes. Lisboa, 2009.
- HOU, X.; YANG, X.; HUANG, Q. – **Using inclinometers to measure bridge deflection.** *Journal of Bridge Engineering.* 10:5 (2005), p. 564–569.
- HOUSNER, G. W.; BERGMAN, L. A.; CAUGHEY, T. K.; CHASSIAKOS, A. G.; CLAUS, R. O.; MASRI, S. F.; SKELTON, R. E.; SOONG, T. T.; SPENCER, B. F.; YAO, J. T. P. – **Structural control: past, present, and future.** *Journal of Engineering Mechanics.* 123:9 (1997), p. 897–971.
- HUNG, P. C.; VOLOSHIN, A. S. – **In-plane strain measurement by digital image correlation.** *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering.* 25:3 (2003), p. 215–221.
- INAUDI, D. – **Fiber optic sensor network for the monitoring of civil engineering structures.** Tese de doutoramento, École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), 1997.
- INAUDI, D. – **Long-Gage Fiber-Optic Sensors for Structural Monitoring,** In: Rastogi, P. E. (Ed.), *Photomechanics, Topics Appl. Phys. Vol. 77.* Berlin: Springer, pp. 273–293, 2000.
- INAUDI, D. – **Photonic Sensing Technology in Civil Engineering,** In: Lopez-Higuera, J. (Ed.), *Handbook of Optical Fibre Sensing Technology.* New York: John Wiley & Sons Inc, 2002.
- INAUDI, D. – **Overview of 40 bridge structural health monitoring projects.** In: *International Bridge Conference, IBC'2010.* Pittsburgh, USA, 2010.
- INAUDI, D.; BOLSTER, M.; DEBLOIS, R.; FRENCH, C.; PHIPPS, A.; SEBASKY, J.; WESTERN, K. – **Structural health monitoring system for the new I-35W St Anthony Falls Bridge.** In: *4th International Conference on Structural Health Monitoring on Intelligent Infrastructure (SHMII-4).* Zurich, Switzerland, 2009.
- INAUDI, D.; CASANOVA, N. – **Geo-structural monitoring with long-gage interferometric sensors.** *SPIE, 7th International Symposium on Smart Structures and Materials.* 3995 (2000), p. 164–174.
- INAUDI, D.; CASANOVA, N.; KRONENBERG, P.; MARAZZI, S.; VURPILLOT, S. – **Embedded and surface-mounted fiber optic sensors for civil structural monitoring.** In: *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering.* Vol. 3044, pp. 236–243. 1997.

- INAUDI, D.; CHURCH, J. – **Paradigm shifts in monitoring levees and earthen dams distributed fiber optic monitoring systems**. In: 31st USSD Annual Meeting & Conference. San Diego, California, USA, 2011.
- INAUDI, D.; DELGROSSO, A.; MESSERVEY, T.; WALDER, R.; FUGGINI, C. – **Long-term structural health monitoring of the Royal Villa of Monza**. In: CSHM-3 2010, International Workshop on Preservation of Heritage Structures. 2010a.
- INAUDI, D.; ELAMARI, A.; PFLUG, L.; GISIN, N.; BREGUET, J.; VURPILLOT, S. – **Low-coherence deformation sensors for the monitoring of civil-engineering structures**. *Sensors and Actuators a-Physical*. 44:2 (1994), p. 125–130.
- INAUDI, D.; GLISIC, B. – **Distributed fiber optic sensors: Novel tools for the monitoring of large structures**. *Geotechnical News*. 25:3 (2007), p. 31–35.
- INAUDI, D.; PINET, E.; JUNEAU, F.; RODRIGUES, C. – **Miniature fiber-optic moms piezometer**. In: 5th European Workshop on Structural Health Monitoring. Sorrento, 2010b.
- INAUDI, D.; POSENATO, D.; GLISIC, B.; MILLER, J.; HABER, T.; GRAVER, T. – **Demodulating interferometric and FBG sensors in the spectral domain**. In: *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. Vol. 5758, pp. 70–75. 2005.
- INAUDI, D.; VURPILLOT, S.; CASANOVA, N.; KRONENBERG, P. – **Structural monitoring by curvature analysis using interferometric fiber optic sensors**. *Smart Materials and Structures*. 7:2 (1998), p. 199–208.
- ITRADEMARKET - CONNECTORS: <http://itrademarket.com/chinarj45/336246/fiber-optic-connectors-st-connectors-multimode-st.htm> (2011).
- IWAKI, H.; YAMAKAWA, H.; MITA, A. – **Health monitoring system using FBG-based sensors for a 12th story building with column dampers**. *Proceedings of SPIE: Smart Structures and Materials and Nondestructive Evaluation for Health Monitoring and Diagnostics*. 4330 (2001), p. 471–477.
- JACKSON, D. A.; DANDRIDGE, A.; SHEEM, S. K. – **Measurement of small phase-shifts using a single-mode optical-fiber interferometer**. *Optics Letters*. 5:4 (1980), p. 139–141.
- JACKSON, D. A.; JONES, J. D. C. – **Fibre optic sensors**. *Optica Acta*. 33:12 (1986), p. 1469–1503.
- JAMES, S. W.; DOCKNEY, M. L.; TATAM, R. P. – **Simultaneous independent temperature and strain measurement using in-fibre Bragg grating sensors**. *Electronics Letters*. 32:12 (1996), p. 1133–1134.

- JANG, J.; CHANG, S.; CHO, N.; KIM, N. – **Crack detection of structures using optical time domain reflectometry (OTDR) method.** Proceedings of SPIE 3988. 276 (2000).
- JAUREGUI, D. V.; WHITE, K. R.; WOODWARD, C. B.; LEITCH, K. R. – **Noncontact photogrammetric measurement of vertical bridge deflection.** Journal of Bridge Engineering. 8:4 (2003), p. 212–222.
- JENKINS, C. H.; KJERENGTRØEN, L.; ØESTENSEN, H. – **Sensitivity of parameter changes in structural damage detection.** Shock and Vibration. 4:1 (1997), p. 27–37.
- KASHYAP, R. – **Fiber Bragg gratings.** San Diego, Calif.: Academic Press, 1999.
- KEISER, G. – **Optical fibre communications (3rd ed.).** New York: McGraw-Hill, 2000.
- KERROUCHE, A.; BOYLE, W. J. O.; GEBREMICHAEL, Y.; SUN, T.; GRATTAN, K. T. V.; TALJSTEN, B.; BENNITZ, A. – **Field tests of fibre Bragg grating sensors incorporated into CFRP for railway bridge strengthening condition monitoring.** Sensors and Actuators a-Physical. 148:1 (2008), p. 68–74.
- KERSEY, A. D. – **A review of recent developments in fiber optic sensor technology.** Optical Fiber Technology. 2:3 (1996), p. 291–317.
- KERSEY, A. D. – **Optical Fiber Sensors,** In: Rastogi, P. (Ed.), Optical Measurement Techniques and Applications. Boston: Artech House, pp. 217–254, 1997.
- KERSEY, A. D. – **Optical fiber sensors for permanent downwhell monitoring applications in the oil and gas industry.** IEICE Transactions on Electron (2000).
- KERSEY, A. D.; DAVIS, M. A.; PATRICK, H. J.; LEBLANC, M.; KOO, K. P.; ASKINS, C. G.; PUTNAM, M. A.; FRIEBELE, E. J. – **Fiber grating sensors.** Journal of Lightwave Technology. 15:8 (1997), p. 1442–1462.
- KISTER, G.; WINTER, D.; BADCOCK, R. A.; GEBREMICHAEL, Y. M.; BOYLE, W. J. O.; MEGGITT, B. T.; GRATTAN, K. T. V.; FERNANDO, G. F. – **Structural health monitoring of a composite bridge using Bragg grating sensors. Part 1: Evaluation of adhesives and protection systems for the optical sensors.** Engineering Structures. 29:3 (2007a), p. 440–448.
- KISTER, G.; WINTER, D.; GEBREMICHAEL, Y.; LEIGHTON, J.; BADCOCK, R. A.; TESTER, P. D.; KRISHNAMURTHY, S.; BOYLE, W. J. O.; GRATTAN, K. T. V.; FERNANDO, G. F. – **Methodology and integrity monitoring of foundation concrete piles using Bragg grating optical fibre sensors.** Engineering Structures. 29:9 (2007b), p. 2048–2055.

- KISTER, G.; WINTER, D.; TETLOW, J.; BARNES, R.; MAYS, G.; FERNANDO, G. F. – **Structural integrity monitoring of reinforced concrete structures. Part 1: evaluation of protection systems.** *Engineering Structures*. 27:3 (2005), p. 411–419.
- KITADA, T. – **Considerations on recent trends in, and future prospects of, steel bridge construction in Japan.** *Journal of Constructional Steel Research*. 62:11 (2006), p. 1192–1198.
- KO, J. M.; NI, Y. Q. – **Technology developments in structural health monitoring of large-scale bridges.** *Engineering Structures*. 27:12 (2005), p. 1715–1725.
- KOBAYASHI, A. S. – **Handbook on experimental mechanics.** Society for Experimental Mechanics Inc. Prentice-Hall Inc., 1989.
- KRISTEK, V.; Z.P., B.; ZICH, M.; KOHOUTKOVA, A. – **Box girder bridge deflections: Why is the initial trend deceptive?** *ACI Concrete International*. 28:1 (2006), p. 55–63.
- KROHN, D. A. – **Fiber optic sensors: fundamentals and applications.** 3<sup>a</sup> ed. ISA, 2000.
- KRONENBERG, P.; CASANOVA, N.; INAUDI, D.; VURPILOT, S. – **Dam monitoring with fiber optics deformation sensors.** *Proceedings of SPIE Smart Structures and Materials: Vol. 3043* (1997).
- KUANG, K. S. C.; KENNY, R.; WHELAN, M. P.; CANTWELL, W. J.; CHALKER, P. R. – **Embedded fibre Bragg grating sensors in advanced composite materials.** *Composites Science and Technology*. 61:10 (2001), p. 1379–1387.
- KURASHIMA, T.; HORIGUCHI, T.; TATEDA, M. – **Distributed-temperature sensing using stimulated Brillouin-scattering in optical silica fibers.** *Optics Letters*. 15:18 (1990), p. 1038–1040.
- KURASHIMA, T.; USU, T.; TANAKA, K.; NOBIKI, A.; SATO, M.; NAKAI, K. – **Application of fiber optic distributed sensor for strain measurement in civil engineering.** *Smart Materials, Structures, and Integrated Systems*. 3241 (1997), p. 247–258.
- KWON, I. B.; KIM, C. Y.; CHOI, M. Y. – **Continuous measurement of temperature distributed on a building construction.** *Proceedings of SPIE: Smart Structures and Materials and Nondestructive Evaluation for Health Monitoring and Diagnostics*. 4696 (2002), p. 273–283.
- LEE, B. – **Review of the present status of optical fiber sensors.** *Optical Fiber Technology*. 9:2 (2003), p. 57–79.

- LEE, D. G.; MITROVIC, M.; FRIEDMAN, A.; CARMAN, G. P. – **Characterization of fiber optic sensors for structural health monitoring**. *Journal of Composite Materials*. 36:11 (2002), p. 1349–1366.
- LEE, J. J.; SHINOZUKA, M. – **A vision-based system for remote sensing of bridge displacement**. *NDT and E International*. 39:5 (2006), p. 425–431.
- LEUNG, C. K. Y.; OLSON, N.; MENG, A.; WAN, K. T. – **Recent developments on a distributed crack sensor for concrete structures**. In: *First European Workshop on Structural Health Monitoring*. France, 2002.
- LI, D. S.; LI, H. N.; REN, L.; SONG, G. B. – **Strain transferring analysis of fiber Bragg grating sensors**. *Optical Engineering*. 45:2 (2006).
- LI, H.; OU, J. P.; ZHOU, Z. – **Applications of optical fibre Bragg gratings sensing technology-based smart stay cables**. *Optics and Lasers in Engineering*. 47:10 (2009), p. 1077–1084.
- LI, H. N.; LI, D. S.; SONG, G. B. – **Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering**. *Engineering Structures*. 26:11 (2004), p. 1647–1657.
- LIENHART, W. – **Experimental investigation of the performance of the SOFO measurement system**. In: *5th International Workshop on Structural Health Monitoring*. Stanford, USA, 2005.
- LISCONCEBE – **Alargamento e reabilitação do tabuleiro rodoviário da Ponte Eiffel sobre o Rio Lima em Viana do Castelo - Memória descritiva do projecto de execução**. Lisconcebe, 2007.
- LIU, M.; FRANGOPOL, D. M.; KIM, S. – **Bridge safety evaluation based on monitored live load effects**. *Journal of Bridge Engineering*. 14:4 (2009), p. 257–269.
- LNEC – **Museu virtual**. <http://www-ext.lnec.pt/LNEC/museuvirtual/> (2011).
- LÓPEZ-HIGUERA, J. M. – **Handbook of optical fibre sensing technology**. New York: Wiley, 2002.
- LYNCH, J. P.; LAW, K. H.; KIREMIDJIAN, A. S.; CARRYER, E.; FARRAR, C. R.; SOHN, H.; ALLEN, D. W.; NADLER, B.; WAIT, J. R. – **Design and performance validation of a wireless sensing unit for structural monitoring applications**. *Structural Engineering and Mechanics*. 17:3-4 (2004), p. 393–408.
- MAASKANT, R.; ALAVIE, T.; MEASURES, R. M.; TADROS, G.; RIZKALLA, S. H.; GUHA-THAKURTA, A. – **Fiber-optic Bragg grating sensors for bridge monitoring**. *Cement and Concrete Composites*. 19:1 SPEC. ISS. (1997), p. 21–33.

- MAJUMDER, M.; GANGOPADHYAY, T. K.; CHAKRABORTY, A. K.; DASGUPTA, K.; BHATTACHARYA, D. K. – **Fibre Bragg gratings in structural health monitoring-present status and applications**. Sensors and Actuators, A: Physical. 147:1 (2008), p. 150–164.
- MANIE, J.; KIKSTRA, W. – **Diana - finite element analysis. User's manual release 9.4.2**. Delft, Netherland: TNO DIANA, 2010.
- MARECOS, J. – **Measurement of vertical displacements through water levelling method**. Matériaux et Constructions. 11:65 (1978), p. 361–370.
- MARECOS, J. – **Long term observation of structures**. Matériaux et Constructions. 70 (1979), p. 321–327.
- MARECOS, J. – **The 40 Years of LNEC experience on observation and testing of bridges and special structures**. Lisboa: LNEC, 1986.
- MARECOS, V. – **Controlo da segurança de pontes em tempo real**. Tese de Doutoramento, LNEC. Universidade Técnica de Lisboa, 2008.
- MEASURES, R. M. – **Structural monitoring with fiber optic technology**. London: Academic Press, 2001.
- MEDLOCK, R. – **Review of modulating techniques for fibre optic sensors**. Journal of Optical Sensors. 1 (1986), p. 43–68.
- MELTZ, G.; MOREY, W.; GLENN, W. H. – **Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method**. Optics Letters. 14:15 (1989), p. 823–825.
- MENDONÇA, T.; BRITO, V.; PAULO, P. – **Sistema de gestão de obras de arte (GOA)**. In: ASCP'09 - 1º Congresso Nacional sobre Segurança e Conservação de Pontes. Lisboa, 2009.
- MERZBACHER, C. I.; KERSEY, A. D.; FRIEBELE, E. J. – **Fiber optic sensors in concrete structures: a review**. Smart Materials and Structures. 5:2 (1996), p. 196–208.
- MÉNDEZ, A.; GRAVER, T. – **Overview of fiber optic sensors for NDT applications**. In: IV NDT Panamerican Conference. Buenos Aires, 2007.
- MOORE, M.; PHARES, B.; GRAYBEAL, B.; ROLANDER, D.; WASHER, G. – **Reliability of visual inspection for highway bridges. (FHWA-RD-01-020 / FHWA-RD-01-021)**. Federal Highway Administration, 2001.
- MOREY, W.; BALL, G.; MELTZ, G. – **Photoinduced Bragg gratings in optical fibers**. Optics and Photonics News. February (1994), p. 7–14.

- MOREY, W. W.; DUNPHY, J. R.; MELTZ, G. – **Multiplexing fiber Bragg grating sensors**. Distributed and Multiplexed Fiber Optic Sensors. 1586 (1992), p. 216–224.
- MOYO, P.; BROWNJOHN, J. M. W.; SURESH, R.; TJIN, S. C. – **Development of fiber Bragg grating sensors for monitoring civil infrastructure**. Engineering Structures. 27:12 (2005), p. 1828–1834.
- MRAD, N. – **Optical fiber sensor technology: introduction and evaluation and application**, In: Schwartz, M. M. (Ed.), Encyclopedia of smart materials. New York: J. Wiley, 2002.
- MUFTI, A. – **Guidelines for structural health monitoring**. ISIS Canada, 2001.
- MUFTI, A. A. – **FRPs and FOSs lead to innovation in Canadian civil engineering structures**. Construction and Building Materials. 17 (2003), p. 379–387.
- MUFTI, A. A.; TADROS, G.; JONES, P. R. – **Field assessment of fibre-optic Bragg grating strain sensors in the Confederation Bridge**. Canadian Journal of Civil Engineering. 24:6 (1997), p. 963–966.
- NASSIF, H. H.; GINDY, M.; DAVIS, J. – **Comparison of laser doppler vibrometer with contact sensors for monitoring bridge deflection and vibration**. NDT and E International. 38:3 (2005), p. 213–218.
- NELLEN, P. M.; FRANK, A.; KENEL, A. – **High strain and high strain gradients measured with fiber Bragg gratings in structural engineering applications**. Ofs 2002: 15th Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest (2002), p. 111–114.
- NEWMENSUS, LABEST, FEUP – **Ponte da Lezíria e Viadutos de Acesso - Monitorização Estrutural e de Durabilidade: Manual de Utilização**. NewMENSUS/LABEST/FEUP, 2008.
- NICKITOPOULOU, A.; PROTOPSALTI, K.; STIROS, S. – **Monitoring dynamic and quasi-static deformations of large flexible engineering structures with GPS: Accuracy, limitations and promises**. Engineering Structures. 28:10 (2006), p. 1471–1482.
- NOVAIS-BARBOSA, J. – **Mecânica dos fluidos e hidráulica geral**. Porto: Porto Editora, 1985.
- OMNISSENS: <http://www.omnisens.ch> (2011).
- OSHIMA, Y. – **Development of monitoring systems using fiber optic sensors**. Tese de doutoramento, Kyoto University, 2003.
- OTHONOS, A. – **Fiber Bragg gratings**. Review of Scientific Instruments. 68:12 (1997), p. 4309–4341.

- PARK, H.; LEE, H.; ADELI, H.; LEE, I. – **A new approach for health monitoring of structures: Terrestrial laser scanning**. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 22:1 (2007), p. 19–30.
- PARK, K. T.; KIM, S. H.; PARK, H. S.; LEE, K. W. – **The determination of bridge displacement using measured acceleration**. *Engineering Structures*. 27:3 (2005), p. 371–378.
- PERDIGÃO, V.; BARROS, P.; MATOS, J. C.; SOUSA, H.; FIGUEIRAS, J. A.; DIAS, I. – **SMARTE - development and implementation of a long term structural health monitoring**. In: IABMAS06 - Third International Conference on Bridge Maintenance Safety and Management. Porto, 2006.
- PEREZ, A. – **Fiber optic sensors: Application to the long-term monitoring of civil engineering structures**. Tese de mestrado, School of Civil Engineering, Technical University of Catalonia, 2001.
- PHARES, B. M.; ROSLANDER, D. D.; GRAYBEAL, B. B.; WASHER, G. A. – **Reliability of visual inspection**. *Public Roads*. 64:5 (2001), p. 22–29.
- PIMENTEL, M. – **Modelação e análise de estruturas laminares de betão: possibilidades e desafios**. Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2004.
- POÇAS, R. – **Gestão do ciclo de vida de pontes**. Tese de mestrado, Universidade do Minho, Escola de Engenharia, 2009.
- PORTUGAL, A.; PERRY DA CÂMARA, A.; VIRTUOSO, F.; REBELO, V. – **Nova travessia do Rio Tejo no Carregado**. In: JPEE2006 - 4as Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas. Lisboa, 2006.
- POSENATO, D. – **Model-free data interpretation for continuous monitoring of complex structures**. Tese de doutoramento, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2009.
- PSIMOULIS, P. A.; STIROS, S. C. – **Measurement of deflections and of oscillation frequencies of engineering structures using robotic theodolites (RTS)**. *Engineering Structures*. 29:12 (2007), p. 3312–3324.
- QUIRION, M.; BALLIVY, G. – **Concrete strain monitoring with Fabry-Perot fiber-optic sensor**. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 12:3 (2000), p. 254–261.
- REFER – **Ponte Eiffel sobre o Rio Lima**. REFER: Direcção de Comunicação e Imagem, 2007.
- RIBEIRO, A. – **Esquemas de multiplexagem de sensores em fibra óptica**. Tese de doutoramento, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, 1996.

- ROBERTS, G.; BROWN, C.; MENG, X. – **Bridge deflection monitoring; tracking millimeters across the Firth of Forth.** GPS World. 17:2 (2006), p. 26–31.
- ROBERTS, G.; MENG, X.; DODSON, A. – **Integrating a global positioning system and accelerometers to monitor the deflection of bridges.** Journal of Surveying Engineering-Asce. 130:2 (2004), p. 65–72.
- ROBERTS-WOLLMAN, C.; BREEN, J.; CAWRSE, J. – **Measurements of thermal gradients and their effects on segmental concrete bridge.** Journal of Performance of Constructed Facilities. 7:2 (2002), p. 166–174.
- ROBERTSON, I.; JOHNSON, G.; WANG, S. – **Instrumentation Performance During Long-Term Bridge Monitoring,** In: Ansari, F. (Ed.), Sensing Issues in Civil Structural Health Monitoring. Springer, pp. 331–340, 2005.
- ROCTESTGROUP: <http://www.roctest-group.com> (2011).
- RODRIGUES, C.; CAVADAS, F.; FÉLIX, C.; FIGUEIRAS, J. – **Assessment of the structural behaviour of a centenary double-deck steel bridge via a fbg monitoring system.** In: 4th European Workshop on Structural Health Monitoring. Krakow, 2008a.
- RODRIGUES, C.; FIGUEIRAS, J. – **Casa da Música - Loja Optimus: Relatório de instrumentação e observação da laje reforçada - Campanha de Junho 2009.** LABEST-FEUP, 2009.
- RODRIGUES, C.; FÉLIX, C.; FIGUEIRAS, J. – **Transdutor para medição de deslocamentos verticais. Patente Portuguesa PCT/pt2009/000058 (PT)** (2008b).
- RODRIGUES, C.; FÉLIX, C.; FIGUEIRAS, J. – **Transducer for measuring vertical displacements. Patente Internacional WO 2010/053392 (EN)** (2010a).
- RODRIGUES, C.; FÉLIX, C.; FIGUEIRAS, J. – **Fiber-optic-based displacement transducer to measure bridge deflections.** Structural Health Monitoring - International Journal. 10:2 (2011a), p. 147–156.
- RODRIGUES, C.; FÉLIX, C.; LAGE, A.; FIGUEIRAS, J. – **O sistema de monitorização de base Óptica da Ponte da Lezíria.** In: 1º Congresso de Segurança e Conservação de Pontes. Lisboa, Portugal: ASCP, 2009.
- RODRIGUES, C.; FÉLIX, C.; LAGE, A.; FIGUEIRAS, J. – **Development of a long-term monitoring system based on FBG sensors applied to concrete bridges.** Engineering Structures. 32:8 (2010b), p. 1993–2002.
- RODRIGUES, C.; FÉLIX, C.; LAGE, A.; FIGUEIRAS, J. – **O sistema de monitorização em fibra óptica da ponte da lezíria.** In: BE2010 - Encontro Nacional Betão Estrutural. Lisboa, 2010c.

- RODRIGUES, C.; FÉLIX, C.; LAGE, A.; FIGUEIRAS, J. – **Monitorização estrutural com base em fibra Óptica: o exemplo da ponte da lezíria**. In: CLME'2011 - 6º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia. Maputo, 2011b.
- RODRIGUES, C.; INAUDI, D. – **Fiber optic sensing technologies: Performance assessment of long-gauge sensors and piezometers**. FEUP/LABEST, SMARTEC, 2010a.
- RODRIGUES, C.; INAUDI, D. – **Laboratory and field comparison of long-gauge strain sensing technologies**. In: 5th European Workshop on Structural Health Monitoring. Sorrento, 2010b.
- RODRIGUES, C.; INAUDI, D.; GLISIC, B. – **Long-gauge fiber optic sensors: Performance comparison and applications**. International Journal of Lifecycle Performance Engineering. ?? (2011c).
- RODRIGUES, C.; INAUDI, D.; JUNEAU, F.; PINET, E. – **Miniature fiber-optic MOMS piezometer**. Geotechnical Instrumentation News. September (2010d), p. 10–13.
- RODRIGUES, C.; SOUSA, H.; FÉLIX, C.; FIGUEIRAS, J. – **Ensaio de Recepção da Nova Travessia do Tejo no Carregado, no sublanço A1/Benavente, da A10 - Auto-estrada Bucelas/ Carregado/ IC3**. LABEST/FEUP, 2007.
- RODRIGUES, F.; RODRIGUES, C. – **Alargamento e substituição do tabuleiro rodoviário da Ponte Eiffel em Viana do Castelo, linha do Minho PK 80+000**. In: VI Congresso de Construção Metálica e Mista. Porto, Portugal: CMM - Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista, 2007.
- SANTA, U.; BERGMEISTER, K. – **Techniques for the acquisition, modeling and interpretation of knowledge in monitoring applications**. In: Proceedings of the 6th International Workshop on Material Properties and Design. Bauhaus University Weimar, 2000.
- SANTIAGO, S. S. – **Sistema de gestão de obras de arte - módulo de inspeção**. BRISA, 2005.
- SANTOS, J. – **Sensores de fibra óptica: aplicação à medição de deslocamentos**. Tese de doutoramento, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, 1989.
- SAOUMA, V. E.; ANDERSON, D. Z.; OSTRANDER, K.; LEE, B.; SLOWIK, V. – **Application of fiber Bragg grating in local and remote infrastructure health monitoring**. Materials and Structures. 31:208 (1998), p. 259–266.
- SEIM, J.; UDD, E.; SCHULZ, W.; LAYLOR, H. M. – **Composite strengthening and instrumentation of the Horsetail Falls Bridge with long gauge length fiber Bragg grating strain sensors**. SPIE Proceedings. 3746 (1999), p. 196–199.

- SELLERS, B. – **The measurement of stress in concrete**, In: Myrvoll, F. (Ed.), *Field Measurements in Geomechanics*. Taylor & Francis, 2003.
- SIVANESAN, P.; SIRKIS, J. S.; MURATA, Y.; BUCKLEY, S. G. – **Optimal wavelength pair selection and accuracy analysis of dual fiber grating sensors for simultaneously measuring strain and temperature**. *Optical Engineering*. 41:10 (2002), p. 2456–2463.
- SMARTTEC, SA: <http://www.smartec.ch> (2011).
- SNEDDON, J. – **The wider application of hydrostatic levelling**. *Survey Review*. 25:91 (1979), p. 23–27.
- SOLOMON, I.; CUNNANE, J.; STEVENSON, P. – **Large-scale structural monitoring systems**. In: *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. Vol. 3995, pp. 276–287. 2000.
- SONG, M.; LEE, B.; LEE, S. B.; CHOI, S. S. – **Interferometric temperature-insensitive strain measurement with different-diameter fiber Bragg gratings**. *Optics Letters*. 22:11 (1997), p. 790–792.
- SOUSA, H.; DIMANDE, A.; RODRIGUES, C.; HENRIQUES, A.; FIGUEIRAS, J. – **'MENSUSMONITOR' - ferramenta de cálculo para tratamento e interpretação de resultados experimentais em engenharia civil**. In: BE2008 - Encontro Nacional Betão Estrutural. Guimarães, 2008a.
- SOUSA, H.; DIMANDE, A.; RODRIGUES, C.; HENRIQUES, A.; FIGUEIRAS, J. – **'MENSUSMONITOR' - programa informático de tratamento e interpretação de resultados experimentais**. *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas*. 6:2 (2009), p. 55–64.
- SOUSA, H.; FÉLIX, C.; BENTO, J.; FIGUEIRAS, J. – **Design and implementation of a monitoring system applied to a long-span prestressed concrete bridge**. *Structural Concrete*. 12:1 (2011), p. 82–93.
- SOUSA, H.; FÉLIX, C.; FIGUEIRAS, J. – **Sistema de monitorização da nova ponte sobre o rio Tejo em Portugal - Ponte da Lezíria**. In: 50<sup>o</sup> Congresso Brasileiro do Concreto. Salvador Bahia, Brasil, 2008b.
- SOUSA, H.; MATOS, J. C.; FIGUEIRAS, J. A. – **Development of an embedded sensor holder for concrete structures monitoring**. In: *The Second Congress fib*. Nápoles, Itália, 2006.
- SOUSA, H.; MATOS, J. C. E.; ASSIS, W.; FÉLIX, C.; FIGUEIRAS, J. – **Ensaio de carga da Ponte sobre o Rio Sorraia, Auto-estrada A13 (Almeirim-Marateca)**. LABEST/FEUP, 2005.

- SPENCER, B. F.; RUIZ-SANDOVAL, M. E.; KURATA, N. – **Smart sensing technology: opportunities and challenges**. Structural Control and Health Monitoring. 11 (2004), p. 349–368.
- SPYRAKOS, C. C.; RAFTOYIANNIS, I. G.; ERMOPOULOS, J. C. – **Condition assessment and retrofit of a historic steel-truss railway bridge**. Journal of Constructional Steel Research. 60:8 (2004), p. 1213–1225.
- STANTON, J. F.; EBERHARD, M. O.; BARR, P. J. – **A weighted-stretched-wire system for monitoring deflections**. Engineering Structures. 25:3 (2003), p. 347–357.
- SUTTON, M.; MINGQI, C.; PETERS, W.; CHAO, Y.; MCNEILL, S. – **Application of an optimized digital correlation method to planar deformation analysis**. Image and Vision Computing. 4:3 (1986), p. 143–150.
- TAHIR, B. A.; ALI, J.; RAHMAN, R. A. – **The functionality of fiber Bragg grating sensor compared to that of foil gauge**. American Journal of Applied Sciences. 2:12 (2005), p. 1600–1605.
- TAPANES, E. E. – **Fiber optic sensing solutions for real time pipeline integrity monitoring**. The Indonesian Pipeliner (1999).
- TENNYSON, R. C. – **Installation, use and repair of fibre optic sensors**. Manitoba: ISIS Canada, 2001.
- TENNYSON, R. C. – **Application of fox-tek fiber optic sensors for monitoring pipelines**. Fox-Tech Application Note, 2002.
- TENNYSON, R. C.; COROY, T.; DUCK, G.; MANUELPILLAI, G.; MULVIHILL, P.; COOPER, D. J. F.; SMITH, P. W. E.; MUFTI, A. A.; JALALI, S. J. – **Fibre optic sensors in civil engineering structures**. Canadian Journal of Civil Engineering. 27:5 (2000), p. 880–889.
- THEVENAZ, L.; FACCHINI, M.; FELLAY, A.; ROBERT, P.; INAUDI, D.; DARDEL, B. – **Monitoring of large structure using distributed Brillouin fiber sensing**. In: 13th International Conference on Optical Fiber Sensors. Kyongju, Korea, 1999.
- TIAN, K. K.; LIU, Y. L.; WANG, Q. M. – **Temperature-independent fiber Bragg grating strain sensor using bimetal cantilever**. Optical Fiber Technology. 11:4 (2005), p. 370–377.
- TODD, M. D.; JOHNSON, G. A.; VOHRA, S. T.; CHANG, C. C.; DANVER, B.; MALSAWMA, L. – **Civil infrastructure monitoring with fiber Bragg grating sensor arrays**. In: 2nd International Workshop on Structural Health Monitoring. Palo Alto, CA, USA, 1999.

- UDD, E. – **Fiber optic smart structures**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1995a.
- UDD, E. – **An overview of fiber-optic sensors**. Review of Scientific Instruments. 66:8 (1995b), p. 4015–4030.
- UDD, E.; SEIM, J.; SCHULZ, W.; MACMAHON, R.; SOLTESZ, S.; LAYLOR, M. – **Monitoring trucks, cars and joggers on the horsetail falls bridge using fiber optic grating strain sensors**. 14th International Conference on Optical Fiber Sensors. 4185 (2000), p. 872–875.
- UDD, E.; SPILLMAN, W. B. – **Fiber optic sensors: an introduction for engineers and scientists (2nd Ed.)**. Wiley-Interscience, 2011.
- UTTAMCHANDANI, D.; CULSHAW, B.; OVERINGTON, M. S.; PARSEY, M.; FACCHINI, M.; THEVENAZ, L. – **Distributed optical fibre sensing in synthetic fibre ropes and cables**. Ofs-13: 13th International Conference on Optical Fiber Sensors & Workshop on Device and System Technology toward Future Optical Fiber Communication and Sensing. 3746 (1999), p. A8–A11.
- VALENÇA, J.; JÚLIO, E.; ARAÚJO, H. – **Applications of photogrammetry to structural assessment**. Experimental Techniques (2011).
- VAN DER AUWERAER, H.; PEETERS, B. – **International research projects on structural health monitoring: An overview**. Structural Health Monitoring. 2:4 (2003), p. 341–358.
- VISHAY – **Surface preparation for strain gage bonding**. <http://www.vishaypg.com> (2010).
- VURPILOT, S. – **Analyse automatisée des systèmes de mesure de déformation pour auscultation des structures**. Tese de doutoramento, École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), 1999.
- WAN, K.; LEUNG, C. – **Applications of a distributed fiber optic crack sensor for concrete structures**. Sensors and Actuators A: Physical. 135:2 (2007), p. 458–464.
- WAN, K.; LEUNG, C.; OLSON, N. – **Investigation of the strain transfer for surface-attached optical fiber strain sensors**. Smart Materials and Structures. 17:3 (2008).
- WATSON, C.; WATSON, T.; COLEMAN, R. – **Structural monitoring of cable-stayed bridge: Analysis of GPS versus modeled deflections**. Journal of Surveying Engineering. 133:1 (2007), p. 23–28.
- WHELAN, M. P.; ALBRECHT, D.; CAPSONI, A. – **Remote structural monitoring of the Cathedral of Como using an optical fiber Bragg sensor system**. Proceedings of SPIE: Smart Structures and Materials and Nondestructive Evaluation for Health Monitoring and Diagnostics. 4694 (2002), p. 242–252.

- WIKIPEDIA - PONTE DA LEZÍRIA: [http://pt.wikipedia.org/wiki/Ponte\\_da\\_Lezíria](http://pt.wikipedia.org/wiki/Ponte_da_Lezíria) (2011).
- WONG, K. – **Instrumentation and health monitoring of cable-supported bridges**. *Structural Control and Health Monitoring*. 11 (2004), p. 91–124.
- WONG, K.; MAN, K.; CHAN, W. – **Monitoring Hong-Kong’s bridges: Real-time kinematic spans the gap**. *GPS World*. 12:7 (2001), p. 10–18.
- WORDEN, K.; DULIEU-BARTON, J. M. – **An overview of intelligent fault detection in systems and structures**. *Structural Health Monitoring*. 3:1 (2004), p. 85–98.
- XU, M. G.; ARCHAMBAULT, J. L.; REEKIE, L.; DAKIN, J. P. – **Thermally-compensated bending gauge using surface-mounted fiber gratings**. *International Journal of Optoelectronics*. 9:3 (1994), p. 281–283.
- XU, M. G.; REEKIE, L.; CHOW, Y. T.; DAKIN, J. P. – **Optical in-fiber grating high pressure sensor**. *Electronics Letters*. 29:4 (1993), p. 398–399.
- YIN, S. – **Distributed Fiber Optic Sensors**, In: Yu, F. T. S.; Yin, S. (Eds.), *Fiber Optic Sensors*. Marcel Dekker, pp. 183–233, 2002.
- YIN, S.; RUFFIN, P. B.; YU, F. T. S. – **Fiber optic sensors (2nd ed.)**. New York: CRC Press, 2008.
- YONEYAMA, S.; KITAGAWA, A.; IWATA, S.; TANI, K.; KIKUTA, H. – **Bridge deflection measurement using digital image correlation**. *Experimental Techniques*. 31:1 (2007), p. 34–40.
- YU, F. T. S.; YIN, S. – **Fiber optic sensors**. New York: Marcel Dekker, 2002.
- YUN, C. B.; CHO, S.; LYNCH, J. P.; ZIMMERMAN, A. T.; SPENCER, B. F.; NAGAYAMA, T. – **Smart wireless sensor technology for structural health monitoring of civil structures**. *International Journal of Steel Structures*. 8:4 (2008), p. 267–275.
- ZHANG, B.; BENMOKRANE, B.; NICOLE, J. F. – **Laboratory evaluation of fiber-optic sensors for strain monitoring**. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 15:4 (2003), p. 381–390.
- ZHAO, Y.; LIAO, Y. B. – **Discrimination methods and demodulation techniques for fiber Bragg grating sensors**. *Optics and Lasers in Engineering*. 41:1 (2004), p. 1–18.
- ZHOU, Z.; JINPING, O. U. – **Development of FBG sensors for structural health monitoring in civil infrastructures**. *Sensing Issues in Civil Structural Health Monitoring* (2004).

---

ZHU, Y.; FU, Y.; CHEN, W.; HUANG, S. – **Online deflection monitoring system for Dafosi cable-stayed bridge**. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 17:8-9 (2006), p. 701–707.