

# MONITORIZAÇÃO EM FASE DE SERVIÇO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DA PONTE INFANTE D. HENRIQUE

A. ADÃO DA FONSECA  
Prof. Catedrático na FEUP  
Engenheiro Civil na AFAssociados

R. OLIVEIRA BASTOS  
Engenheiro Civil na AFAssociados

## SUMÁRIO

Descreve-se o sistema de monitorização em fase de serviço do comportamento estrutural da Ponte Infante D. Henrique e apresenta-se uma síntese de algumas leituras e do seu significado estrutural referentes ao primeiro ano de vida útil daquela importante estrutura.

### 1. SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO

O comportamento estrutural da Ponte Infante D. Henrique foi monitorizado durante a sua construção por via de sensores colocados nas principais secções dos elementos estruturais e por via de um equipamento de aquisição, tratamento e transmissão de dados por telefone que permitiu a leitura directa dos sensores instalados. O referido sistema era gerido informaticamente, permitindo o registo de dados discretos “quase em contínuo”. A maioria dos sensores instalados e o equipamento de aquisição, tratamento e transmissão de dados foram fornecidos pela empresa *Kinesia – Ingeniería de Auscultación, SA*, que forneceu também o sistema de “hardware” e “software” para tratamento e transmissão desses dados por via telefónica, usando o programa *Merlin*.

Esse mesmo sistema de monitorização permite agora o acompanhamento da evolução de diversos parâmetros que caracterizam o comportamento estrutural e da Ponte durante a sua vida útil, dos 120 sensores usados em fase construtiva da Ponte tendo sido mantidos 81 para a fase de serviço – sendo 35 (8 clinómetros, 19 extensómetros e 8 termómetros) no tabuleiro, 31 (25 extensómetros e 6 termómetros) no arco e 15 (2 clinómetros e 13 extensómetros) nos montantes. Evidentemente, não se mantiveram os dispositivos de monitorização dos elementos estruturais provisórios existentes na fase de construção da Ponte, como sejam os anéis deflectómetros nos montantes provisórios, os extensómetros e termómetros nos pilares provisórios, os extensómetros nas escoras e as células de carga nos encontros.

As características dos sensores em funcionamento são as seguintes:

- Os extensómetros do betão são constituídos por uma banda extensométrica unitária embutida numa peça de argamassa que se embebe directamente no betão na direcção cuja deformação longitudinal se deseja medir. Estão calibrados em  $\mu\text{m}/\text{m}$  ( $1 \times 10^{-6}$ )
- Os extensómetros das armaduras são constituídos por um elemento de armadura passiva ( $\text{Ø}13$  mm), instrumentado com 4 bandas extensométricas, que empalma com o varão da armadura cuja tensão se deseja medir. Estão calibrados em MPa (ou  $\text{N}/\text{mm}^2$ )
- Os clinómetros são do tipo fixo e são aparafusados às almas do tabuleiro ou à parede do montante. São constituídos por um cilindro com um pêndulo interior tipo consola instrumentado com 4 bandas extensométricas. A sua amplitude de medição é de  $\pm 5^\circ$  ( $0.88\text{rad}$ ) e estão calibrados em  $\mu\text{rad}$  ( $10^{-6}$  rad)

- Os termómetros são embutidos no betão a uma profundidade de aproximadamente 10 cm. São constituídas por um elemento em latão com 4 bandas extensométricas. O seu campo de medida é de -45°C a 100°C e, dado que as sondas foram colocadas antes da betonagem, estão preparadas para suportar o calor de hidratação do betão. Estão calibradas em °C

Existem, portanto, 4 tipos de sensores, todos do tipo extensométrico, isto é, dispositivos com bandas extensométricas internas que medem a deformação de uma peça interna do sensor e traduzem para unidades eléctricas a magnitude física que é objecto de medida. Todos os sensores têm resposta linear, ou seja, proporcional à magnitude.

A ligação dos sensores ao sistema de aquisição de dados faz-se com cabos isolados de modo a minimizar as interferências e o ruído de carácter eléctrico, contribuindo para uma correcta transmissão de dados independentemente da distância a que se encontra o sensor.

O sistema de aquisição de dados cumpre os requisitos seguintes:

- Funcionamento autónomo (sem assistência de operador)
- Alimentação ininterrupta e estabilizada com capacidade suficiente para 30 minutos
- Possibilidade de controlo remoto e de transferência de ficheiros pela linha telefónica tradicional
- Realiza, por defeito, um registo periódico com intervalo de uma hora
- Todas as leituras e gráficos são apresentados em unidades de engenharia (°C, kN, micron, MPa, etc.) com as correcções apropriadas dos valores de “zero” (*offset*), perdas de sinal nos cabos, etc.
- Todas as leituras são gravadas em ficheiros informáticos em tempo real, de forma a garantir que não há perdas de informação perante eventuais falhas de alimentação

Os níveis de precisão finais de toda a cadeia de medida (sensor + cabo + unidade de leitura + etc.) são os seguintes:

- Temperaturas: 0,05 °C
- Extensómetros: 1 µm/m
- Clinómetros:  $\pm 0,001^\circ$  ( $\pm 0,017$  mm/m)

Embora a instrumentação instalada inclua um computador que armazena em intervalos predefinidos todos os registos nos sensores, a sua interpretação só é efectuada periodicamente.

O software de processamento de dados proporciona as seguintes funcionalidades:

- Capacidade de visualizar não só os valores registados mas também qualquer função destes (como diferenças, gradientes, médias, etc.)
- Capacidade de representar graficamente diversos gráficos X-Y sobrepostos utilizando escalas comuns ou diferentes. Os gráficos podem ser explorados com o cursor e permitem a realização de ampliações parciais (zooms)
- Capacidade de elaborar modelos das variáveis, incluindo desfasamentos horários, inércia térmica, etc., a fim de ser possível decompor o registo de uma variável numa soma ponderada dos registos de outras variáveis consideradas componentes da variável
- Capacidade de realizar correlações estatísticas “inteligentes” entre as variáveis que permitem estabelecer, por métodos estatísticos, os ajustes adequados entre as diferentes leituras dos sensores e os possíveis intervalos de variação dos parâmetros ambientais térmicos e tenso-deformacionais (fluência, retracção, módulo de elasticidade) dos materiais.

- Capacidade de trabalhar simultaneamente com um grupo de variáveis como se tratasse de uma única, de modo a quantificar, por exemplo, as curvaturas estruturais e a posição do eixo neutro

A capacidade de realizar correlações estatísticas foi fundamental para o controlo e interpretação dos resultados por parte dos Projectistas. Eliminaram-se, desta forma, os problemas derivados da visão clássica determinista dos sistemas de instrumentação e utilizaram-se os recursos da estatística para se obterem “medidas com significado mecânico” fiáveis que permitiram a comparação com os valores previstos em projecto e a consequente tomada de decisões. Em particular, permitiu a “identificação dos parâmetros” do comportamento mecânico da Ponte, como seja a realização de estimativas fiáveis dos valores reais da fluência do betão estrutural da obra.

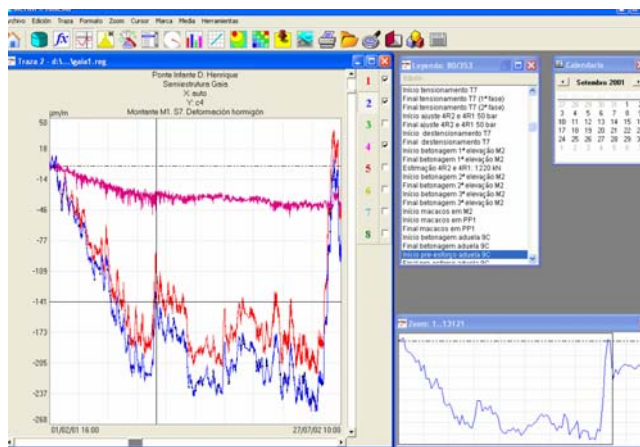


Figura 1 – Exemplo de processamento de dados

Projectistas e construtores sabiam que a construção da Ponte do Infante (Figura 2) seria extremamente difícil [1] e [2], mas foi realizada sempre com total segurança e controlo do seu comportamento estrutural [3], em grande parte graças à fiabilidade e capacidades do sistema de monitorização instalado quer na Ponte (superestrutura e fundações) quer nos maciços rochosos das encostas [4] e [5].



Figura 2 – Vista aérea das Pontes Maria Pia, Infante D. Henrique e Luiz I

## **2. COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES ESPERADOS E OS VALORES LIDOS PELA MONITORIZAÇÃO**

A Ponte do Infante foi aberta ao tráfego no dia 30 de Março de 2003, mas só a 12 de Junho seguinte foi possível retomar a leitura dos valores fornecidos pelos sensores de instrumentação instalados. No final de Fevereiro de 2004 ocorreu uma avaria grave no computador do sistema que implicou que tenha havido uma interrupção nas leituras até ao início de Junho seguinte. Mas o número de leituras registadas ao longo do primeiro ano de vida útil da Ponte é já imenso e é impossível apresentar neste trabalho a evolução registada em todas as grandezas estruturais que estão a ser monitorizadas. Consequentemente, opta-se por referir apenas as grandezas nas secções mais relevantes, sobrepostas com os valores esperados para essas grandezas obtidos com o modelo matemático de análise visco-elástico e geometricamente não-linear.

De qualquer modo, desde já se confirma que, entre Junho de 2003 e Julho de 2004, a resposta da Ponte foi claramente comandada pelas variações térmicas diárias e sazonais e pelos fenómenos diferidos do betão (retracção e fluência). Em particular, o comportamento diferido esperado para a Ponte resume-se a um acréscimo dos esforços de flexão do tabuleiro resultantes de uma pequena perda de impulso de arco. Com efeito, são visíveis os acréscimos dos esforços de flexão no tabuleiro e a diminuição do esforço axial no arco. Eventuais perdas de impulso no arco superiores ao esperado tornariam o comportamento da Ponte menos “favorável”, podendo dar origem a perdas de funcionalidade em condições de serviço, nomeadamente no que diz respeito às deformações e à durabilidade dos elementos estruturais e acessórios (aparelhos de apoio e juntas de dilatação) da Ponte. Estas perdas de impulso podem ser originadas por causas extrínsecas como, por exemplo, assentamentos de apoio, e por causas intrínsecas como são os efeitos reológicos do betão.

A comparação entre os valores esperados (obtidos pelo cálculo analítico evolutivo) e os valores lidos nos dispositivos de monitorização permitiu já avaliar o comportamento da Ponte em termos de deformações (rotações e extensões) e a partir daí extrapolar as conclusões dessa comparação para as redistribuições de esforços. Mas salienta-se que uma análise “autónoma” da evolução das deformações não é suficiente para avaliar o comportamento da Ponte em termos de esforços instalados. Em cada secção é necessário conhecer, em todos os instantes, as deformações e as correspondentes tensões, considerando convenientemente o comportamento visco-elástico dos materiais.

De qualquer modo, para poderem ser comparados com os valores teóricos esperados, os valores recolhidos devem ser devidamente “filtrados” de modo a extrair a parte relativa ao comportamento diferido do betão, eliminando os efeitos das variações térmicas diárias e sazonais. A “filragem” dos valores lidos consiste em definir numericamente as parcelas à custa das quais se consegue descrever o andamento de cada uma das séries de valores medidos pela monitorização. Dado que em fase de exploração não há nem alterações do sistema estrutural nem das condições de carregamento (as sobrecargas de utilização além de transitórias não são significativas), as parcelas a considerar resumem-se aos efeitos térmicos e reológicos.

Para estimar a parcela referente aos efeitos térmicos são utilizados os valores registados pelos termómetros embebidos no betão em várias secções da Ponte, sendo possível estabelecer desfasamentos temporais entre o modelo que se pretende desenvolver e as leituras de determinado termómetro para ter em conta as distintas exposições solares e as distintas inércias térmicas das secções.

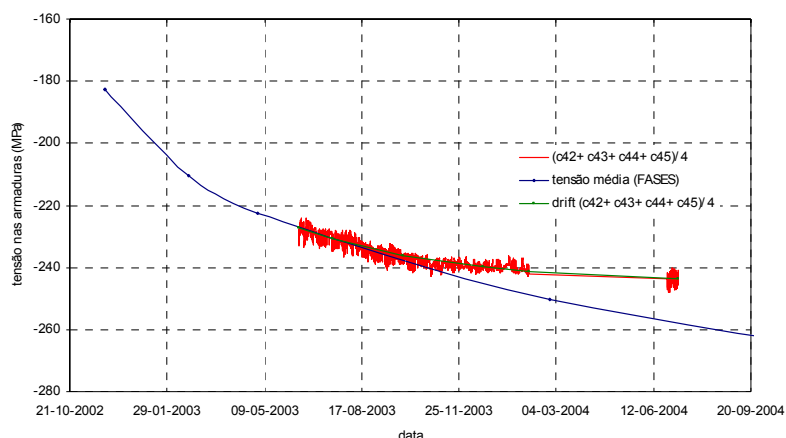
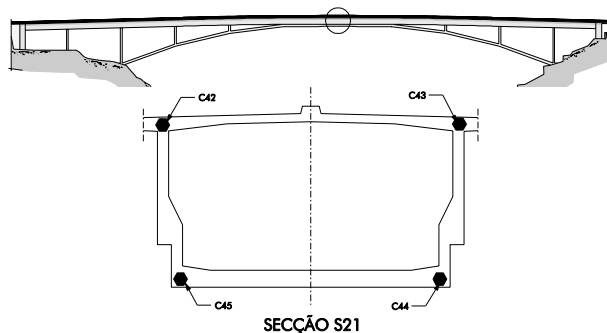
Para simular a evolução das grandezas resultante do comportamento diferido do betão, o

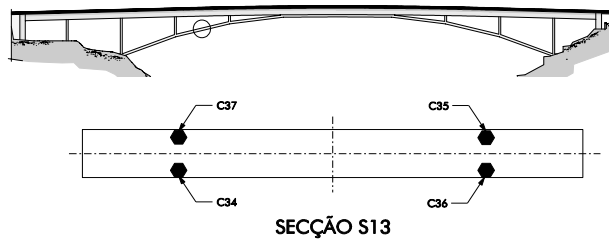
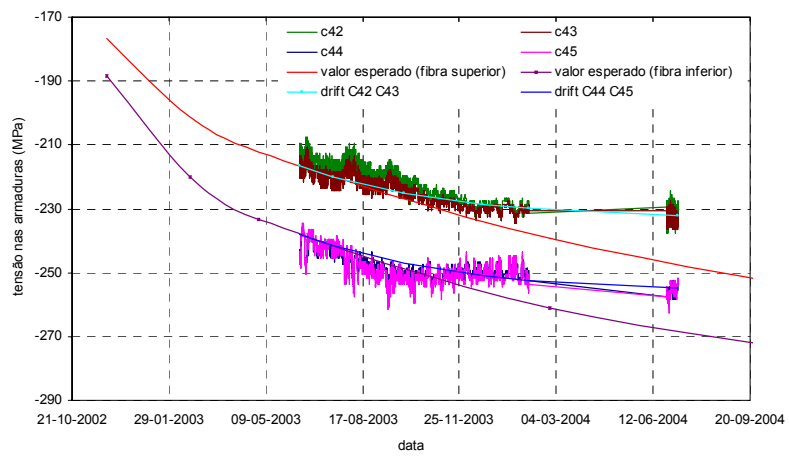
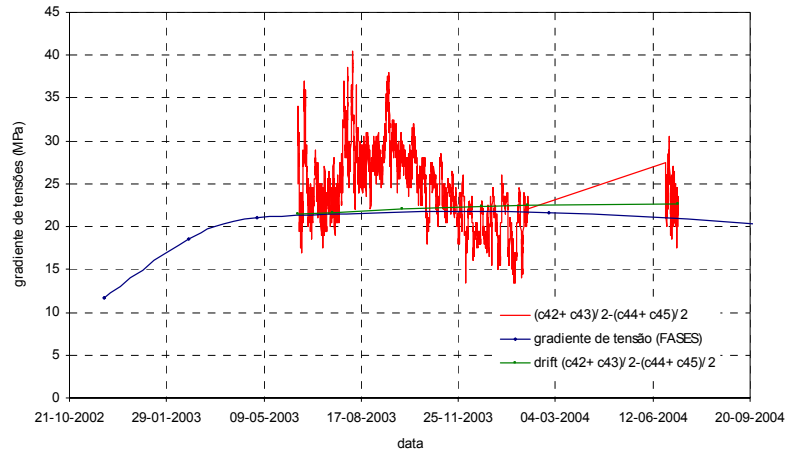
programa recorre a funções exponenciais amortecidas (denominadas internamente por funções “drift”) que pretendem modelar os efeitos dos fenómenos reológicos do material em causa. É esta parcela do modelo numérico de cada série de valores medidos que se compara directamente com os valores teóricos do cálculo evolutivo.

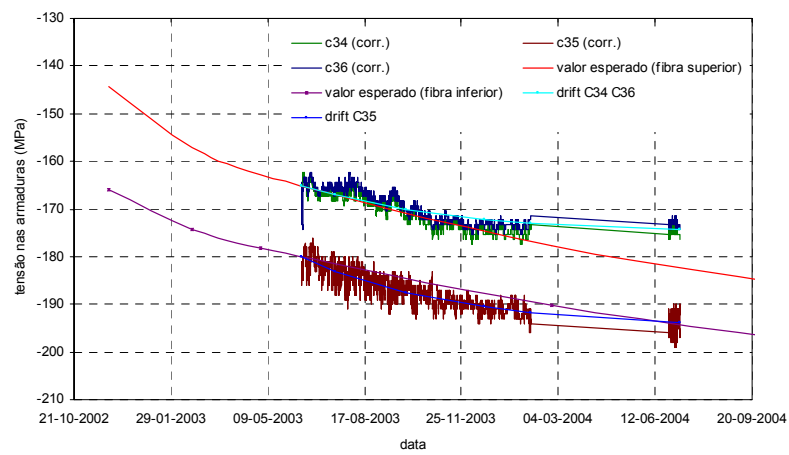
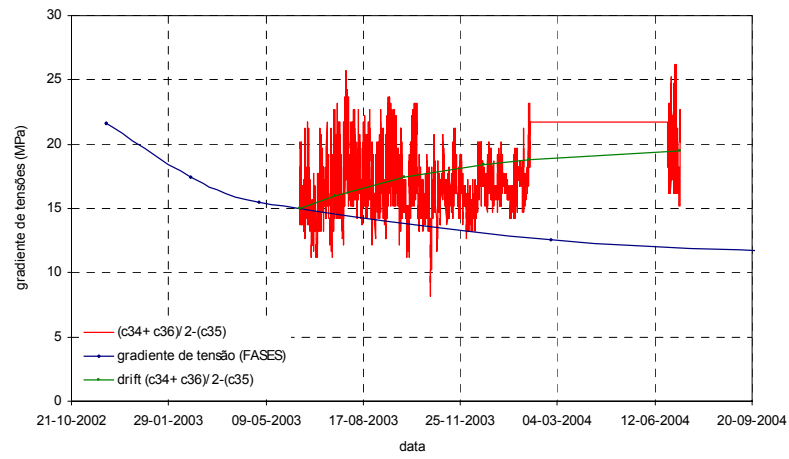
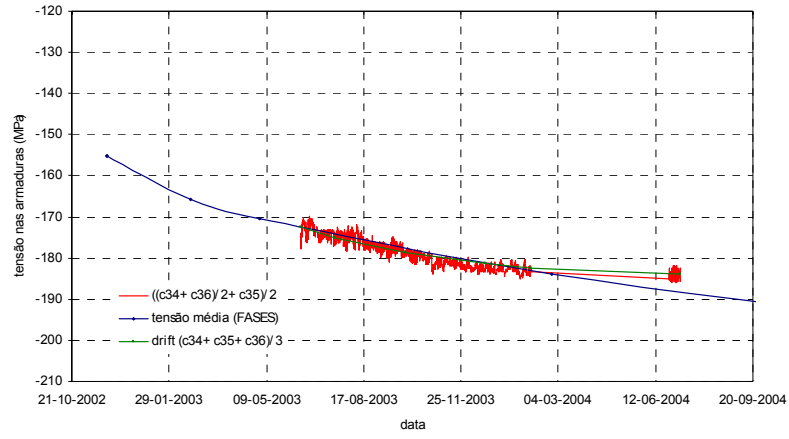
Para realizar a comparação entre valores esperados e valores lidos torna-se, ainda, necessário adoptar, caso a caso, uma translação inicial nas ordenadas das leituras de modo a corrigir os seus valores “acumulados” até ao início da fase de exploração da Ponte. Desta forma se analisa de forma independente a evolução do comportamento diferido da Ponte durante a sua vida útil, desvalorizando o historial de tensões durante o processo construtivo.

Para ajustar “no tempo” as curvas dos valores lidos com as curvas dos valores esperados, define-se para os últimos um referencial temporal que aproxime o plano de obra modelado ao realmente executado. É impraticável modelar dia a dia a série de operações realizadas durante a obra, pelo que se optou por agrupá-las em conjuntos de tarefas representativas. Esta discretização dá origem a algumas diferenças em fases concretas da obra como, por exemplo, durante a desmontagem dos elementos provisórios e o início do funcionamento em condições de serviço. No entanto, estas discrepâncias, que são relevantes em instantes específicos, atenuam-se com a evolução do tempo.

Os gráficos seguintes apresentam a comparação entre valores lidos e valores esperados da evolução dos comportamentos da secção do tabuleiro a meio-vão da Ponte e da secção do arco a meio-vão do 2º tramo do lado de Gaia.







A análise da comparação entre os valores esperados e as curvas de tendência obtidas pelo tratamento estatístico dos valores lidos (“valores filtrados”) permite extrair duas conclusões gerais relevantes:

- Nas secções do tabuleiro e do arco, a evolução dos valores médios das extensões é menos acentuada do que o previsto.
- Nas secções do tabuleiro, a evolução das curvaturas e dos gradientes de tensões (entre as fibras superiores) é muito semelhante ao esperado.

A explicação mais correcta para o facto de as extensões médias das secções do arco e do tabuleiro serem inferiores às esperadas será então a constatação de que os valores reais da retracção dos betões são inferiores aos valores considerados no modelo evolutivo. Com efeito, apesar de nos ensaios de caracterização se terem obtido valores da retracção cerca de 40% superiores aos teóricos para o betão do tabuleiro e cerca de 10% superiores aos teóricos para o betão do arco, no modelo evolutivo optou-se por considerar, do lado da segurança, majorações de 50% para ambos os casos.

### 3. CONCLUSÃO

Face à informação disponível, um ano após a abertura ao tráfego da Ponte verifica-se que o andamento das curvas dos valores lidos “filtrados” é concordante com as curvas dos valores esperados, **o que significa que não ocorrem desvios relevantes no comportamento da Ponte em relação aos valores teóricos de Projecto.**

### 4. REFERÊNCIAS

- [1] Adão da Fonseca, A. et al, “Ponte Infante D. Henrique: dimensionamento estrutural”, Encontro Nacional de Betão Estrutural 2000, Porto, Novembro 22-24: 857-865.
- [2] Adão da Fonseca, A. et al, “Ponte Infante D. Henrique: processo construtivo”, Encontro Nacional de Betão Estrutural 2000, Porto, Novembro 22-24: 867-877.
- [3] Adão da Fonseca, A., “Ponte Infante D. Henrique”, Congresso Nacional da Engenharia de Estruturas 2002 – Os novos desafios na qualidade das obras, Lisboa, Julho 10-13: 725-744.
- [4] Adão da Fonseca, A. et al, “Ponte Infante D. Henrique: construção e monitorização”, Encontro Nacional de Betão Estrutural 2002, Lisboa, Novembro 27-29: 729-738.
- [5] Adão da Fonseca, A. et al, “Monitoring of temporary cables in Infante Dom Henrique Bridge”, First European Workshop on Structural Health Monitoring, Paris, July 10-12, 2002: 1065-1070.