

## **Projecto, Implementação e Acompanhamento do Sistema de Monitorização Estrutural da Ponte da Lezíria**

**Paulo Barros<sup>1</sup> Carlos Biscaia<sup>2</sup> Claudia Guerreiro<sup>3</sup> Vera Perdigão<sup>4</sup> Fernando Branco<sup>5</sup>**

### **RESUMO**

O presente artigo descreve, de um forma geral, as especificações do sistema de Monitorização Estrutural instalado na Ponte da Lezíria e viadutos de acesso, as estratégias seguidas na fase de instalação dos sensores e acompanhamento das leituras destes no decurso da obra, bem como as principais características do seu interface de monitorização, desenvolvido especificamente para a fase de serviço.

### **PALAVRAS-CHAVE**

Monitorização estrutural, caderno de encargos, gestão de obras de arte.

<sup>1</sup> Brisa Engenharia e Gestão, S.A., Departamento de Estudos e Projectos, paulo.barros@brisa.pt

<sup>2</sup> Brisa Engenharia e Gestão, S.A., Gestão de Empreendimentos, carlos.biscaia@brisa.pt

<sup>3</sup> Brisa Engenharia e Gestão, S.A., Departamento de Estudos e Projectos, claudia.guerreiro@brisa.pt

<sup>4</sup> Brisa Auto-Estradas de Portugal, S.A., Direcção de Conservação, Segurança e Ambiente, vera.perdigao@brisa.pt

<sup>5</sup> Departamento de Engenharia Civil – IST, fbranco@civil.ist.utl.pt

## **1. DESCRIÇÃO DA OBRA DE ARTE**

A Travessia do Tejo no Carregado, designada por “Ponte da Lezíria”, em exploração desde Julho de 2007, está inserida no Sublanço A1 / Benavente da Auto-estrada A10 - Bucelas / Carregado (A1) / A13 (IC3), com uma extensão de cerca de 12km.



Figura 1 – Vista aérea da Ponte da Lezíria

Este sublanço tem início a Nascente do Carregado, após o Nó de interligação desta Auto-estrada com a A1 e termina próximo do Nó de Benavente. Assegura a ligação entre as duas principais infra-estruturas rodoviárias longitudinais adjacentes ao Vale do Tejo: a A1 – Auto-estrada do Norte e a A13 – Auto-estrada Almeirim / Marateca.

A Ponte da Lezíria é constituída por uma secção principal, com 970 m, que assegura a travessia do Tejo e pelos viadutos de acesso, a Norte e a Sul, que garantem o atravessamento da Lezíria numa extensão de cerca de 10 600 m de extensão.

Cada uma daquelas secções apresenta soluções estruturais e processos construtivos diferentes: No Viaduto Norte foi adoptada uma solução de tabuleiros vigados betonados “*in-situ*”, executados com viga de lançamento, sendo longitudinalmente constituído por quatro subestruturas independentes.

A Ponte sobre o Tejo apresenta um tabuleiro constituído por uma secção transversal em caixão monocelular e consolas exteriores ligadas à estrutura principal por escoras metálicas, tendo sido executado pelo processo de avanços sucessivos, com consolas betonadas em segunda fase.

Finalmente, o Viaduto Sul encontra-se dividido em 22 subestruturas independentes, com uma solução de tabuleiro constituída por vigas prefabricadas, pré-lajes e laje de solidarização betonada em segunda fase.

As fundações dos viadutos de acesso são indirectas, recorrendo a estacas com 1.5m de diâmetro, que se prolongam em pilar-estaca. As fundações dos encontros e dos pilares intermédios da ponte são constituídos por maciços de 8 e 10 estacas com 2.0m de diâmetro.

## **2. O SISTEMA DE INSPECÇÃO DE OBRAS DE ARTE NA BRISA**

Actualmente a BRISA possui um programa de inspecções periódicas às obras de arte de toda a rede, seguindo um planeamento a longo prazo, definido para o total das cerca de 1800 obras de arte existentes na rede concessionada.

Para a concretização deste objectivo a BRISA implementou, desde 1994, uma sistematização na gestão de obras de arte. Actualmente, e desde Janeiro de 2004, está em funcionamento o sistema designado por GOA – Gestão de Obras de Arte, que além de ser uma base de dados onde estão inseridos todos as informações relativas a estas estruturas, possui também um módulo específico de inspecções, onde se registam os dados caracterizadores do estado de conservação das obras e registo da eventual necessidade de intervenção/reparação.

Até 2007, a única obra de arte com um sistema de monitorização permanente na BRISA era a Ponte sobre o Rio Sorraia, na A13, que integrou um projecto de investigação específico designado “SMARTE”. Neste sistema, o registo do comportamento da estrutura é efectuado de um modo contínuo ao longo do seu ciclo de vida, permitindo, deste modo, detectar e registar a maioria das ocorrências, analisar o seu impacto na estrutura, permitindo intervir com maior celeridade, designadamente, despoletar a necessidade de uma inspecção visual ou ensaios complementares, em função dos dados recebidos.

## **3. OBJECTIVOS DA MONITORIZAÇÃO DA PONTE DA LEZÍRIA**

Face à dimensão e importância da Ponte da Lezíria na rede de AE concessionada à Brisa, desde o lançamento desta obra, a BRISA decidiu promover a instalação de um sistema de monitorização contínua e remota, visando obter um elevado desempenho na monitorização estrutural e funcional durante a vida útil da obra, controlando o seu comportamento, avaliando as condições de durabilidade, e detectando eventuais danos ou situações de acidente. Para isto foram definidos, no Caderno de Encargos de concurso, os parâmetros a monitorizar. Posteriormente, durante a evolução da obra, foram acordados com a FEUP os equipamentos a instalar, a sua localização, bem como os procedimentos de monitorização contínua a adoptar.

## **4. FASE DE CONCURSO**

Assim, foi definido, na fase de concurso, que o adjudicatário teria que desenvolver um sistema de monitorização estrutural na ponte e viadutos de acesso, que permitisse quantificar grandezas de carácter estático, dinâmico e de durabilidade. Foi ainda considerada, pela primeira vez, que se saiba, a monitorização da infra-escavação no canal de navegação.

A base de funcionamento do sistema, inicialmente proposto, exclusivamente com sensores de base eléctrica, sofreu várias evoluções na fase de projecto. No entanto, face aos grandes desenvolvimentos e às vantagens dos sistemas de fibra óptica, a Brisa considerou relevante instrumentar com este tipo de sensores, em redundância, algumas zonas da Travessia, para medição de deslocamentos verticais, deformação e temperatura, permitindo melhorar as especificações inicialmente definidas no caderno de encargos da fase de concurso.

As duas tecnologias foram instaladas apenas na Ponte. Esta opção permitirá comparar os respectivos resultados, comparando a fiabilidade e precisão dos dois sistemas bem como aumentar o conhecimento existente sobre este novo tipo de sensores, para além do maior manancial de informação que é possível adquirir no comportamento estrutural da ponte.

## **5. FASE DE PROJECTO**

### **5.1 Duas tecnologias distintas de sensores**

O sistema de monitorização remota, instalado nas obras de arte permitirá a obtenção de informação em tempo real, com observação de gráficos e esquemas, onde o estabelecimento de valores limites de segurança para as diversas grandezas medidas, permitirá alertar sempre que determinados níveis sejam atingidos, surgindo assim como uma ferramenta essencial para a gestão desta obra de arte.

A monitorização remota, ao permitir a detecção atempada de eventuais anomalias ou situações críticas, poderá contribuir para a diminuição de custos associados a deslocações/inspecções às obras de arte e simultaneamente para o aumento da segurança das estruturas e utentes. Por outro lado, a melhor sistematização no armazenamento de informação já devidamente processada e analisada, permitirá também uma gestão mais racional e adequada.

As duas tecnologias de sensores instalados possuem princípios de funcionamento distintos e a sua integração será efectuada através da unidade CPU instalada em obra. O resultado final é um sistema integrado de resultados de grandezas físicas, cuja origem do sinal (óptico ou eléctrico) é identificada pela designação do sensor.

### **5.2 Sensores instalados, grandezas em observação**

Foram instalados sensores que permitem observar as seguintes grandezas associadas ao comportamento estrutural:

- Acelerações sísmicas e de embates de embarcações;
- Deformações no betão por meio de extensómetros;
- Temperaturas do betão, do ar e humidade relativa atmosférica;
- Abertura de juntas;
- Deslocamentos verticais;
- Rotações;
- Profundidade da infra-escavação.

### **5.3 Medidas topográficas**

Está prevista, em paralelo, a monitorização topográfica dos deslocamentos da obra ao longo do tempo, associados a assentamentos das fundações e deformações diferidas, permitindo ainda recolher informação após um sismo ou embates de embarcações.

Esta monitorização dos deslocamentos compreende:

- O nivelamento do tabuleiro;
- Medição dos deslocamentos dos topos dos pilares da ponte;
- Assentamentos dos pilares da ponte.

### **5.4 Durabilidade**

Foi elaborado um programa de controlo da durabilidade do betão, permitindo aferir se o comportamento da obra ao longo do tempo é compatível com as hipóteses de cálculo adoptadas.

A durabilidade dos betões e o estado de corrosão das armaduras é analisado através de sondas embebidas no betão, o que permitirá estimar a evolução da corrosão. Tal permitirá definir medidas atempadas de protecção da estrutura.

Em paralelo, a medição da intensidade da corrosão das camisas das estacas da ponte principal será realizada através de avisadores de corrosão fixados nas mesmas, com um sistema de testemunhos desenvolvido para o efeito.

### **5.5 Fluência e retracção do betão**

Foi elaborado também um programa de ensaios e controlo do comportamento mecânico do betão a longo prazo. Este inclui a monitorização dos efeitos da retracção e da fluência realizada através da observação das extensões do betão, com extensómetros de cordas vibrantes colocados em prismas-amostra onde são realizadas as leituras. Este programa permitirá avaliar as características reológicas do betão e aferir os modelos de evolução considerados em projecto.

## **6. FASE DE OBRA**

Ao contrário dos procedimentos habituais, durante a fase de obra foram desde logo monitorizadas 3 zonas representativas de cada uma das estruturas principais, Viaduto Norte, Ponte e Viaduto Sul.

Esta monitorização, realizada apenas em zonas localizadas, foi implementada de modo a se atingir numa fase precoce da obra, os seguintes objectivos:

- Testar o funcionamento dos equipamentos;
- Monitorizar o faseamento construtivo, em particular das zonas pré-fabricadas;
- Definir o nível de extensões/tensões que ficam instaladas no início da exploração.

Este aspecto permitiu avaliar o nível de tensões que se iriam gerar em todo o processo de colocação das vigas pré-fabricadas, permitindo confirmar os modelos numéricos considerados

## **7. SISTEMA DE COMUNICAÇÃO DE DADOS**

### **7.1 Gestão das medidas**

#### **7.1.1 Níveis de vigilância e alerta**

Foi desenvolvido um sistema que visa disponibilizar à Brisa uma ferramenta orientada para a vigilância e prevenção da segurança estrutural e de durabilidade, fornecendo um conjunto de dados e medidas das diversas grandezas em observação, com registos contínuos e simultâneos.

Se as leituras vierem a apresentar valores superiores ou iguais aos definidos como níveis de alerta ou de vigilância, poderá ser necessário intervir, uma vez que a estrutura poderá estar a comportar-se de uma forma diferente do previsto em projecto. O sistema permite o envio de um alerta automático para a Brisa, permitindo fazer uma avaliação e orientar a decisão sobre o tipo de intervenção a seguir.

#### **7.1.2 Ponto zero**

As variações dos deslocamentos e assentamentos ao longo do tempo serão analisadas em relação a uma medição inicial -“ponto zero”- que foi realizada no final da construção e em que foi possível medir em simultâneo a generalidade dos sensores instalados. Como houve uma monitorização durante a construção, este ponto zero foi passível de ser corrigido com as tensões da fase de construção.

#### **7.1.3 Tratamento e Registo das Medidas**

As medidas topográficas foram efectuadas em marcas referenciadas a uma rede de pontos fixos conhecidos.

A ligação em rede dos sensores e sistema de aquisição permitirá controlar o funcionamento dos sensores e aparelhos de medida, testando as funções à distância, transferindo automaticamente os

resultados de medição dos sensores da rede para um computador num posto central e sincronizando os sistemas de aquisição.

## 7.2 Base de dados

No total, estão distribuídos ao longo das obras de arte nove Postos de Observação, que realizam as leituras dos sensores com uma periodicidade de 1 hora. Os dados de cada leitura são sinais não tratados recebidos de cada sensor e são armazenados nos PO, que, por sua vez são captados regularmente por um posto de observação principal localizado na Ponte. Neste posto, o servidor possui uma aplicação que recebe os dados, converte-os e organiza toda a informação numa base de dados, disponibilizada posteriormente numa aplicação Web.

## 7.3 Visualização dos resultados

A aplicação Web tem a finalidade de servir de interface de visualização dos resultados da medição do sistema. Permite construir gráficos, gravar e exportar. É possível ainda gerar relatórios que são enviados por e-mail. Apresenta-se um corte longitudinal da Ponte ‘Fig. 2’ e um exemplo de visualização de resultados do controlo da infra-escavação ‘Fig. 3’ representando a profundidade do leito do rio na zona do canal de navegação.

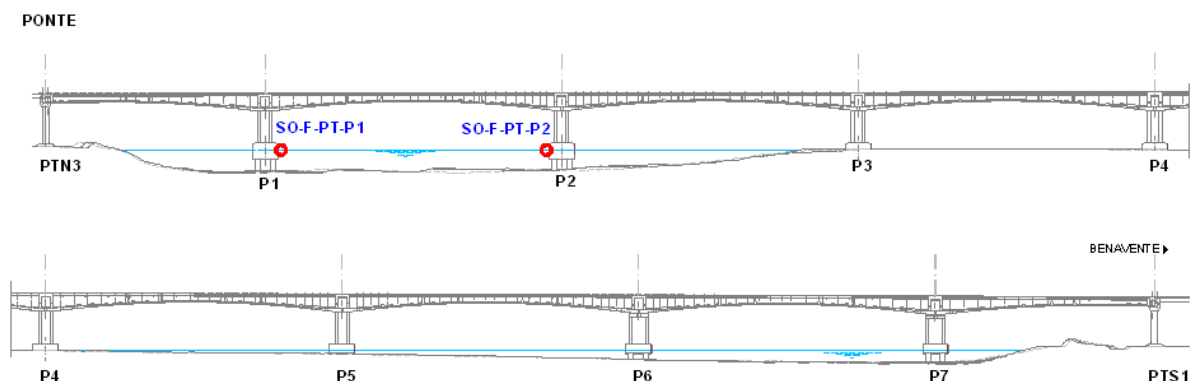


Figura 2 – Corte Longitudinal da Ponte com localização do equipamento de monitorização da infra-escavação nos maciços dos pilares P1 e P2 (canal de navegação)

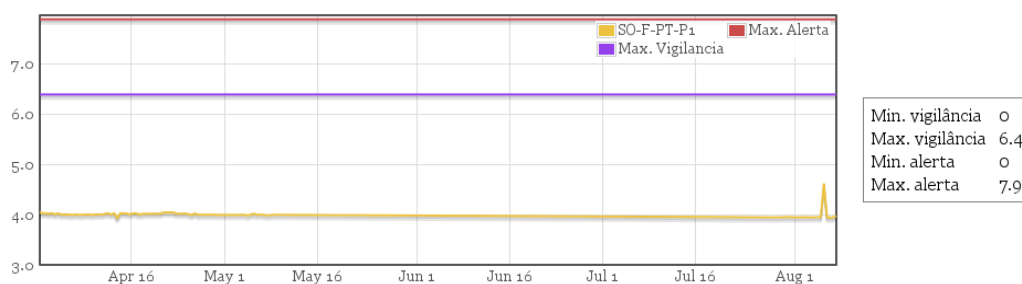


Figura 3 – Registo ao longo do tempo (2008) da profundidade do leito rio em relação ao maciço de encabeçamento de estacas do pilar P1

Das leituras apresentadas entre Abril e Agosto de 2008, pode-se constatar que não se registaram alterações relativamente à profundidade do leito do rio.

Apresenta-se uma secção transversal da obra de arte na zona do pilar P7 ‘Fig. 4’ e os registos de deformação para os diferentes tipos de sensores ‘Figs. 5 e 6’ na laje superior e inferior do tabuleiro:

- Os efeitos térmicos são mais acentuados na laje superior do caixão da ponte. De facto, é nos extensómetros localizados nas fibras superiores que são mais elevados os gradientes de deformação devidos aos ciclos diários da temperatura;
- As diferenças encontradas entre os extensómetros ópticos e eléctricos são reduzidas e podem resultar sobretudo da posição exacta de cada par de extensómetros assim como de eventuais erros cometidos nas compensações da temperatura dos sensores, quer ópticos quer eléctricos.

## **8. CONCLUSÕES**

A implementação de sistemas de monitorização estrutural com acesso remoto, traz uma mais valia técnica à Brisa, permitindo realizar uma interpretação e análise de dados mais eficiente, que não se baseia exclusivamente em observações visuais, permitindo intervenções com maior rigor e também maior fiabilidade na garantia de padrões de qualidade, segurança estrutural e estado de conservação de estruturas.

Na monitorização desta obra, para além da utilização de sensores pouco frequentes em Portugal (infra-escavação e sensores de corrosão em chapas), utilizaram-se dois tipos de redes de sensores de grandezas estáticas (eléctrica e fibra óptica, no caso da Ponte) e implementou-se a monitorização desde a fase de construção permitindo obter um “ponto zero” que já acumulava muita informação da fase construtiva.

Toda a informação que está a ser gerada vai permitir não só analisar o comportamento real da estrutura, face aos pressupostos de cálculo adoptados na fase de projecto, como servirá também como um caso de estudo de referência de melhoria em projectos futuros, nomeadamente permitindo avaliar a eficácia das redes de sensores de base eléctrica versus sensores de fibras ópticas, o comportamento dos novos sensores utilizados e a eficácia do sistema de transmissão de dados e de alertas implementado.

## **Agradecimentos**

A solução do sistema, a condução dos trabalhos de fornecimento, instalação e exploração durante a construção e a fase inicial de exploração foi elaborado pela FEUP-LABTEST- Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto/Laboratório de Tecnologia do Betão e do Comportamento Estrutural e a empresa NewMensus, Lda.

## **Referências**

[1] Caderno de Encargos do Concurso;

[2] Projecto de Execução – Monitorização Estrutural e de Durabilidade – TACE, FEUP, LABTEST e NewMensus;