

OBSERVAÇÃO DA PONTE SOBRE O RIO ANGUEIRA

Luís Oliveira Santos*

*Departamento de Estruturas, Laboratório Nacional de Engenharia Civil

SUMÁRIO

Apresenta-se nesta comunicação alguns dos resultados obtidos pelo LNEC na observação do comportamento estrutural da ponte sobre o rio Angueira. Descreve-se ainda o equipamento utilizado

A observação iniciou-se durante a construção, com a instalação de equipamento no interior das secções de betão. A anteceder a entrada em serviço da ponte, em Abril de 1994, foram efectuados ensaios de carga estáticos e dinâmicos. Desde então a estrutura tem sido observada através de campanhas periódicas.

ABSTRACT

The purpose of this paper is to present the main results and the methodology developed for the observation of Angueira bridge. This bridge has been instrumented during construction and their behaviour have been experimentally followed during construction and in a final load test, in April 94. Since then, periodical observations are being made under service conditions.

1 - INTRODUÇÃO

A análise e interpretação dos resultados obtidos directamente do protótipo de uma estrutura permite um melhor conhecimento do seu comportamento estrutural, contribuindo para o aperfeiçoamento do projecto e construção de futuras obras.

A presente comunicação tem como objectivo divulgar o envolvimento do Laboratório Nacional de Engenharia Civil na observação do comportamento estrutural da nova ponte sobre o rio Angueira na estrada nacional 219, no distrito de Bragança.

Após uma breve descrição da obra, apresenta-se o plano geral de instrumentação e alguns dos principais resultados obtidos durante e após a construção. Finalmente descrevem-se os ensaios de carga estáticos e dinâmicos a que a estrutura foi sujeita em Abril de 1994, comparando-se os resultados medidos com os obtidos por via analítica.

2 - DESCRIÇÃO DA OBRA

A ponte sobre o rio Angueira é uma estrutura porticada em betão armado pré-esforçado, constituída por três tramos cujos comprimentos são de 115 m, no vão central, e de 57,5 m, nos vãos extremos, perfazendo um comprimento total de 230 m [1].

O tabuleiro tem uma largura total de 11,8 m, dos quais 9,0 m são ocupados pela faixa de rodagem, e é estruturalmente constituído por uma viga contínua de três vãos. A secção do tabuleiro é em caixão monocelular, com altura variável entre 7,0 m, sobre os pilares, e 2,5 m, no meio vão central e nas zonas contíguas aos encontros. As almas desta viga têm uma espessura constante de 0,4 m, variando a espessura da laje inferior entre 1,1 m, nas secções junto aos pilares, e 0,2 m, nas secções de menor altura. A laje superior prolonga-se lateralmente, para além das almas do caixão, por duas consolas com vãos de 2,9 m.

Os dois pilares, com fundação directa, têm uma secção rectangular de 5,5 m × 4,6 m, constante em toda a sua altura, sendo de 0,40 m a espessura das paredes. A altura dos pilares, medida entre a face inferior do tabuleiro e a face superior das sapatas de fundação, é de 42,0 m.

O tabuleiro foi construído pelo método dos avanços sucessivos em consola, partindo do coroamento dos pilares. O fecho do tramo central foi efectuado, após o fecho dos tramos laterais, em Janeiro de 1994, tendo a ponte entrado ao serviço em Abril de 1994.

Na figura 1 apresenta-se uma vista geral da obra.

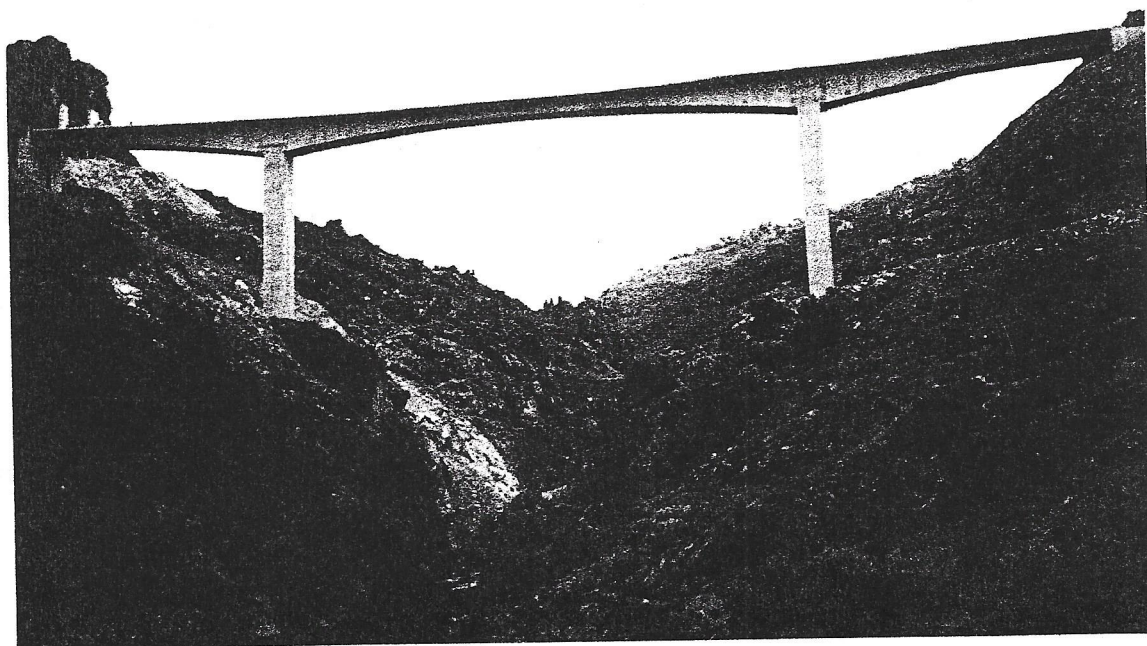


Figura 1 - Vista geral da ponte sobre o rio Angueira

3 - OBSERVAÇÃO DURANTE E APÓS A CONSTRUÇÃO

A instrumentação da ponte, efectuada de acordo com o plano de observação previamente elaborado [2], consistiu, fundamentalmente, na instalação de diversos extensómetros de corda vibrante e termómetros de resistência, em quatro secções da ponte cuja localização está indicada na figura 2, nas quais se observou igualmente o comportamento diferido do betão ao longo do tempo. Foram também instaladas diversas bases de clinómetro nos pilares e encontros, bases de nivelamento ao longo do tabuleiro e bases de alongamento nas juntas de dilatação nos encontros. Na figura 3 está representada, a título exemplificativo, a localização pormenorizada do equipamento no interior da secção S2. Faz-se de seguida uma breve descrição da instrumentação efectuada, apresentando-se alguns dos resultados obtidos desde a montagem dos primeiros aparelhos, em Outubro de 1993, até Abril de 1996 [3], incluindo, portanto, a fase de construção da ponte e os dois primeiros anos em serviço.

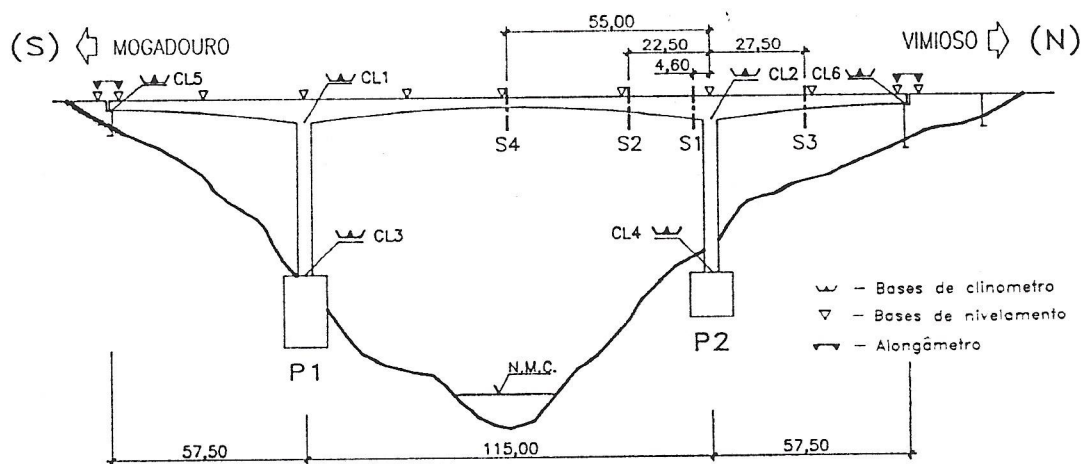


Figura 2 - Plano geral da instrumentação da ponte de Angueira

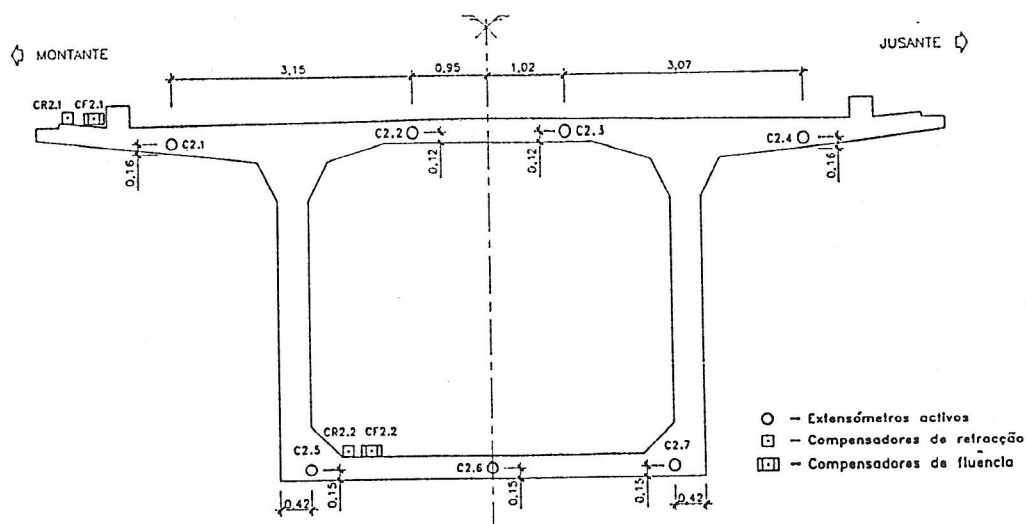


Figura 3 - Secção instrumentada do tabuleiro da ponte de Angueira (S₂)

A medição das extensões foi efectuada através de extensómetros de corda vibrante instalados no interior do betão. Na figura 4 apresentam-se os resultados obtidos nos extensómetros instalados na laje superior da secção S₂.

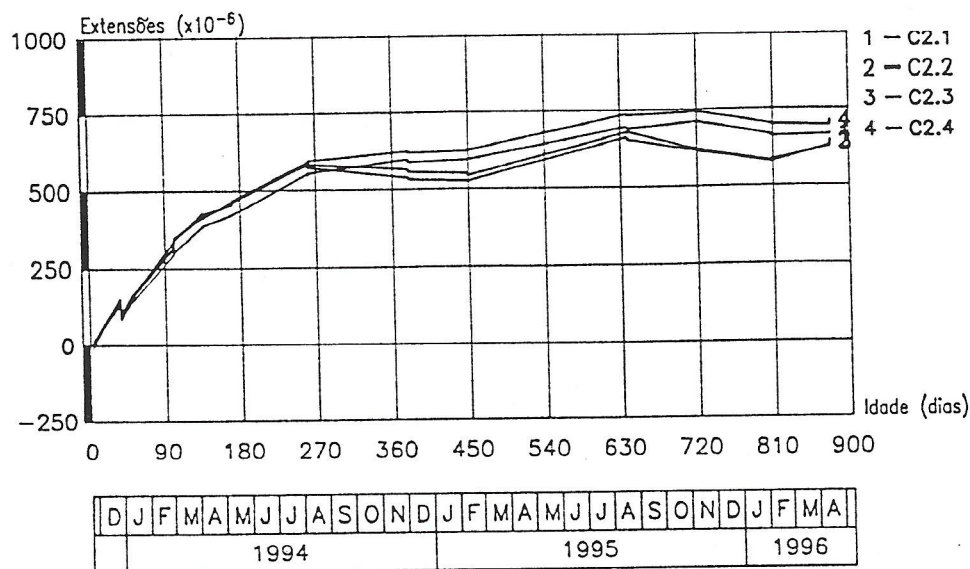


Figura 4 - Extensões medidas na laje superior da secção S₂

Foram medidas as temperaturas no interior do betão através de termómetros de resistência colocados em duas secções (S₃ e S₄), apresentando-se na figura 5 os valores registados em três aparelhos posicionados na laje superior da secção S₃.

A temperatura mais elevada medida após a cura do betão foi de 32,7°C, registada em Agosto de 1995 no termómetro T3.3 colocado a cerca de 5 cm da face superior da laje. Simultaneamente, verificava-se uma temperatura média dos dezoito termómetros instalados na secção de 28,3°C, sendo de 29,7°C a média da laje superior, de 27,2°C nas almas e de 27,4°C o valor médio medido na laje inferior. A temperatura média mais baixa foi de 7,2°C, medida na secção S₄, em Fevereiro de 1996.

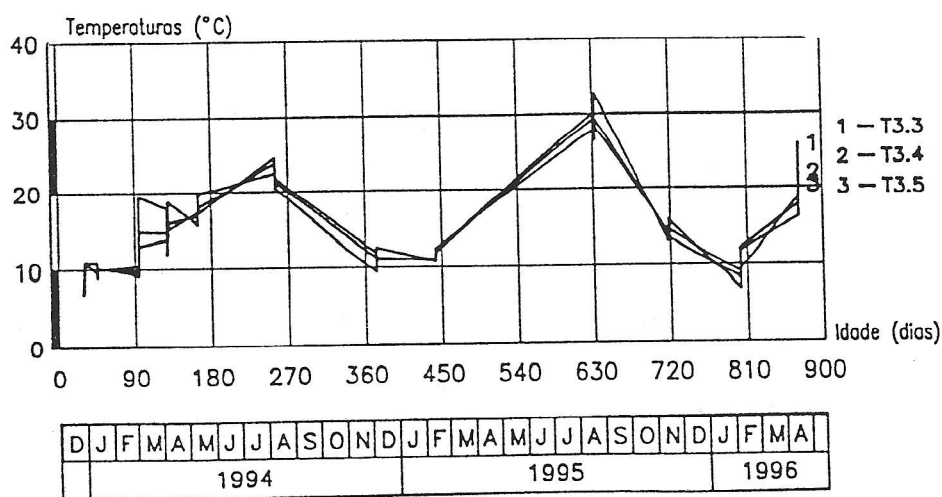


Figura 5 - Temperaturas medidas na laje superior da secção S₃

A caracterização da retracção e da fluência *in situ* foi efectuada através de prismas betonados em simultâneo com as secções instrumentadas, que permanecem na obra junto à respectiva secção, de forma a ficarem sujeitos às mesmas condições ambientais. No interior destes prismas foram introduzidos extensómetros que permitem caracterizar as deformações de

fluência e retracção do betão utilizado. Um dos prismas, designado por compensador termo-higrométrico, não é sujeito a forças exteriores, pelo que as extensões que sofre apenas se devem a variações de temperatura e à retracção. O outro prisma, denominado por compensador de fluência, é introduzido numa estrutura metálica e submetido a uma tensão uniforme e constante de compressão. Nestes provetes as extensões verificadas devem-se, não só à retracção e a variações de temperatura, mas também à fluência. A partir de provetes cilíndricos recolhidos durante as betonagens e ensaiados em laboratório é obtida a evolução do módulo de elasticidade do betão ao longo do tempo.

Os resultados obtidos nas diversas secções observadas permitem verificar que a evolução da retracção tem um andamento com valores superiores aos das curvas de retracção preconizadas pelo EC2[4]. Permitem ainda constatar que os provetes colocados no interior do caixão, sob condições ambientais menos variáveis e ao abrigo da chuva, sofrem retracções muito mais elevadas que os prismas mantidos ao ar livre sobre o tabuleiro. Finalmente, é nítida a influência das condições ambientais sobre a retracção verificando-se que a sua variação ao longo do tempo se processa com flutuações sazonais, com valores mais elevados no Verão e mais reduzidos no Inverno.

Na figura 6 apresentam-se as extensões devidas aos efeitos termo-higrométricos medidas em dois prismas colocados junto à secção S₂, um sobre o tabuleiro e o outro no interior do caixão. Com o objectivo de estabelecer um termo de comparação traçou-se igualmente a curva de retracção preconizada pelo EC2[4], considerando uma humidade relativa de 70%, temperaturas médias entre 10°C e 20°C e cimento de presa normal ou rápida.

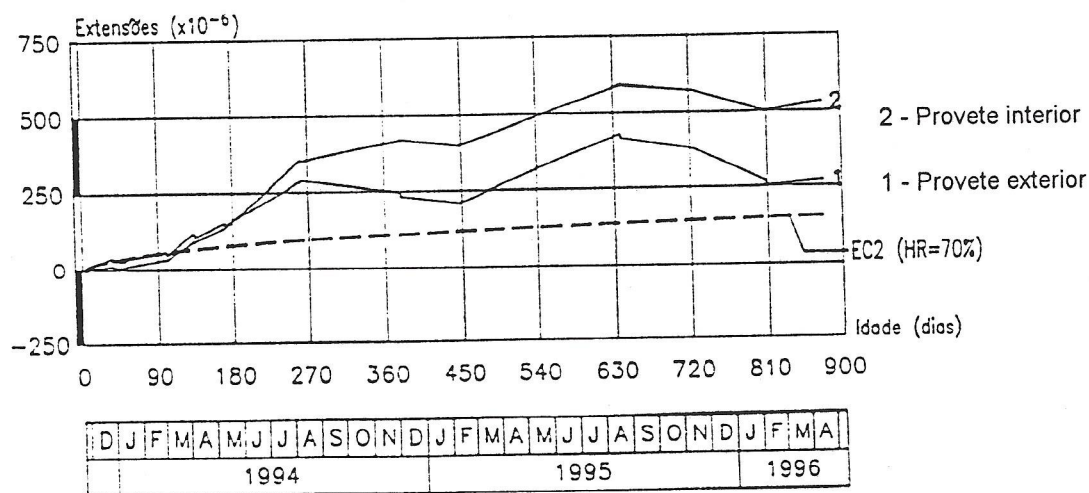


Figura 6 - Extensões medidas nos compensadores termo-higrométricos da secção S₂

Na figura 7 está representada a evolução dos coeficientes de fluência determinados a partir dos valores experimentais obtidos em cada par de prismas compensadores colocados junto à secção S₂, um sobre o tabuleiro (ϕ_1) e o outro no interior do caixão (ϕ_2). Estes coeficientes de fluência estão referidos aos módulos de elasticidade do betão com idade correspondente à data de entrada em compressão dos prismas compensadores de fluência, Ect0. Está também traçada a curva teórica preconizada pelo EC2 [4] para uma humidade relativa de 70%. A observação desta figura permite facilmente constatar que o coeficiente de fluência assume valores bastante mais elevados do que os previstos na curva teórica, à

semelhança do que aconteceu nas extensões medidas nos provetes compensadores termo-higrométricos e de fluência, registando-se um valor médio do coeficiente de fluência que, ao fim de dois anos e meio, se situa em cerca de 2,5.

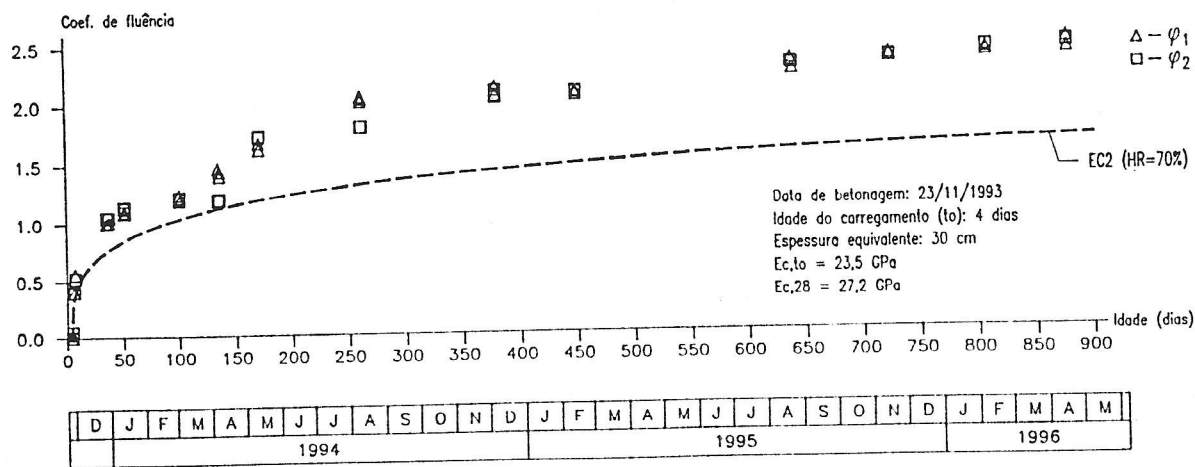


Figura 7 - Coeficientes de fluência relativos à secção S₂

A medição das rotações na base e no topo dos pilares assim como nos encontros foi efectuada através de clinómetro de bolha de ar, amovível, de elevada precisão aplicado sobre bases de medida apropriadas que permitem medições em duas direcções ortogonais.

Os valores medidos permitem afirmar que as rotações nas duas direcções nas bases dos pilares e nos encontros não apresentam valores significativos. As rotações longitudinais observadas ao nível das secções superiores dos pilares indiciam uma rotação dessas secções, para o interior do tramo central. Estas rotações são da mesma ordem de grandeza e a sua taxa de crescimento aparenta estar a diminuir. Apresentam-se na figura 8 as rotações medidas no topo do pilar P2. É de referir que a rotação acentuada e brusca que, durante a fase construtiva, se verificou no topo do pilar P2, em Novembro de 1993, se deveu ao facto de ter sido betonada a aduela 5 do lado de Vimioso, estando ainda por betonar a aduela correspondente do lado oposto. Posteriormente este desequilíbrio foi totalmente recuperado.

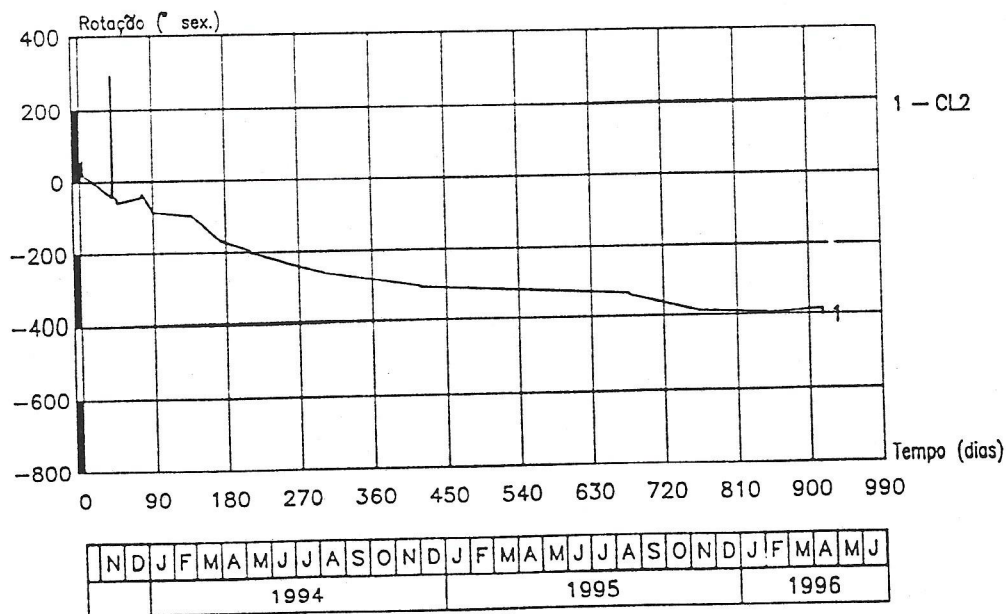


Figura 8 - Rotações longitudinais medidas no topo do pilar P2

O controlo da abertura das juntas de dilatação entre o tabuleiro e os encontros é efectuado através de um alongametro, tendo-se para esse efeito, montado 4 bases de medida, duas em cada encontro, uma a montante e outra a jusante.

A evolução do movimento de juntas é semelhante em ambos os encontros, evidenciando uma variação sazonal. Ao fim de dois anos, e entre situações sazonais equivalentes (Abril de 1994 e Abril de 1996), verifica-se um aumento da abertura, em cada junta, de cerca de 30 mm, como se pode verificar na figura 9 onde se apresenta a evolução da junta do encontro direito.

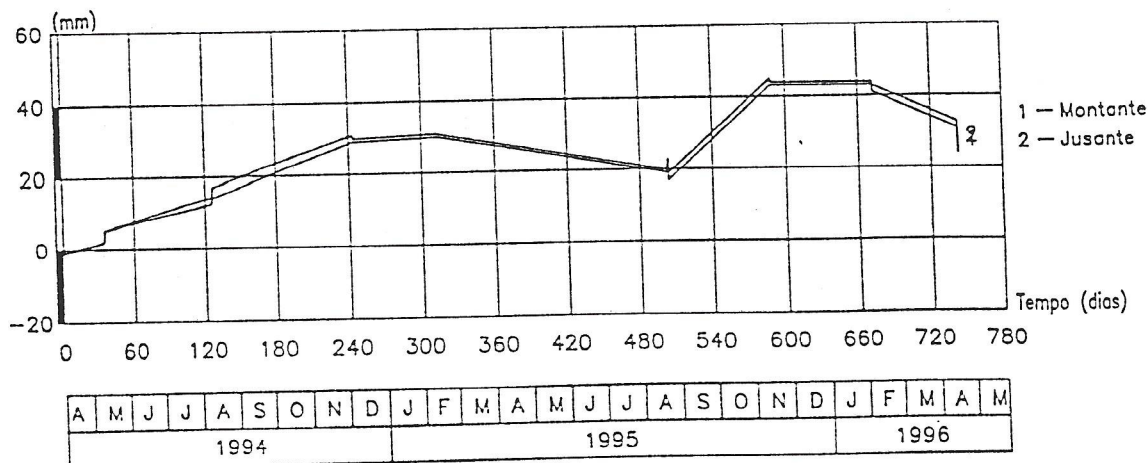


Figura 9 - Evolução da abertura da junta de dilatação do encontro direito

4 - ENSAIOS DE CARGA

4.1 - Ensaio estáticos

Os ensaios de carga estáticos consistiram na aplicação de cargas estrategicamente posicionadas, de forma a avaliar o funcionamento estrutural da obra sem comprometer o seu comportamento futuro.

Durante a realização dos ensaios estáticos foram medidos deslocamentos verticais, rotações, extensões e temperaturas. Para este efeito utilizou-se aparelhagem de observação instalada durante a construção, destinada ao acompanhamento do comportamento estrutural em serviço, nomeadamente, os extensómetros de corda vibrante, as bases de clinómetro de precisão e os termómetros, e equipamento montado especificamente para a realização dos ensaios [5]. No quadro I apresenta-se um resumo da aparelhagem de observação utilizada durante os ensaios, cuja localização em obra está representada na figura 10. Antes e após a ocorrência dos ensaios foi efectuado um nivelamento geométrico de precisão da superestrutura.

A medição das flechas da ponte foi efectuada através de dois teodolitos estacionados no interior do caixão, sobre cada um dos pilares. Cada teodolito visava três pares de alvos de pontaria colocados na secção de meio vão do tramo extremo e no quarto de vão do tramo central adjacente à sua posição e, ainda, no meio vão do tramo central. Por uma questão de

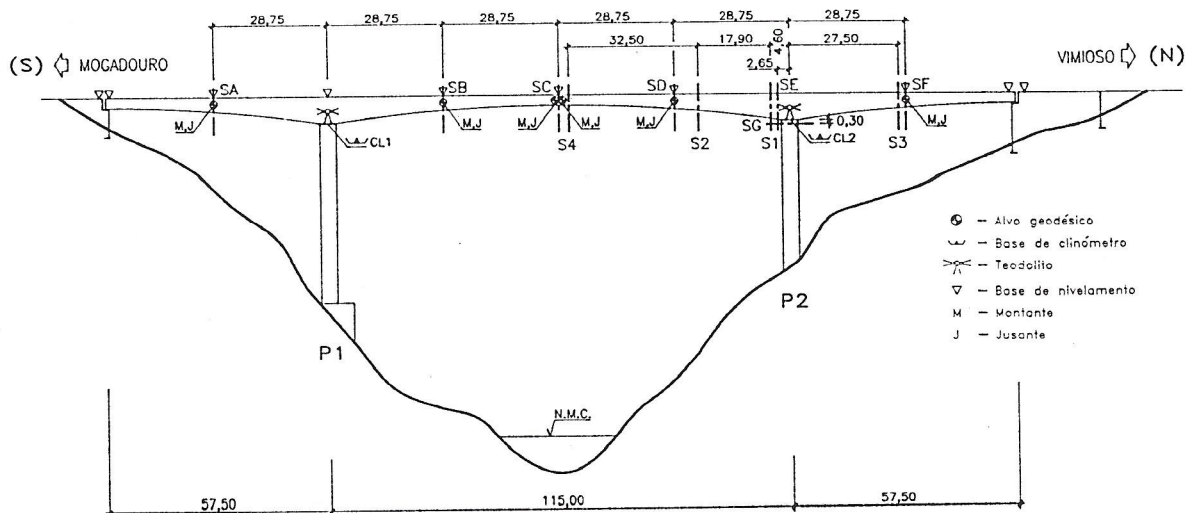


Figura 10 - Instrumentação da ponte durante a realização dos ensaios estáticos

controlo, os deslocamentos nesta secção foram observados simultaneamente pelos dois teodolitos. Em cada secção os alvos de pontaria foram montados junto às almas de montante e de jusante.

A medição de extensões foi efectuada por meio de extensómetros de corda vibrante, previamente montados no interior do betão, em quatro secções do tabuleiro (S_1, S_2, S_3, S_4) e de extensómetros de indução instalados em duas secções do tabuleiro (S_C e S_E) e numa secção do pilar P_2 (S_G).

Durante a realização dos ensaios foi efectuada a medição das temperaturas do tabuleiro da ponte, em duas secções (S_3 e S_4), com o auxílio de termómetros de resistência eléctrica instalados a diversas profundidades dos elementos de betão (laje superior, almas e laje inferior). Pretendeu-se desta forma ajuizar a importância dos efeitos estruturais induzidos pelas variações de temperatura da estrutura, durante as várias fases das provas de carga, relativamente aos efeitos induzidos exclusivamente pelas cargas de ensaio.

Nos ensaios estáticos foi aplicada uma carga designada por “carga concentrada”, constituída por três veículos dispostos segundo uma linha perpendicular ao eixo da obra, e uma carga distribuída ao longo do tabuleiro, materializada por diversos camiões formando duas filas paralelas. A carga máxima utilizada consistiu na actuação de um comboio de cargas constituído por dezoito camiões carregados, perfazendo uma carga total de cerca de 4500 kN. Esta carga provocou momentos flectores máximos de cerca de 68% dos correspondentes aos valores característicos das sobrecargas rodoviárias máximas regulamentares a considerar na verificação da segurança da estrutura em causa [6].

Os resultados obtidos pelos ensaios efectuados com a carga concentrada permitiram a obtenção de linhas de influência. Nas figuras 11 e 12 apresentam-se as linhas de influência de

QUADRO I
Aparelhagem de observação utilizada

Designação	Quantidade
Teodolitos	2
Alvos geodésicos	12
Clinómetros	2
Extensómetros de corda vibrante	30
Extensómetros indutivos	6
Termómetros	34

cálculo relativas ao deslocamento vertical na secção de meio vão do tramo central e à rotação do topo do pilar P1, bem como os correspondentes valores experimentais. De referir que nessas figuras as abcissas correspondem à posição do eixo traseiro dos três camiões utilizados nestes ensaios.

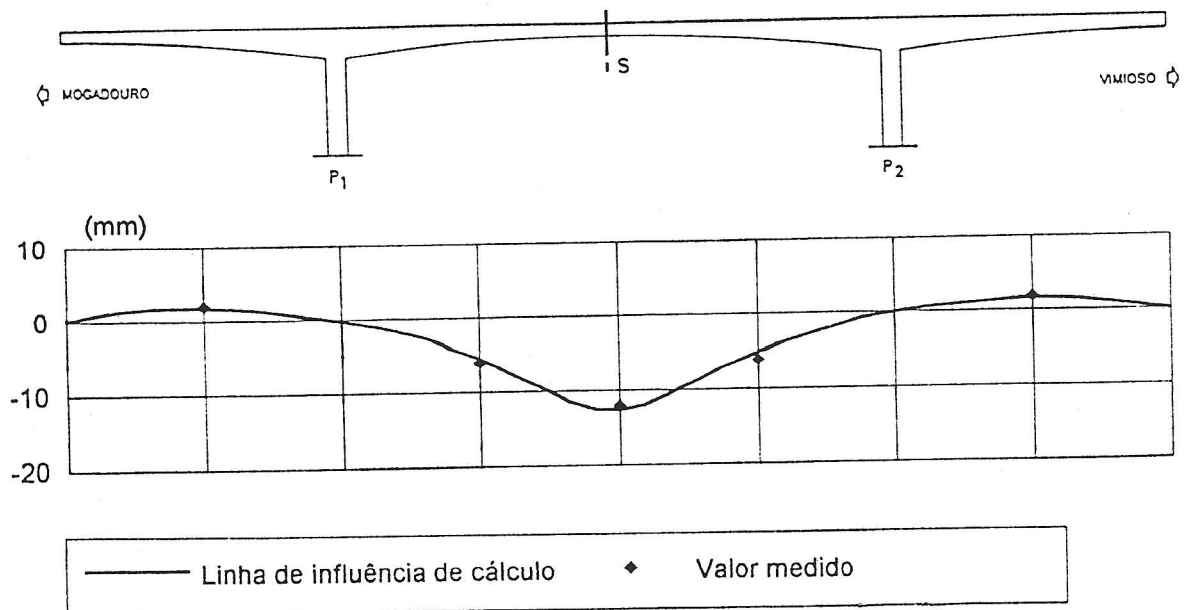


Figura 11 - Linha de influência do deslocamento vertical na secção de meio vão central

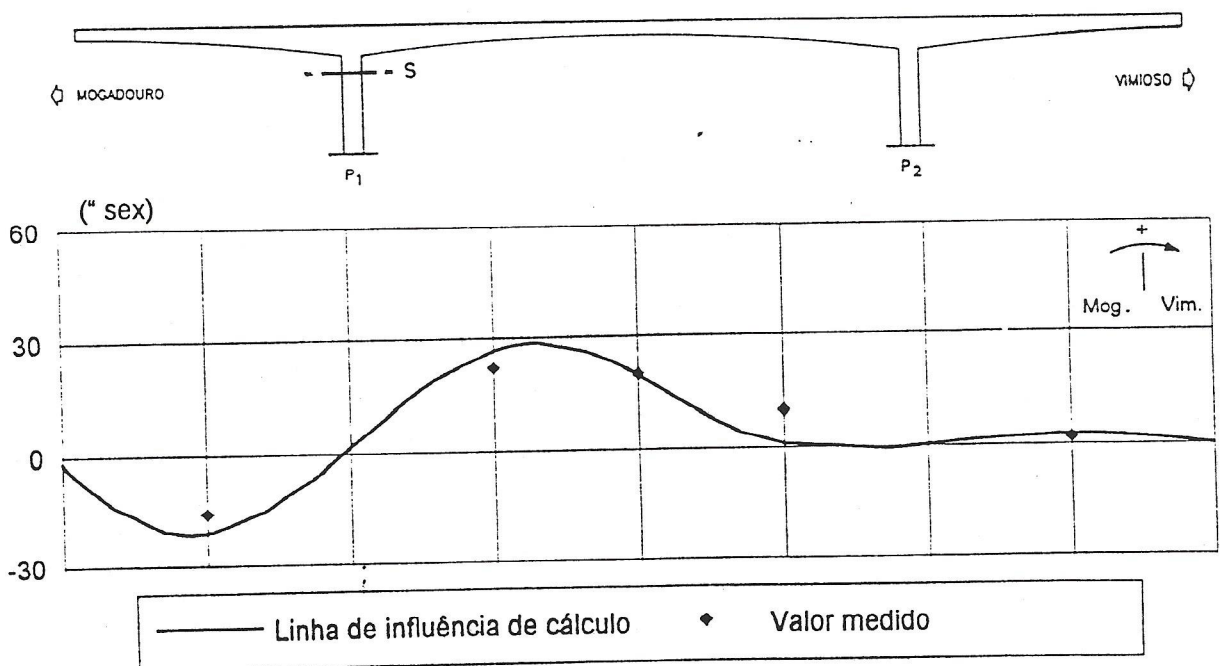


Figura 12 - Linha de influência da rotação no topo do pilar P1

Com o comboio de carga constituído por 4, 8 ou 9 pares de veículos realizaram-se sete posições de carga. Nas figuras 13 e 14 apresentam-se as flechas e as extensões nas secções S3 e S4 medidas quando a carga máxima, constituída por 18 veículos, se encontrava no vão central. Em ambas as figuras estão também representados os correspondentes valores de cálculo.

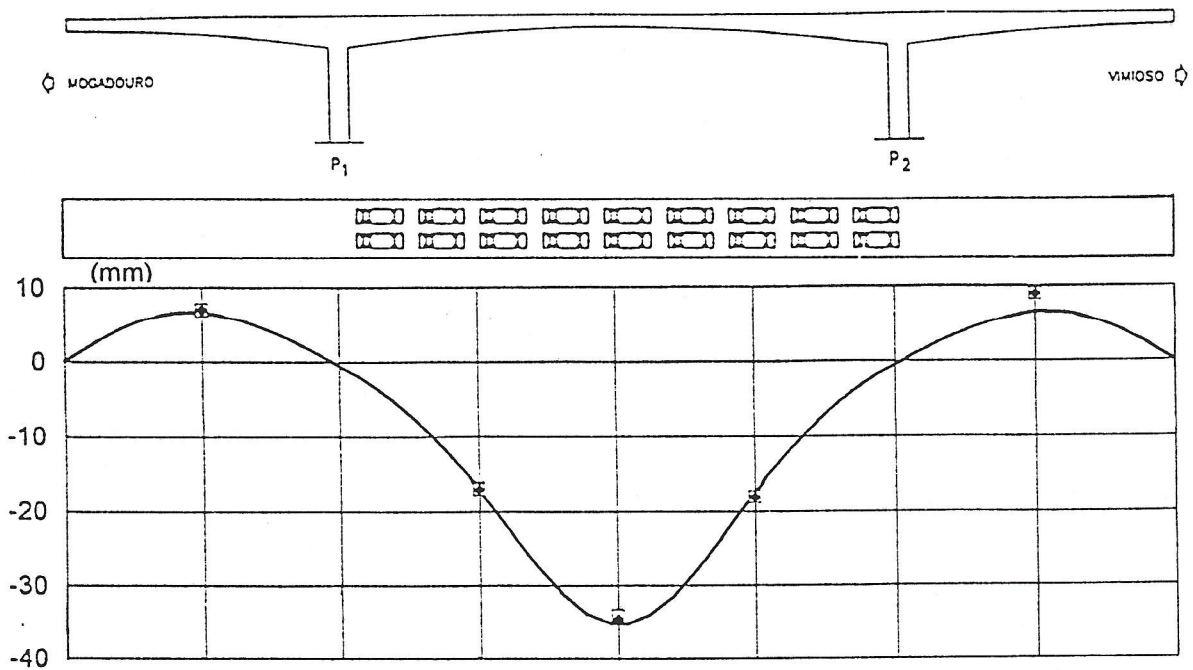


Figura 13 - Flechas medidas e calculadas com o comboio de cargas no tramo central

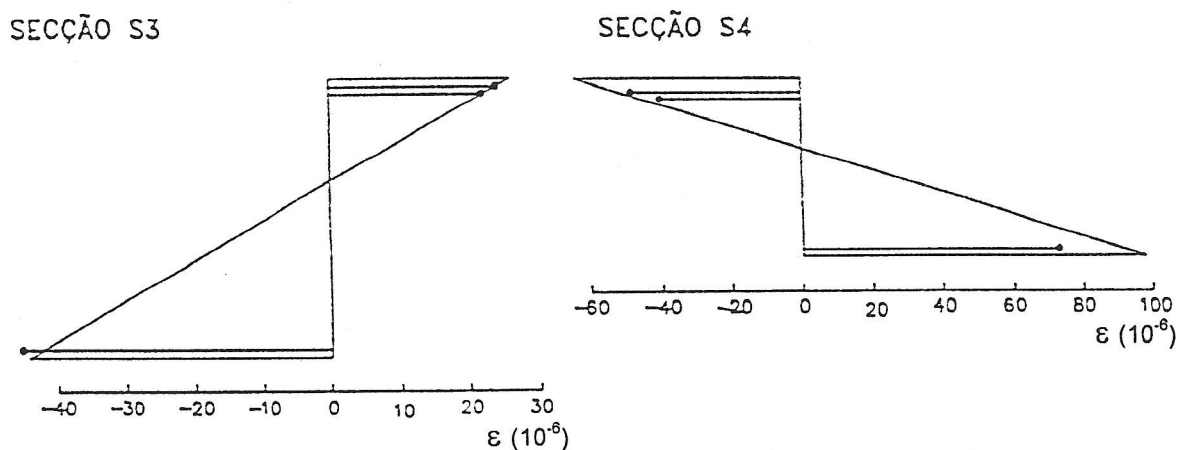


Figura 14 - Extensões medidas e calculadas com o comboio de cargas no tramo central

4.2 - Ensaio dinâmicos

Os ensaios dinâmicos da ponte de Angueira consistiram na actuação de um veículo ou de dois veículos a par, circulando a velocidade uniforme e em ensaios de ressalto. Durante a realização destes ensaios foram medidas as extensões em regime dinâmico através de quatro extensómetros de indução: um colocado no topo do pilar P2, outro montado na laje superior junto ao pilar P2 e os restantes colocados na laje inferior da secção de meio vão do tramo central. Com a realização dos ensaios dinâmicos, além de se testar o comportamento global da estrutura quando actuada por solicitações dinâmicas, pretendem-se avaliar características de vibração da ponte, designadamente a frequência própria de vibração vertical do tabuleiro e o coeficiente de amortecimento.

5 - CONCLUSÕES

Numa apreciação global dos resultados observados durante a construção e nos dois primeiros anos em serviço pode concluir-se que a estrutura teve um comportamento satisfatório, apresentando as diversas grandezas medidas uma evolução regular ao longo de todo o período em causa.

Os resultados obtidos experimentalmente nos ensaios de carga permitem concluir que a estrutura teve um comportamento elástico para o nível de cargas aplicado, evidenciando uma concordância satisfatória com os valores previstos através da idealização estrutural elaborada, apresentando uma boa recuperação das deformações após a retirada das cargas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem os apoios recebidos para a realização deste trabalho, nomeadamente por parte da Junta Autónoma de Estradas e do Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

REFERÊNCIAS

- [1] Gaspar, M. - *Projecto de execução da ponte sobre o rio Angueira - EN 219*, 1989.
- [2] Castanheta, Mário - *Plano geral de observação da ponte de Angueira na EN-219*. Nota Técnica 14/92 - NOE, LNEC, 1992.
- [3] Santos, Luís Oliveira - *Observação da ponte sobre o rio Angueira na EN 219*. Relatório 116/96, LNEC, 1996.
- [4] *EUROCÓDIGO 2 - Projecto de estruturas de betão*. Parte I: Regras gerais e regras para edifícios (versão portuguesa). CT115 (LNEC), 1993.
- [5] Santos, Luís Oliveira - *Ensaio de carga da ponte sobre o rio Angueira*. Relatório 147/94, LNEC, 1994.
- [6] *Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes*. Decreto-lei 235/83, INCM, Lisboa, 1983.
- [7] Vaz, Carlos T. - *Análise Dinâmica de Estruturas Espaciais com 6 G.L. por Nó. I - Determinação dos modos de vibração*. Relatório 288/84 - NDA, LNEC, 1984.