

PROVAS DE CARGA DAS PONTES ATIRANTADAS DO ALGARVE

Fernandes, João Almeida^{*}; Branco, Fernando^{**};
Santos, Luís Oliveira^{***}; Santos, Teresa Oliveira^{***}

^{*}Investigador Coordenador, Departamento de Estruturas, Laboratório Nacional de Engenharia Civil

^{**}Professor Associado, Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico

^{***}Assistente de Investigação, Departamento de Estruturas, Laboratório Nacional de Engenharia Civil



RESUMO

As pontes atirantadas do Guadiana e do Arade têm sido objecto de uma observação do comportamento estrutural desde o início da sua construção, tendo sido sujeitas a provas de carga antes da entrada em serviço. A ponte internacional do Guadiana tem um vão central de 324 m e a ponte do Arade tem um tabuleiro em suspensão total com um vão central de 256 m. Ambas têm torres em Y invertido e tirantes dispostos em semi-harpa. Neste artigo apresentam-se os planos de observação adoptados e os principais resultados obtidos durante os ensaios de carga estáticos e dinâmicos.

1. INTRODUÇÃO

As pontes atirantadas do Guadiana e do Arade, têm sido objecto de uma observação do comportamento estrutural desde o início da sua construção. Apresentam-se neste trabalho os planos de observação adoptados e alguns dos principais resultados obtidos nos ensaios de carga, realizados no final da construção.

Dado o elevado volume de informação obtida nas medições e cálculos realizados, apenas se apresenta parte dessa informação. Assim, para exemplificar o tipo de trabalhos desenvolvidos, semelhantes em ambas as pontes, optou-se por apresentar resultados escolhidos em geral de forma alternada entre as duas obras.

A ponte internacional do Guadiana (figura 1)

tem um tabuleiro em caixão de betão armado pré-esforçado, com um vão central de 324 m e um comprimento total de 666 m (C. Martins, 1993). A ponte sobre o rio Arade (figura 2) é uma ponte atirantada de suspensão total, com um vão central de 256 m, cujo tabuleiro, constituído por uma laje com duas nervuras laterais tubulares, se desenvolve com uma secção praticamente constante e em continuidade com os viadutos de acesso, numa extensão total de 842 m (A. Rito, 1993). Em ambas as pontes as torres têm a forma de Y invertido e a disposição dos tirantes é em semi-harpa.



Fig. 1 - Vista geral da ponte internacional sobre o rio Guadiana



Fig. 2 - Vista geral da ponte sobre o rio Arade em Portimão

2. INSTRUMENTAÇÃO EFECTUADA DURANTE A CONSTRUÇÃO

A observação a longo prazo das pontes atirantadas do Algarve foi efectuada através da instrumentação de diversas secções durante a construção, tendo sido medidas extensões, temperaturas, rotações e deslocamentos, para além do estudo *in situ* da fluência e do comportamento termo-higrométrico do betão

(T. Santos, 1993). A localização dessas secções está indicada nas figuras 3 e 4, apresentando-se a título exemplificativo nas figuras 5 e 6 a instrumentação de uma secção do tabuleiro da ponte do Guadiana e de uma secção do tabuleiro da ponte do Arade, respectivamente (Fernandes *et al*, 1992a, 1992b). Faz-se de seguida uma breve descrição dos equipamentos utilizados.

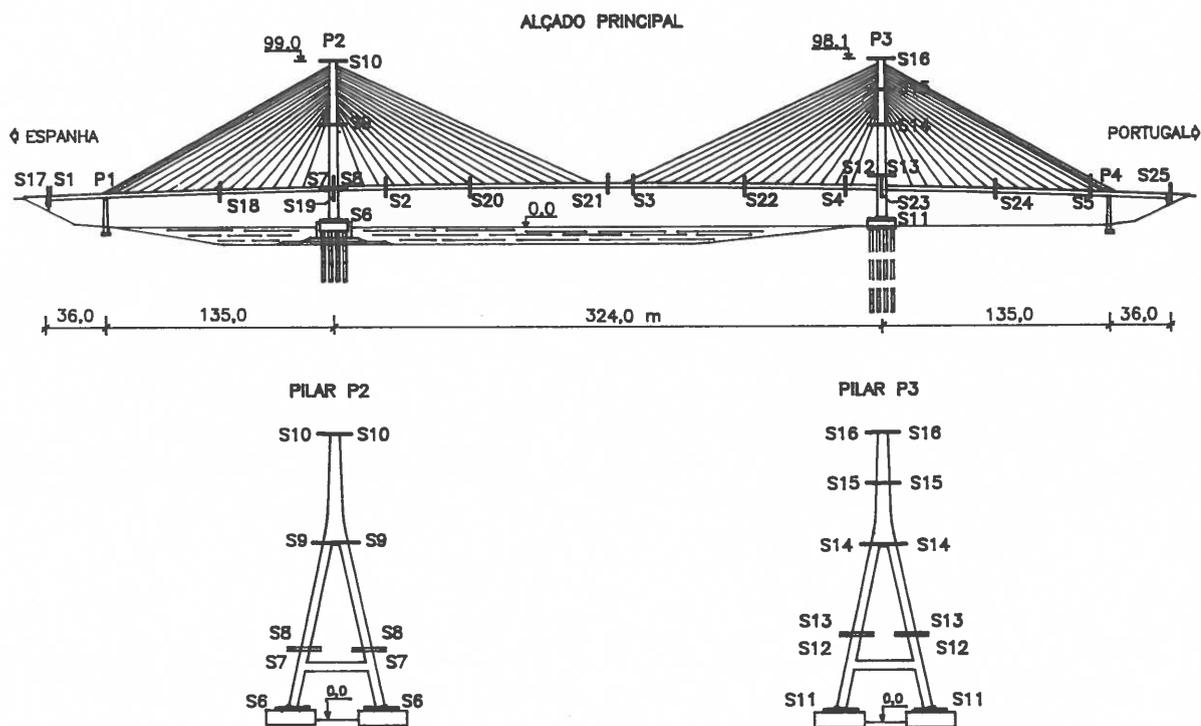


Fig. 3 - Plano geral da instrumentação da ponte internacional do Guadiana

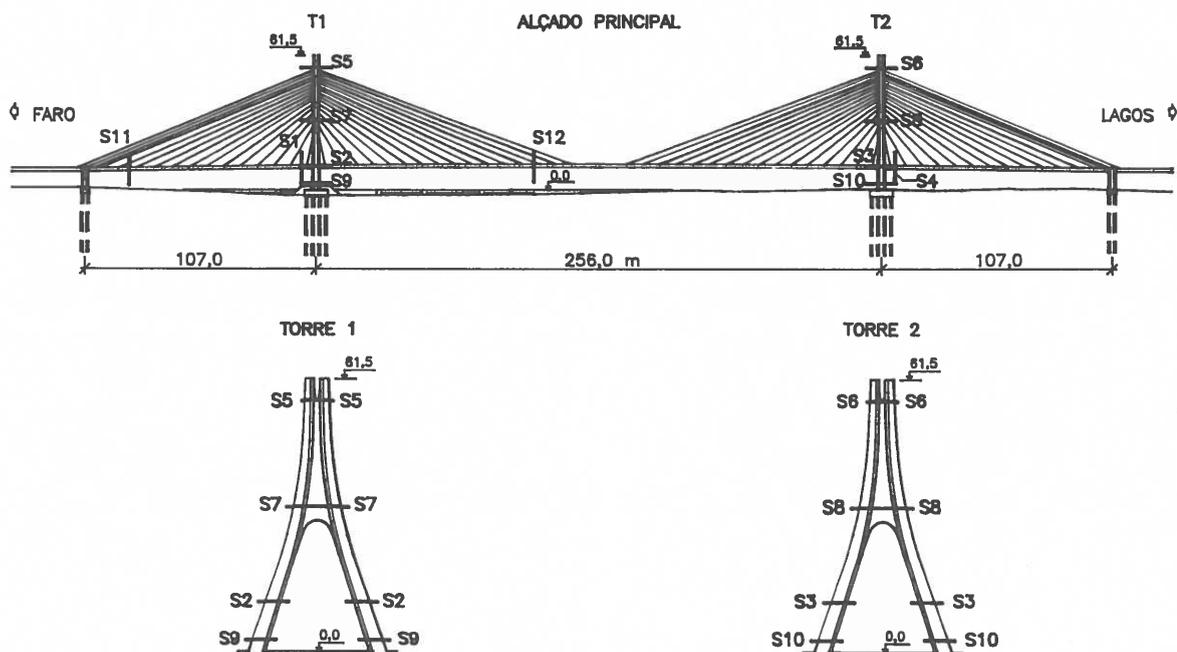


Fig. 4 - Plano geral da instrumentação da ponte sobre o rio Arade, em Portimão

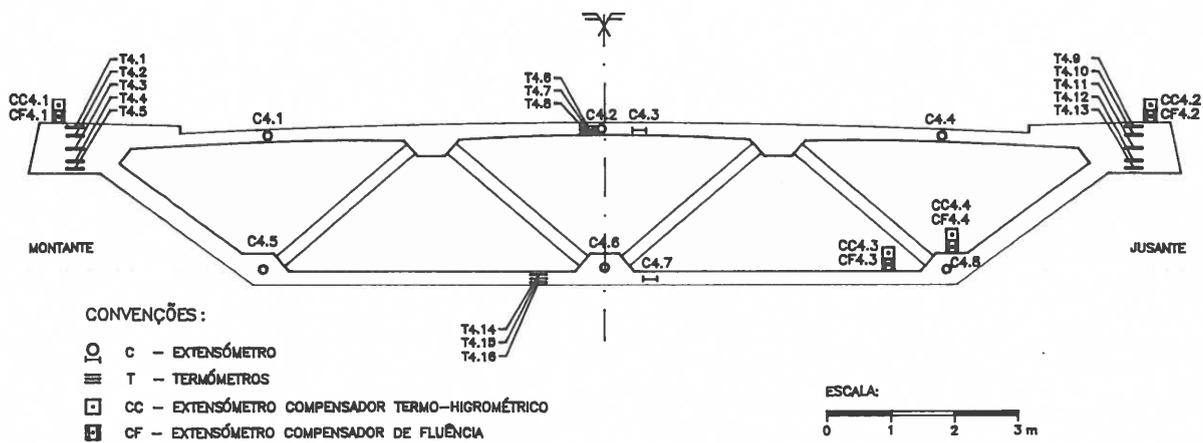


Fig. 5 - Secção instrumentada do tabuleiro da ponte do Guadiana (S4)

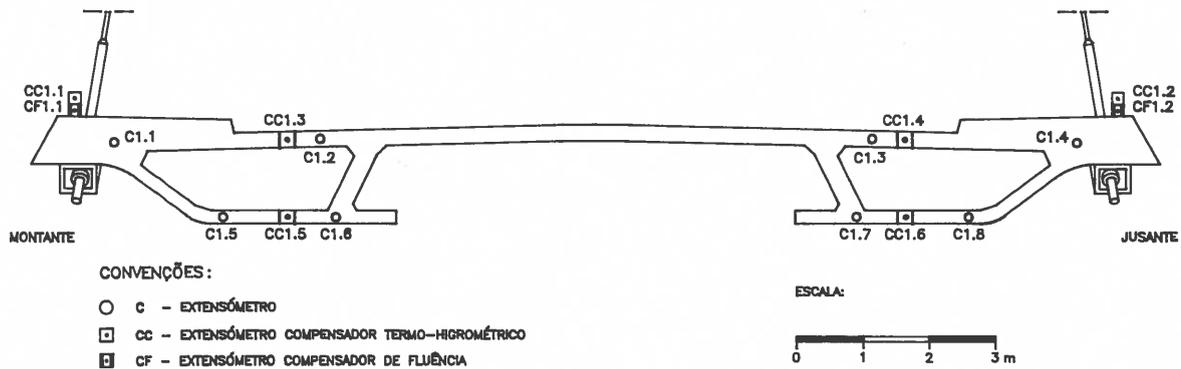


Fig. 6 - Secção instrumentada do tabuleiro da ponte do Arade (S1)

Para a medição das extensões no interior do betão foram instalados extensómetros acústicos de tipo corda vibrante. Para a determinação *in situ* das curvas de retracção e fluência utilizaram-se pares de prismas betonados em simultâneo com a estrutura, e com o mesmo betão, que permanecem na obra, junto à secção instrumentada, de forma a ficarem sujeitos às mesmas condições ambientais. No interior destes prismas foram montados extensómetros que permitiram caracterizar as deformações devidas à fluência e retracção do betão. Os prismas designados por compensadores termo-higrométricos não foram sujeitos a forças exteriores, pelo que as extensões que sofreram apenas se devem a variações de temperatura e à retracção. Os prismas denominados por compensadores de fluência foram introduzidos em estruturas metálicas e submetidos a uma tensão de compressão constante. Nestes provetes as extensões verificadas devem-se, não só à retracção e a variações de temperatura, mas também à fluência. Através dos resultados medidos em ambos os prismas, determinaram-

se as curvas de fluência. A partir de provetes cilíndricos recolhidos durante as betonagens e ensaiados em laboratório foi obtida a evolução do módulo de elasticidade do betão ao longo do tempo. Dada a elevada espessura das paredes das torres destas pontes foram deixados, no interior de negativos criados durante a betonagem, prismas fabricados com o mesmo betão e instrumentados com extensómetros para avaliação da retracção diferencial destas paredes.

A diferente sensibilidade às variações térmicas dos diversos elementos que constituem o sistema estrutural principal de uma ponte atirantada - tirantes, tabuleiro e torres - torna particularmente importante a medição destas variações. Uma vez que as secções das torres e tabuleiros têm dimensões consideráveis e sendo as variações diferenciais de temperatura importantes, é necessário instalar os sensores de temperatura (termómetros de resistência eléctrica ou pares termo-eléctricos) em várias zonas do interior da secção dispostos segundo a espessura. A medição da temperatura nos tirantes, constituídos por cordões

auto-protegidos, é uma tarefa de difícil execução pelo facto de ser necessário preservar a integridade do revestimento que os protege da corrosão. Para aferir experimentalmente a sensibilidade térmica destes tirantes, de aplicação ainda recente, foi feito no LNEC um estudo em que se instrumentaram com termopares diversos cordões e interstícios de dois feixes de cabos, ambos com revestimento de polietileno de alta densidade, um com a pigmentação branca utilizada na ponte do Arade e outro com o revestimento preto usado na ponte internacional do Guadiana (C. Santos *et al*, 1993). O dispositivo de ensaio foi colocado junto a uma estação meteorológica por forma a controlar as variações de temperatura ambientais, a intensidade da radiação solar e da velocidade e orientação do vento.

Desde o início da construção foram medidas rotações em diversas secções das estruturas, tendo-se utilizado para esse efeito clinómetros de bolha de ar com 2" de sensibilidade, colocados sobre bases fixas ao betão, que permitem a medição de rotações em duas direcções ortogonais.

No final da construção, foram colocados tacos de nivelamento ao longo dos tabuleiros para medição, através de técnicas geodésicas, dos deslocamentos verticais. A medição de deslocamentos horizontais das torres foi efectuada por distanciómetros acoplados a teodolitos, sobre alvos e reflectores instalados na base e no topo das torres. Os equipamentos de medida foram sujeitos a uma centralização forçada sob pilares assentes junto aos encontros.

O controlo periódico da largura das juntas de dilatação, entre o tabuleiro e os encontros, é feito com um dispositivo experimental especialmente concebido para o efeito (telescómetro). Para além de indicar o movimento anual destas juntas devido à variação uniforme de temperatura, permitem também avaliar o encurtamento médio do tabuleiro devido à fluência e à retracção do betão.

3. ENSAIOS DE CARGA

3.1. Considerações gerais

Após a sua conclusão e antes da entrada em serviço as duas pontes foram submetidas a

provas de carga estáticas e dinâmicas com o objectivo de obter uma comprovação dos modelos teóricos em que se basearam os respectivos projectos.

A aparelhagem instalada durante a construção foi complementada por outros equipamentos para medição em simultâneo, durante os ensaios, de temperaturas, forças, deslocamentos, rotações, extensões, velocidades e acelerações em pontos notáveis das torres, do tabuleiro e dos tirantes. A aquisição, registo e tratamento da vultuosa informação obtida durante os ensaios foi efectuada por um complexo sistema informático, instalado em local apropriado e com condicionamento de temperatura e humidade ambientes.

3.2. Ensaio estáticos

As provas de carga iniciaram-se pelos ensaios estáticos, os quais consistiram na aplicação à estrutura de cargas concentradas e distribuídas, com valores consideravelmente elevados quando comparados com as sobrecargas máximas regulamentares. Estas cargas foram estrategicamente posicionadas por forma a avaliar os efeitos estruturais induzidos. A materialização das cargas foi conseguida com camiões carregados de areia, cujo valor total atingiu cerca de 5700 kN, no caso da ponte do Arade (L. Santos *et al*, 1995) e cerca de 6500 kN, no caso da ponte do Guadiana (Rodrigues *et al*, 1993).

As figuras 7 a 9, que se referem à ponte do Arade, apresentam, sucessivamente, as linhas de influência dos deslocamentos verticais das secções de meio vão dos tramos central e lateral, as linhas de influência dos deslocamentos horizontais no topo das duas torres e, por último, as linhas de influência das rotações no topo das duas torres. Todas estas linhas de influência foram obtidas pelo posicionamento sucessivo de três camiões dispostos segundo uma linha transversal ao tabuleiro.

Na figura 10 apresenta-se a deformada de cálculo da ponte do Guadiana assim como os valores medidos durante o ensaio quando o comboio de cargas se encontrava sobre o vão central.

A anteceder os ensaios dinâmicos efectuaram-se diversas passagens lentas de dois veículos dispostos a par. Desta forma obtiveram-se

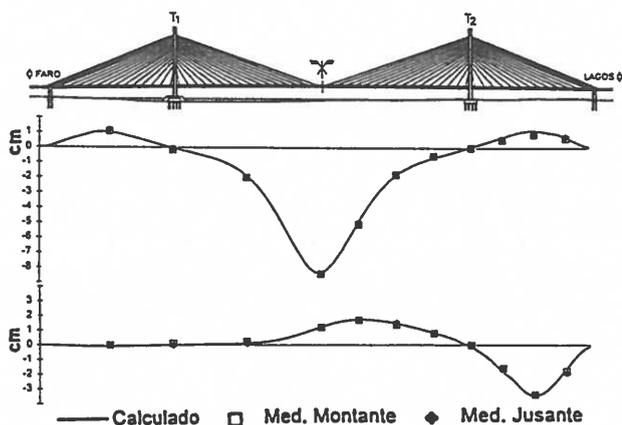


Fig. 7 - Linha de influência do deslocamento vertical a meio dos vãos central e lateral (P. Arade)

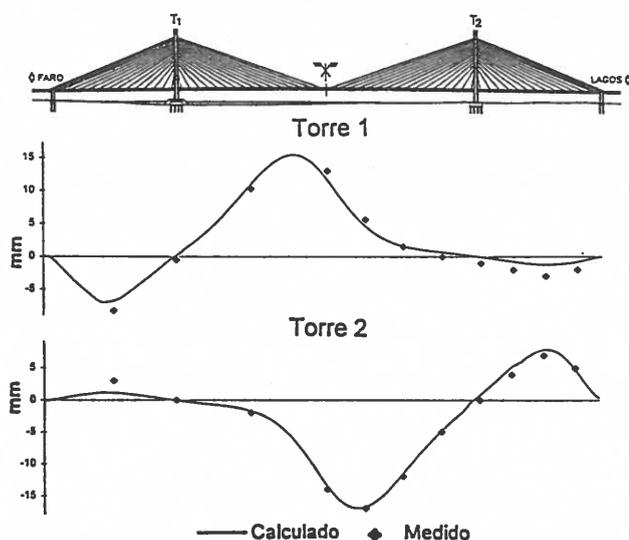


Fig. 8 - Linha de influência do deslocamento horizontal no topo das torres (P. Arade)

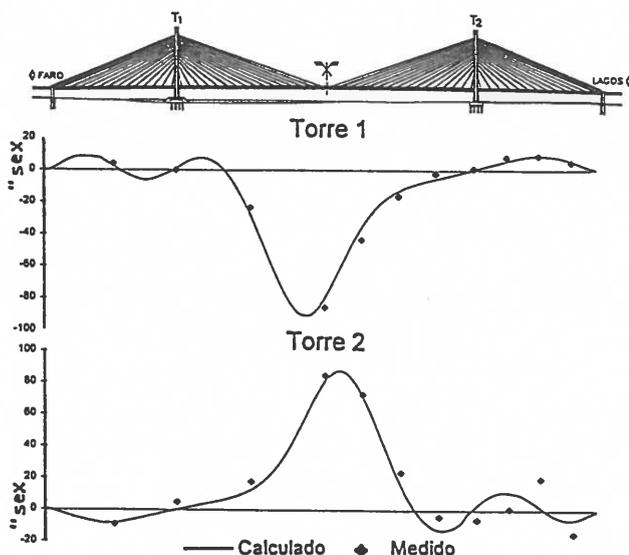


Fig. 9 - Linha de influência da rotação no topo das torres (P. Arade)

também diversas linhas de influência, das quais se apresentam, na figura 11, as referentes ao esforço normal num único cordão de três tirantes, e, na figura 12, as linhas de influência das extensões observadas em duas secções da torre 2 e numa secção do tabuleiro da ponte do Arade.

Na figura 13 é feita a representação gráfica das extensões medidas e calculadas em duas secções do tabuleiro, induzidas por determinadas posições do comboio de cargas.

Como se pode verificar da análise destas figuras, os valores experimentais observados apresentaram uma boa concordância com os resultados obtidos através dos modelos de cálculo desenvolvidos.

3.3. Ensaios dinâmicos

O comportamento sísmico de ambas as pontes foi analisado, durante a fase de projecto, recorrendo a modelos utilizando elementos de barra tridimensional (6 g.d.l. por nó) (Branco *et al*, 1987; Vaz *et al*, 1988). Para aferir os valores numéricos obtidos, realizaram-se, durante os ensaios de carga, ensaios dinâmicos de modo a obter experimentalmente as frequências e modos de vibração das pontes (Branco *et al*, 1993; Corrêa *et al*, 1993). Fizeram-se medições considerando como excitação a acção do vento, a passagem de camiões ou a suspensão de pesos calibrados.

Na ponte do Guadiana os melhores resultados foram obtidos largando um peso suspenso do meio vão, o que permitiu excitar os modos verticais do tabuleiro (figura 14). Os espectros de velocidades correspondentes conduziram a valores das frequências experimentais próximos dos obtidos numericamente, nomeadamente para as frequências mais baixas. A identificação experimental das frequências mais elevadas mostrou-se no entanto difícil, em ambas as pontes, devido à interferência das frequências de vibração dos cabos com as do tabuleiro. A partir do afastamento entre os pontos de meia potência dos vários picos do espectro obtido, estimaram-se para a ponte do Guadiana os amortecimentos modais em 1,23%, 1,17% e 0,62% para os três modos verticais mais baixos. Note-se que o valor mais baixo é provavelmente uma consequência do acoplamento com a frequência própria de um

ESPAÑA

PORTUGAL

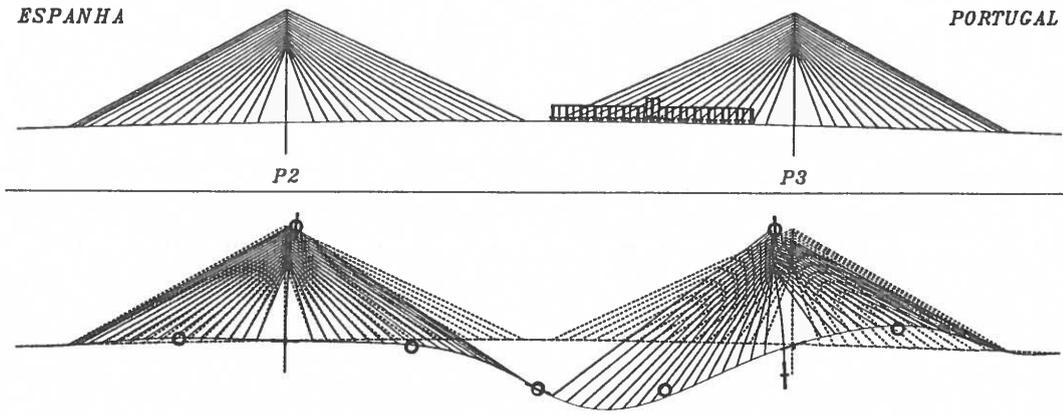
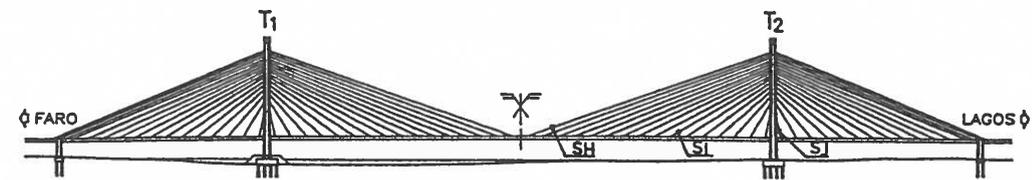
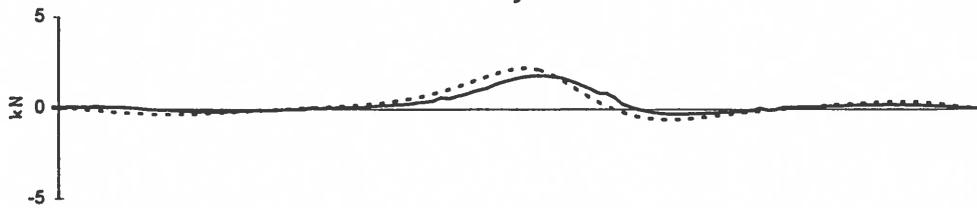


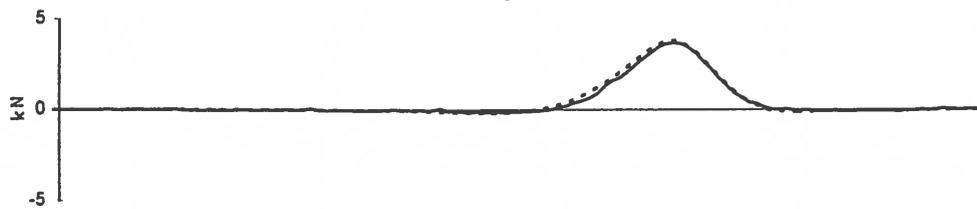
Fig. 10 - Deformada da ponte do Guadiana para um carregamento assimétrico do vão central (valores medidos e calculados)



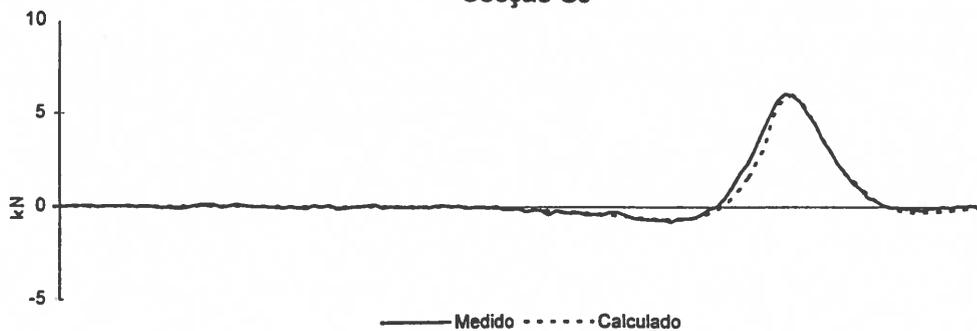
Secção SH



Secção SI



Secção SJ



— Medido - - - - - Calculado

Fig. 11 - Linha de influência do esforço normal em três tirantes da Ponte do Arade (num único cordão)

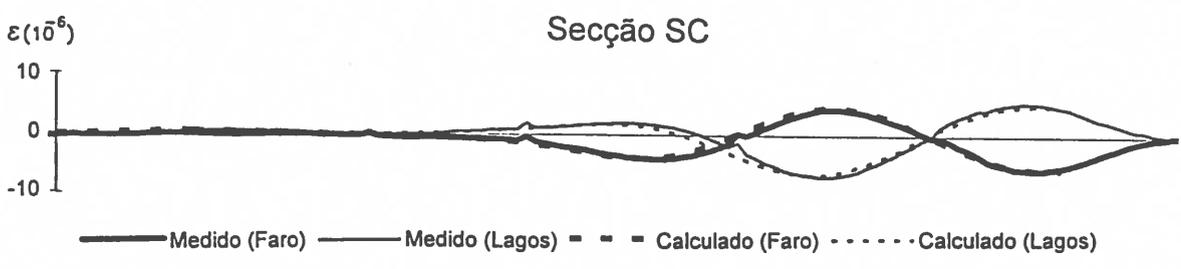
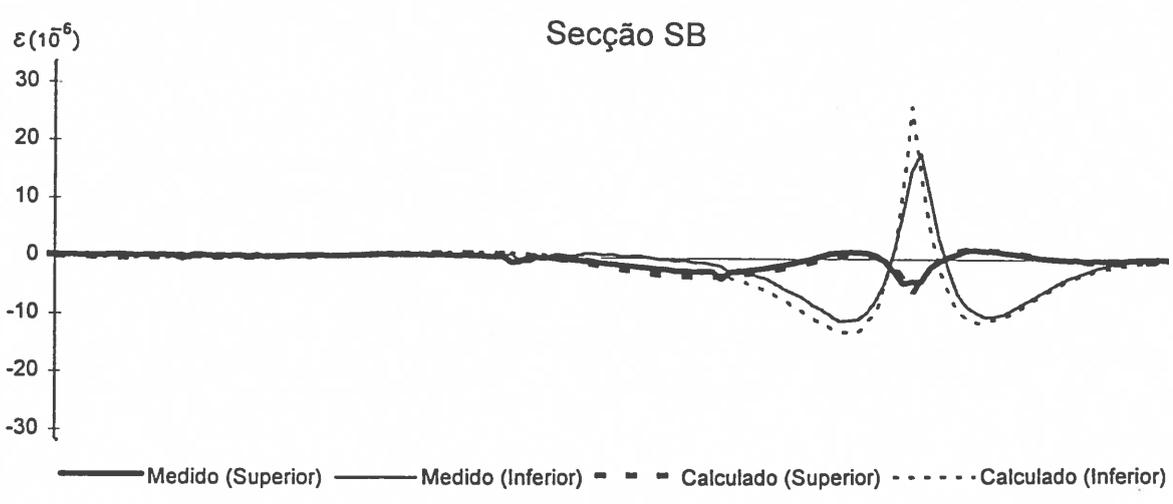
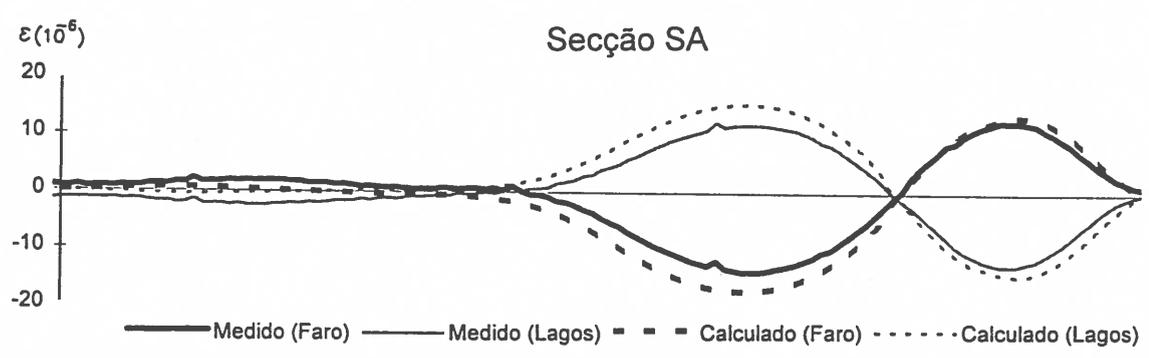
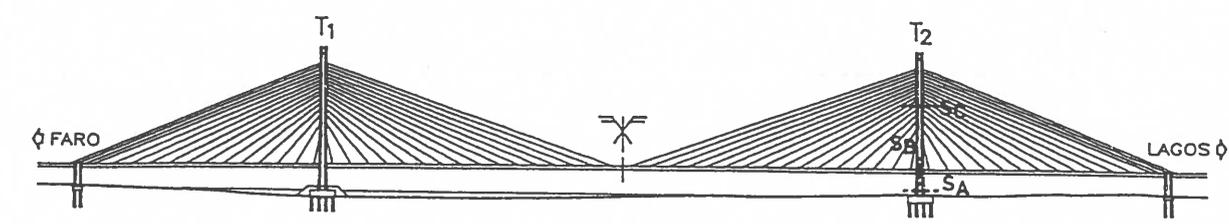


Fig. 12 - Linha de influência das extensões medidas nas secções S_A, S_B e S_C (Ponte do Arade)

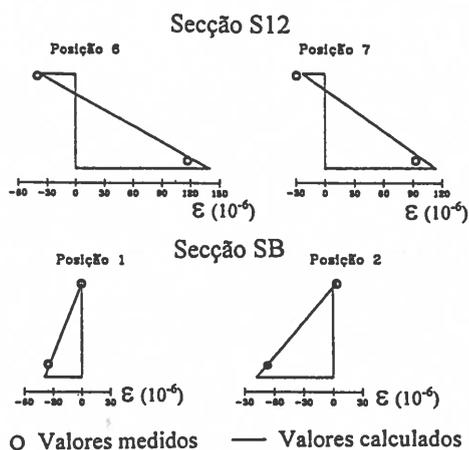


Fig. 13 - Extensões medidas e calculadas durante o ensaio estático (Ponte do Arade)

dos cabos, reflectindo assim o amortecimento do cabo e não o do modo de vibração. O coeficiente de amplificação dinâmica (c) foi também estimado recorrendo à medição dos deslocamentos verticais a meio vão correspondentes à passagem de camiões com as velocidades de 15 e 30 km/h. Na ponte do Guadiana obtiveram-se valores de $c = 1,067$ e $c = 1,031$ para a passagem de um camião a uma velocidade de 30km/h com ressalto e sem ressalto, respectivamente.

Os ensaios da ponte do Arade mostraram também uma boa correlação entre os resultados experimentais e os numéricos para os vários modos de vibração (figura 15). O amortecimento modal, para as frequências verticais indicadas na figura, corresponde aos

valores de 2,44%, 1,35% e 1,03%.

As vibrações nos cabos, resultantes da acção do vento foram objecto de uma observação experimental específica. Foram obtidos registos das acelerações em vários cabos, com base nos quais se obtiveram as frequências experimentais, com valores concordantes com os analíticos. Foi ainda analisada a correlação entre as vibrações no tabuleiro e nos cabos, resultantes da acção do vento.

4. CONCLUSÕES

Os resultados experimentais obtidos nas pontes atirantadas do Guadiana e do Arade apresentaram uma boa correlação com os valores calculados a partir dos modelos analíticos desenvolvidos. O comportamento estrutural observado foi de uma forma geral correctamente idealizado pelo modelos numéricos adoptados na fase de projecto. Os ensaios de carga permitiram a identificação de certos fenómenos particulares, como por exemplo, a interacção entre a vibração dos cabos e do tabuleiro.

A análise e interpretação de resultados obtidos directamente dos protótipos permite um melhor conhecimento do seu comportamento estrutural, permitindo também contribuir para o aperfeiçoamento do projecto e construção deste tipo de pontes.

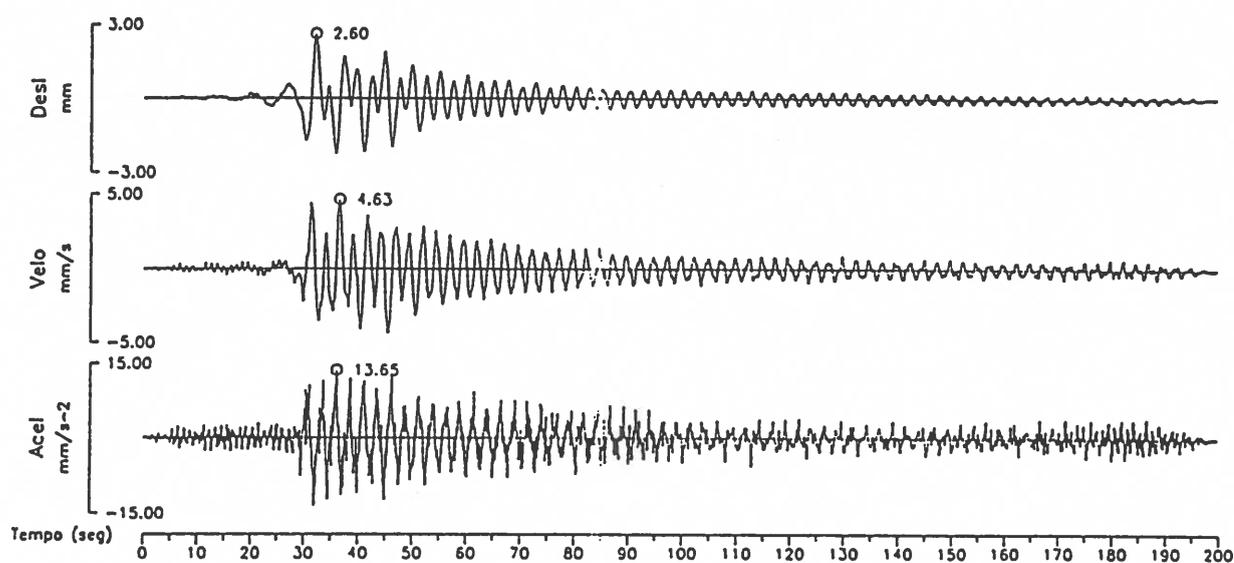


Fig. 14 - Registo de vibrações no tabuleiro a meio vão da Ponte do Guadiana (queda do pêndulo)

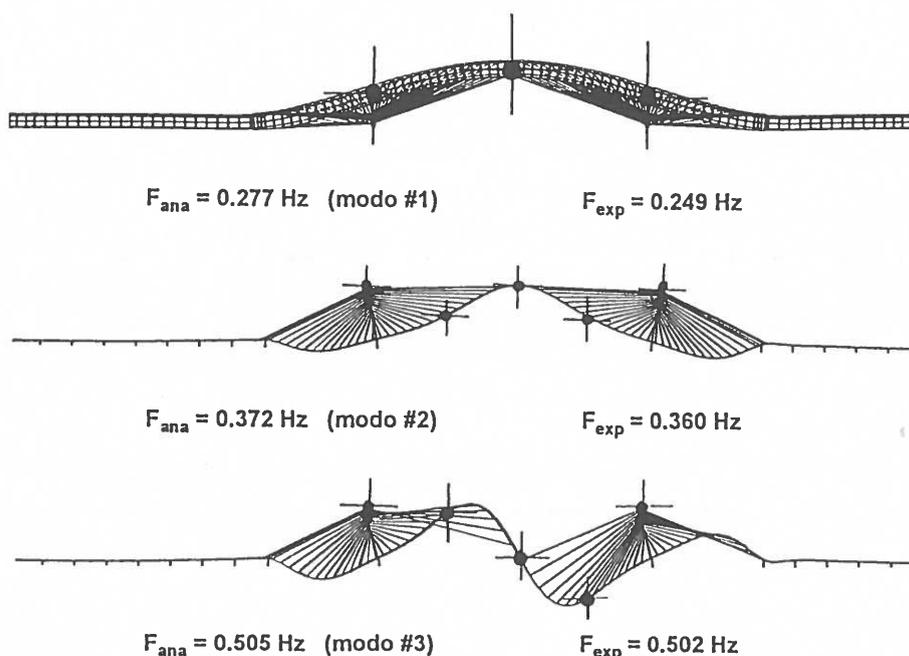


Fig. 15 - Frequências e configurações dos 3 primeiros modos de vibração da Ponte do Arade (medidos e calculados)

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem os apoios recebidos para a realização deste trabalho, nomeadamente por parte das seguintes entidades: Junta Autónoma de Estradas, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Teixeira Duarte SA, J. L. Câncio Martins, Conduril SA., Armando Rito e Freyssinet International.

REFERÊNCIAS

- Branco, F. (1987) - Special studies for the Int. Cable-Stayed Guadiana Bridge, *Cable-Stayed Bridges, Experience and Practice*, Ed. Kanok-Nukulchai, Bangkok.
- Branco, F.; Azevedo, J.; Corrêa, M.Ritto; Costa, A.C. (1993) - "Dynamic Analysis of the International Guadiana Bridge", *Structural Eng. Int. Journal*, 4/93, IABSE.
- Corrêa, M.Ritto; Costa, A.C. (1993) - "Ensaios dinâmicos da ponte sobre o rio Arade", *Pontes atir. do Guad. e do Arade*, LNEC.
- Fernandes, J. Almeida.; Santos, Teresa O. (1992a) - *Observação a longo prazo da ponte internacional sobre o rio Guadiana. Plano da instrumentação efectuada durante a construção*, NT 2/92- NOE, LNEC.
- Fernandes, J. Almeida; Santos, Teresa O. (1992b) - *Observação a longo prazo da*

ponte sobre o rio Arade, em Portimão. Plano da instrumentação efectuada durante a construção, NT 3/92-NOE, LNEC.

- Martins, J.L.Câncio (1993) - "Ponte intern. sobre o Guadiana em Castro Marim", *Pontes atir. do Guad. e do Arade*, LNEC.
- Santos, C.Pina; Fernandes, J. Almeida; Santos, L. Oliveira (1993) - "Estudo do comportamento térmico de tirantes", *Pontes atirantadas do Guadiana e do Arade*, LNEC.
- Santos, L. Oliveira; Fernandes, J. A. (1995) - *Ensaio de carga da ponte sobre o rio Arade em Portimão*, Relatório 16/95, LNEC.
- Santos, Teresa (1993) - "Observação a longo prazo das pontes atirantadas do Guadiana e do Arade", *Pontes atirantadas do Guadiana e do Arade*, LNEC.
- Rito, Armando (1993) - "Ponte sobre o Arade, na variante à EN 125 em Portimão", *Pontes atir. do Guad. e do Arade*, LNEC.
- Rodrigues, J.; Fernandes, J.A. (1993) - "Ensaios estáticos da ponte do Guadiana. Comparação entre valores medidos e calculados", *Pontes atir. do Guad. e do Arade*, LNEC.
- Vaz, C.T.; Rito, A.; Duarte, R. Teixeira (1988) - "Seismic studies of the Arade river cable-stayed bridge", *IX World Conference on Earthquake Engineering*, Japan.