

## ENSAIOS DE CARGA DO VIADUTO DE VILA POUCA DE AGUIAR

Luís Oliveira Santos<sup>1</sup>, Xu Min<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, luis.osantos@lnec.pt

<sup>2</sup> Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, xumin@lnec.pt

**Resumo:** Apresenta-se o trabalho experimental desenvolvido no âmbito dos ensaios de carga do Viaduto de Vila Pouca de Aguiar, realizados no final da sua construção. Para além de uma descrição geral do Viaduto e dos procedimentos adoptados durante os ensaios estáticos e dinâmicos, são apresentados alguns dos principais resultados obtidos, estabelecendo-se o confronto entre os valores medidos e calculados. Uma atenção especial é prestada aos aspectos mais inovadores, designadamente, a utilização do nivelamento hidrostático no registo contínuo de deslocamentos verticais, o uso de acelerómetros na medição de rotações e o recurso a sensores de fibra óptica para medição de extensões no betão.

**Palavras-chave:** comportamento *in situ*, ensaios de carga, nivelamento hidrostático, identificação modal.

### 1. INTRODUÇÃO

A realização de ensaios de carga é uma forma privilegiada de observar o comportamento *in situ* de uma estrutura, permitindo a validação de teorias de comportamento e dos modelos estruturais considerados, bem como a caracterização do seu estado inicial, que poderá ser utilizado como uma referência ao longo da sua vida.

Neste contexto foram realizados os ensaios de carga do Viaduto de Vila Pouca de Aguiar, obra de arte inserida na auto-estrada A24. A grande envergadura da obra, bem como os diversos ensaios realizados e as distintas técnicas experimentais utilizadas, proporcionaram a obtenção de um conjunto de resultados e ensinamentos cuja divulgação se pretende efectuar na presente comunicação.

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 dos resultados obtidos que são comparados com os valores obtidos através do modelo numérico utilizado.

### 2. DESCRIÇÃO DA OBRA DE ARTE

O Viaduto de Vila Pouca de Aguiar, integrado no lanço Pedras Salgadas / Falperra da auto-estrada A24, é uma obra de arte que, para além de vencer o vale de Vila Pouca de Aguiar, a Sul da referida vila, cruza a Estrada Nacional 2, a linha de Caminho de Ferro do Corgo e o rio Corgo. Na Figura 1 apresenta-se uma vista geral do viaduto.

Trata-se duma estrutura em betão armado pré-esforçado, com uma acentuada inclinação longitudinal, contínua em toda a sua extensão, constituída por dois tabuleiros independentes, um para cada sentido de tráfego, com uma secção transversal constituída por um caixão unicelular. Possui uma extensão total de 1348,0 m, que se divide em dezassete tramos. Estes podem ser reunidos em três grupos, de acordo com as suas dimensões e processo construtivo utilizado: uma zona central, formada por cinco tramos com cerca de 130 m de vão e duas zonas extremas, constituídas por cinco tramos com vãos compreendidos entre 32 m e 60 m (Figura 2). A ligação entre estas zonas assegurada por tramos intermédios com 79 m de vão. A zona central do viaduto, compreendida entre os pilares P6 e P11, para além de compreender os tramos com maior vão, possui os pilares de maior altura, com cerca de 75 m.

A descrição detalhada da estrutura bem como do seu processo construtivo é apresentada por Rito *et al* [1].



Figura 1 – Vista geral do Viaduto de Vila Pouca de Aguiar

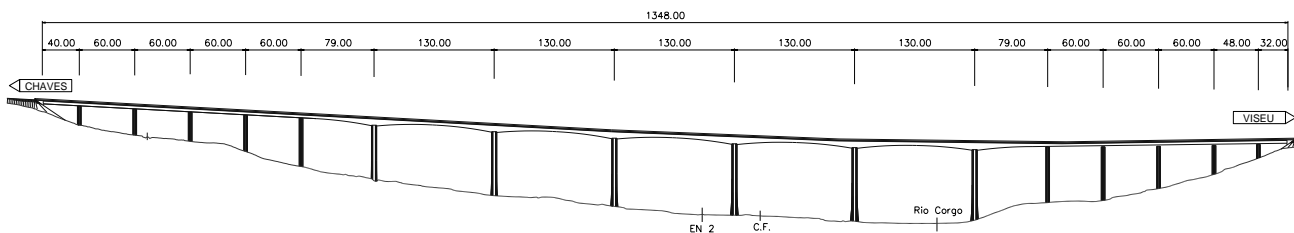


Figura 2 – Alçado do Viaduto de Vila Pouca de Aguiar

### 3. MODELO NUMÉRICO

O comportamento estrutural do viaduto foi analisado através de um modelo numérico tridimensional, tendo-se recorrido ao programa SAP2000 [2] para simular o seu comportamento quando submetido às diversas solicitações decorrentes da realização dos ensaios.

A definição deste modelo foi efectuada com base nas características físicas e geométricas definidas no projecto [3]. Foram utilizados elementos finitos de casca na modelação dos banzos e das almas do tabuleiro, elementos finitos de barra na simulação dos pilares e das juntas entre banzos e almas e elementos de ligação para modelar os diversos aparelhos de apoio. No total foram utilizados 4230 elementos de casca, 1708 elementos de barra e 24 elementos de ligação. Os pilares foram considerados perfeitamente encastrados na base.

### 4. ENSAIOS ESTÁTICOS

#### 4.1. Ensaios realizados

Os ensaios estáticos visaram o estudo do comportamento estrutural do viaduto sob a acção de sobrecargas significativas, posicionadas de forma a avaliar o seu desempenho sem provocar fendilhação precoce.

Os ensaios efectuados incidiram sobre o tabuleiro destinado ao tráfego descendente. Embora também tenham sido ensaiados os tramos correntes compreendidos entre os pilares P1 e P5, o presente trabalho incide apenas sobre os ensaios realizados nos tramos centrais, compreendidos entre os pilares P6 e P11, que pela sua relevância foram sujeitos a ensaios mais sofisticados, com equipamento mais diversificado.

Nos ensaios realizados foi utilizada uma carga concentrada de 889 kN, constituída por três camiões, dispostos segundo uma linha transversal ao eixo do Viaduto, bem como uma carga distribuída, composta por doze camiões com um peso total de 4067 kN.

A carga concentrada foi, numa primeira fase, posicionada na generalidade das secções de meio vão e de quarto de vão dos tramos ensaiados, num total de 14 casos de carga. Posteriormente, esta carga foi utilizada como carga rolante, circulando de forma muito lenta, cerca de 1,7 km/h, ao longo do tabuleiro, permitindo efectuar o registo contínuo das diversas grandezas observadas.

Apesar de uma linha de influência ser, por definição, o efeito de uma carga rolante unitária, a elevada dimensão dos vãos desta obra permite considerar o peso dos três camiões utilizados como uma carga pontual [4]. Torna-se assim possível com a realização destes ensaios a determinação de “linhas de influência” das grandezas observadas, embora a carga utilizada não seja unitária.

A carga distribuída, constituída por doze camiões carregados divididos por quatro linhas perpendiculares ao eixo do viaduto, foi sucessivamente posicionada ao longo do tabuleiro, visando induzir significativos momentos flectores nas secções de meio vão dos tramos ensaiados bem como nas secções de apoio sobre os pilares.

Os maiores momentos flectores positivos nas secções de meio vão foram obtidos nos cinco casos de carga em que os doze camiões foram sucessivamente colocados sobre cada um dos tramos ensaiados. Na Figura 3 apresenta-se uma vista geral do comboio de cargas numa destas posições.

Os maiores momentos flectores negativos nas secções de apoio foram induzidos através do carregamento simultâneo dos dois tramos adjacentes ao apoio, dispondo-se em cada tramo duas linhas de três camiões.

Foram também aplicadas cargas excêntricas na via de nascente, tendo-se, para este efeito, utilizado oito camiões, dispostos em duas colunas, ficando a coluna da direita no extradorso do tabuleiro e a outra coluna imediatamente ao lado.



Figura 3 – Comboio de cargas durante os ensaios

## 4.2. Instrumentação

Na instrumentação da zona central foram utilizados diversos tipos de equipamento que permitiram a medição de deslocamentos verticais, rotações longitudinais e transversais, bem como de extensões do tabuleiro. Foi também controlada a evolução da temperatura ambiente no exterior e no interior do caixão.

A medição dos deslocamentos verticais nas secções de meio vão nos tramos compreendidos entre os pilares P7 e P11 foi efectuada através de sistemas de nivelamento hidrostático, associados a células de pressão. Desta forma o deslocamento vertical não é medido directamente pela variação de altura do líquido, mas sim através da variação de pressão que lhe está associada.

Dada a extensão da obra e a acentuada inclinação do tabuleiro, foram usados três sistemas hidráulicos independentes, o primeiro colocado no tramo P7-P8, o segundo no tramo seguinte e o terceiro cobrindo os restantes dois tramos. Cada circuito incluía, para além de um depósito, uma célula de pressão em cada ponto de medida e, ainda, uma célula no topo de um pilar, que, por diferença com os restantes sensores permitiram a determinação dos deslocamentos nas secções de meio vão. As células de referência foram colocadas nos pilares P7, P8 e P9, permitindo assim a medição dos deslocamentos nas secções de meio vão dos tramos compreendidos entre os pilares P7 e P11. Na Figura 4 apresenta-se uma vista da célula de referência e do depósito colocados sobre o pilar P7.

No tramo compreendido entre os pilares P6 e P7 a medição dos deslocamentos verticais foi efectuada através de deflectómetros registadores.



Figura 4 – Célula de pressão e depósito no topo do pilar P7

A medição de rotações foi efectuada através de um clinómetro de bolha de ar, colocado no topo do pilar P7, e de quatro clinómetros eléctricos *Schaevitz T233*, colocados no topo dos pilares P8 a P11 (Figura 5).

A aquisição das leituras efectuadas pelas células de pressão e pelos clinómetros eléctricos foi efectuada através de cinco *datalogger Datatakker DT515*, permitindo centralizar estas medições num computador portátil. Estes equipamentos registaram também as temperaturas medidas por três termómetros *PT100*, dois deles colocados no interior do caixão.

Na medição de rotações foram também utilizados quinze acelerómetros uniaxiais do tipo *force-balance* (Figura 5). Este procedimento, que permite utilizar nos ensaios estáticos, equipamento que habitualmente só é utilizado nos ensaios dinâmicos, baseia-se no facto de, ao longo de um ensaio estático, um acelerómetro orientado numa determinada direcção horizontal, transversal ou longitudinal, 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. Foram assim medidas as rotações nas direcções longitudinal e transversal na generalidade das secções de meio vão e de quarto de vão dos tramos compreendidos entre os pilares P8 e P11.

O registo das leituras dos acelerómetros foi realizado através de um sistema de aquisição de dados *Gantner Instruments*, incluindo um módulo *e.gate DP* e 4 módulos *e.bloxx AI-4* com conversão analógica/digital.



Figura 5 – Acelerómetro e clinómetro eléctrico

As extensões do betão foram medidas no tramo compreendido entre os pilares P9 e P10, numa secção distando 3,50 m do eixo do pilar P10. Para esse efeito foram utilizados quatro sensores de fibras ópticas do tipo *Bragg*, colocados na superfície interior das lajes superior e inferior. A aquisição das leituras realizadas por estes sensores foi efectuada por uma unidade *FS 5500 Benchtop Braggscope* (Figura 6).

A localização dos diversos aparelhos de medida utilizados durante os ensaios estáticos está assinalada na Figura 7.

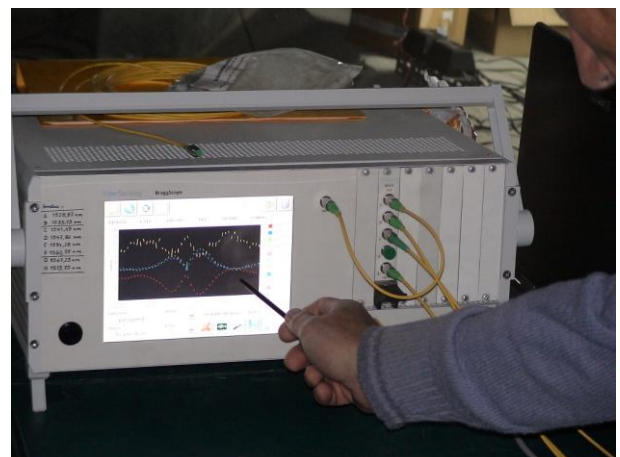


Figura 6 – Unidade *FS 5500 Benchtop Braggscope*

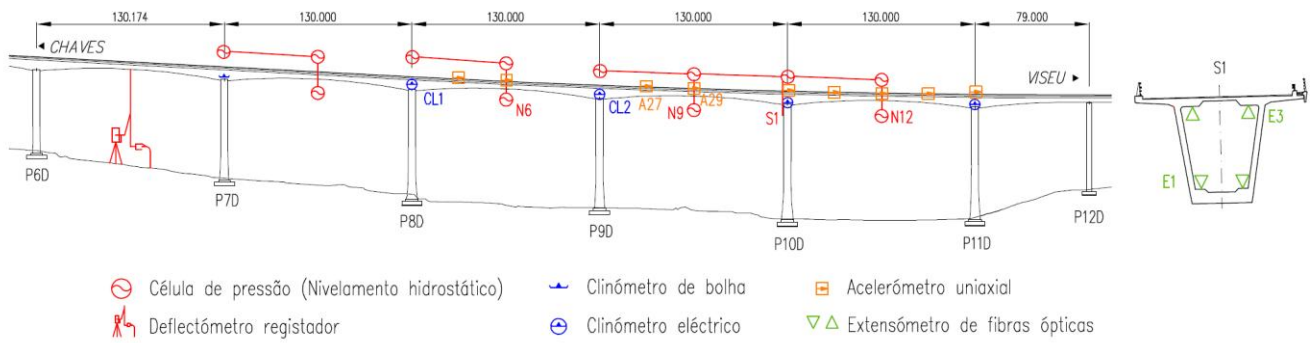


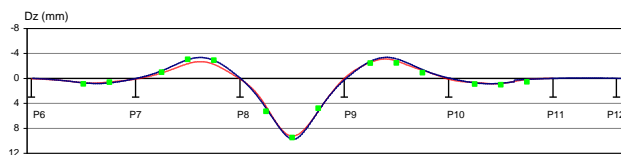
Figura 7 – Plano de instrumentação do Viaduto de Vila Pouca de Aguiar

### 4.3. Resultados obtidos

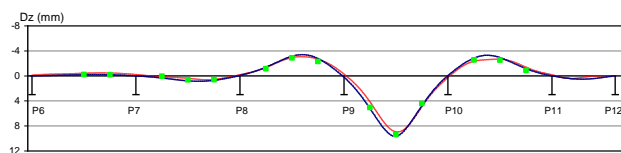
Os ensaios realizados proporcionaram um volume considerável de informação, pelo que do conjunto dos resultados obtidos apresenta-se apenas uma parte, seleccionados de modo a formar uma amostra representativa das diversas grandezas observadas.

Das diversas linhas de influência obtidas através do posicionamento sucessivo ao longo do tabuleiro da carga de faca constituída por três camiões, bem como da sua utilização como carga rolante, apresentam-se na Figura 11 as relativas aos deslocamentos verticais nas secções de meio vão dos tramos compreendidos entre os pilares P8 e P11. Nos gráficos desta figura, os valores medidos durante as posições de carga têm, naturalmente, um carácter discreto, ao contrário dos obtidos através da passagem da carga rolante que têm um carácter contínuo. Para além dos valores experimentais, está representada a linha de influência estimada pelo modelo de cálculo idealizado.

Deslocamento vertical na secção de 1/2 vão entre P8 e P9 – Célula N6



Deslocamento vertical na secção de 1/2 vão entre P9 e P10 – Célula N9



Deslocamento vertical na secção de 1/2 vão entre P10 e P11 – Célula N12

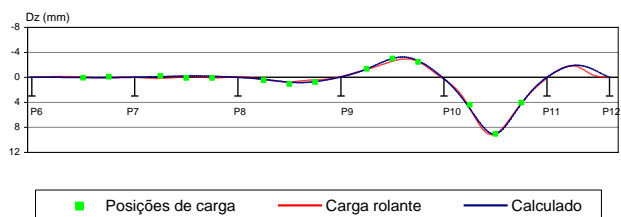
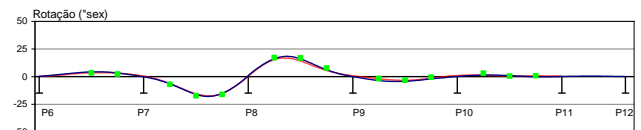


Figura 8 – Linhas de influência de deslocamentos verticais

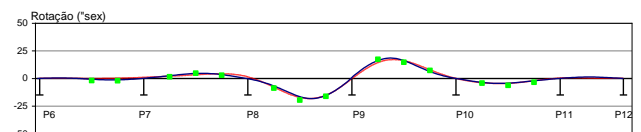
Esta figura, para além da boa concordância entre os valores experimentais e calculados, evidencia também uma notável correlação entre os valores medidos durante as diversas posições de carga e a passagem da carga rolante. Este facto é muito significativo relativamente às capacidades do sistema de nivelamento hidrostático, uma vez que, embora o sistema de nivelamento hidrostático tenha sido utilizado em numerosos ensaios de carga [5],[6],[7],[8],[9], a medição dos deslocamentos provocados por uma carga rolante foi efectuada pela primeira vez nestes ensaios.

As linhas de influência das rotações longitudinais medidas pelos clinómetros eléctricos colocados no topo do pilar P8 e P9 constituem a Figura 9. Também nesta figura é óbvia a correlação entre os valores estimados pelo modelo numérico e os valores medidos, tanto durante as posições de carga como durante a passagem da carga rolante.

Rotação no topo do pilar P8 – CL1



Rotação no topo do pilar P9 – CL2



■ Posições de carga    — Carga rolante    — Calculado

Figura 9 – Linhas de influência de rotações longitudinais medidas por clinómetros eléctricos

Durante a passagem da carga rolante a aquisição 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 0,005 Hz para as rotações.

A medição de rotações ao longo do ensaio foi também efectuada através de acelerómetros. Este procedimento revelou-se muito eficiente tanto durante as posições de carga como durante as passagens com carga rolante, tal como se pode observar na Figura 10, na qual se apresentam as rotações medidas numa secção de quarto de vão e numa secção de meio vão.

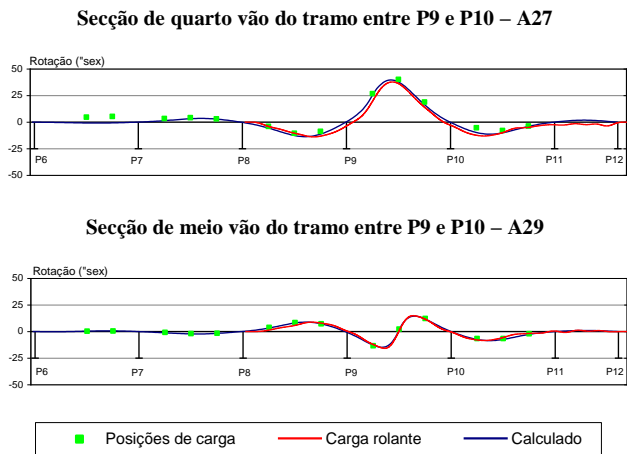


Figura 10 – Linhas de influência de rotações longitudinais medidas por acelerómetros

Finalmente, apresentam-se na Figura 11 as linhas de influência das extensões medidas na secção S1, distante 3,50m do eixo do pilar P10, através de extensómetros de fibras ópticas colocados tanto na laje superior como na inferior. Constata-se nesta figura que, embora se verifique uma apreciável concordância qualitativamente entre valores experimentais e numéricos, os valores máximos das extensões são claramente inferiores aos numéricos.

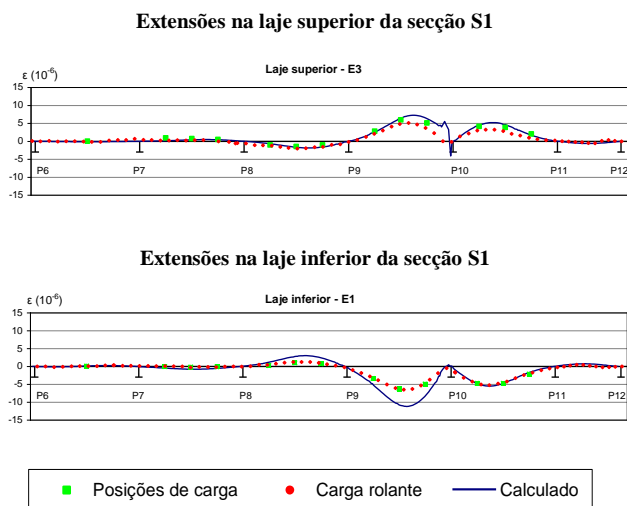


Figura 11 – Linhas de influência das extensões na secção S1

A utilização do comboio de carga induziu esforços e deformações muito significativas na estrutura. Nos casos de carga em que todo o comboio de carga se encontrava num único tramo obtiveram-se os maiores deslocamentos, que nas secções de meio vão foram muito semelhantes, variando entre 35 mm e 37 mm. Na Figura 12 apresentam-se os valores

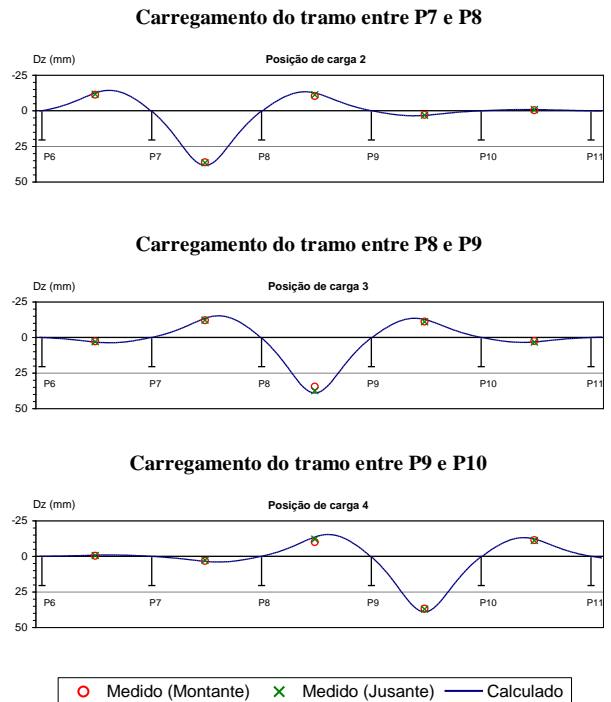


Figura 12 – Deslocamentos verticais do tabuleiro

medidos quando os camiões carregaram cada um dos tramos compreendidos entre os pilares P7 e P10.

## 5. ENSAIOS DINÂMICOS

### 5.1. Ensaios realizados

Os ensaios dinâmicos tiveram como objectivo a avaliação experimental das frequências, configurações e coeficientes de amortecimento dos principais modos de vibração do Viaduto de Vila Pouca de Aguiar. Foram efectuados seis ensaios de medição de acelerações induzidas pelas acções ambientais, essencialmente pelo vento.

Nos primeiros cinco ensaios foram registadas acelerações verticais e transversais. Foram instrumentadas 21 secções entre os pilares P6 e P11, tal como está esquematicamente representado na Figura 13, tendo-se colocado em cada secção três transdutores: enquanto um media as acelerações transversais os restantes dois, colocados em extremos opostos da secção, estavam orientados verticalmente. Durante estes ensaios os três acelerómetros colocados numa secção escolhida como referência (assinalada na Figura 13) permaneceram sempre nessa secção, enquanto os restantes foram sendo colocados em diversas secções ao longo do tabuleiro.

No último ensaio foram medidas apenas as acelerações longitudinais, tendo-se disposto os acelerómetros nas secções compreendidas entre os pilares P8 e P11.

A frequência de amostragem utilizada nos ensaios foi de 1000 Hz, procedendo-se posteriormente ao tratamento digital dos registos assim obtidos. Em cada ensaio obtiveram-se registos com uma duração cerca de 30 minutos.

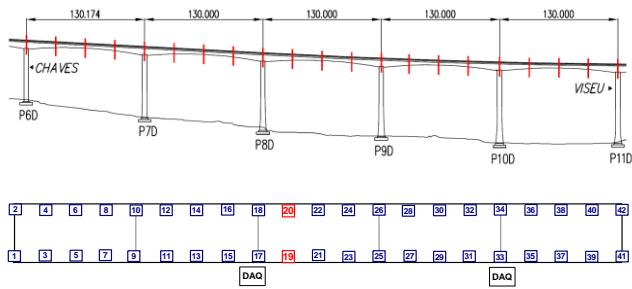


Figura 13 – Instrumentação dinâmica do viaduto

## 5.2. Identificação das características dinâmicas

Antes da análise de identificação modal, os registos de aceleração obtidos nos ensaios foram objecto de um pré-processamento que consistiu nas seguintes operações [10]: remoção das componentes contínuas ou de tendências lineares; filtragem passa-baixo a 5,00 Hz com um filtro de tipo *Butterworth* de ordem 8; decimação dos registos, da frequência de 1000 Hz, com que foram adquiridos nos ensaios, para uma frequência de 12,50 Hz (Figura 14). O pré-processamento foi efectuado através do programa *LabView* [11].

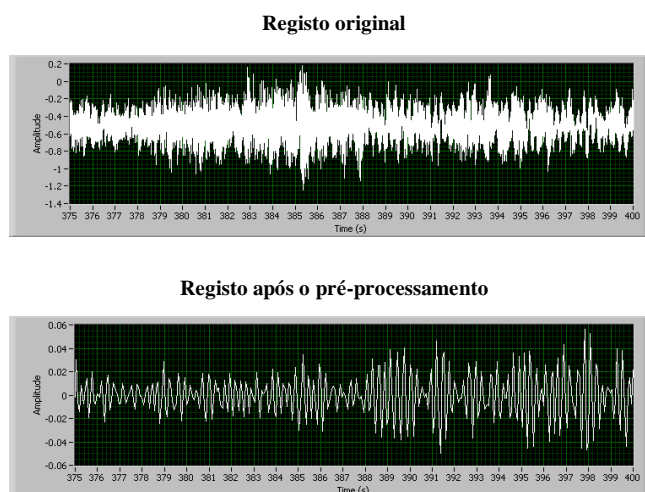


Figura 14 – Registos de aceleração

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* [12]. Para a aplicação do método EFDD foram estimadas as funções de densidade espectral dos registos de acelerações, considerando amostras com 1024 valores o que corresponde a uma resolução em frequência de 0,0061 Hz nas estimativas espectrais. As matrizes das funções de densidade espectral foram decompostas em valores e vectores singulares tendo-se obtido os espectros de valores singulares (Figura 15).

A identificação das características dinâmicas foi realizada de modo separado para as acelerações transversais e verticais,

visto que as frequências dos respectivos modos de vibração são muito próximas.

Analisando os espectros de valores singulares e as configurações correspondentes aos seus picos de ressonância, foram identificados 14 modos de vibração transversais e 14 modos de vibração verticais. As frequências dos modos identificados estão assinaladas nos espectros apresentados na Figura 15.

Na Figura 16 apresentam-se as frequências, coeficientes de amortecimento e configurações dos primeiros três modos de vibração transversais identificados experimentalmente. Na coluna da direita da mesma figura incluem-se as correspondentes frequências e configurações dos modos de vibração estimadas pelo modelo numérico utilizado.

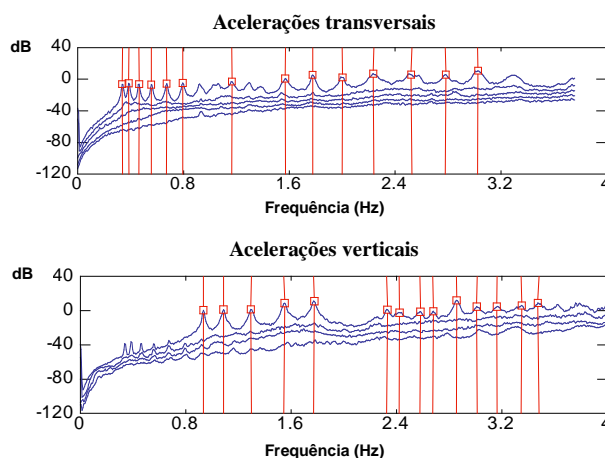


Figura 15 – Espectros de valores singulares da matriz de funções de densidade espectral

De forma análoga, apresentam-se na Figura 17 as características dos primeiros modos de vibração verticais, identificadas experimentalmente, bem como as correspondentes frequências e configurações determinadas numericamente.

A análise das duas figuras permite constatar a boa correlação que se verifica entre as características dinâmicas identificadas experimentalmente e as obtidas por via numérica.

## 6. CONCLUSÕES

Nesta comunicação descreveram-se os procedimentos seguidos durante os ensaios estáticos e dinâmicos efectuados no Viaduto de Vila Pouca de Aguiar e apresentaram-se alguns dos resultados obtidos.

O trabalho experimental foi acompanhado pelo desenvolvimento de um modelo numérico tridimensional, cujos resultados foram comparados com os valores experimentais, tendo-se obtido uma boa concordância entre os valores medidos e os calculados, tanto no que se refere aos ensaios estáticos como aos ensaios dinâmicos.

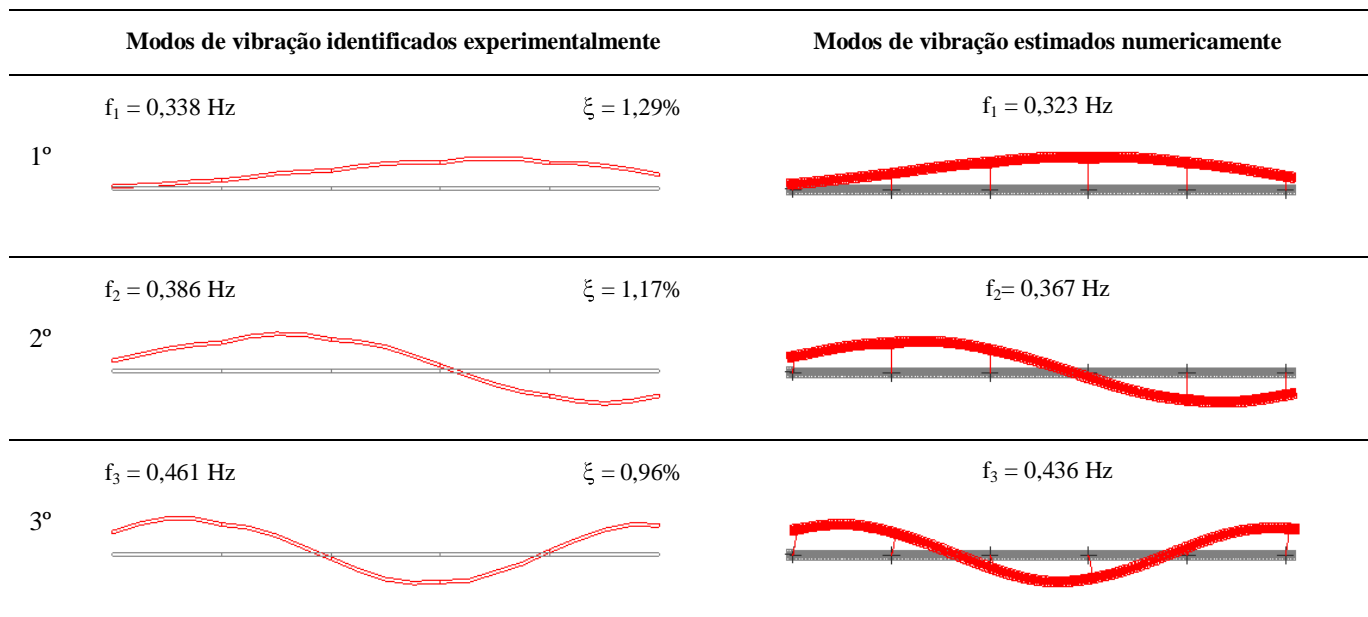


Figura 16 – Modos de vibração transversais identificados experimentalmente e calculados

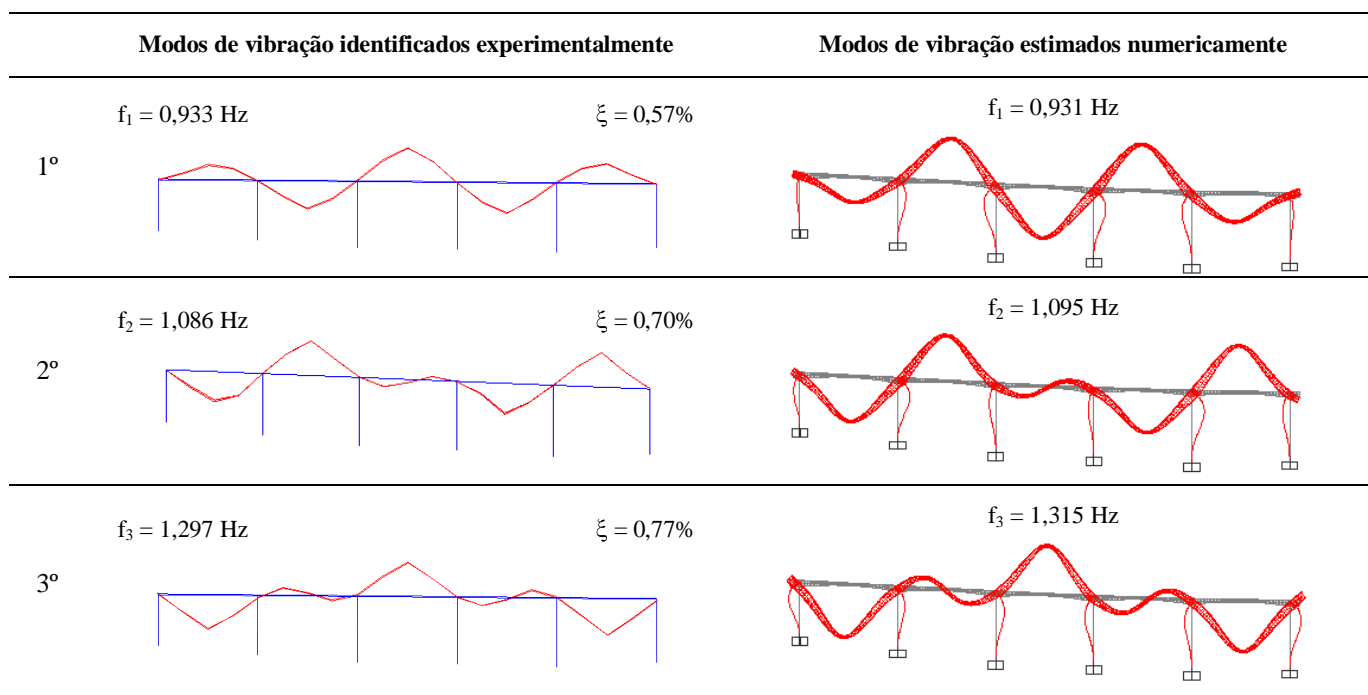


Figura 17 – Modos de vibração verticais identificados experimentalmente e calculados

Os resultados obtidos no decurso dos ensaios, validados pela boa concordância com os valores numéricos, revelam que a estrutura teve um comportamento elástico e linear para o nível de cargas aplicado, apresentando uma boa recuperação das deformações após a retirada das cargas.

Os resultados medidos *in situ* permitem também validar o desempenho dos equipamentos de observação utilizados.

Assume, assim, particular interesse a possibilidade de utilização do nivelamento hidrostático durante a passagem lenta de cargas de ensaio, efectuada pela primeira vez no decurso destes ensaios.

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

por outros equipamentos. Nestes ensaios foi particularmente interessante a sua utilização no decurso da passagem lenta das cargas de ensaio.

Finalmente uma referência para os sensores de fibras ópticas do tipo *Bragg* utilizados na medição de extensões à superfície do betão, que foram utilizados com sucesso durante as posições de carga bem como durante da passagem lenta das cargas de ensaio.

A avaliação das características dinâmicas do viaduto foi efectuada através de ensaios de medição de vibrações ambientais. A análise da informação experimental assim obtida foi realizada através da aplicação de um método de identificação modal estocástica. Estes procedimentos revelaram ser adequados, permitindo identificar um número significativo de modos de vibração da estrutura.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem os apoios recebidos por parte do Eng<sup>o</sup> Armando Rito e da Norinter para a realização deste trabalho, bem como a participação empenhada nos ensaios dos técnicos do LNEC José Fidalgo, Amândio Marecos, Diamantino Carocinho, Vítor Devesa e João Paulo Santos, bem como da bolseira Maíra Ledesma que efectuou a aquisição dinâmica.

## REFERÊNCIAS

- [1] Rito, Armando; Cabral, Pedro; Xavier, Luís – “A Construção da Viaduto de Vila Pouca de Aguiar”, 4<sup>as</sup> *Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas*, LNEC, Lisboa, 2006.
- [2] CSI – *Analyses Reference Manual for SAP2000, ETABS and SAFE*, 2007.
- [3] Rito, Armando – *Viaduto de Vila Pouca de Aguiar*, Projecto de execução, 2001.
- [4] Hirachan, J.; Chajes, M. – “Experimental influence lines for bridge evaluation”, *Bridges Structures*, Vol. I, No 4, pp. 405-412, Taylor & Francis, 2005.
- [5] Santos, L. O.; Xu, M.; Fernandes, J.A. – “Ensaio de Carga da Ponte Salgueiro Maia” *Betão Estrutural 2002*, LNEC, Lisboa, 2002.
- [6] Rodrigues, J.; Santos, L.O.; Xu, M. – “Static and dynamic tests of Arade Bridge in the A2 highway”, 2<sup>nd</sup> *European Workshop on Structural Health Monitoring*, Munich, Germany, 2004.
- [7] Santos, L.O.; Rodrigues, J.; Xu, M. – “Load Testing of a Large Viaduct”, *Metropolitan Habitats and Infrastructure*, IABSE Symposium, Shanghai, China, 2004.
- [8] Santos, L.O.; Rodrigues, J.; Xu, M. – “Ensaio estático e dinâmico da ponte sobre o rio Corgo”, *Betão Estrutural 2004*, FEUP, 2004.
- [9] Santos, L.O.; Rodrigues, J.; Xu, M. – “Field observations on concrete box girder railway bridges”, 3<sup>th</sup> *International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management - IABMAS'06*, Porto, 2006.
- [10] Rodrigues, J. – *Identificação Modal Estocástica. Métodos de Análise e Aplicações em Estruturas de Engenharia Civil*, Dissertação de doutoramento, FEUP, Porto, 2004.
- [11] National Instrument – *LabView Professional Development System, version 8.2*, 2006.
- [12] Structural Vibration Solutions – *ARTEMIS Extractor Pro*, Release 3.5, Denmark, 2005.