

Monitorização da integridade estrutural de obras de arte



**Joaquim A.
Figueiras¹**

RESUMO

Na última década, a Monitorização da Integridade Estrutural (SHM – Structural Health Monitoring) tem emergido como um novo e interessante tema, de aplicação cada vez mais alargada, no seio da Engenharia Civil. O conceito geral de SHM refere-se à verificação do desempenho das estruturas em serviço, baseada na medição de grandezas relevantes recorrendo às novas tecnologias, sendo cada vez em maior grau um instrumento importante no projecto, na construção, e na manutenção das obras de arte e dos edifícios.

No presente artigo são referidos os componentes de um sistema de monitorização e a actividade do LABEST na monitorização de estruturas e no desenvolvimento de novos tipos de sensores. É feita referência à utilização de sensores de Bragg em fibra óptica implementados e aplicados em obra. Por último, é apresentado o sistema de monitorização afecto com carácter de permanência à nova ponte sobre o Tejo no Carregado, a Ponte da Lezíria. A concepção do referido sistema de monitorização teve em conta, entre outros aspectos, tanto a fase de construção como a fase de exploração da obra, integrando um conjunto de parâmetros estruturais (estáticos e dinâmicos) e de durabilidade, medidos por sensores apropriados. É descrito o processo e a instalação do sistema de monitorização da referida obra.

PALAVRAS-CHAVE

Monitorização estrutural, Sensores ópticos, Ponte da Lezíria, Projecto de monitorização

¹ LABEST, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
R. Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, Portugal. jafig@fe.up.pt

1. INTRODUÇÃO

1.1 Estruturas de Engenharia Civil

As actuais sociedades desenvolvidas dependem de um extenso e complexo sistema de infra-estruturas para manter a prosperidade económica e qualidade de vida. Na Europa, nos Estados Unidos e outros países desenvolvidos os edifícios, as pontes e demais infra-estruturas de transportes têm-se ressentido de décadas de falta de manutenção e sobre-utilização, resultando na sua degradação acelerada. Muitas das nossas infra-estruturas exibem hoje um desempenho menos satisfatório, mas os fundos públicos são cada vez mais escassos para a necessária reabilitação das estruturas existentes ou para a construção de novas.

Vários factores têm contribuído para a condição menos satisfatória em que se encontram as nossas estruturas, nomeadamente, a corrosão extensa dos varões de aço em estruturas de betão, a corrosão do aço em estruturas metálicas, o incremento das cargas e de novos requisitos de segurança, ou simplesmente, a deterioração geral e envelhecimento devido a condições ambientais cada vez mais adversas. Mas um dos factores primários que mais tem contribuído para o estado em que se encontram as nossas infra-estruturas é sem dúvida a deficiente inspecção e monitorização em que os problemas apenas se tornam aparentes e a merecer a atenção quando as estruturas estão num estado de degradação tal que o custo da reparação se aproxima do correspondente à sua substituição.

O nosso conhecimento intrínseco do comportamento das infra-estruturas sujeitas às acções ambientais e às cargas aplicadas é ainda limitado, necessitando os profissionais de Engenharia Civil de recorrer a regras práticas e a parâmetros conservativos que resultam muitas vezes em custos acrescidos. O projecto de estruturas inovadoras, o uso de novos materiais, e a utilização de novos processos construtivos exigem maiores responsabilidades e riscos acrescidos aos intervenientes. Essas responsabilidades acrescidas serão assumidas se as estruturas forem dotadas de instrumentos/meios que permitam fornecer informação sobre o seu estado de integridade quer durante a construção, quer ao longo da fase de exploração [1].

Nos últimos anos, o nosso País tem feito um enorme esforço de renovação das redes de transportes rodoviário e ferroviário mas é necessário que esse esforço se apoie nas melhores práticas, recolhendo os benefícios de um processo de manutenção eficiente com recurso às novas tecnologias. Embora as decisões de gestão e manutenção das infra-estruturas estejam baseadas na prática corrente, as inconsistências dos métodos actuais de diagnóstico resultam na reabilitação e reforço de pontes que não necessitavam de reforço, mas pior é a possibilidade de algumas pontes que precisam de intervenção urgente não sejam identificadas.

Na última década, a monitorização da integridade estrutural (SHM – Structural Health Monitoring) tem emergido como um novo e interessante tema, de aplicação cada vez mais alargada, no seio da Engenharia Civil. Refere-se ao conceito geral de SHM correspondente à verificação do desempenho das estruturas em serviço, baseada na medição de grandezas relevantes que nos fornecem informação sobre o estado actual da estrutura. As estruturas vivas, aquelas dotadas de sistema de monitorização incorporando diferentes tipos de sensores, têm emergido como uma solução potencial no diagnóstico precoce da deterioração estrutural (antes desta se tornar crítica), representando assim um instrumento poderoso na luta pela sustentabilidade das infraestruturas. É cada vez mais claro que a SHM é correntemente e será no futuro um instrumento importante no projecto, na construção, e na manutenção dos sistemas modernos de estruturas de Engenharia Civil [2].

2. MONITORIZAÇÃO ESTRUTURAL

A monitorização da integridade estrutural – SHM, não é uma ideia nova. Desde os primeiros tempos que os engenheiros procuram examinar o desempenho das estruturas num esforço para prolongar o

bom funcionamento em serviço e garantir a segurança de pessoas e bens. Contudo, apenas recentemente a SHM se tem mostrado como uma componente importante da Engenharia Civil, com um papel de relevo na sustentabilidade das infraestruturas, e essencial para o sucesso da próxima geração de engenheiros. A rápida evolução e avanços das novas tecnologias de SHM pode ser atribuída a um conjunto de factores de entre os quais se refere:

- A necessidade de monitorização permanente de projectos inovadores usando novos materiais (i.e. controlar e garantir a segurança de sistemas cujo desempenho não é ainda perfeitamente conhecido);
- A necessidade de monitorizar permanentemente as estruturas correntes com vista à sua gestão e manutenção mais eficaz;
- A necessidade de conhecer melhor o comportamento de estruturas existentes, a serem reabilitadas, por forma a garantir uma intervenção mais eficaz e segura;
- Os recentes desenvolvimentos e disponibilidade de novos sensores mais funcionais e económicos (e.g. sensores em fibra óptica, materiais inteligentes) e de novos sistemas de aquisição de dados;
- Os contínuos desenvolvimentos das tecnologias de comunicação (baseadas na internet e sistemas “wireless”) e na disponibilidade de meios potentes para a transmissão, armazenamento e gestão de dados;
- Os avanços na análise e diagnóstico de estruturas, incluindo a análise numérica rigorosa, os modelos de detecção de dano e os algoritmos de inteligência artificial.

A monitorização da integridade estrutural pode ser definida como um método não destrutivo de avaliação estrutural in-situ que utiliza vários sensores, aplicados à superfície ou embebidos na estrutura, que permitem medir diferentes grandezas de forma permanente ou temporária. Os dados recolhidos podem ser usados para a verificação da segurança, da integridade, da resistência, ou do desempenho da estrutura, e ainda para identificar possível dano no início da sua ocorrência.

2.1 Analogia do corpo humano

Uma forma de introduzir a ideia da SHM consiste em estabelecer uma analogia com o corpo humano [3]. Da mesma forma como a um médico se solicita que verifique a saúde do seu paciente, os engenheiros de hoje têm de ser capazes de monitorizar a condição actual das estruturas (ver Figura 1). Um médico usa equipamento especializado para detectar os sinais vitais do paciente e aferir do seu estado geral de saúde. De forma similar, o engenheiro utiliza sensores especializados para recolher informação sobre o estado de “saúde” da estrutura. Se a pressão sanguínea do paciente está demasiado elevada o doutor prescreve medicamento correctivo. Identicamente nas aplicações de SHM, se os dados que nos chegam dos sensores indicam deformações e tensões excessivas na estrutura, o engenheiro pode tomar medidas adequadas para corrigir a situação. Em ambos os casos, a acção preventiva pode evitar consequências catastróficas. Os “check-ups” anuais na medicina são já uma forma preventiva de manutenção para os seres humanos, e pouca gente, hoje questiona que esta rotina tem melhorado a saúde da população em geral. No futuro, a SHM das infra-estruturas entrará de igual modo na rotina, e fornecerá informação atempada sobre a degradação estrutural, contribuindo assim

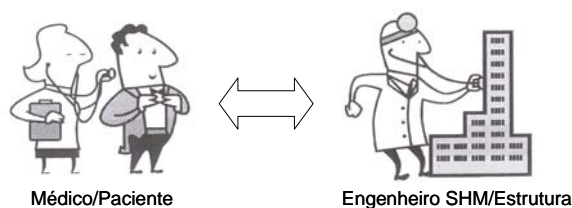


Figura 1. A analogia SHM/corpo humano [3].

para a manutenção eficiente do nosso sistema de infra-estruturas. Esta tecnologia emergente está destinada a ser de grande valor para os responsáveis pela segurança e durabilidade das estruturas de Engenharia Civil.

2.2 Componentes e tipos de sistemas de SHM

Os sistemas de monitorização da integridade estrutural são aplicáveis a todos os tipos de estruturas de Engenharia Civil nomeadamente, pontes, edifícios, túneis, condutas, auto-estradas e vias férreas. Embora os detalhes específicos de um sistema de monitorização possam variar substancialmente, um sistema moderno de SHM deve incluir tipicamente as cinco componentes seguintes: i) Sistema sensor e aquisição de dados; ii) Comunicação da informação; iii) Processamento inteligente, armazenamento e gestão dos dados; iv) Diagnóstico e interpretação da resposta estrutural; v) Acesso à informação relevante para a tomada de decisão.

Uma representação esquemática de um sistema típico de monitorização estrutural está ilustrado na Figura 2. Claramente que o desenvolvimento de um sistema destes envolve o conhecimento em diferentes áreas, tais como estruturas, materiais, sensores, gestão e processamento de dados, modelação, computadores e comunicação.

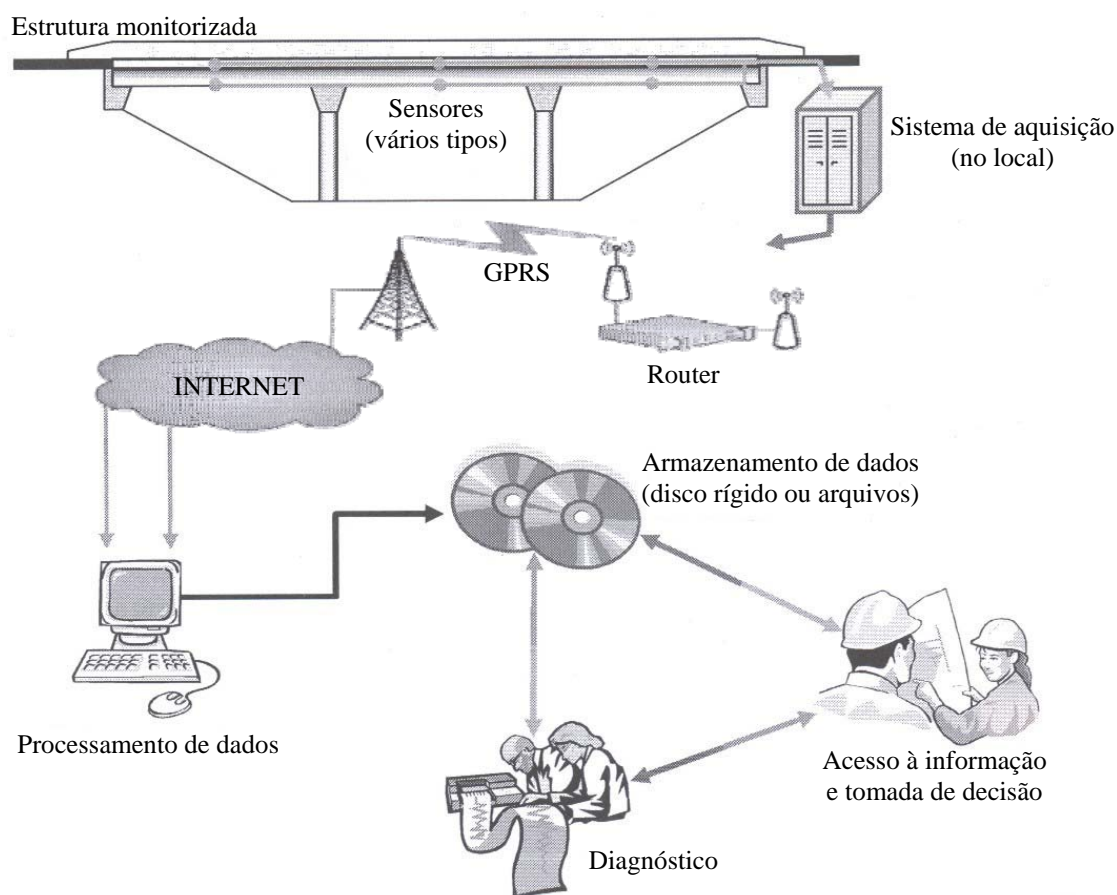


Figura 2. Ilustração esquemática de um sistema típico de SHM [3].

A monitorização da integridade estrutural pode ser classificada numa das seguintes quatro categorias: ensaios estáticos, ensaios dinâmicos, monitorização periódica e monitorização contínua (ver Figura 3). Estas categorias, que se podem dividir em diferentes sub-tipos como indicado na Figura 3, distinguem-se pelo tipo de acção a que as estruturas são sujeitas, quer em termos da frequência da medição das grandezas físicas, quer no que diz respeito à escala temporal para recolha dos dados.

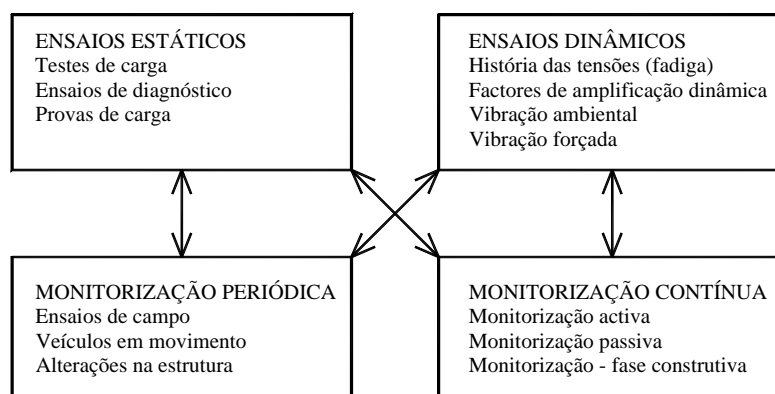


Figura 3. Tipos e sub-tipos de sistemas de SHM.

3. DESENVOLVIMENTOS EM SISTEMAS DE MONITORIZAÇÃO

3.1 A experiência do LABEST

LABEST - Laboratório da Tecnologia do Betão e do Comportamento Estrutural é uma unidade de investigação integrada no Sistema Científico Português, baseada na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, que nos últimos anos tem devotado especial atenção à problemática da monitorização da integridade estrutural de pontes.

O trabalho começou com provas de carga e monitorização de estruturas por períodos curtos, nos quais foram usados sensores eléctricos e sistemas de aquisição automática de sinal [4]. Projectos de investigação, suportados por fundos públicos, foram então desenvolvidos, executados demonstradores laboratoriais, e novas competências em sistemas sensores e de aquisição de sinal foram adquiridas [5]. Cabeças sensoras baseadas quer na tecnologia eléctrica quer na tecnologia óptica foram desenvolvidas e o seu desempenho avaliado tendo em vista a aplicação a estruturas de engenharia civil de sistemas de monitorização mais fiáveis e mais duráveis.

Projectos de demonstração e desenvolvimento de protótipos foram então realizados, com fundos públicos e privados, para promover a aplicação dos novos conceitos da monitorização de integridade estrutural. O projecto de investigação em consórcio SMARTE [6], parcialmente suportado pela ADI – Agência de Inovação, juntou os laboratórios de investigação LABEST e INESC-Porto e o concessionário de Auto-estradas - BRISA S.A., com o objectivo de implementação de um novo sistema de monitorização estrutural que contribua para uma gestão mais eficiente da problemática da manutenção de pontes.

Contratos realizados com os donos de infra-estruturas de transportes e com empresas construtoras para o fornecimento de sistemas específicos de monitorização têm desde então pavimentado o caminho do LABEST na direcção das novas metodologias para o projecto, construção e manutenção das estruturas de engenharia civil fazendo uso das potencialidades da monitorização estrutural. O trabalho de monitorização desenvolvido durante as operações de reabilitação e reforço na ponte Luiz I com vista à sua integração na rede do Metro do Porto é um exemplo de intervenção pioneira do LABEST [2]. O Sistema de Monitorização Estrutural e de Durabilidade da nova Ponte da Lezíria, cuja aplicação está a ser finalizada, é pela sua importância, extensão e diversidade de parâmetros a serem controlados um marco a nível internacional.

A contribuição do LABEST para o desenvolvimento e aplicação de sistemas de monitorização tem-se reflectido essencialmente: i) na análise do comportamento estrutural com vista à selecção dos pontos críticos e das grandezas cuja medição é relevante; ii) na implementação dos sensores e transdutores mais apropriados para a aplicação em vista; iii) na concepção e implementação da rede de sensores e

sistemas de aquisição; iv) no desenvolvimento do software de gestão, de consulta e de análise de dados; e v) na aplicação de modelos numéricos de diagnóstico e de identificação de danos e/ou alterações estruturais. Na secção seguinte é feita apenas uma referência à selecção dos sensores mais apropriados em face da aplicação pretendida.

3.2 Sensores eléctricos *versus* sensores ópticos

Uma das linhas de força que tem suportado os recentes avanços na tecnologia da monitorização da integridade estrutural (SHM) tem sido o desenvolvimento de novos tipos de sensores com robustez adequadas para instalação em obra, e que forneçam dados fiáveis, por períodos longos de tempo e sem perda da referência inicial.

Os sensores eléctricos têm sido tradicionalmente os sensores de base dos sistemas automáticos de observação de estruturas existindo por isso uma larga experiência na sua utilização em obra. Recentemente, têm-se verificado um grande desenvolvimento das tecnologias dos sensores em fibra óptica (FOS) impulsionado, quer pelos enormes avanços das tecnologias de comunicação em fibra óptica, quer pelas vantagens que estes sensores oferecem quando comparados com os sensores eléctricos convencionais. De entre as vantagens que são apontadas aos sensores de fibra óptica, e em especial os sensores em rede de Bragg (FBG), refere-se o seu pequeno diâmetro em material não corrosível e fácil de embeber, a imunidade a interferências electromagnéticas e ondas de rádio, resultando na ausência de ruído, uma elevada precisão na leitura do sinal, e a possibilidade de multiplexagem, i.e., de ligar vários sensores ao longo de uma mesma fibra óptica.

Nos últimos 6 anos o LABEST tem desenvolvido e aplicado sensores de Bragg em fibra óptica a par com a aplicação de sensores de base eléctrica, resultando daí já alguma experiência acumulada. De entre os casos em que a monitorização óptica foi aplicada em obra, salienta-se no Quadro 1 as intervenções do LABEST indicando, o tipo de aplicação, o número e classe dos sensores utilizados e o objectivo a atingir.

Quadro 1. Sensores de Bragg em fibra óptica aplicados pelo LABEST

<i>Obra</i>	<i>ano</i>	<i>Número e tipo de sensores</i>	<i>Objectivo da selecção/opção</i>
Ponte sobre o Rio Sorraia na A10 – Projecto SMARTE	(2004)	30 sensores de deformação 10 sensores de temperatura (embebidos no betão)	Comparação da eficiência dos sistemas eléctricos e ópticos de interrogação e aquisição de sinal.
Ponte Luiz I	(2006)	118 sensores de deformação 10 sensores de temperatura 8 sensores de deslocamento	Sistema permanente e durável aplicado a estrutura metálica.
Ponte da Lezíria	(2007)	60 sensores de deformação 6 sensores de temperatura (embebidos no betão) 11 sensores de flecha 4 sensores de temperatura	Sistema inovador para medição de curvaturas e flechas nos tramos da ponte.
Ponte Eiffel em Viana do Castelo (Reabilitação)	(2007)	30 sensores de deformação (colados à superfície do aço)	Redução do ruído e eliminação das interferências de campos electro-magnéticos.
Casa da Música no Porto (Reforço de casca)	(2008)	10 sensores de deformação 4 sensores de temperatura (colados a compósito CFRP)	Não intrusivo. Possibilidade de leituras periódicas com equipamento portátil sem perder referência inicial.
Ponte ferroviária de Trezói Projecto: POCTI/ECM/57286/2004 (Fadiga)	(2008)	6 sensores de deformação (colados à superfície do aço)	Avaliação dos níveis de tensão em serviço. Comparação do desempenho de sensores ópticos com eléctricos.

No que se refere à comparação da medição de deformações obtidas com extensómetros de resistência eléctrica e com redes de Bragg em fibra óptica colados directamente a uma superfície metálica é de interesse ilustrar os resultados obtidos na Ponte de Trezói [7] que exibem grande amplitude de deformações com a passagem dos comboios.

Comparação de resultados obtidos na Ponte de Trezói

O sistema de monitorização implementado na ponte ferroviária de Trezói, na linha da Beira Alta, teve como objectivo a realização de ensaios dinâmicos (circulação corrente dos comboios) para traçar níveis de tensões em elementos críticos da estrutura com vista à definição da vida útil e fadiga. A monitorização consistiu na aplicação para além dos sensores de temperatura, de sensores de deformação de base eléctrica e sensores ópticos usados para aferição [7]. A ponte em estrutura metálica rebitada, é formada por três tramos de 39m, 48m e 39m apoiados em dois pilares em estrutura metálica treliçada de configuração trapezoidal e nos encontros em alvenaria. O tabuleiro é constituído por duas vigas principais longitudinais cujos banzos são constituídos por 2 UNP, apresentando 5.68m de altura e distância entre vigas de 4.40m (ver Figura 4). As vigas dão apoio a carlingas sobre as quais se apoiam as longarinas que suportam directamente os carris.



Figura 4. Vista geral da ponte ferroviária de Trezói. Vista do interior do tabuleiro.

A secção S6 de meio vão do tramo central da corda inferior de uma das vigas principais, onde se instalaram lado a lado sensores ópticos e eléctricos (ver Figura 5), é considerada para comparar o desempenho na aquisição dinâmica (100Hz) dos dois tipos de sensores de deformação.

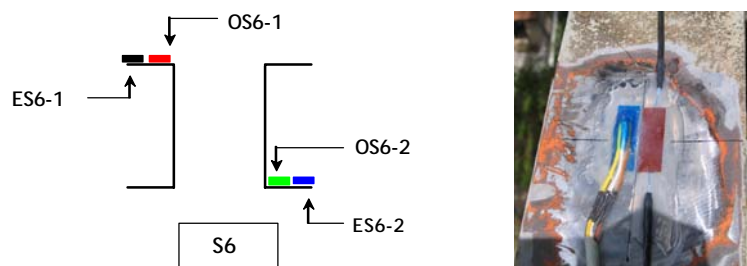


Figura 5. Localização dos sensores eléctricos e ópticos na secção S6 a meio vão da corda inferior e pormenor dos extensómetros ES6-1 (eléctrico) e OS6-1 (óptico) antes da protecção.

A Figura 6 apresenta as deformações registadas pelos sensores ópticos e eléctricos aplicados na corda inferior a meio vão do tramo central durante a passagem, a cerca de 30km/h, do comboio de mercadorias ilustrado.

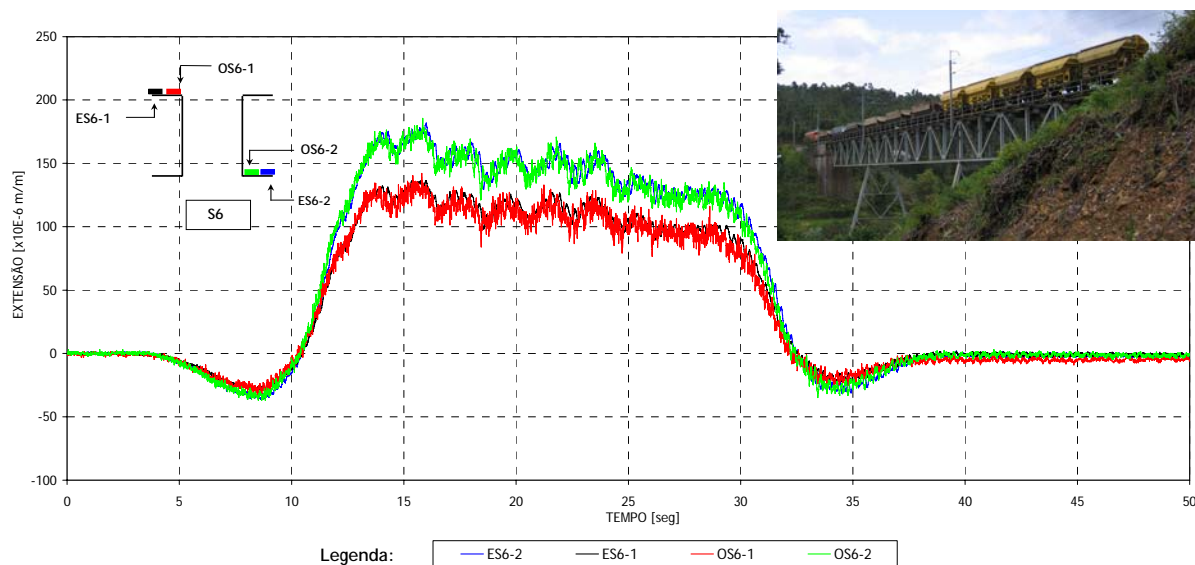


Figura 6. Deformações registradas pelos sensores eléctricos e ópticos instalados na corda inferior a meio vão do tramo central durante a passagem de um comboio de mercadorias.

Comparando os resultados do sistema óptico e eléctrico, qualquer deles com uma frequência de aquisição de 100Hz, verifica-se que sendo o sistema correctamente instalado, os sensores apresentam sensibilidade equivalente e os resultados são idênticos. Refira-se que, com a instrumentação dos carris no troço de aproximação à ponte poderemos de forma simples ter um sistema de pesagem em movimento do comboio. A Figura 7 ilustra o registo obtido por um extensómetro aplicado a um dos carris durante a passagem do comboio de mercadorias ilustrado na Figura 6. Uma vez calibrado o sensor, poderá ser feita a identificação do comboio que transita, nomeadamente a sua constituição, a velocidade e o peso.

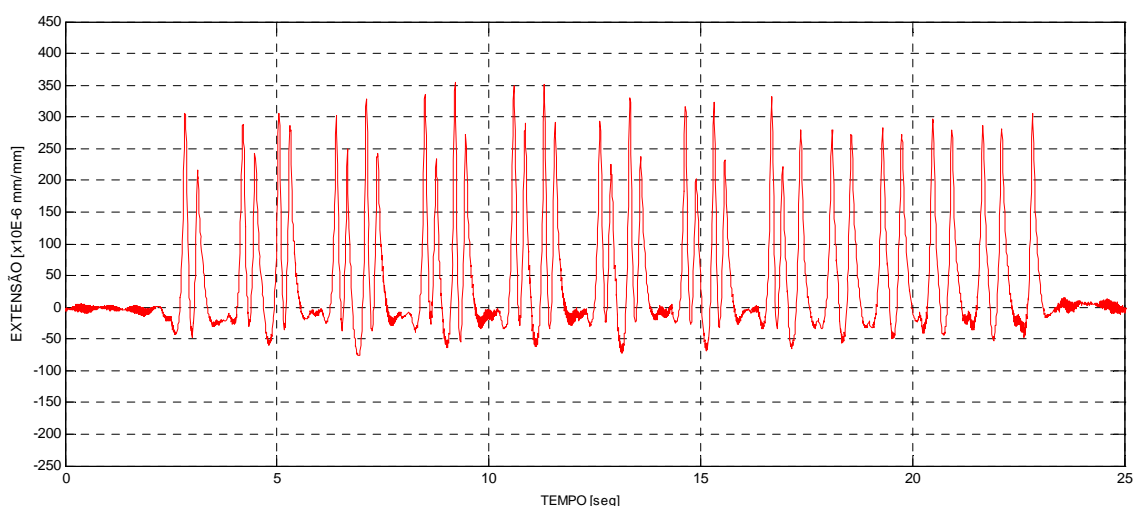


Figura 7. Deformações registradas na secção de um dos carris durante a passagem de comboio de mercadorias.

Para concluir a comparação dos sistemas eléctrico e óptico quando aplicados em obra, convém referir que o sistema óptico ainda apresenta algumas desvantagens que poderão vir a ser superadas no futuro. A disponibilidade de equipamento de aquisição de sinal é ainda limitada o que faz com que os custos não sejam em geral competitivos. Verifica-se ainda que a robustez das fibras e dos cabos ópticos a instalar em obra é menor que os correspondentes eléctricos, e que as conexões e ligações ópticas não tem apresentado a robustez e durabilidade desejadas.

4. SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO DA PONTE DA LEZÍRIA

A nova travessia do Tejo no Carregado permite a ligação entre o Carregado e Benavente, situados a norte e sul respectivamente, contemplando o viaduto de acesso do lado norte, a ponte principal sobre o rio Tejo (Figura 8) e o viaduto de acesso do lado sul. A Ponte da Lezíria, como ficou chamada esta travessia, com um comprimento total de 11,7km, a nona maior ponte do mundo, beneficiou da implementação de um sistema de monitorização definido durante a fase de projecto.



Figura 8. Ponte da Lezíria, em Novembro de 2007.

Um projecto, como o sistema de monitorização da Ponte da Lezíria é complexo, podendo ser desdobrado na sequência de três etapas como se ilustra na Figura 9 [8]: (i) o processo, onde se insere todo o desenvolvimento até à definição do documento para execução; (ii) a instalação, onde se inserem todas as tarefas que permitem a realização concreta do que consta nesse documento de execução; (iii) e os registos, os quais representam o resultado pretendido pela implementação do sistema de monitorização.



Figura 9. Etapas do projecto do sistema de monitorização da ponte da Lezíria.

O sistema de monitorização da ponte da Lezíria apresenta alguns aspectos inovadores na monitorização em Portugal, desde logo foi parte integrante do projecto da ponte, existindo um volume no caderno de encargos a si destinado e intitulado: “Plano de Monitorização Estrutural e de Durabilidade” [9]. Este volume foi alvo de sucessivas versões e com a intervenção das mais diversas entidades, desde o dono de obra, projectistas, consultores, construtora e especialistas em SHM. O projecto, na sua versão final, pela sua organização, conteúdos e objectivos demonstrou ser um documento de referência na área da monitorização de estruturas.

4.1 O Processo

Como se ilustra na Figura 10, o Projecto Executivo do Plano de Monitorização Estrutural e de Durabilidade é constituído por um conjunto de documentos, desde logo previstos, num processo de “abertura de gavetas” que foram, e estão a ser, sucessivamente preenchidas no tempo [10]. Na Figura ilustram-se os documentos que materializam o projecto, ou seja, as diversas gavetas que constituem o projecto. Trata-se de um processo evolutivo no tempo, que foi, e está a ser, completado à medida que se vão atingindo patamares de objectivos até à entrega definitiva ao dono de obra. A conclusão de um processo deste tipo não se dá no momento da finalização da instalação física de todos os equipamentos, cablagens e acessórios, mas sim após um determinado período pós instalação

(conclusão da obra) em que é efectuado um acompanhamento minucioso para validação do sistema visando a entrega definitiva ao dono de obra.

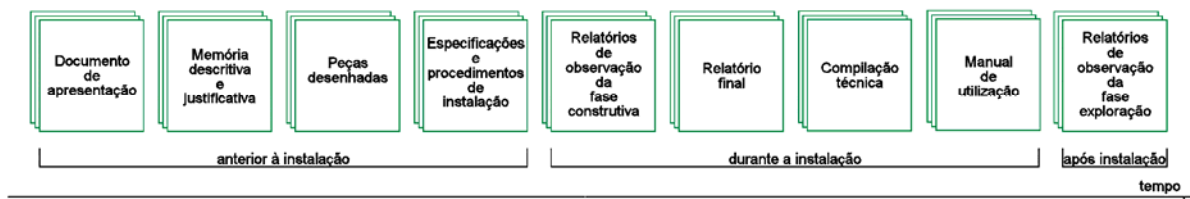


Figura 10. Organização do projecto do sistema de monitorização estrutural e de durabilidade.

O sistema de monitorização proposto integra assim toda a componente de equipamentos eléctricos/electrónicos, sensores, sistema de aquisição automática e tratamento/gestão de dados integrados numa rede de comunicação em fibra óptica de acesso remoto (Figura 11). Este sistema disponibiliza ao cliente final, um sistema orientado para a vigilância e prevenção da segurança estrutural e de durabilidade, fornecendo um conjunto de medidas das diversas grandezas em observação, com registos contínuos e simultâneos de acesso remoto.



Figura 11. Constituição do sistema de monitorização da ponte da Lezíria.

Componente sensorial

A componente sensorial baseia-se na instalação de: (i) sensores apropriados para a medição das grandezas interessadas; (ii) sistemas de interrogação que permitem interrogar e armazenar os registos desses mesmos sensores. Para isso, é seleccionado um conjunto de pontos relevantes para o estudo e acompanhamento do comportamento da estrutura.

No que concerne ao sistema da Ponte da Lezíria, os referidos sensores e sistemas de aquisição são distribuídos de um modo agrupado. Mais especificamente em nove zonas instrumentadas, duas nos viadutos de acesso da margem norte, três zonas na estrutura da ponte e quatro zonas nos viadutos de acesso da margem sul. Cada zona monitorizada consiste numa série de secções instrumentadas, existindo numa dessas secções um Posto de Observação (PO) que possui um ou mais tipos de sistemas de aquisição. Em cada secção, são instalados sensores para medir os parâmetros pretendidos. A ligação dos sensores aos sistemas de aquisição, localizados no PO, é realizada por intermédio de cablagens, sendo as ligações efectuadas em Caixas de Junção (CJ) e Caixas Concentradoras de Sinal (CCS) [10]. Para uma mais fácil interpretação do enunciado, esquematiza-se na Figura 12 a arquitectura da componente sensorial.

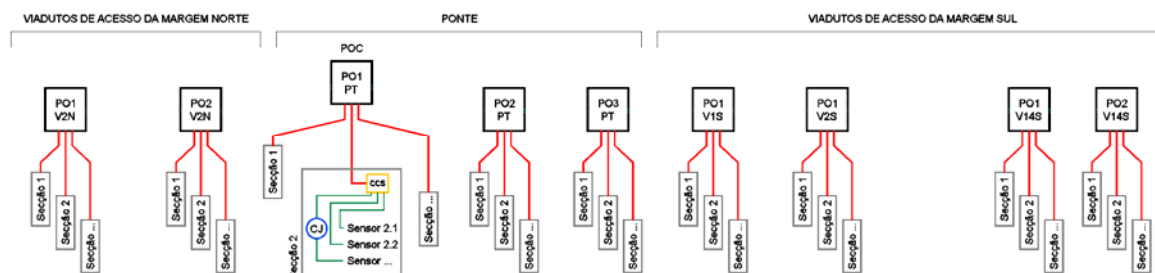


Figura 12. Arquitectura da componente sensorial.

Ilustra-se na Figura 13 os constituintes da componente sensorial onde são identificados os parâmetros seleccionados para medição, com os respectivos símbolos e siglas adoptados para identificação.

Adicionalmente é apresentado, na mesma figura, a identificação dos sistemas de aquisição adoptados para a interrogação dos parâmetros seleccionados.

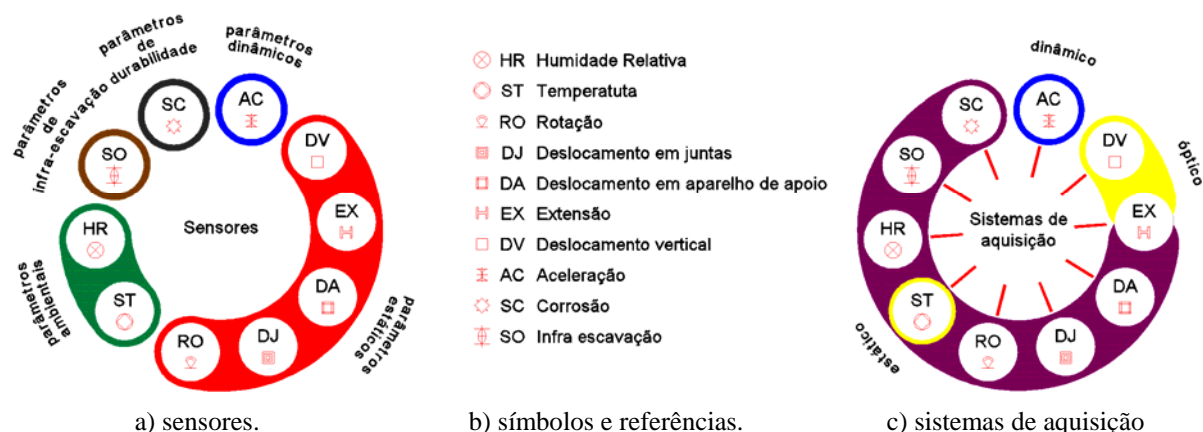


Figura 13. Constituintes da componente sensorial.

4.2 A Instalação

A instalação baseou-se no cumprimento dos documentos “A–Memória Justificativa”, “B–Peças Desenhadas” e “C–Procedimentos e Especificações” [10], os quais fazem parte do processo do sistema de monitorização referido anteriormente. Tendo em conta a complexidade do sistema de monitorização e a sua dimensão, a instalação teve como guia principal o documento “C–Procedimentos e Especificações” [10]. Este documento foi elaborado com o objectivo de antecipar e organizar o conjunto de tarefas a serem realizadas durante a instalação. Foram tidos em conta aspectos como: (i) a organização de tarefas de laboratório de modo a minimizar os trabalhos em obra; (ii) a sequência e interdependência de tarefas de modo a que fosse minimizada a repetição de procedimentos nos trabalhos em obra; (iii) a fase da construção em que estas tarefas seriam realizadas, de modo a antecipar cenários, rentabilizar recursos e minimizar esforços.

Preparação e organização em laboratório

Como em qualquer trabalho de campo, o sucesso da instalação depende fortemente dos trabalhos de preparação realizados em laboratório. É fundamental a existência de uma equipa em laboratório que efectue a gestão dos equipamentos, cablagens e acessórios. Numa instalação deste tipo, com as especificidades que lhe estão inerentes, a base do sucesso em obra é ter, em laboratório, um conjunto de procedimentos que devem ser aplicados a todos os equipamentos, cablagens e acessórios que serão utilizados em obra. Nenhum material deve sair do laboratório para obra sem que tenha passado por esses procedimentos.

Instalação de equipamentos, cablagens e acessórios em obra

Concluídas as tarefas de preparação e calibração em laboratório, procede-se à instalação em obra. O sistema de monitorização instalado contempla uma série de sensores embebidos na estrutura, o que obrigou desde logo à sua instalação durante a fase de betonagem. Caso se pretenda monitorizar apenas a fase de exploração, a instalação do sistema pode ser realizada em duas fases distintas. Uma primeira fase que consiste na instalação dos sensores embebidos aquando das betonagens, e posteriormente uma segunda fase onde são realizados os restantes trabalhos. No entanto, caso se pretenda monitorizar a fase de construção, para além da instalação dos sensores embebidos durante a fase de construção, é necessário considerar de modo provisório a instalação de Postos de Observação, condução de cablagens por caminhos provisórios e respectivas ligações. Ou seja, para além da instalação dos sensores embebidos, é necessário considerar nesta primeira fase uma instalação provisória do sistema de monitorização.

Para a Ponte da Lezíria foi considerada a monitorização da fase construtiva tendo em conta a importância socioeconómica da obra. Foram monitorizadas três das nove zonas instrumentadas durante a construção, mas mesmo assim exigiu um elevado empenho da equipa de instalação para dar resposta ao ritmo que foi imposto pela construção e obter o sucesso nos registos pretendidos. Perante o exposto, depreende-se que uma instalação que opte pela monitorização da fase de construção, exige um maior empenho quando comparado com uma instalação vocacionada apenas para a fase de exploração. Na Figura 14 ilustra-se a sequência dos trabalhos efectuados para o acompanhamento da fase construtiva.



Figura 14. Sequência dos trabalhos de instalação durante a fase de construção.

Independentemente de se pretender a monitorização da fase de construção, existe uma fase dos trabalhos que se destinam à conclusão da instalação do sistema de monitorização. Esta fase dos trabalhos coincide com a fase de acabamentos da estrutura, começando a existir condições para realizar um conjunto de tarefas tais como: (i) a instalação de sensores exteriores em segurança; (ii) a passagem de cablagens ao longo de calhas técnicas e tubagens em passeios; (iii) a instalação dos diversos Postos de Observação de modo definitivo; (iv) a realização das ligações em caixas apropriadas para o efeito (Figura 15).

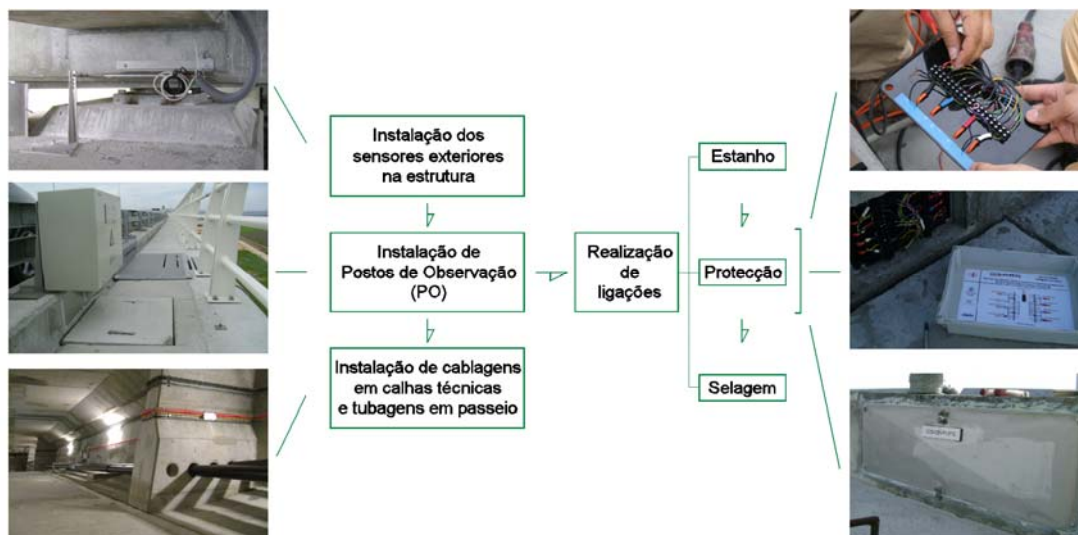


Figura 15. Sequência dos trabalhos de instalação durante a fase de acabamentos da obra.

Esta fase dos trabalhos de instalação é das mais intensivas, pois trata-se da fase final da construção e desmultiplicam-se equipas de acabamentos para terminar a obra no prazo previsto exigindo um ritmo acelerado dos trabalhos, bem como horários de trabalho mais extensos. Neste cenário, e atendendo a que os materiais e equipamentos de um sistema de monitorização são extremamente sensíveis, exige-se em obra uma equipa técnica muito competente, dinâmica e flexível.

Testes, manual de imagem e impermeabilizações

Antes da entrega do sistema de monitorização ao dono de obra, é necessário efectuar uma série de testes e verificações finais de modo a garantir o pleno funcionamento do sistema. O objectivo destes procedimentos é identificar, e reparar, eventuais anomalias que possam ter sido originadas durante os trabalhos de instalação em obra. Há que ter presente que uma instalação deste tipo, numa obra desta envergadura e com a agressividade que lhe está inerente, a probabilidade de uma cablagem danificada, um sensor exterior desnivelado (ou mesmo danificado), ou um equipamento que não funciona correctamente não é tão reduzida como se possa pensar. São várias as frentes de trabalho, especialidades diferentes comportando-se de modo independente. Isto conduz a uma deficiente consciência, por parte de todos os que estão em obra, da globalidade dos trabalhos que simultaneamente estão a ser realizados.

Com a conclusão dos testes e verificações, tem-se o sistema de monitorização a funcionar em plenitude. No entanto, tendo em consideração o carácter permanente do sistema, e por outro lado a imagem integrada que se pretende fornecer ao dono de obra, deve ser elaborado e instalado um manual de imagem. A concepção deste manual de imagem teve como objectivo oferecer uma visão integrada e de fácil leitura do sistema, sempre que o dono de obra necessite de realizar uma intervenção de manutenção e/ou reparação. A sua implementação consistiu na colocação de um conjunto de placas de identificação, plastificados e manuais de utilização, de acordo com referências que constam no documento “B-Peças Desenhadas” [10].

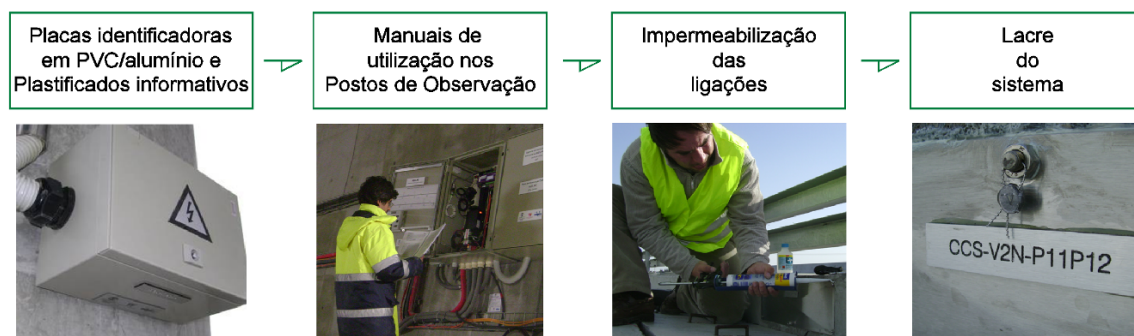


Figura 16. Manual de imagem, impermeabilizações e lacre.

5. CONCLUSÕES

Foi salientada, na presente comunicação, a importância que apresentam para o sector da construção e para a Engenharia Civil em particular, os novos sistemas de monitorização de estruturas. Encorajam o uso de novos materiais e técnicas inovadoras já que permitem um conhecimento aprofundado do comportamento estrutural da obra. Efectuando a vigilância remota e detecção atempada de anomalias, permitem uma manutenção mais eficiente e a adopção de estratégias de gestão mais eficazes na melhor locação dos recursos disponíveis.

Foi introduzida a actividade do LABEST no âmbito da monitorização da integridade estrutural e foi apresentado o processo e a instalação do sistema de monitorização da Ponte da Lezíria. Para poder tornar este último sistema numa realidade, foi necessário passar por várias etapas, tendo sido destacada a sua concepção e organização, passando por toda a fase de instalação até à obtenção dos registos. As valências que este sistema integra, levaram a que fosse um processo longo em todas as suas vertentes. Por um lado reuniu um conjunto de especialistas de modo a conduzir a um sistema equilibrado e integrado, por outro lado, a sua implementação durante a fase de instalação representou um verdadeiro desafio à capacidade de uma equipa multi-disciplinar. O método, experiência e a capacidade de organização foram aspectos que conduziram ao sucesso.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece o contributo de toda a equipa SHM do LABEST. Agradece igualmente, no que se refere à monitorização da Ponte da Lezíria, à Brisa, S.A., à construtora TACE e à empresa NewMensus.

REFERÊNCIAS

- [1] MUFTI, A.; ANSARI, F. – Structural health monitoring of innovative civil engineering structures, Proc. SHM 2004 Workshop, 2004, ISIS Canada. ISBN: 0-9689006-9-0.
- [2] FIGUEIRAS, J.A.; FÉLIX, C.M. – Innovative structural health monitoring of bridges in Portugal, Keynote lecture, IABMAS 2006, Third Int. Conf. on Bridge Maintenance, Safety and Management, Ed. Cruz, P. [et al.], 2006, Portugal.
- [3] ISIS Canada Research Network, Structural Health Monitoring, <http://www.isiscanada.com>.
- [4] COSTA, B.; FÉLIX, C.M.; FIGUEIRAS, J.A. – Ensaios de carga em pontes e viadutos: sua utilidade e recomendações, Edição de J.A. Figueiras [et al.], E.N. Betão Estrutural 2004, 830-880. FEUP edições, Porto, 2004.
- [5] SIMEC – Monitorização estrutural usando sensores de Bragg em fibra óptica, Relatório final, LABEST/FEUP e INESC-Porto, Projecto de investigação POCTI/ECM/36047/99_FCT/MCT, Porto, 2001.
- [6] SMARTE – Sistema de gestão e de monitorização de pontes baseado em sensores eléctricos e de fibra óptica com acesso remoto, Relatório final, BRISA, S.A., LABEST/FEUP e INESC-Porto, Projecto IDEIA de investigação e consórcio, POCTI/POSI, Agência de Inovação, FCT/MCT, Porto, 2004.
- [7] COSTA, B. [et al.] – Monitorização do comportamento da Ponte Ferroviária de Trezói sob acção do tráfego, Relatório Técnico, LABEST/FEUP, Maio, 2008.
- [8] SOUSA, H. [et al.] – Sistema de monitorização da nova Ponte sobre o Rio Tejo em Portugal – Ponte da Lezíria, Anais do 50º Congresso Brasileiro do Concreto, CBC2008, Salvador, Brasil, Setembro 2008.
- [9] 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, 2006.
- [10] FIGUEIRAS, J.A. [et al.] – Construção da travessia do Tejo no Carregado Sublanço A1/Benavente, da A10 Auto-Estrada Bucelas/Carregado(IC3; Projecto executivo de monitorização estrutural e de durabilidade, LABEST, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2007.