



Anais do 50º Congresso Brasileiro do Concreto
CBC2008
Setembro / 2008
ISBN
@ 2008 - IBRACON



Sistema de monitorização da nova ponte sobre o rio Tejo em Portugal – Ponte da Lezíria

Monitoring system of the new bridge over Tagus River in Portugal – Lezíria bridge

Helder Sousa(1); Carlos Félix(2), Joaquim Figueiras(3)

(1) *Aluno doutoramento, FEUP-LABEST – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Laboratório da Tecnologia do Betão e do Comportamento Estrutural, Portugal*

(2) *Professor Coordenador, ISEP – Instituto Superior de Engenharia do Porto, Portugal*

(3) *Professor Catedrático, FEUP-LABEST – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Laboratório da Tecnologia do Betão e do Comportamento Estrutural, Portugal
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto; Departamento de Engenharia Civil; Secção de Estruturas; Rua Dr. Roberto Frias, s/n; 4200-465 Porto PORTUGAL*

Resumo

Actualmente, na área de estruturas de engenharia civil, os designados sistemas de monitorização do comportamento estrutural e de durabilidade são cada vez mais utilizados, principalmente em barragens e obras de arte pela importância socioeconómica que este tipo de estruturas representa.

Os registos obtidos pelos sistemas de monitorização são desde logo uma fonte de conhecimento mesmo em estado bruto não tratado. A aplicação, a estas bases de dados, de algoritmos de tratamento de dados e análise vêm permitir a obtenção de um conhecimento de nível superior, conhecimento este, útil na prevenção de situações de dano e valioso na gestão da manutenção das estruturas.

Neste trabalho é apresentado o sistema de monitorização afecto com carácter de permanência à nova ponte sobre o Tejo no Carregado em Portugal – 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 estrutura, integrando um conjunto de parâmetros estruturais e de durabilidade, medidos por sensores apropriados.

Para além da explicitação dos aspectos tidos em conta na concepção e na implementação do sistema, são também apresentadas as funcionalidades e potencialidades do sistema de monitorização adoptado.

Palavra-Chave: Sistemas de monitorização integrados

Abstract

Currently, Long-Term Monitoring Systems are mandatory in important Civil Engineering Structures, like bridges and dams. Those systems allow the surveillance, in real time, of the structural behavior and the durability. A set of physical, chemical and mechanical parameters are in critical sections of the structure by incorporating appropriated sensors. The data collected by these systems demonstrates great potential in prevention of damage states and contribute to a more efficient maintenance of the monitored structures.

In the present work, the Long-Term Monitoring System of the new bridge over the Tagus River, located at Carregado, Portugal, the Lezíria Bridge is described. The monitoring system was developed to follow the constructive and the service life, and integrate a set of structural and durability parameters, measured by appropriated sensors. The conception, architecture and functionalities of the monitoring system adopted, and some obtained records until date are discussed.

Keywords: Integrated monitoring systems

1 Introdução

Até à presente data tem-se assistido a uma evolução na concepção e arquitectura de sistemas de monitorização permanente instalados em estruturas de engenharia civil. Essa evolução reflectiu-se, por um lado na racionalização e maximização das potencialidades dos recursos e equipamentos disponíveis no mercado, e por outro lado no constante aparecimento de novos produtos de mercado tecnologicamente inovadores. Deste modo, os actuais sistemas de monitorização permitem o acompanhamento da evolução do comportamento estrutural e durabilidade dos materiais de modo remoto e em tempo real. Isto é conseguido através da medição de um conjunto de grandezas físicas e químicas por intermédio da utilização de sensores apropriados, com recurso a um sistema de aquisição e comunicação que permita a recolha automática e remota das leituras efectuadas pelos sensores numa base de dados acessível via internet.

Pela experiência do LABEST, essa evolução reflectiu-se principalmente: (i) na selecção dos pontos críticos com relevância para medição; (ii) nas grandezas físicas e/ou químicas a serem consideradas para monitorização nesses pontos; (iii) considerando as grandezas que se querem quantificar, a selecção apropriada dos sensores a usar; (iv) na concepção da rede e sistemas de aquisição que permitem a integração de todos os sensores anteriormente seleccionados; (v) no software de gestão de dados, consulta e análise.

Um projecto, como o sistema de monitorização da ponte da Lezíria é complexo, no entanto pode ser desdobrado na sequência de três etapas como se ilustra na Figura 1: (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 1 – 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” [1]. 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 (“Structural Health Monitoring”). O projecto, na sua versão final, pela sua organização, conteúdos e objectivos demonstraram ser um documento de referência na área da monitorização de estruturas.

Com o projecto definido, seguiu-se a instalação do sistema de monitorização. Foi um longo percurso no tempo, cerca de ano e meio, tendo sido uma empreitada de grande dimensão e envolvendo uma equipa altamente especializada. Características como dinamismo, flexibilidade, adaptabilidade e entrosamento revelaram-se fundamentais para o sucesso da instalação do sistema de monitorização.

Os registos obtidos até ao momento têm-se revelado uma fonte de conhecimento em estado bruto, apresentando grandes potencialidades na prevenção de situações de dano e um contributo para uma maior eficiência na gestão das estruturas monitorizadas.



Após conclusão da implementação do sistema de monitorização na nona maior ponte do mundo com 11,670m de comprimento total [2], este projecto revelou-se um desafio de alto nível. Nível esse, que exigiu uma alta capacidade de resposta e conhecimento da área, que só foi possível realiza-lo devido ao longo caminho de auto-aprendizagem que o LABEST adquiriu ao longo dos últimos anos na área da monitorização de estruturas.

2 Sistemas de monitorização – Experiência 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 de sinal [3]. Projectos de investigação, suportados por fundos públicos, foram então desenvolvidos, foram executados demonstradores laboratoriais, e novas competências em sistemas sensores e de aquisição de sinal foram adquiridos [4]. 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 [5], parcialmente suportado pela ADI – Agência de Inovação, juntou os laboratórios de investigação LABEST e INESC-Porto e uma empresa de infra-estruturas 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 [6]. 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.

3 Sistema de monitorização da ponte da Lezíria – O processo

A Travessia do Tejo no Carregado permite a ligação entre os lugares do Carregado e de Benavente, situados a norte e sul respectivamente, contemplando o viaduto de acesso do lado norte, a ponte principal sobre o rio Tejo e o viaduto de acesso do lado sul (Figura 2).



Figura 2 – Fase da construção da ponte da Lezíria, em Maio de 2007.

Como se ilustra na Figura 3, 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 com o tempo [7]. Na Figura ilustram-se os documentos que materializam o projecto, ou seja, as diversas gavetas que constitui o projecto. Com esta configuração, 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. Esta opção na organização do processo teve em consideração algumas especificidades deste tipo de sistemas, nomeadamente o aspecto da sua conclusão. 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.

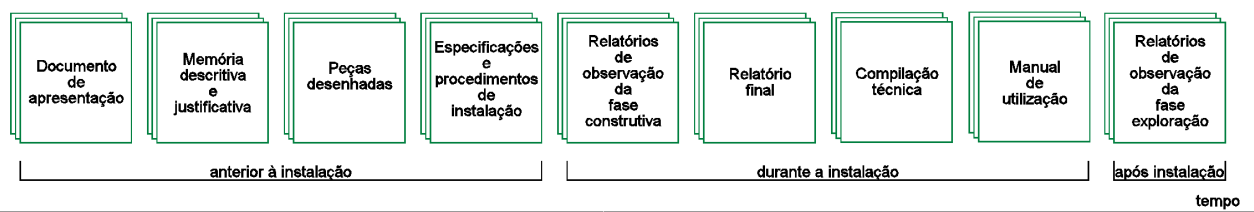


Figura 3 – Organização do projecto do sistema de monitorização estrutural e de durabilidade.

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 4). 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 [7].



Figura 4 – Constituição do sistema de monitorização da ponte da Lezíria.

3.1 Componente sensorial

Com fundamento no que é importante medir e registrar, 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) [8]. Para uma mais fácil interpretação do enunciado, esquematiza-se na Figura 5 a arquitectura da componente sensorial.

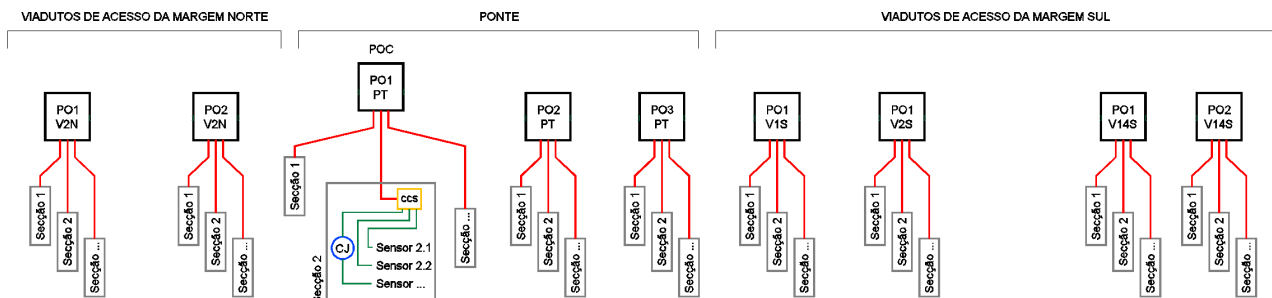
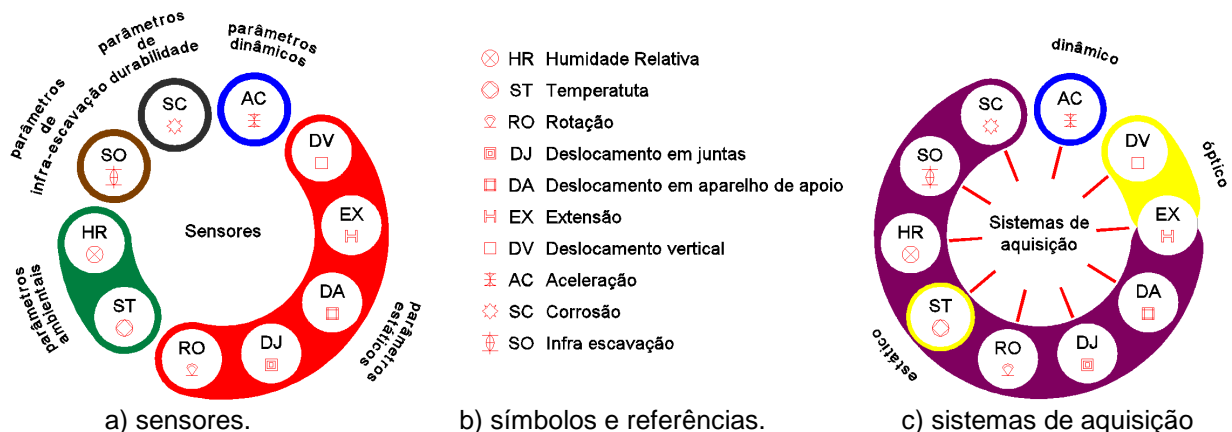


Figura 5 – Arquitectura da componente sensorial.

Ilustra-se na Figura 6 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.



a) sensores.

b) símbolos e referências.

c) sistemas de aquisição









Figura 6 – Constituintes da componente sensorial.

3.1.1 Sistema de aquisição estático

O grupo de sensores instalados que são interrogados por sistemas de aquisição estáticos representa cerca de 80% do número total de sensores instalados. Por este facto, o sistema de monitorização da ponte da Lezíria tem uma grande vocação para o acompanhamento do comportamento estrutural a longo prazo, através dos registos dos parâmetros estáticos tais como deformações, rotações, deslocamentos, corrosão, infra escavação, e parâmetros ambientais (Figura 6).

De acordo com o ilustrado na Figura 6, apresenta-se na Tabela 1 uma breve descrição dos objectivos de medição pretendidos com a monitorização dos parâmetros estáticos, bem como a identificação das zonas da estrutura onde os sensores são instalados.

Tabela 1 – Parâmetros estáticos medidos pelo sistema de aquisição estático.

Parâmetro estático	Símbolo	Objectivo de medição	Zonas da estrutura instrumentadas
Deformações		Registo das deformações do betão da estrutura.	Estacas (a diferentes profundidades), topo de pilares e secções de apoio e vão do tabuleiro.
Deslocamento horizontal relativo		Registo dos deslocamentos horizontais relativos ocorridos em aparelhos de apoio.	Aparelhos de apoio em pilares intermédios da ponte.
		Registo dos deslocamentos horizontais relativos ocorridos em juntas de dilatação.	Aparelhos de apoio em pilares de transição, com juntas de dilatação.
Rotação		Registo de rotações do tabuleiro da estrutura.	Em secções de apoio do tabuleiro.
Temperatura		Registo de temperaturas do ambiente circundante à estrutura e do betão.	Topo de pilares e secções de apoio e vão do tabuleiro.
Humidade relativa		Registo de humidades relativas do ambiente circundante à estrutura.	Tabuleiro.
Infra escavação		Registo de profundidades de escavação em rio.	Base do maciço de fundação de pilares localizados no leito do rio.
Durabilidade		Registo de velocidades de corrosão na armadura mais superficial ao betão.	Pilares e tabuleiro.

Todos estes sensores são interrogados por um mesmo sistema de interrogação e aquisição de sinal. Sendo possível definir procedimentos de leitura de modo programável, com possibilidade de escolha na frequência de leitura para cada sensor, ordem de leitura, e armazenamento dos registos em ficheiros de texto.

3.1.2 Sistema de aquisição dinâmico

No que diz respeito ao sistema de aquisição dinâmico, em termos de sensores instalados o seu peso representa cerca de 5% do número total de sensores instalados.


A instalação destes sensores visou acompanhar as acelerações induzidas, por sismos ou por choques de embarcações na estrutura e no terreno circundante. Com esta configuração será possível avaliar a energia transmitida à estrutura, a sua dissipação, e avaliar os efeitos produzidos nos elementos estruturais.

Para realizar a medição são utilizados acelerómetros triaxiais que medem e registam, em três direcções ortogonais, as acelerações ocorridas no ponto instrumentado. Estes sensores são ligados ao sistema de aquisição por intermédio de cablagens eléctricas e

blindadas especificamente fabricados para este tipo de sensores. Refere-se ainda que a instrumentação em solo e estrutura foi distinta devido às especificidades inerentes. No caso dos acelerómetros instalados na estrutura, estes foram rigidamente fixados à estrutura de modo a medirem a vibração que está a ocorrer nesse ponto da estrutura. No caso dos acelerómetros instalados no solo, estes foram conduzidos ao longo de furos de sondagem realizados para o efeito, sendo posicionados a diferentes cotas em profundidade, com posterior selagem dos furos de sondagem de modo a obter uma boa ligação ao solo envolvente [8] [9].

De acordo com o ilustrado na Figura 6, apresenta-se na Tabela 2 uma breve descrição dos objectivos de medição pretendidos com a monitorização dinâmica, bem como a identificação das zonas da estrutura onde os sensores são instalados.

Tabela 2 – Parâmetros estáticos medidos pelo sistema de aquisição estático.

Parâmetro dinâmico	Símbolo	Objectivo de medição	Zonas da estrutura instrumentadas
Aceleração		Registo de acelerações, em três direcções ortogonais na estrutura e solo circundante.	Solo (a diferentes profundidades), base de pilares, secções de apoio e vão do tabuleiro.

Estes sensores são interrogados por um sistema de interrogação e aquisição de sinal do mesmo fabricante dos acelerómetros, sendo deste modo uma solução mais robusta. Destaca-se, que o software que gere o sistema de interrogação permite a definição de níveis de alarme, por sensor e/ou eixo de medição, bem como o envio de mensagens de alerta para um determinado endereço.

3.1.3 Sistema de aquisição óptico




A utilização de sensores em fibra óptica na área da engenharia civil tem experimentado grandes desenvolvimentos, reconhecidas que são as suas vantagens. De entre estas salienta-se a imunidade aos campos electromagnéticos e a reduzida perda de sinal. No domínio dos sensores de fibra óptica, os sensores de Bragg apresentam-se como dos mais promissores para aplicação em estruturas de engenharia civil. Devido às técnicas de multiplexagem, uma só fibra pode ser portadora dos sinais de diversos sensores. Esta tecnologia possibilita que o sistema de aquisição de sinal possa ser concentrado num único posto de observação para o qual concorrerão as fibras portadoras do sinal dos diversos sensores instalados [8].

Assim, foi também instalado um sistema de leitura e aquisição com base em sensores em fibra óptica recorrendo à utilização dos referidos sensores de Bragg. Os sensores foram desenvolvidos especificamente para o efeito, fazendo parte integrante do sistema de monitorização estrutural e de durabilidade da ponte da Lezíria, e medem três parâmetros: (i) deslocamentos verticais; (ii) deformação; (iii) temperatura [8].

No sistema de monitorização idealizado estabeleceu-se como objectivos aumentar a informação relativa ao comportamento estrutural da ponte, e complementarmente comparar a eficiência nesta obra dos dois sistemas de monitorização (de base eléctrica e de base óptica) [8].

De acordo com o ilustrado na Figura 6, apresenta-se na Tabela 3 uma breve descrição dos objectivos de medição pretendidos com a monitorização de base óptica, bem como a identificação das zonas da estrutura onde os sensores são instalados.

Tabela 3 – Parâmetros estáticos e dinâmicos medidos pelo sistema de aquisição óptico.

Parâmetro estático	Símbolo	Objectivo da sua medição	Zonas da estrutura instrumentadas
Deslocamentos verticais		Registo dos deslocamentos verticais da estrutura	Em secções de vão do tabuleiro.
Deformações		Registo das deformações do betão da estrutura.	Estacas, pilares e tabuleiro.
Temperatura		Registo de temperaturas do ambiente circundante à estrutura e do betão.	Secções de apoio e vão do tabuleiro.

3.2 Componente de comunicação

3.2.1 Rede de comunicação

Considerando a extensão da estrutura, os vários Postos de Observação (PO) estão fisicamente distantes entre si. Para se ter uma ideia, a distância entre os dois PO's extremos é cerca de 8km. Numa perspectiva de centralizar a informação registada nos diversos PO's num só PO, designado por Posto de Observação Central (POC), foi necessário instalar uma rede de comunicação interna que permitisse a integração de todo o sistema. Para aceder remotamente ao sistema, a opção de ter uma rede interna mostra-se mais vantajosa, visto que assim apenas se tem que aceder a um PO, ou seja ao POC onde toda a rede se centraliza. Esta rede, em fibra óptica, possui dois anéis, com nove nós coincidentes com os diversos PO's, e centralizados no POC (Figura 7).

A Ponte da Lezíria insere-se na rede rodoviária da concessionária BRISA, SA, a qual tem implementada uma rede de comunicações que se estende a praticamente toda a rede. De modo a ser possível aceder remotamente ao sistema de monitorização instalado em obra, foi estabelecida a ligação entre a rede local de comunicação e a rede de comunicação da BRISA, por intermédio de uma ligação física entre o POC e um nó da rede de comunicação da BRISA. Esta ligação permite a comunicação directa e permanente com o POC instalado em obra a partir de um PC instalado no Central de Operações da BRISA. É através desta ligação possível aceder remotamente a qualquer um dos sistemas de aquisição (Figura 7).

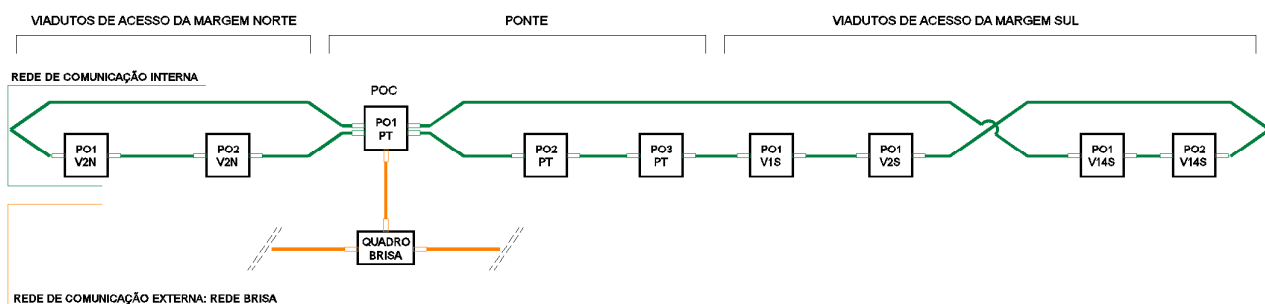


Figura 7 – Rede de comunicação que integra os vários PO's e centraliza no POC.

3.3 Componente de processamento e gestão de dados

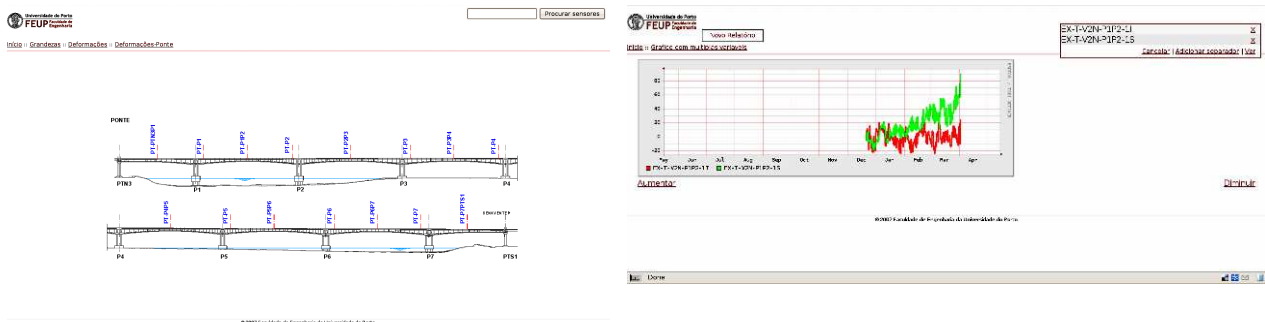
Estabelecida a comunicação com o sistema de monitorização, o processamento e gestão dos registos obtidos assenta num software que acumula as funções de actualização da base de dados, cada vez que é estabelecido o contacto com a estrutura monitorizada, com o de visualização dos resultados, para além de um módulo de consulta de toda a informação relativa ao sistema de monitorização instalado [8].

O módulo de actualização realiza um tratamento diferenciado para os diferentes sistemas de medição instalados na estrutura, nomeadamente o sistema de monitorização da durabilidade, o sistema que integra os acelerómetros e o sistema que inclui os restantes sensores [8].

O módulo de visualização permite ver os resultados, de sensores previamente seleccionados, em forma de tabela e em forma de gráfico de um modo isolado ou agrupados por secções. Os gráficos permitem a observação da evolução temporal das grandezas em apreço.

No módulo de consulta é disponibilizada toda a informação relativa ao sistema de medição instalado em obra, como por exemplo, localização na obra das secções instrumentadas, ou a localização e descrição dos sensores instalados em cada secção.

É igualmente possível aceder aos ficheiros de valores, em formato de texto para posterior tratamento em software específico, bem como acesso a relatórios gerados automaticamente, em formato pdf contendo gráficos de grandezas previamente seleccionadas [8].



a) informação das secções instrumentadas.

b) visualização gráfica dos registos.

Figura 8 – Componente de processamento e gestão de dados.

4 Sistema de monitorização da ponte da Lezíria – A instalação

A instalação baseou-se no cumprimento dos documentos “A–Memória Justificativa” [8], “B–Peças Desenhadas” [9] 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 minimizado a repetição de

procedimentos nos trabalhos em obra; (iii) em que fase da construção estas seriam realizadas, de modo a antecipar cenários, rentabilizar recursos e minimizar esforços.

4.1 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. Na Figura 9 ilustra-se a sequência de trabalhos considerados necessárias na preparação e organização em laboratório.

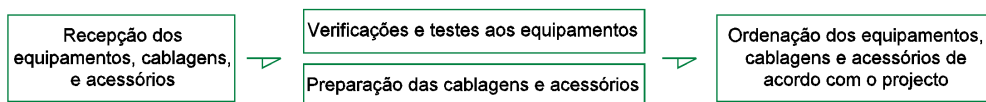


Figura 9 – sequência dos trabalhos de preparação e organização em laboratório.

4.2 Instalação de equipamentos, cablagens e acessórios em obra

Concluídas as tarefas de preparação e calibração em laboratório, procede-se à instalação em obra. Como já foi referido, 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 da instalação 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 10 ilustra-se a sequência dos trabalhos efectuados para o acompanhamento da fase construtiva.



Figura 10 – 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 fase de acabamentos da estrutura. É nesta fase da construção que as betonagens estruturais já terminaram, não havendo por isso mais sensores embudidos a instalar. Por outro lado, começam 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 11).

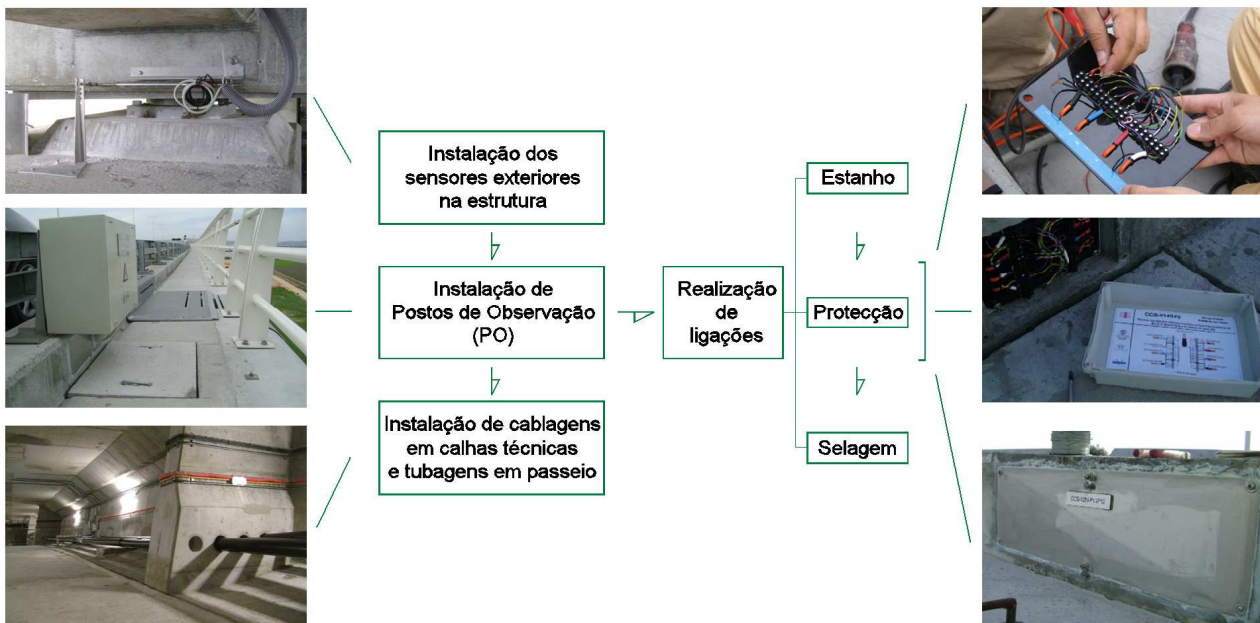


Figura 11 – Sequência dos trabalhos de instalação durante a fase de acabamentos.

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 a um ritmo acelerado dos trabalhos, bem como horários de trabalho mais extensos. Neste cenário, características como dinamismo, flexibilidade, adaptabilidade e entrosamento revelaram-se fundamentais para o sucesso desta fase dos trabalhos.

4.3 Testes, verificações finais

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 que estão nas frentes, da globalidade dos trabalhos que simultaneamente estão a ser realizados.

Deste modo, diversos testes são realizados, nomeadamente: (i) verificação do sinal dos diversos sensores instalados; (ii) verificação da integridade das cablagens; (iii) verificação dos sistemas de aquisição; (iv) verificação das comunicações e transmissão de dados para a Central de Operações (Figura 12).



Figura 12 – Sequência dos testes e verificações finais.

4.4 Manual de imagem, impermeabilizações e lacre

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, foi 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 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*” [9].

Para finalizar, como se pretende um sistema durável no tempo, todas as caixas de ligações foram impermeabilizadas, já que estes pontos do sistema são sempre condicionantes para o bom funcionamento do sistema.

Acrescido à impermeabilização, o sistema foi todo lacrado. O objectivo é identificar eventuais intervenções não autorizadas que possam por em causa o bom funcionamento do sistema e que de outro modo não seriam facilmente detectáveis. O lacre do sistema visa definir a fronteira da responsabilidade da equipa de instalação do sistema. Na Figura 13 esquematizam-se as tarefas associadas ao manual de imagem, impermeabilizações e lacre com uma ilustração de alguns trabalhos realizados em obra.

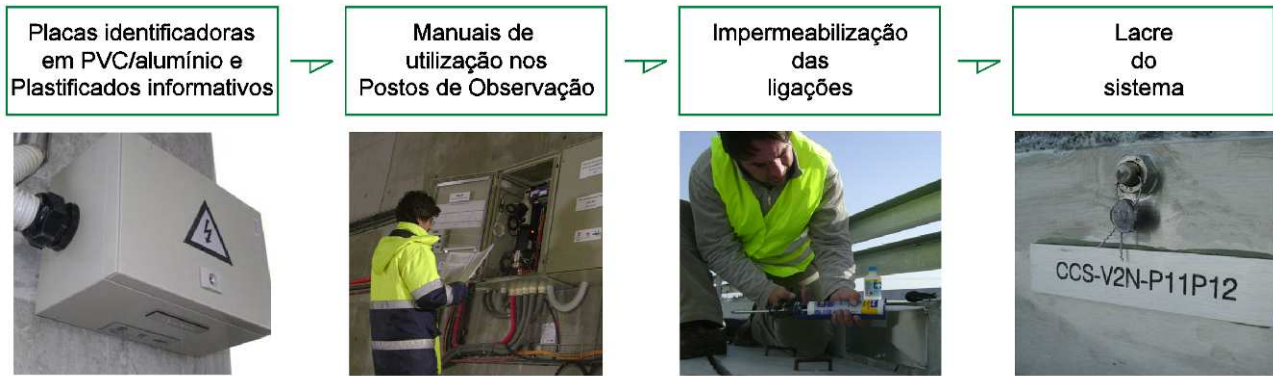


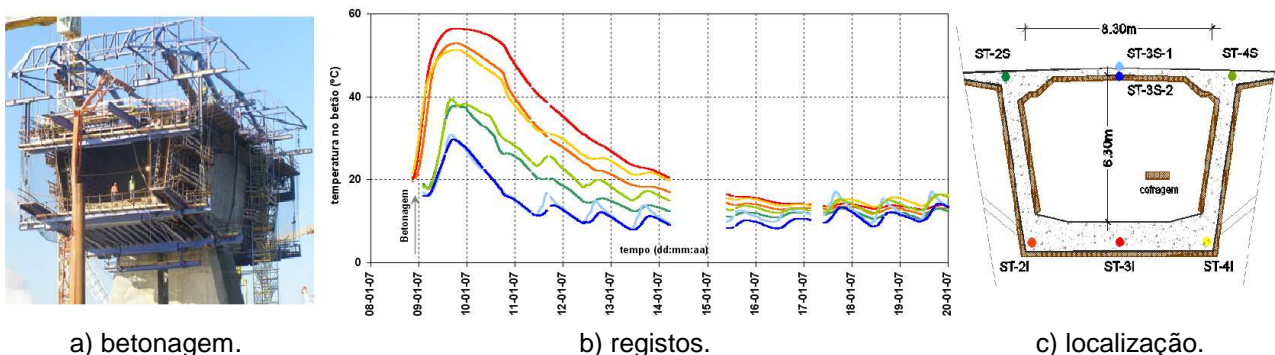
Figura 13 – Manual de imagem, impermeabilizações e lacre.

5 Sistema de monitorização da ponte da Lezíria – Os registos

Como referido, este sistema de monitorização começou a entrar em funcionamento assim que o primeiro sensor foi instalado. Esta opção permitiu o acompanhamento e registo de diversos acontecimentos durante a fase de construção da estrutura, tais como: (i) betonagens; (ii) operações de pré-esforço; (iii) retirada de cimbres ao solo e movimentos dos carros de avanço na zona sobre o rio; (iv) forças de afastamento nos fechos da ponte. Na fase final da construção, foram feitos ensaios de recepção da estrutura para verificação da conformidade do seu comportamento estrutural.

Deste modo, são apresentados alguns resultados obtidos durante a fase da construção, não sendo objectivo no presente trabalho efectuar uma análise desses resultados mas apenas demonstrar os registos que este sistema consegue oferecer ao dono de obra.

Assim, na Figura 14 ilustra-se as temperaturas registadas numa aduela da ponte a partir do momento da betonagem. Mais especificamente, referem-se a sete sensores de temperatura embebidos no betão. Da observação do registo, é de salientar o facto de os picos de temperatura atingidos serem mais elevados na camada inferior (2I, 3I e 4I), quando comparados com registos obtidos para a camada superior (2S, 3S-1, 3S-2 E 4S). Também é perceptível que as temperaturas registadas no betão estabilizam apenas sete dias após a betonagem, passando a partir daí a serem condicionadas essencialmente pelas condições ambientais envolventes. Este tipo de informação pode ser útil no acompanhamento em tempo real da cura do betão e detectar temperaturas excessivas no sentido de intervir atempadamente.



a) betonagem.

b) registos.

c) localização.

Figura 14 – Temperaturas registadas no betão de uma aduela da ponte

Outro acontecimento relevante durante a fase de construção fora os dois últimos fechos da ponte sobre o rio Tejo. Mais concretamente é ilustrado o caso do penúltimo fecho, onde foram aplicadas forças de afastamento na zona do fecho P4P5, de modo a introduzir um deslocamento relativo de afastamento entre as duas faces do fecho imediatamente antes da betonagem (Figura 15). Estas operações envolveram um grande aparato, já que envolveram a aplicação de grandes forças com recurso a macacos hidráulicos e sistemas de controlo de força. Para além de um controlo topográfico realizado pela construtora, o sistema de monitorização instalado forneceu, em tempo real, os deslocamentos que foram ocorrendo durante a operação nos aparelhos de apoio deslizantes localizados nos pilares P7 e PTS1.

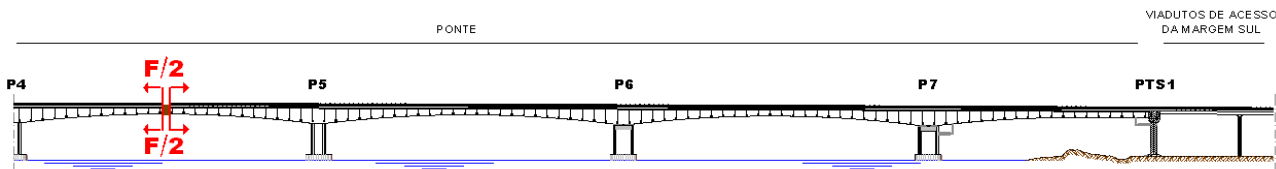
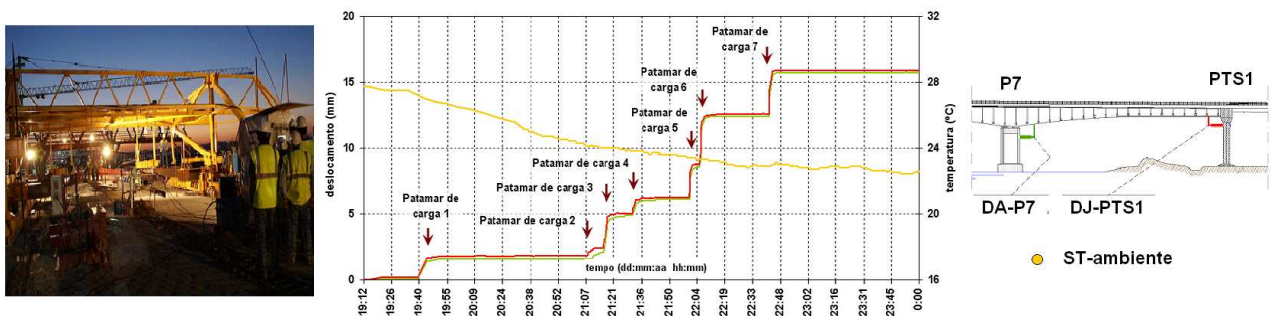


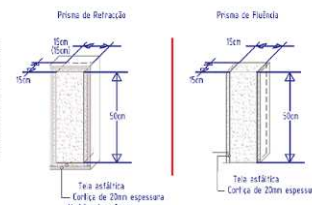
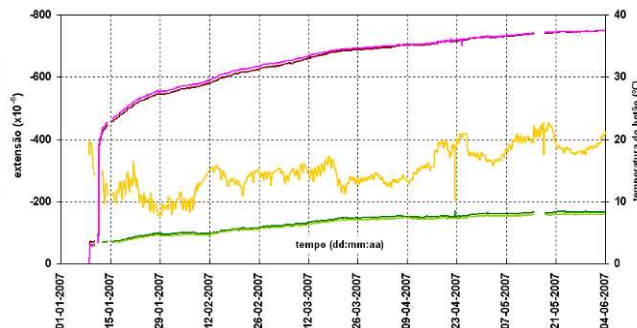
Figura 15 – Aplicação de forças de afastamento no penúltimo fecho da ponte, fecho P4P5.

Dos registos apresentados na Figura 16, é possível identificar os sete patamares de deslocamentos “instantâneos” que correspondem aos sete patamares de forças aplicadas no fecho P4P5. Por observação dos registos, é possível verificar a boa concordância dos dois deslocamentos relativos registados. É de salientar que a informação fornecida pelo sistema de monitorização teve a vantagem de ser em tempo real, enquanto que o controlo topográfico condicionou os intervalos de tempo entre patamares de carga para medição e confirmação dos deslocamentos ocorridos nos mesmos pontos.



a) operação de afastamento. b) registos. c) localização dos sensores.
 Figura 16 – Deslocamentos relativos registados em aparelhos de apoio durante a operação de afastamento.

Um outro exemplo é apresentado na Figura 17, e diz respeito aos registos das deformações obtidos em prismas de betão. Estes prismas foram executados durante a fase da construção, coincidindo a sua instrumentação e betonagem com a instrumentação e betonagem de uma secção instrumentada. Deste modo consegue-se uma maior representatividade da retracção e fluência ocorrida no betão da estrutura em que se efectuou a instrumentação. À semelhança dos registos das temperaturas apresentados (Figura 14), também aqui as medições se iniciaram no momento da betonagem. Estes registos são fundamentais para uma melhor interpretação dos registos obtidos pelos sensores instalados no betão da estrutura, através da compensação da retracção e fluência do betão ocorridos nesses prismas.



a) prismas.

b) registos.

c) execução dos prismas.

Figura 17 – Deformações registadas por retracção e fluência do betão de uma aduela da ponte.

6 Conclusões

Começando pelos registos apresentados, ficaram demonstradas algumas das potencialidades que o sistema de monitorização da ponte da Lezíria pode oferecer através dos exemplos apresentados. Os registos apresentados demonstram a diversidade de grandezas que podem ser monitorizadas, em diferentes fases da vida da estrutura, em tempo real e armazenamento automático em ficheiros de texto. Neste momento o sistema debita, periodicamente, os registos obtidos pelos sensores para uma base de dados localizada na Central de Operações. O potencial desta base de dados cresce continuamente.

Numa óptica de gestão, foi demonstrada a complexidade e grandeza deste sistema. Para poder tornar este 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 diverso 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.

7 Agradecimentos

Como em todos os trabalhos de campo, existem pessoas que dão o seu contributo e que deixam a sua marca pelo dinamismo e aquele esforço a mais para a concretização de um todo. Nesse sentido, os autores agradecem a todos os que contribuíram para o sucesso da implementação deste sistema, designadamente à restante equipa LABEST, NewMENSUS, à construtora TACE e à BRISA S.A. O primeiro autor expressa agradecimentos à Fundação para a Ciência e a Tecnologia, da qual é bolseiro de doutoramento.

8 Referências

[1] COBA-PC&A-CIVILSER-ARCADIS. **Construção da Travessia do Tejo no Carregado Sublanço A1/Benavente, da A10 Auto-Estrada Bucelas/Carregado/IC3; Volume XV – ANAIS DO 50º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - CBC2008 – 50CBCxxxx**



Anais do 50º Congresso Brasileiro do Concreto
CBC2008
Setembro / 2008
ISBN
@ 2008 - IBRACON



“**Plano de Monitorização Estrutural e de Durabilidade**”. Empreitada de Concepção, Projecto e Construção da Travessia do Tejo no Carregado, 2006.

[2] <http://en.structurae.de/>.

[3] Costa B., Félix C., Figueiras J.. **Ensaio de carga em pontes e viadutos: sua utilidade e recomendações**. Edição de J.A. Figueiras et al., E.N. Betão Estrutural 2004, 873-880, FEUP edições, Porto, 2004

[4] 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.

[5] 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 em consórcio, POCTI/POSI, Agência de Inovação, FCT/MCT, Porto, 2004.

[6] Figueiras, J., Félix, C.. **Innovative structural health monitoring of bridges in Portugal**. IABMAS'06 - Third International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, Porto, 2006.

[7] 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 0 – Apresentação**. LABEST, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2007.

[8] 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.

[9] 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 B – Peças Desenhadas**. LABEST, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto; 2007.

[10] 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 C – Caderno de Especificações e Procedimentos**. LABEST, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto; 2007.