

# Ensaaios estáticos e dinâmicos da ponte sobre o rio Mondego na auto-estrada A17

Static and dynamic tests of the bridge over the river Mondego on the A17 highway

Xu Min

Luís Oliveira Santos

## Resumo

A ponte sobre o rio Mondego na auto-estrada A17 foi sujeita a ensaios estáticos e dinâmicos realizados no final da sua construção. Para além de uma descrição geral da estrutura e dos procedimentos adoptados durante os ensaios estáticos e dinâmicos, são apresentados alguns dos principais resultados, estabelecendo-se a comparação entre valores medidos e calculados.

## Abstract

The bridge over the river Mondego located at the A17 highway, near Figueira da Foz, was subjected to static and dynamic tests in order to perform an evaluation of the static behaviour of the bridge and to identify its dynamic characteristics (as vibration frequencies, mode shapes and damping ratios). This paper presents the finite element model used and the experimental procedures adopted. Both static and dynamic experimental results are compared with the analytical values computed by the finite element model.

**Palavras-chave:** Ensaios de carga / Nivelamento hidrostático / Ensaios dinâmicos / Identificação modal / Linhas de influência / Ponte de betão pré-esforçado

**Keywords:** Bridge testing / Hydrostatic levelling / Dynamic tests / Modal identification / Influence lines / Prestressed concrete bridge

## Xu Min

Investigadora Auxiliar  
Laboratório Nacional de Engenharia Civil  
Lisboa  
xumin@lnec.pt

## Luís Oliveira Santos

Investigador Principal  
Laboratório Nacional de Engenharia Civil  
Lisboa  
luis.osantos@lnec.pt

## 1 Introdução

A realização de ensaios de carga no final da construção é uma forma singular de caracterizar o comportamento *in situ* de uma estrutura, permitindo a validação de teorias de comportamento e dos modelos estruturais considerados, bem como a detecção precoce de eventuais deficiências estruturais e a caracterização do seu estado inicial, que constitui uma referência ao longo da vida da obra.

Os ensaios estáticos visaram o estudo do comportamento estrutural da obra de arte sob a acção de sobrecargas significativas, posicionadas de forma a avaliar o seu desempenho sem provocar fendilhação precoce. Os ensaios dinâmicos tiveram como objectivo a avaliação experimental das frequências, configurações e coeficientes de amortecimento dos principais modos de vibração da estrutura. Neste contexto foram realizados os ensaios de carga da Ponte sobre o rio Mondego inserida na auto-estrada A17. Assim, após uma breve descrição da estrutura e do modelo numérico desenvolvido para simular o seu comportamento durante os ensaios, descrevem-se os ensaios estáticos e dinâmicos realizados, referindo-se os equipamentos utilizados e a forma como foi efectuado o tratamento dos resultados. Finalmente, apresentam-se alguns resultados experimentais que são comparados com os valores obtidos através do modelo numérico utilizado.

## 2 Descrição da obra de arte

A Ponte sobre o rio Mondego é uma estrutura de betão armado pré-esforçado, constituída por dois tabuleiros independentes, um para cada sentido de tráfego, contínuos em toda a sua extensão. Possui um comprimento total de 1016,1 m, que, em planta, se insere, de sul para norte, numa curva circular esquerda com 900 m de raio, seguida de uma clotóide esquerda e de um alinhamento recto [1]. Os tabuleiros são idênticos entre si, possuindo individualmente uma plataforma de 18,10 m. Na Figura 1 apresenta-se uma vista geral da estrutura.

Constituída pela ponte propriamente dita e pelo viaduto de acesso, a estrutura da obra de arte apresenta duas soluções distintas.

O viaduto de acesso é formado por nove tramos com 41,5 m de vão e um tramo extremo com 32,0 m. A secção transversal dos tabuleiros é constituída por duas vigas longitudinais, com uma altura de 3,40 m, ligadas por uma laje de espessura variável que se prolonga em consolas laterais. Em cada secção de apoio existem dois pilares/estaca.

A ponte compreende seis tramos, delimitados pelo pilar de transição (pilar P10) e o encontro Norte. O tramo adjacente ao pilar P10 vence um vão de 56,6 m, a que se seguem dois tramos com 100,0 m de extensão, dois vãos de 135,0 m sobre o rio Mondego e um vão extremo de 84,0 m. O tabuleiro é formado por um caixão unicelular, cuja

A realização de ensaios de carga no final da construção é uma forma singular de caracterizar o comportamento in situ de uma estrutura, permitindo a validação de teorias de comportamento e dos modelos estruturais considerados, bem como a detecção precoce de eventuais deficiências estruturais e a caracterização do seu estado inicial, que constitui uma referência ao longo da vida da obra.

altura varia entre 3,40 m e 8,20 m. Nas secções sobre os pilares e encontros, os tabuleiros dispõem de carlingas. Os pilares dão continuidade às estacas de fundação, que, em cada tabuleiro, são duas no pilar P10 e quatro nos pilares P11 a P14. Neste caso, cada par de estacas está ligado transversalmente por uma parede de betão de espessura variável. O pilar P15 é constituído por duas paredes semelhantes às dos pilares P13 e P14, embora a sua fundação seja directa, realizada através de sapatas [1].



Figura 1 Vista geral da ponte sobre o rio Mondego (foto cedida pela LACE)

### 3 Modelo numérico

O comportamento estrutural da ponte foi analisado através de um modelo numérico tridimensional, tendo-se recorrido ao programa SAP2000 [2]. A definição deste modelo foi efectuada com base nas características físicas e geométricas definidas no projecto [1]. Uma vez que os ensaios efectuados incidiram sobre o tabuleiro destinado

ao tráfego ascendente, apenas se efectuou a modelação deste tabuleiro.

O tabuleiro foi modelado através de elementos finitos de casca e de barra. A ligação entre os elementos de barra e os de casca foi realizada através de “Body Constraint”. Os pilares/estaca foram modelados através de elementos finitos de barra e considerados perfeitamente encastrados na base. Os aparelhos de apoio existentes nos pilares e encontros foram modelados através de elementos de ligação lineares.

Na Figura 2 representa-se um pormenor do modelo de uma aduela em caixão e de um pilar da ponte.

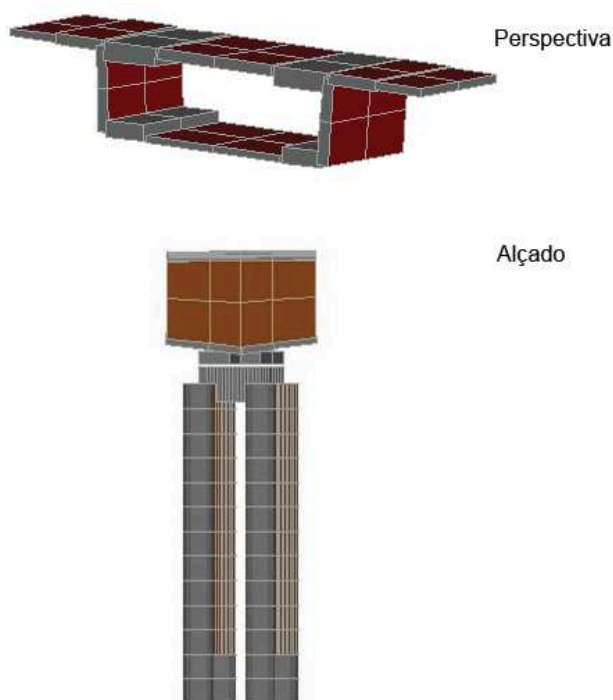


Figura 2 Pormenor do modelo do tabuleiro em caixão e de um pilar

## 4 Ensaios estáticos

### 4.1 Ensaios realizados

Os ensaios efectuados incidiram sobre o tabuleiro destinado ao tráfego ascendente, tendo sido ensaiados os tramos do viaduto de acesso compreendidos entre os pilares P3 e P7 e todos os tramos da ponte, compreendidos entre o pilar P10 e o encontro Norte. Pela sua maior relevância, o presente trabalho aborda apenas os ensaios realizados na ponte propriamente dita.

Estes ensaios foram realizados em duas fases distintas: na primeira fase foi utilizada uma carga concentrada para determinação de linhas de influência; na segunda fase recorreu-se a uma sobrecarga distribuída, com a qual se procurou maximizar a resposta estrutural.

Apesar de não se tratar de uma carga pontual e unitária, o recurso

à carga concentrada de 1206 kN, constituída por uma linha de quatro camiões, permitiu a determinação experimental das linhas de influência das diversas grandezas observadas [3]. Para este efeito foram realizados 16 casos de carga, correspondentes ao posicionamento da carga nas secções de meio vão e de quarto de vão dos tramos ensaiados. Posteriormente, esta carga circou de forma muito lenta ao longo do tabuleiro, permitindo efectuar o registo contínuo das diversas grandezas observadas.

A carga distribuída foi materializada por um conjunto de dezasseis camiões com um peso total de 4847 kN, dispostos em quatro linhas perpendiculares ao eixo da ponte. Os maiores momentos flectores positivos nas secções de meio vão foram obtidos com três linhas de camiões que foram sucessivamente colocadas sobre cada um dos tramos ensaiados (Figura 3). Os maiores momentos flectores negativos nas secções de apoio foram induzidos através do carregamento simultâneo dos dois tramos adjacentes ao apoio em causa, dispondo-se em cada tramo duas linhas de camiões.



Figura 3 Cargas de ensaio

## 4.2 Instrumentação

No decurso dos ensaios da ponte efectuou-se a medição de deslocamentos verticais e das rotações em diversas secções do tabuleiro (Figura 7). Foi também controlada a evolução da temperatura ambiente no exterior e no interior do caixão.

Os deslocamentos verticais foram medidos em todas as secções de meio vão, bem como nas secções de quarto de vão dos dois tramos principais sobre o rio Mondego.

Nestes dois tramos a medição foi efectuada através de um sistema de nivelamento hidrostático, associado a células de pressão (Figura 4), com uma precisão associada de 0,5 mm. O circuito incluía ainda células de referência no topo dos pilares P14 e P15, locais considerados fixos. Estas células de referência são essenciais neste sistema, em que os deslocamentos verticais são determinados através das variações de pressão relativa nas células.

Nos restantes tramos os deslocamentos verticais foram medidos através de clássicos deflectómetros registadores, que permitem a medição de deslocamentos com uma precisão de 0,2 mm (Figura 5).

A medição de rotações longitudinais e transversais foi efectuada através de seis clinómetros eléctricos biaxiais, colocados no topo dos pilares P13 e P14, bem como nas secções de quarto de vão adjacentes a estes pilares.



Figura 4 Célula de pressão



Figura 5 Deflectómetro registador



Figura 6 Clinómetro eléctrico biaxial

Na medição de rotações foram também utilizados quinze acelerómetros uniaxiais do tipo *force-balance*. Este procedimento baseia-se no facto de, ao longo de um ensaio estático, um acelerómetro orientado numa determinada direcção medir pequenas variações da aceleração em torno da componente da gravidade segundo essa direcção; quando o ponto em que o acelerómetro está colocado sofre uma rotação essa componente altera-se. Conhecendo-se essa alteração, a rotação pode ser determinada por considerações trigonométricas. Esta metodologia, que permite



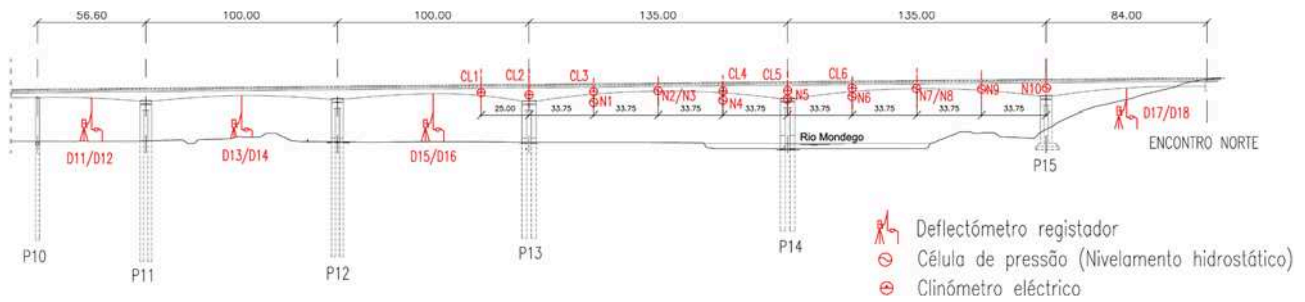


Figura 7 Instrumentação da ponte durante o ensaio estático

utilizar nos ensaios estáticos equipamento que habitualmente só é utilizado nos ensaios dinâmicos, tem sido aplicada pelo LNEC com sucesso no ensaio de pontes desde 2004 [4].

As leituras efectuadas obtidas através do sistema de nivelamento hidrostático, dos clinómetros eléctricos e dos termómetros eléctricos de resistência foram registadas com recurso a *dataloggers*, permitindo centralizar estas medições num computador portátil. Os valores medidos com acelerómetros foram registados pelo sistema de aquisição utilizado nos ensaios dinâmicos.

### 4.3 Resultados obtidos

Os ensaios realizados geraram um volume considerável de informação, pelo que do conjunto dos resultados obtidos apresenta-se apenas uma parte, com valores seleccionados de modo a formar uma amostra representativa das diversas grandezas observadas.

Na Figura 8 apresentam-se algumas linhas de influência obtidas através do posicionamento da carga concentrada ao longo do tabuleiro, bem como da sua utilização como carga rolante. Nos gráficos desta figura, os valores medidos durante as posições de carga têm, naturalmente, um carácter discreto, ao contrário dos

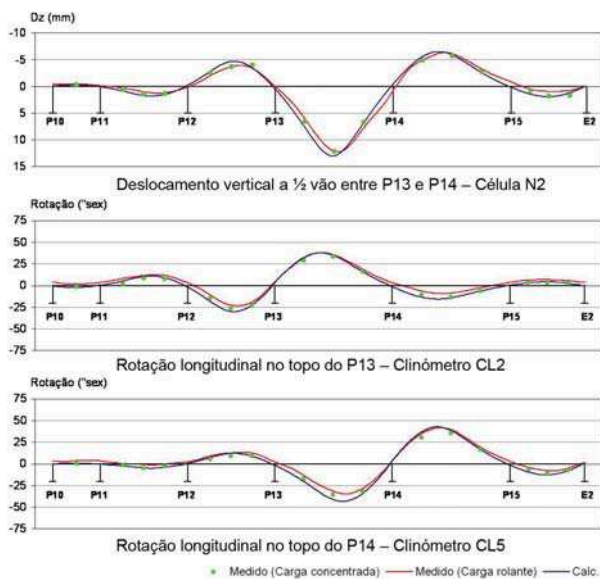


Figura 8 Linhas de influência

obtidos através da passagem da carga rolante que têm um carácter contínuo.

Durante a passagem da carga rolante a aquisição automática das diversas grandezas foi efectuada com uma frequência de 1 Hz. Os registos assim obtidos foram objecto de um pré-processamento, que consistiu na remoção das componentes contínuas ou de tendências lineares e filtragem passa-baixo com um filtro de tipo Butterworth de ordem 8 com uma frequência de corte de 0,01 Hz para os deslocamentos e de 0,02 Hz para as rotações.

Para além dos valores experimentais, na Figura 8 está representada a linha de influência calculada através do modelo numérico. Esta figura, para além da boa concordância entre os valores experimentais e calculados, evidencia também a correlação entre os valores medidos durante as diversas posições de carga e a passagem da carga rolante.

A utilização do comboio de carga induziu esforços e deformações muito significativas na estrutura. Os maiores deslocamentos medidos foram de cerca de 35 mm nas secções de meio vão dos tramos principais, tal como se pode observar na Figura 9. Nesta

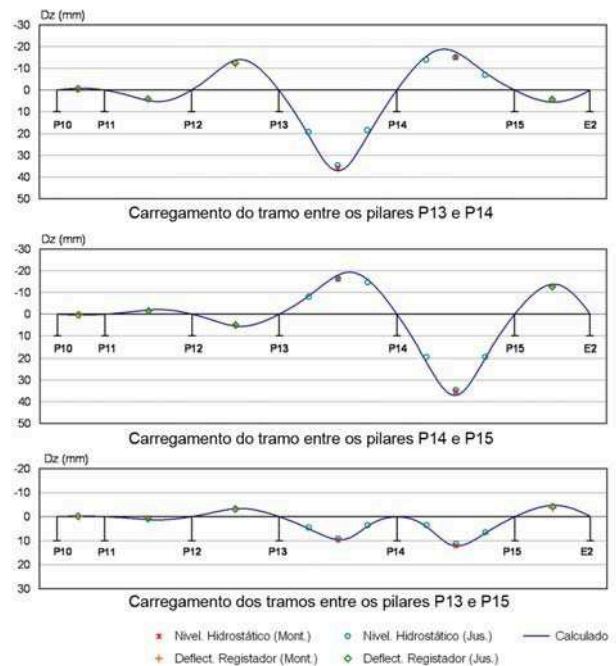


Figura 9 Deformadas do tabuleiro

figura inclui-se também a deformada do tabuleiro quando estes dois tramos foram carregados simultaneamente. A boa correlação entre os valores medidos e calculados é evidente.

A medição de rotações com acelerómetros revelou-se muito eficiente, tal como se pode observar na Figura 10, na qual se apresentam as rotações medidas no topo do pilar P14, simultaneamente através de um clinómetro eléctrico e de um acelerómetro, bem como os valores estimados através do modelo de cálculo.

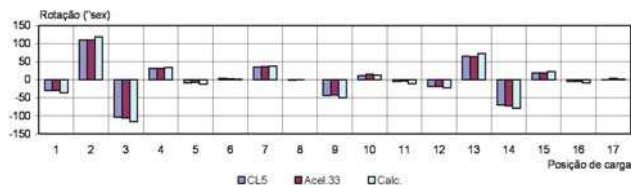


Figura 10 Rotações longitudinais medidas e calculadas no topo do pilar P14

## 5 Ensaios dinâmicos

### 5.1 Ensaios realizados

Os ensaios dinâmicos da Ponte sobre o rio Mondego incidiram apenas sobre a ponte, compreendendo o tabuleiro em caixão entre o pilar P10 e o encontro Norte. Foram efectuados sete ensaios de medição de acelerações induzidas pelas acções ambientais, essencialmente pelo vento. Foram utilizados 15 acelerómetros, dos quais três foram colocados numa secção escolhida como referência permanecendo fixos nessa secção, enquanto os restantes foram sendo colocados em diversas secções ao longo dos seis tramos. No total foram registadas acelerações em 25 secções, cuja localização está assinalada na Figura 11.

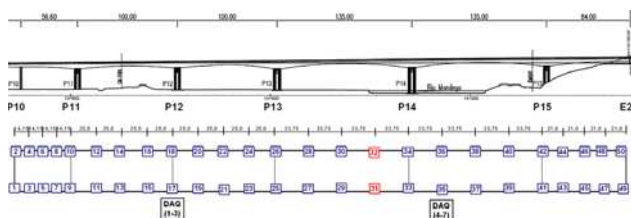


Figura 11 Pontos instrumentados nos ensaios dinâmicos

A frequência de amostragem utilizada nos ensaios foi de 500 Hz, procedendo-se posteriormente ao tratamento digital dos registos assim obtidos. Em cada ensaio obtiveram-se registos com uma duração de cerca de 45 minutos.

### 5.2 Identificação das características dinâmicas

Os registos de aceleração obtidos nos ensaios foram objecto de um pré-processamento, com recurso ao programa LabView [6], que consistiu nas seguintes operações [7]:

- Remoção das componentes contínuas ou de tendências lineares;
- Filtragem passa-baixo com um filtro Butterworth de ordem 8 com uma frequência de corte de 4 Hz;

- Decimação dos registos, da frequência de 500 Hz com que foram adquiridos nos ensaios para uma frequência de 10 Hz.

Na Figura 12 estão apresentados os registos antes e após o pré-processamento.

Com a decimação dos sinais para uma frequência de 10,0 Hz, a frequência de Nyquist passou a ser de 5,0 Hz. A identificação modal subsequente foi desenvolvida até à frequência de 4,0 Hz.

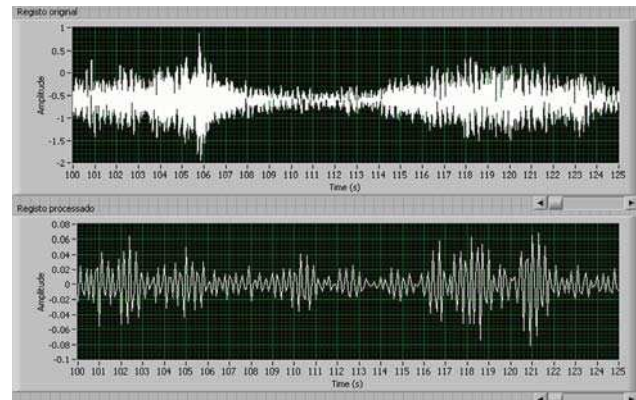


Figura 12 Registos de aceleração

Para a identificação das frequências, coeficientes de amortecimento e configurações dos modos de vibração do tabuleiro, foi utilizado o método aperfeiçoado de decomposição no domínio da frequência (EFDD), implementado no programa ARTeMIS – *Output-only modal identification* [8]. Para a aplicação do método EFDD foram estimadas as funções de densidade espectral dos registos de acelerações, cujas matrizes foram decompostas em valores e vectores singulares (Figura 13).

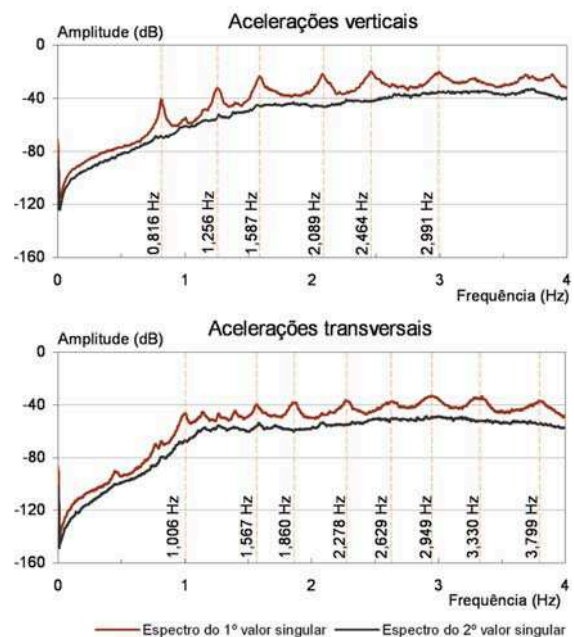


Figura 13 Espectros de valores singulares da matriz de funções de densidade espectral

A identificação das características dinâmicas foi realizada de modo separado para as acelerações verticais e transversais. Analisando os espectros de valores singulares e as configurações correspondentes aos seus picos de ressonância, foram identificados 6 modos de vibração verticais e 8 modos de vibração transversais. As frequências dos modos identificados estão assinaladas nos respectivos espectros apresentados na Figura 13. A frequência do primeiro modo de vibração vertical do tabuleiro identificado foi de 0,816 Hz, enquanto que do primeiro modo de vibração transversal foi de 1,006 Hz.

A relação entre as frequências dos modos de vibração, obtidas por via experimental e analítica é apresentada de forma gráfica na Figura 14. Nesta figura ressalta a boa concordância entre as frequências calculadas e as identificadas experimentalmente, relativamente aos modos de vibração verticais, em particular para os modos de vibração mais baixos.

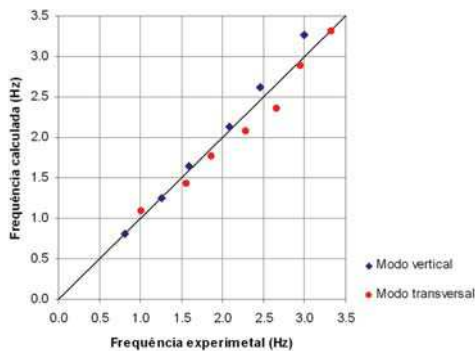


Figura 14 Comparação entre as frequências experimentais e calculadas

Nas Figuras 15 a 20 estão representadas as configurações e respectivos valores de frequência e coeficiente de amortecimento dos primeiros três modos de vibração, verticais e transversais, identificados com a técnica EFDD. Nas mesmas figuras estão também incluídos os modos de vibração correspondentes, obtidos através do modelo de cálculo.

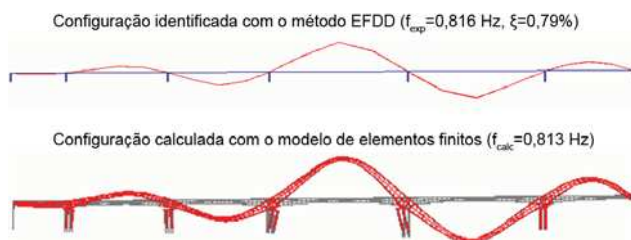


Figura 15 Configuração do 1º modo de vibração vertical

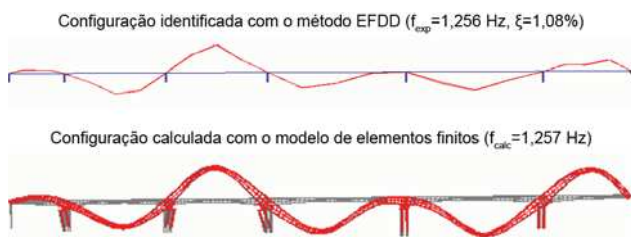


Figura 16 Configuração do 2º modo de vibração vertical

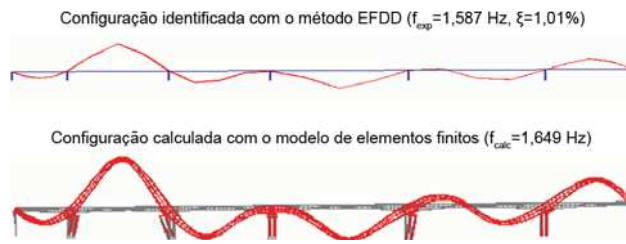


Figura 17 Configuração do 3º modo de vibração vertical

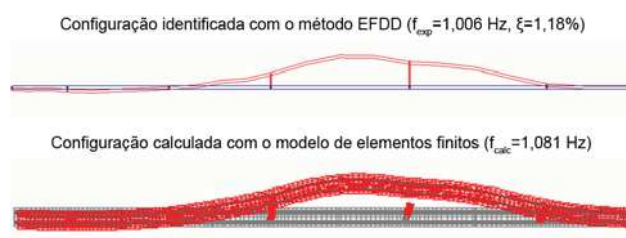


Figura 18 Configuração do 1º modo de vibração transversal

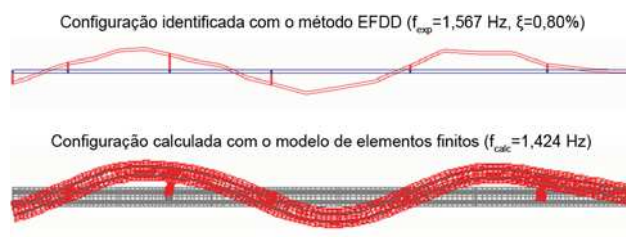


Figura 19 Configuração do 2º modo de vibração transversal

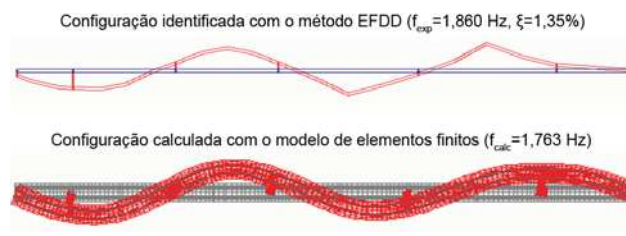


Figura 20 Configuração do 3º modo de vibração transversal

## 6 Conclusões

Nesta comunicação descrevem-se os procedimentos seguidos durante os ensaios estáticos e dinâmicos efectuados na Ponte da A17 sobre o rio Mondego e apresentam-se alguns dos principais resultados obtidos.

Foi desenvolvido um modelo tridimensional de elementos finitos, tendo-se obtido uma boa concordância entre os valores medidos e calculados, tanto no que se refere aos ensaios estáticos como aos ensaios dinâmicos. O modelo numérico calibrado constitui uma mais-valia significativa da realização dos ensaios, uma vez que valida a sua utilização para a interpretação futura do comportamento da obra ensaiada.

A capacidade do sistema de nivelamento hidrostático utilizado para efectuar medições em regime contínuo durante a circulação lenta

de cargas, usado pelo LNEC desde 2007 [9], foi confirmada pela boa concordância entre os valores assim obtidos e os determinados através do sucessivo posicionamento da carga concentrada ao longo do tabuleiro.

A utilização de acelerómetros do tipo *force-balance* para a medição de rotações em regime estático revelou ser uma técnica fiável, tendo sido também comprovada por outros equipamentos.

Os ensaios realizados, para além da calibração do modelo numérico desenvolvido, permitiram a aferição do comportamento da obra de arte, tanto em regime estático como em regime dinâmico, constituindo os resultados obtidos uma referência ao longo da vida útil da obra.

## Referências

- [1] Rito, Armando – *A17: Auto-estrada Marinha Grande/Mira. Sublanço Louriçal/A14. Ponte sobre o rio Mondego e viaduto de acesso*, Projecto de execução, 2006.
- [2] CSI – SAP2000 – *Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures*, 2000.
- [3] Hirachan, J.; Chajes, M. – “Experimental influence lines for bridge evaluation”, *Bridges Structures*, Vol. 1, No 4, pp. 405-412, December 2005.

- [4] Santos, L. Oliveira; Rodrigues, Jorge; Xu Min – “Ensaio estático e dinâmico da ponte sobre o rio Corgo”, *Betão Estrutural 2004*, Porto, 2004.
- [5] Structural Vibration Solutions (SVS) – *ARTEMIS Extractor Pro*, Release 3.2, Denmark, 2005.
- [6] National Instruments – *LabView, version 8.2 Reference Manual*, National Instruments Inc, 2006.
- [7] Rodrigues, Jorge – *Identificação Modal Estocástica. Métodos de Análise e Aplicações em Estruturas de Engenharia Civil*, Dissertação de doutoramento, FEUP, Porto, 2004.
- [8] Structural Vibration Solutions (SVS) – *ARTEMIS Extractor Pro*, Release 3.2, Denmark, 2005.
- [9] Santos, L. Oliveira; Xu Min – “Ensaio de carga do viaduto de Vila Pouca de Aguiar”, *ICM2007*, pp. 93-100, Lisboa, Portugal, 2007.

## Agradecimentos

Os autores agradecem os apoios recebidos por parte do Eng.º Armando Rito e da LACE – Litoral Atlântico, Construtores ACE para a realização deste trabalho.