

PONTE INFANTE D. HENRIQUE **Construção e monitorização**

A. ADÃO DA FONSECA*

Renato BASTOS

AFAssociados – Projectos de Engenharia, SA

* Professor Catedrático da FEUP

F. MILANES MATO**

Luis MATUTE

IDEAM, SA

** Professor Catedrático da ETSICCP de Madrid

SUMÁRIO

A construção da Ponte Infante D. Henrique está terminada e constitui mais uma obra singular de Engenharia a enriquecer o património de magníficas pontes sobre o rio Douro, entre as cidades do Porto e Gaia. Neste artigo são sintetizados alguns dos aspectos mais significativos do controlo da sua construção.

1. A ESTRUTURA

A Ponte do Infante é constituída por dois elementos fundamentais em interação mútua: uma viga caixão, relativamente rígida, em betão armado pré-esforçado, de 4,50 m de altura, apoiada sobre um arco muito flexível, em betão armado, com 1,50 m de espessura. O vão entre arranques do arco é de 280 m e a flecha entre o fecho e os arranques é de 25 m, numa relação de abatimento superior a 11 (Figura 1).



Figura 1 – Alçado da Ponte

O comportamento da estrutura é determinado pela relação que se estabelece entre dois elementos de rigidez tão desigual no conjunto arco-tabuleiro. A Ponte afasta-se do funcionamento clássico de um arco rígido que liberta de flexões o tabuleiro ou reduz as flexões à distância entre montantes. Com efeito, a grande rigidez do tabuleiro face ao arco, aliada ao forte abatimento deste, aproxima mais o funcionamento da estrutura da Ponte do Infante ao de uma ponte com o tabuleiro rígido, onde é a viga-caixão que vence o vão completamente por flexão, tal como numa ponte contínua convencional, mas proporcionando o arco vários apoios elásticos afastados de 35 m entre si [1].

2. O PROCESSO CONSTRUTIVO

A construção de uma grande Ponte com critérios de precisão geométrica nunca dantes solicitados constituiu um grande desafio lançado aos construtores. E, construir um arco tão delgado e tão abatido ao longo de 280 m “exigiu” um processo construtivo em que o tabuleiro avançou à frente do arco. Um procedimento que só uma vez havia sido utilizado, na Ponte de Nakatanigawa, no Japão, onde o arco tem 100 m de vão e 19 m de flecha.

Em termos gerais, o processo construtivo consistiu no avanço da estrutura a partir de cada uma das margens mediante a execução de dois pilares provisórios de modo a diminuir o vão em fase construtiva, e a colocação de diagonais e montantes provisórios (a somar aos definitivos) entre a viga e o arco, de modo a formar uma consola única de inércia variável em que o tabuleiro era o banzo traccionado, o arco era o banzo comprimido e as diagonais e os montantes eram “as almas”. Na realidade, esteve-se perante uma estrutura triangulada de altura considerável que possibilitou a sua sustentação em consola até à materialização do fecho do arco (Figura 2).



Figura 2 – Alçado geral durante a construção

Após a betonagem da aduela de fecho, procedeu-se à desmontagem dos cabos de retenção, das diagonais, dos montantes e dos pilares provisórios (Figura 3), numa sequência tão criteriosa quanto a utilizada na sua montagem [2].

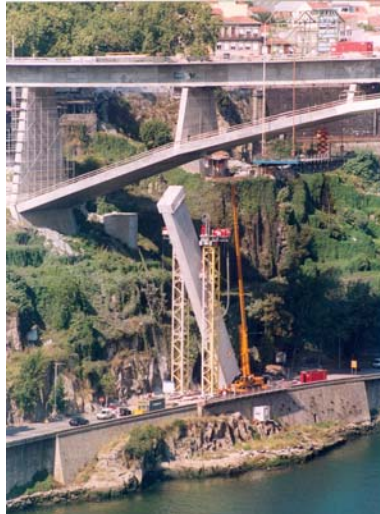


Figura 3 – Desmontagem do pilar provisório do lado do Porto

3. CONTROLO DO PROCESSO CONSTRUTIVO

3.1. Controlo de geometria

O estabelecimento de critérios rígidos e de tolerâncias quase nulas durante a construção da Ponte pretendeu assegurar as condições geométricas implícitas ao funcionamento estrutural requerido. Nomeadamente, assinalam-se as duas condições seguintes:

- a flecha do arco e os ângulos de desvio sob os montantes, a tempo infinito, sendo determinantes para a configuração resistente do conjunto arco-tabuleiro, tinham de ser garantidos com precisão máxima;
- o arco, em que pela primeira vez em Portugal se utilizou betão de alto desempenho (C60/75), apresenta propositadamente contraflechas não afins dos modos de encurvadura fundamentais (Figura 4), as quais tinham também de ser conseguidas com precisão máxima (Figura 5) por forma a obterem-se factores de segurança adicionais em relação à instabilidade por encurvadura desta peça tão esbelta e tão fortemente comprimida.

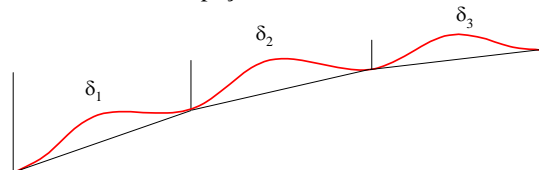


Figura 4 – Definição das contraflechas de cada meio arco

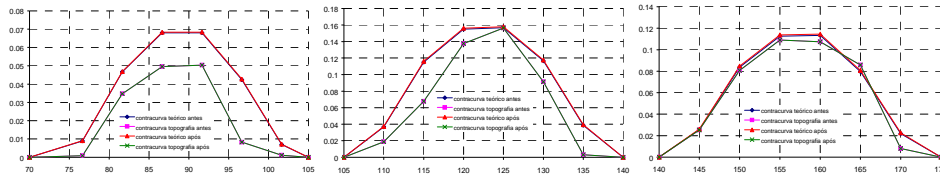


Figura 5 – Comparação entre as contracurvas de projecto e executadas

A tomada de decisões acerca de eventuais correcções da geometria e/ou dos esforços instalados, bem como da própria metodologia de correcção, foi fundamentada nos modelos matemáticos desenvolvidos, sempre actualizados com os dados que foram “colhidos” no evoluir da obra, quer quanto à resposta deformacional quer quanto à resposta tensional da estrutura, onde assumiram relevância especial os resultados, devidamente tratados, dos dispositivos de monitorização internos e externos da Ponte.

3.3. Monitorização da construção

A construção desta Ponte beneficiou de um sistema de monitorização muito completo, instalado quer na Ponte (superestrutura e fundações) quer nos maciços rochosos das encostas.

Nos maciços graníticos de ambas as encostas, foram instalados 14 inclinómetros (9 no lado do Porto e 5 no lado de Gaia) que atingiram a profundidade aproximada de 40 m. No lado do Porto, dentro do túnel da Alfândega, foram também instrumentadas três secções transversais com sistemas de convergência de observação óptica (Figura 6). Em ambas as encostas instrumentou-se, ainda, um total de 11 ancoragens.

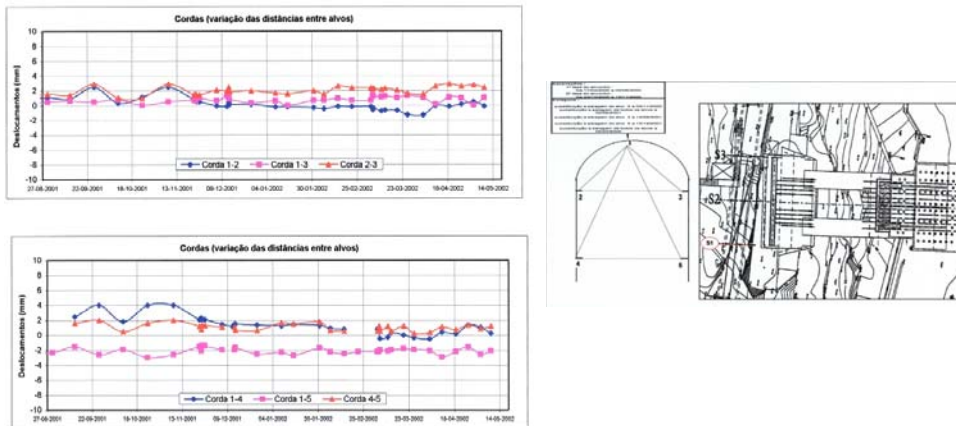


Figura 6 – Sistema de convergência de observação óptica no túnel da Alfândega

O sistema de instrumentação “interna” da Ponte foi especialmente relevante [3]. Ele assentou em dois sistemas informáticos colocados dentro do caixão da Ponte (um em cada meia-ponte), funcionando independentemente mas transmitindo toda a informação por via telefónica para

outras consolas de trabalho (no Estaleiro, na Fiscalização, nos Projectistas – no Porto e em Madrid – e ainda na empresa Kinesia - Ingeniería de Auscultación SA, responsável pelo sistema). O sistema permitiu conhecer os valores de grandezas físicas de natureza diversa, como sejam as reacções em apoios e os momentos flectores, esforços axiais, rotações e temperaturas em secções escolhidas do arco, do tabuleiro e dos pilares (montantes). Foi instalado um total de 120 sensores (extensómetros, clinómetros, termómetros e células de carga), conforme apresentado na Figura 7 e na Tabela 1.

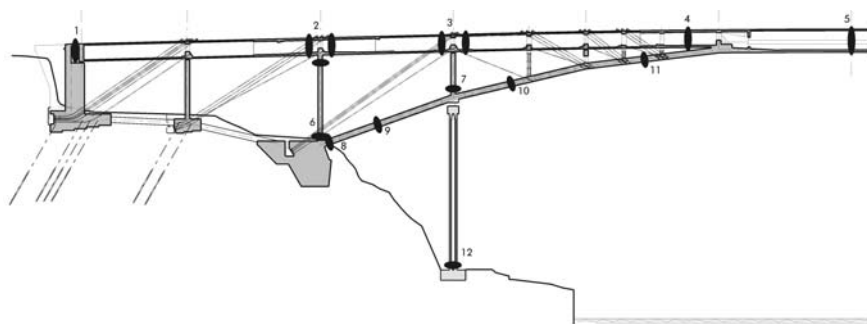


Figura 7 – Localização das secções instrumentadas na meia-ponte do lado de Gaia

Tabela 1 – Sensores na meia-ponte do lado de Gaia

Secção	Sensor	Parâmetro medido
1	Células de carga nos aparelhos de apoio	Esforço axial no tabuleiro.
2	Clinómetros Termómetros	Rotação do tabuleiro e do montante Curvatura média do tabuleiro (momento flector) Temperatura nos banzos superior e inferior do tabuleiro
3	Clinómetros Extensómetros	Rotação do tabuleiro, curvatura média do tabuleiro (momento flector) Esforço axial e momento flector no tabuleiro
4	Extensómetros Termómetros	Esforço axial e momento flector no tabuleiro Temperatura nos banzos superior e inferior do tabuleiro
5	Extensómetros	Esforço axial e momento flector no tabuleiro
6	Extensómetros	Esforço axial e momento flector no montante
7	Extensómetros	Esforço axial e momento flector no montante
8	Extensómetros	Esforço axial e momento flector no arco
9	Extensómetros Termómetros	Esforço axial e momento flector no arco Temperatura nas faces superior e inferior do arco
10	Extensómetros	Esforço axial e momento flector no arco
11	Extensómetros	Esforço axial e momento flector no arco
12	Extensómetros Termómetros	Esforço axial e momento flector no pilar provisório Temperatura nas faces opostas do pilar provisório

O sistema dispõe de um módulo de “correlação estatística inteligente” que permite 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. A mais-valia resultante desta abordagem 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 uma verdadeira “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.

Na Figura 8 apresenta-se um exemplo da correlação das leituras de um dos extensómetros na base do montante sobre o arranque do arco do lado de Gaia com as leituras de um dos termómetros instalados no betão. Essa correlação é exibida pelo gráfico superior direito, no qual estão também considerados automaticamente os efeitos do comportamento reológico do betão e os carregamentos introduzidos na estrutura.

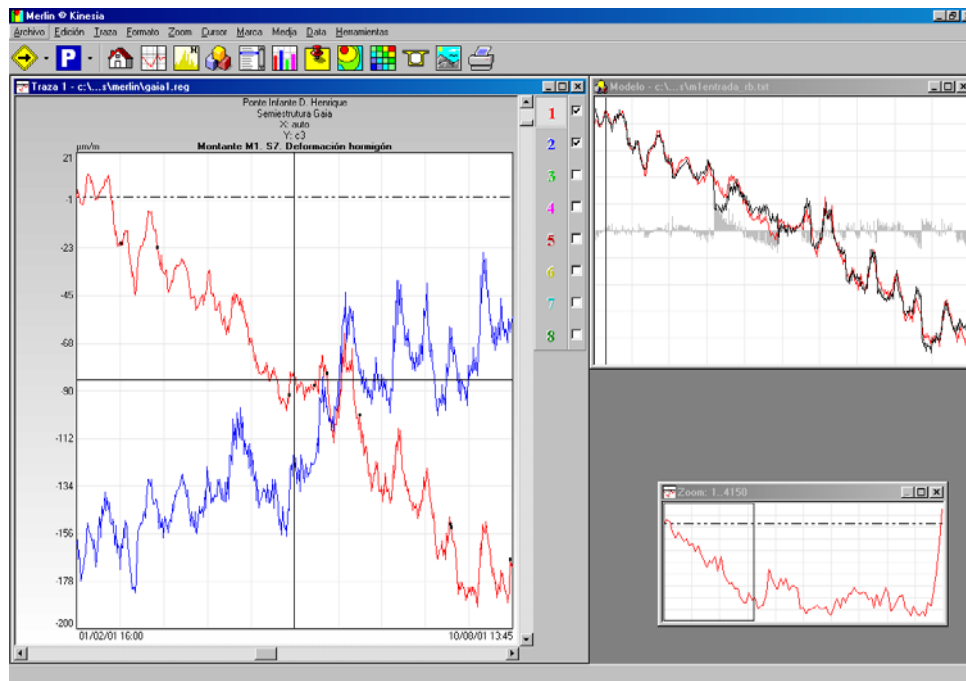


Figura 8 – Exemplo do tratamento estatístico de leituras

Como exemplo de leituras fornecidas pelo sistema de monitorização que implicaram uma actuação de “correção estrutural”, a Figura 9 mostra a evolução das extensões nas fibras superior e inferior da secção de arranque do arco, numa determinada fase da obra. O “afastamento” progressivo entre as leituras referentes a cada uma das fibras significa flexão de sinal negativa devida ao insuficiente tensionamento dos cabos de suspensão durante a execução do 1º tramo do arco. Esta situação foi compensada por um retensionamento dos tirantes, ainda antes do apoio no pilar provisório.

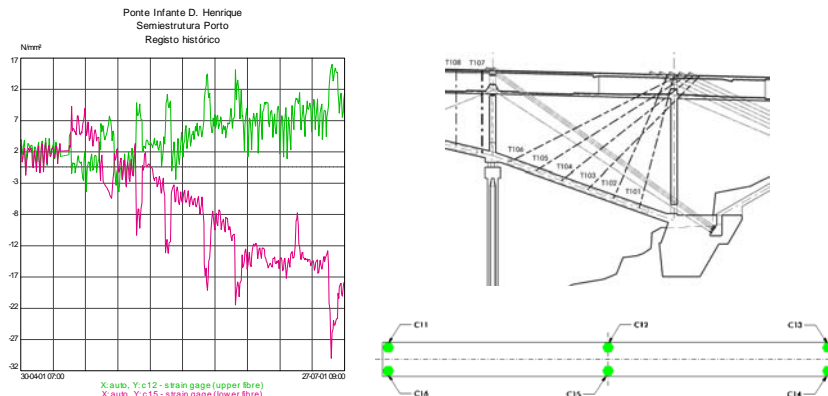


Figura 9 – Evolução das extensões das fibras superior e inferior da secção de arranque do arco

O processo construtivo estabelecia duas operações especiais em que se recorria a actuações com conjuntos de macacos hidráulicos (com uma capacidade total de 100 000 kN): uma a meio do avanço em consola do tramo central e outra após o fecho da Ponte, para a desapoiar dos pilares provisórios. Tratava-se de materializar assentamentos de apoio “precisos e controlados”, sobre os referidos pilares, de 25 e 90 mm, respectivamente. Estas delicadíssimas operações, que solicitavam por primeira vez a resposta estrutural global arco laminar / tabuleiro rígido, foram controladas em tempo real pelo sistema de instrumentação, o que permitiu verificar segundo a segundo a sua adequação aos cálculos realizados previamente. Na Figura 10 estão representadas as comparações entre os valores esperados e os valores medidos das extensões nas fibras superiores e inferiores da secção do tabuleiro sobre o pilar provisório do lado do Porto durante a operação de desapoio.

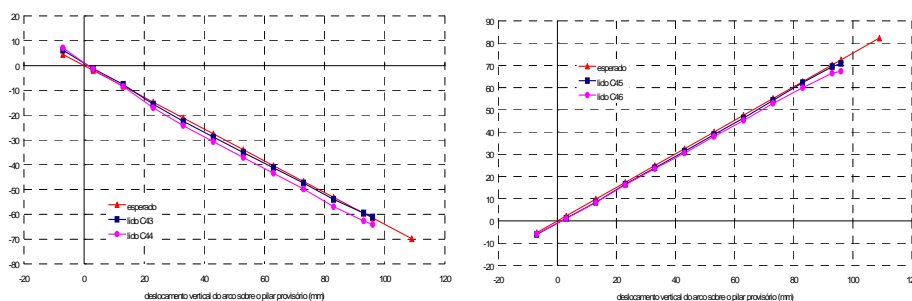


Figura 10 – Extensões na secção do tabuleiro sobre o pilar provisório do lado do Porto

O sistema de instrumentação possibilitou também o seguimento, directo e imediato, do comportamento da Ponte durante os ensaios de carga. Os resultados obtidos (Figura 11) ajustaram-se com extrema precisão aos valores previstos, como aliás era esperado face às múltiplas comparações que foram sendo efectuadas ao longo da construção da obra. A Figura 11 apresenta as linhas de influência das extensões nas fibras superiores e inferiores de 3 secções do tabuleiro, obtidas com a passagem de 4 camiões de cerca de 30 toneladas.



Figura 11 – Linhas de influência das extensões em 3 seções do tabuleiro

Por outro lado, a “leitura” directa das forças de tracção instaladas nos cabos (retenções e diagonais) provisórios exigiria um número elevado de sensores, com custos que foram considerados não justificados. Assim, optou-se por proceder à determinação daquelas forças separadamente, com base na teoria das cordas vibrantes. Como exemplo, apresenta-se a comparação entre os valores esperados e os valores medidos da variação do esforço axial instalado na diagonal provisória D1 (Figura 12) [4].

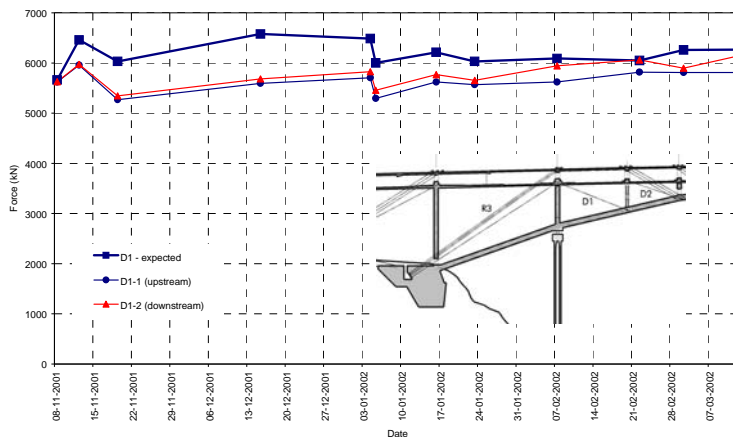


Figura 12 – Variação do esforço axial instalado na diagonal D1 (medido vs esperado)

Todo este sistema de monitorização não anulou as leituras topográficas habituais, com as quais foram sendo feitas as correlações mais diversas, assim se controlando todo o processo construtivo quer em termos geométricos quer em termos de esforços instalados e decisões de intervenção, como foram os assentamentos de apoio introduzidos criteriosamente sobre os pilares provisórios e entre os montantes, situados no alinhamento daqueles pilares, e o tabuleiro.

Projectistas e construtores reconhecem que a construção da Ponte do Infante foi extremamente difícil, mas foi realizada sempre com total segurança e controlo do seu comportamento estrutural, em grande parte graças à fiabilidade e capacidades do sistema de monitorização instalado.

E assim, certamente que as Pontes Maria Pia e Luiz I receberam bem, entre elas, a Ponte Infante D. Henrique (Figura 13).



Figura 13 – Vista aérea das Pontes Maria Pia, Infante D. Henrique e Luiz I

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos são devidos a todos os colegas da AFAssociados e da IDEAM pela contribuição nas discussões onde se encontraram muitas das soluções desenvolvidas.

REFERÊNCIAS

- [1] Adão da Fonseca, A. *et al.*, “Ponte Infante D. Henrique, dimensionamento estrutural”, *Encontro Nacional de Betão Estrutural 2000*, Porto, Nov. 22-24: 857-865.
- [2] Adão da Fonseca, A. *et al.*, “Ponte Infante D. Henrique, processo construtivo”, *Encontro Nacional de Betão Estrutural 2000*, Porto, Nov. 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, Jul. 10-13: 725-744.
- [4] Adão da Fonseca, A. *et al.*, “Monitoring of temporary cables in Infante D. Henrique bridge”, *First European Workshop on Structural Health Monitoring*, Paris, Jul. 10-12, 2002: 1065-1070.