

ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DINÂMICA DA PASSAGEM SUPERIOR PS17 DA AUTO-ESTRADA A-14

Rodrigues, J.¹

¹Assistente de Investigação
Departamento de Estruturas
Laboratório Nacional de Engenharia Civil



RESUMO

Descrevem-se e apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de caracterização dinâmica realizados na passagem superior PS17 da auto-estrada A-14. Estes ensaios, incluídos nos ensaios de recepção dessa estrutura, realizados pelo LNEC, consistiram na medição de acelerações induzidas pela passagem do tráfego corrente e também de camiões carregados. Descrevem-se os equipamentos utilizados, os métodos de análise aplicados e apresentam-se as características dinâmicas identificadas com base nos ensaios, comparando-as com as calculadas com um modelo de elementos finitos da estrutura.

1 - INTRODUÇÃO

O conhecimento das efectivas características dinâmicas das estruturas de pontes, é extremamente importante, para a comprovação de modelos utilizados na análise do seu comportamento em relação às acções do tráfego, vento ou sismos. Para além disso, as propriedades dinâmicas constituem uma boa forma de caracterização global do estado das estruturas, podendo-se, através da sua avaliação ao longo da vida das obras, acompanhar também a evolução desse estado e, eventualmente, detectar e quantificar situações de degradação estrutural.

No âmbito de ensaios de recepção de pontes e viadutos, antes da sua entrada em serviço, ou incluídos em trabalhos de inspecção de obras já existentes, têm-se desenvolvido no LNEC diversos estudos de caracterização dinâmica experimental de estruturas de pontes. Esta actividade envolve o desenvolvimento, numa forma integrada, de equipamentos, técnicas de

ensaio, programas para aquisição de dados e métodos adequados para a sua análise.

Neste artigo apresentam-se os ensaios de caracterização dinâmica da passagem superior PS17 do troço S^a. Eulália – Coimbra (Norte) da auto-estrada A14 [Rodrigues (2001)]. É feita uma breve descrição da estrutura, do equipamento utilizado e dos ensaios realizados. São descritos os métodos de análise aplicados e são apresentadas as características dinâmicas identificadas, comparando-as com as calculadas com um modelo de elementos finitos.

2 – DESCRIÇÃO DA PS17

A passagem superior PS17 tem um comprimento total de 68 m entre eixos dos encontros, dividido em dois vãos laterais de 16 m e um vão central de 36 m. É uma estrutura em pórtico com o tabuleiro monoliticamente ligado aos dois pilares intermédios e apoiado nos encontros através de aparelhos de apoio unidireccionais. Os pilares têm secção circular com 1,20 m de diâmetro e alturas de 7,89 m e 7,79 m.

As fundações dos dois pilares são directas, sendo constituídas por sapatas quadradas com 5,0 m de lado e 1,5 m de altura. No caso dos encontros, as fundações são indirectas, sendo formadas por 8 estacas com 0,8 m de diâmetro e comprimentos de 11,4 m e 8,4 m. As estacas são encabeçadas por um maciço rectangular com 12,0 m x 3,3 m e 1,0 m de altura.

Na figura 1 apresenta-se um corte longitudinal da PS17.

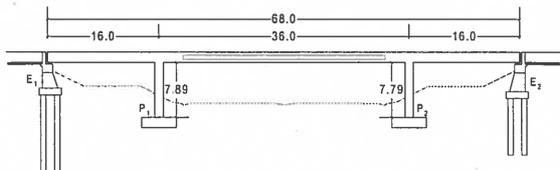


Fig. 1 - Corte longitudinal da PS17

O tabuleiro da PS17 é constituído por uma viga-laje com secção transversal trapezoidal que se prolonga lateralmente em consolas de espessura variável. Nos vãos laterais e na zona sobre os pilares, a viga-laje é em secção cheia, enquanto que no vão central, numa extensão de 29,0 m, a secção é aligeirada por intermédio de 4 vazados circulares com 0,90 m de diâmetro. A altura do tabuleiro é de 1,50 m e a sua largura total é de 11,10 m.

Na figura 2 apresentam-se as secções transversais do tabuleiro da PS17.

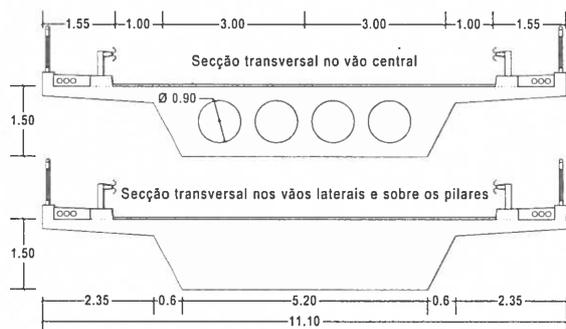


Fig. 2 - Secções transversais do tabuleiro da PS17

3 - EQUIPAMENTO UTILIZADO NOS ENSAIOS

Os ensaios de caracterização dinâmica da PS17 foram efectuados com o seguinte equipamento:

- 12 acelerómetros uniaxiais de marca *Kinematics* e modelo *ES-U*;

- 4 unidades, desenvolvidas no LNEC, para alimentação dos acelerómetros *ES-U* e condicionamento do respectivo sinal;
- 1 computador portátil com 1 placa *DAQ Card AI-16XE-50* da *National Instruments*, com conversão analógica/digital a 16 bits;
- 1 chassis *SCXI-1000DC* com 32 canais;
- cabos para alimentação dos acelerómetros e transmissão do respectivo sinal às unidades de condicionamento e alimentação e destas ao sistema de aquisição de dados.

Os acelerómetros *ES-U* são do tipo servo-controlado e são um transdutor relativamente recente da *Kinematics*. As suas principais características são: resposta dinâmica entre DC e 200 Hz; gama dinâmica superior a 145 dB; fim de escala seleccionável entre $\pm 0,25$ g, $\pm 0,5$ g, $\pm 1,0$ g, $\pm 2,0$ g ou $\pm 4,0$ g. A resposta dinâmica até DC e a elevada gama dinâmica destes transdutores são duas características fundamentais para a realização de ensaios de caracterização dinâmica de estruturas de engenharia civil.

Na figura 3 apresenta-se um esquema do sistema de medição de acelerações utilizado nos ensaios da PS17.

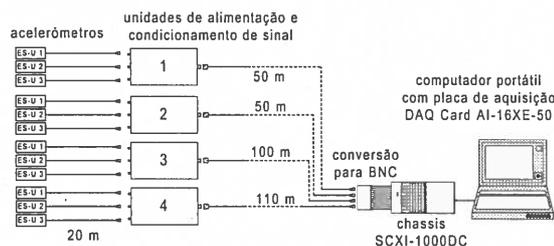


Fig. 3 - Esquema do equipamento utilizado

4 - TÉCNICA DE ENSAIO

Os ensaios efectuados visaram a identificação experimental dos modos verticais e de torção do tabuleiro da PS17, tendo-se medido apenas acelerações na direcção vertical.

Utilizou-se uma técnica de ensaio em que se escolheu uma secção de referência (com base numa análise prévia com um modelo de elementos finitos e de modo a

evitar escolher um nodo dos principais modos de vibração da estrutura) onde se colocaram transdutores que aí permaneceram em todos os ensaios realizados, enquanto que os restantes acelerómetros foram colocados, em cada ensaio, em secções diferentes ao longo da estrutura. Instrumentaram-se assim 22 pontos da estrutura, em 11 secções do tabuleiro, ver figuras 4 e 5.

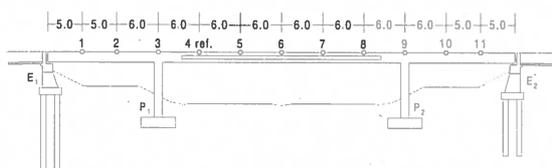


Fig. 4 – Secções instrumentadas

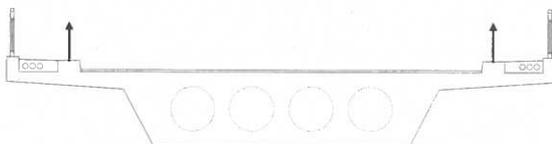


Fig. 5 – Instrumentação em cada secção

Foram efectuados dois ensaios, correspondendo cada um deles a colocações diferentes dos acelerómetros, ver figuras 6 e 7, em que há transdutores que ficaram sempre colocados na secção de referência e em que os outros foram deslocados de ensaio para ensaio, percorrendo as restantes secções.

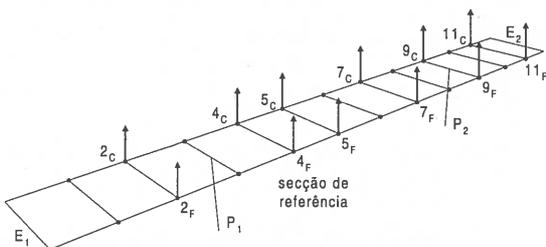


Fig. 6 – Ensaio 1

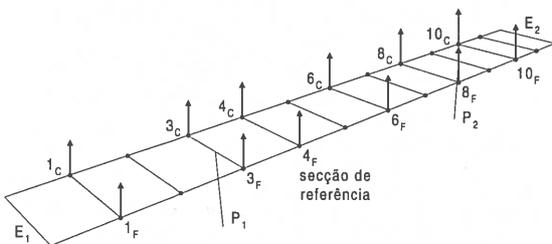


Fig. 7 – Ensaio 2

Nos dois ensaios efectuados, fizeram-se circular 4 camiões sobre a estrutura com velocidades de 30 a 40 km/h. Estes camiões, com cerca de 300 kN de peso,

foram os mesmos que tinham sido utilizados nos ensaios de carga estáticos. Não se procurou controlar com precisão a velocidade de circulação dos camiões, pois o objectivo que se pretendia atingir era o de gerar uma vibração “ambiente” que excitasse bem a estrutura numa banda larga de frequências, permitindo identificar melhor as suas características dinâmicas.

Na figura 8 podem observar-se duas fases dos ensaios realizados na passagem superior PS17.

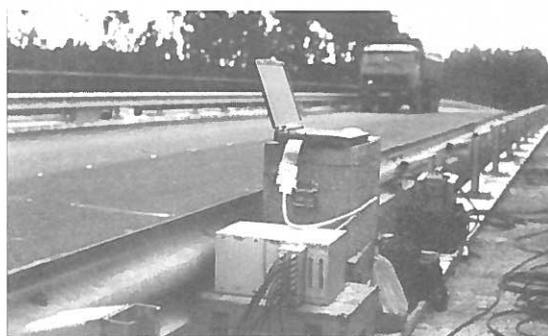


Fig. 8 – Fases dos ensaios realizados na PS17

A frequência de amostragem utilizada nos ensaios foi de 200 Hz, e em cada um deles obtiveram-se registos com uma duração de aproximadamente 19 minutos.

5 – IDENTIFICAÇÃO MODAL

5.1 – Pré-processamento

A análise dos registos de aceleração obtidos nos ensaios teve como principal objectivo a identificação de características dinâmicas da ponte, nomeadamente, das frequências, coeficientes de amortecimento e configurações dos seus modos de vibração verticais e de torção.

Antes da aplicação do método de identificação modal, os registos de aceleração obtidos nos ensaios, foram objecto

de um pré-processamento que consistiu nas seguintes operações:

- remoção da componente contínua ou de tendências lineares;
- filtragem passa-baixo com frequência de corte de 40 Hz e utilizando um filtro de tipo Butterworth de ordem 4;
- decimação dos registos, da frequência de 200 Hz com que foram adquiridos nos ensaios para uma frequência de 100 Hz.

A vantagem em efectuar a decimação, consistiu em reduzir para metade o número de valores em cada um dos registos a analisar, sem perder informação na gama de frequências com maior interesse para a identificação modal da estrutura.

Ao nível do pré-processamento dos registos, foi ainda calculada a semi-soma e a semi-diferença dos dois registos verticais obtidos em cada secção instrumentada. As séries obtidas por semi-soma dos registos verticais contêm as componentes com movimentos verticais da secção, enquanto que as obtidas por semi-diferença contêm as componentes com movimentos de torção. As séries assim determinadas foram as consideradas na análise subsequente de identificação modal pois dessa forma tornou-se bastante mais fácil distinguir entre modos verticais e modos de torção.

Para ilustrar as séries obtidas após o pré-processamento, apresentam-se na figura 9, amostras das acelerações registadas na secção 6 (a 1/2 vão do tramo central).

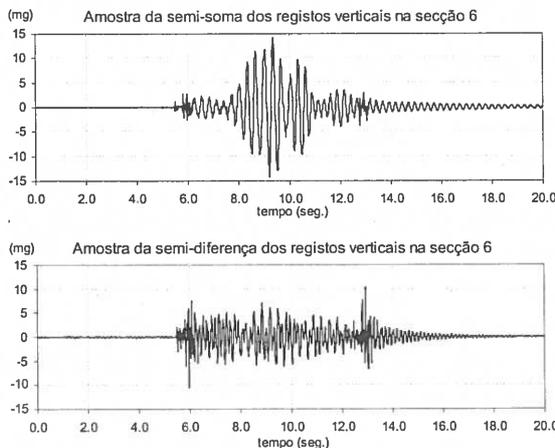


Fig. 9 – Amostras dos registos na secção 6

5.2 – Frequências e configurações dos modos de vibração da PS17

A técnica de identificação modal utilizada, foi o chamado método básico no domínio da frequência [Ventura e Brincker (2000)] ou método de detecção de picos [Andersen et al. (1999)]. Esta técnica tem sido aplicada noutros trabalhos de avaliação experimental das características dinâmicas de estruturas [Rodrigues (2000)], e é também utilizada por outros autores [Felber e Cantieni (1996)].

O método de identificação modal utilizado envolve, fundamentalmente, o cálculo de auto espectros, espectros cruzados, funções de coerência entre os registos obtidos em diferentes pontos, e estimativas das funções de resposta em frequência também entre diferentes pontos. Este método foi implementado num programa em LabView.

A determinação dos auto espectros foi efectuada utilizando a transformada de Fourier dos registos de aceleração, para a determinação da qual utilizou-se o algoritmo da transformada rápida de Fourier (FFT) implementado em Labview.

Os auto espectros $S_{xx}(f)$ e $S_{yy}(f)$ de duas séries de aceleração $x(t)$ e $y(t)$ foram então calculados através de:

$$S_{xx}(f) = X(f) \cdot X^*(f) = |X(f)|^2 \quad (1)$$

$$S_{yy}(f) = Y(f) \cdot Y^*(f) = |Y(f)|^2 \quad (2)$$

em que: $X(f)$ e $Y(f)$ são as transformadas de Fourier de $x(t)$ e de $y(t)$

$X^*(f)$ e $Y^*(f)$ são os conjugados complexos de $X(f)$ e de $Y(f)$

O espectro cruzado $S_{xy}(f)$ e a coerência $\gamma_{xy}^2(f)$ entre as duas séries de aceleração $x(t)$ e $y(t)$ foram determinados através de:

$$S_{xy}(f) = X(f) \cdot Y^*(f) \quad (3)$$

$$\gamma_{xy}^2(f) = \frac{|S_{xy}(f)|^2}{S_{xx}(f) \cdot S_{yy}(f)} \quad (4)$$

A coerência $\gamma_{xy}^2(f)$ é uma função escalar que pode assumir valores entre 0 e 1, traduzindo, no domínio da frequência, o grau de linearidade da relação entre o sinal $x(t)$ e o sinal $y(t)$. Valores próximos de 1

mostram que há uma forte relação de linearidade entre os dois sinais. A coerência tem um significado análogo ao quadrado do coeficiente de correlação utilizado em estatística [Bendat e Piersol (2000)].

Os auto espectros foram avaliados considerando a média dos espectros calculados com 28 séries independentes de 4096 valores, em que se subdividiram os registos totais. A resolução em frequência dos espectros é assim a correspondente aos 4096 valores de cada série, o que para a frequência de amostragem de 100 Hz corresponde a $\Delta f = 0,024$ Hz. Antes do cálculo dos espectros, a cada uma das séries foi aplicada uma janela de *Hanning* de forma a reduzir os efeitos de escorregamento (*leakage*).

A análise dos espectros para identificação de picos de ressonância, centrou-se apenas na gama de frequências até aos 40 Hz.

Para reunir e sintetizar a informação contida nos auto espectros avaliados com os registos obtidos nas 11 secções que foram instrumentadas, determinaram-se os correspondentes espectros normalizados médios (ANPSD).

Os espectros normalizados médios foram calculados separadamente para a semi-soma dos registos verticais (figura 10), para identificar as frequências de modos verticais, e para a semi-diferença dos registos verticais (figura 11), para identificar as frequências de modos de torção.

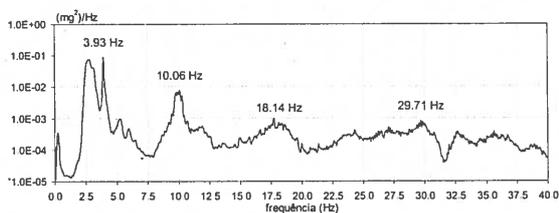


Fig. 10 – Espectro normalizado médio da semi-soma dos registos verticais

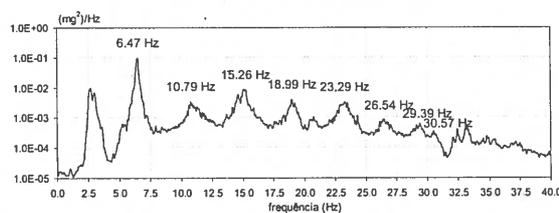


Fig. 11 – Espectro normalizado médio da semi-diferença dos registos verticais

Nas figuras 10 e 11 indicam-se também as frequências que foram consideradas como correspondentes a modos naturais de vibração da estrutura. Para a escolha dessas frequências foi feita uma análise cuidada das funções de coerência e das relações de amplitude e fase (configurações) entre as diferentes secções instrumentadas. Verificou-se assim que:

- o pico na frequência de 0,24 Hz não corresponde a um modo natural de vibração da PS17; este pico deve-se à deformada da estrutura devida às cargas rolantes (camiões carregados) que a atravessaram durante os ensaios; note-se que uma carga rolante a 30 km/h tem um período de circulação sobre o vão central (36 m) de 4,36 segs., o que corresponde a uma deformada da estrutura com uma frequência de 0,23 Hz;
- o pico bastante evidente na frequência de 2,76 Hz, também não corresponde a um modo natural de vibração da PS17; analisando este pico e o pico seguinte na frequência de 3,93 Hz, concluiu-se que ele se deve às frequências de vibração da carga dos camiões sobre os seus sistemas de suspensão (normalmente com valores entre 2 Hz e 5 Hz [Paultre et al. (1995)]); para confirmar esta hipótese, calcularam-se os espectros com uma amostra dos registos que não contem os instantes de passagem dos camiões, e verificou-se que apenas o pico a 3,93 Hz permanece nos espectros.

As configurações dos modos de vibração da PS17 foram avaliadas com base na estimativa $H_1(f)$ da função de resposta em frequência entre os registos $y(t)$ obtidos nas diversas secções instrumentadas e os registos $x(t)$ adquiridos na secção considerada como referência. A função $H_1(f)$ foi determinada através de:

$$H_1(f) = \frac{S_{xy}(f)}{S_{xx}(f)} \quad (5)$$

em que: $S_{xy}(f)$ é o espectro cruzado entre os sinais $x(t)$ e $y(t)$;

$S_{xx}(f)$ é o auto espectro do sinal $x(t)$.

O procedimento utilizado para identificação das configurações modais da PS17, consistiu então no seguinte:

- avaliação de $\gamma_{xy}^2(f)$ e de $H_i(f)$ entre os registos nas diferentes secções instrumentadas e os registos na secção de referência;
- análise dos valores de $\gamma_{xy}^2(f)$ e de $H_i(f)$ nas frequências identificadas nos auto espectros (e na sua vizinhança);
- determinação do erro aleatório normalizado $\varepsilon_r[H_i(f)]$ na avaliação de $H_i(f)$, através de [Bendat e Piersol (2000), Delaunay et al. (1998)]:

$$\varepsilon_r[H_i(f)] = \frac{\sqrt{1 - \gamma_{xy}^2(f)}}{\gamma_{xy}(f)} \sqrt{\frac{6n_d - 1}{16n_d^2}} \quad (6)$$

em que nd é o número de séries independentes sobrepostas a 50%, consideradas no cálculo de $H_i(f)$ - $nd = 28$ no caso da análise efectuada para a PS17;

- a amplitude de $H_i(f)$, considerada com o sinal da sua parte real, forneceu directamente os valores das componentes modais em cada secção relativamente à secção de referência;
- ao desenhar as componentes modais representaram-se também os respectivos intervalos de confiança a 95 %, determinados a partir de $\varepsilon_r[H_i(f)]$.

Nas figuras 12 a 23 representam-se as configurações identificadas para os modos de vibração da passagem superior PS 17.

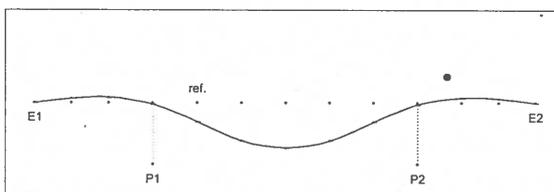


Fig. 12 - Configuração do 1º modo vertical identificado - $f = 3,93$ Hz

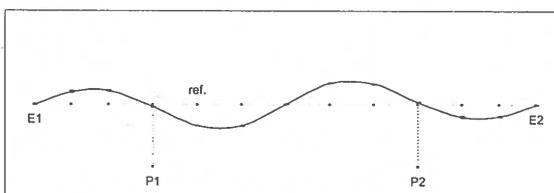


Fig. 13 - Configuração do 2º modo vertical identificado - $f = 10,06$ Hz

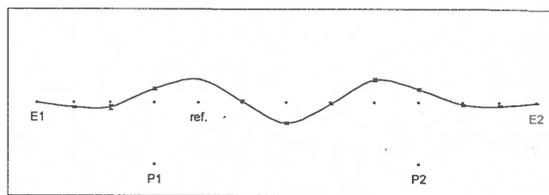


Fig. 14 - Configuração do 3º modo vertical identificado - $f = 18,14$ Hz

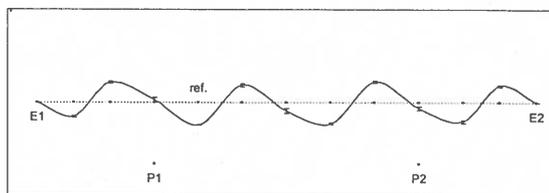


Fig. 15 - Configuração do 4º modo vertical identificado - $f = 29,71$ Hz

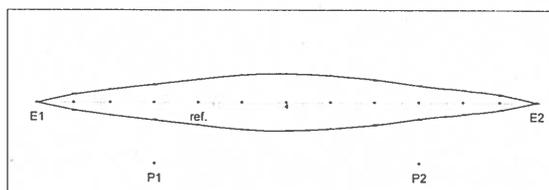


Fig. 16 - Configuração do 1º modo de torção identificado - $f = 6,47$ Hz

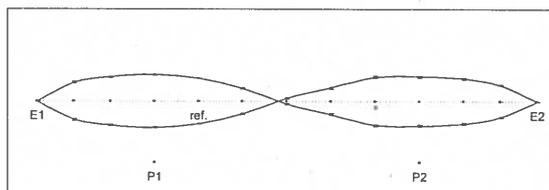


Fig. 17 - Configuração do 2º modo de torção identificado - $f = 10,79$ Hz

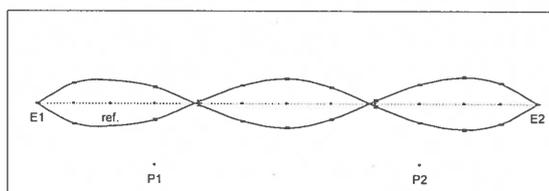


Fig. 18 - Configuração do 3º modo de torção identificado - $f = 15,26$ Hz

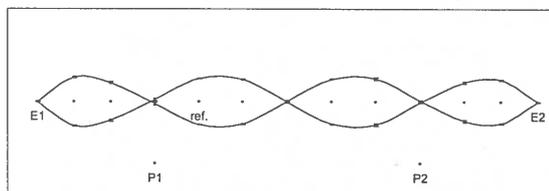


Fig. 19 - Configuração do 4º modo de torção identificado - $f = 18,99$ Hz

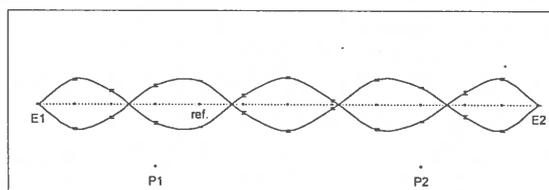


Fig. 20 - Configuração do 5º modo de torção identificado - $f = 23,29$ Hz

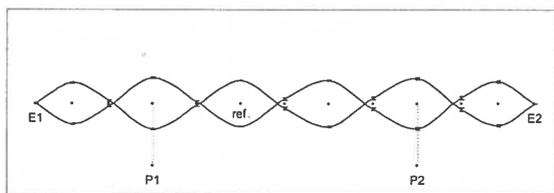


Fig. 21 – Configuração do 6º modo de torção identificado – $f = 26,54$ Hz

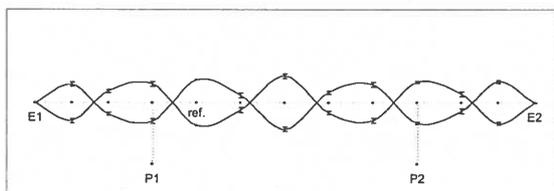


Fig. 22 – Configuração do 7º modo de torção identificado – $f = 29,39$ Hz

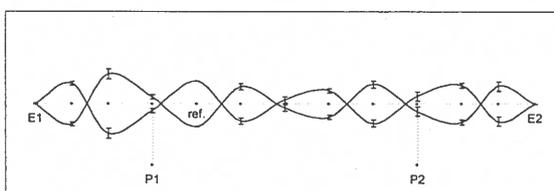


Fig. 23 – Configuração do 8º modo de torção identificado – $f = 30,57$ Hz

Na configuração identificada para o 3º modo vertical, ver figura 14, aparece uma componente vertical importante na secção sobre os pilares, note-se no entanto que os acelerómetros foram colocados aproximadamente a meio das consolas laterais da secção transversal do tabuleiro, ver figura 5. Assim, essa componente vertical na secção sobre os pilares deve-se fundamentalmente a flexão das consolas e não propriamente a deformação axial dos pilares.

5.3 – Coeficientes de amortecimento

Para estimar os coeficientes de amortecimento da PS17, utilizou-se uma técnica de ajuste dum espectro analítico aos picos de ressonância dos auto espectros das acelerações registadas nos ensaios. O espectro analítico ajustado é o correspondente à resposta em aceleração de um sistema com um grau de liberdade sujeito a uma acção de densidade espectral constante (“ruído branco”).

No quadro I indicam-se os valores estimados para os coeficientes de amortecimento (ζ), bem como os valores dos des-

vios padrão (σ_ξ) resultantes da técnica de ajuste utilizada.

Quadro I – Coeficientes de amortecimento

	f (Hz)	ξ (%)	σ_ξ (%)
modos verticais	3,93	1,20	0,13
	10,06	1,96	0,19
	18,14	0,42	0,34
	29,71	2,21	0,61
modos de torção	6,47	1,38	0,10
	10,79	3,04	0,47
	15,26	1,20	0,11
	18,99	1,92	0,41
	23,29	2,12	0,19
	26,54	1,61	0,15
	29,39	2,46	0,24
30,57	0,16	0,03	

6 – COMPARAÇÃO COM UM MODELO DA ESTRUTURA

Em paralelo com o trabalho de caracterização dinâmica experimental da estrutura, desenvolveu-se também um modelo de elementos finitos da PS17. Na fase de planeamento dos ensaios, este modelo constituiu um elemento importante para a escolha da secção de referência e de todas as secções a instrumentar. Os resultados obtidos com o modelo ajudaram também na interpretação dos resultados experimentais.

O modelo elaborado é um modelo espacial, sendo constituído por: 128 elementos de casca para as consolas laterais do tabuleiro; 12 elementos de barra para os pilares; 180 elementos de barra para o tabuleiro; e, 4 elementos de ligação para os aparelhos de apoio nos encontros. No total, o modelo tem 1050 graus de liberdade.

No modelo desenvolvido, representado na figura 24, as fundações dos 2 pilares foram consideradas como apoios rígidos. Foram ainda admitidas as seguintes características:

- módulo de elasticidade, $E = 35,0$ GPa para todos os elementos estruturais;
- rigidez dos aparelhos de apoio nos encontros:
 - $k_L = 4 \times 10^3$ kN/mm (longitudinal);

- $k_T = 1 \times 10^7$ kN/mm (transversal);

- $k_v = 1 \times 10^{12}$ kN/mm (vertical);

- para além da massa da estrutura, considerou-se ainda a massa correspondente às restantes cargas permanentes, com um valor de 173 kg/m^2 .

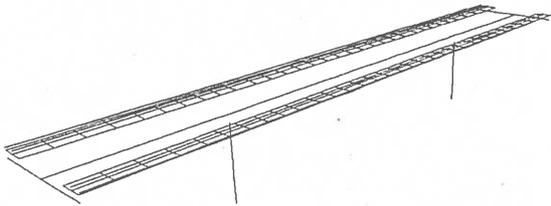


Fig. 24 - Modelo de elementos finitos

Na figura 25 comparam-se as frequências identificadas experimentalmente com as calculadas com o modelo.

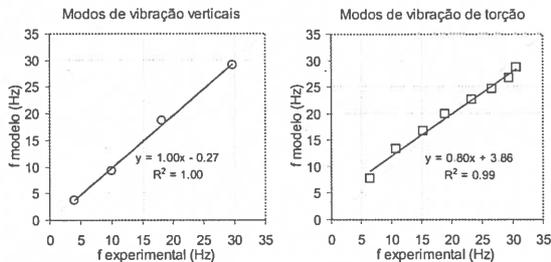


Fig. 25 - Frequências experimentais e calculadas com o modelo de elementos finitos

Nas figuras 26 a 37 representam-se as configurações modais calculadas com o modelo, correspondentes aos modos de vibração identificados experimentalmente.

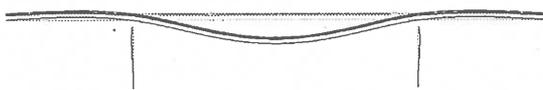


Fig. 26 - Configuração calculada - $f = 3,67$ Hz

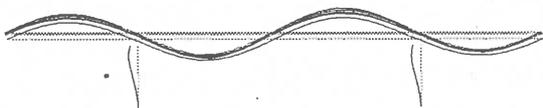


Fig. 27 - Configuração calculada - $f = 9,26$ Hz

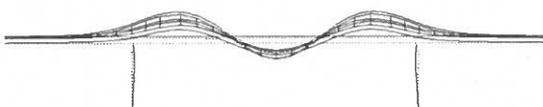


Fig. 28 - Configuração calculada - $f = 18,62$ Hz

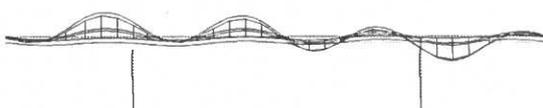


Fig. 29 - Configuração calculada - $f = 29,04$ Hz

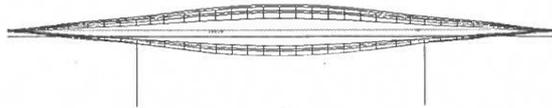


Fig. 30 - Configuração calculada - $f = 7,72$ Hz

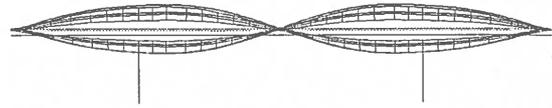


Fig. 31 - Configuração calculada - $f = 13,31$ Hz

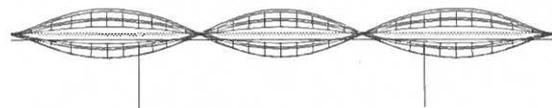


Fig. 32 - Configuração calculada - $f = 16,73$ Hz

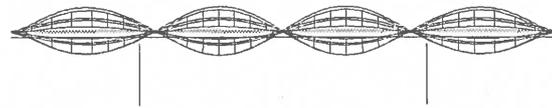


Fig. 33 - Configuração calculada - $f = 19,99$ Hz

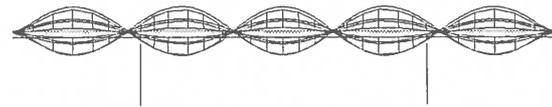


Fig. 34 - Configuração calculada - $f = 22,65$ Hz

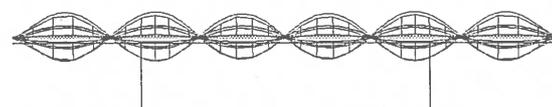


Fig. 35 - Configuração calculada - $f = 24,72$ Hz

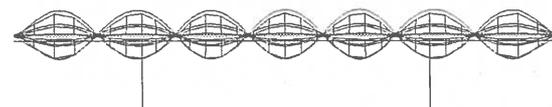


Fig. 36 - Configuração calculada - $f = 26,66$ Hz

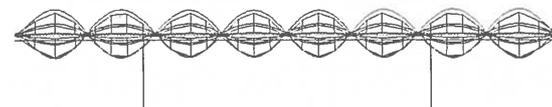


Fig. 37 - Configuração calculada - $f = 28,77$ Hz

Para comparar as configurações identificadas experimentalmente com as calculadas com o modelo de elementos finitos, determinaram-se também os coeficientes MAC que exprimem a correlação entre ambas as configurações (valores de 1 indicam uma correlação perfeita e de 0 exprimem a existência de uma má correlação). Nas figuras 38 e 39 apresentam-se os valores obtidos.

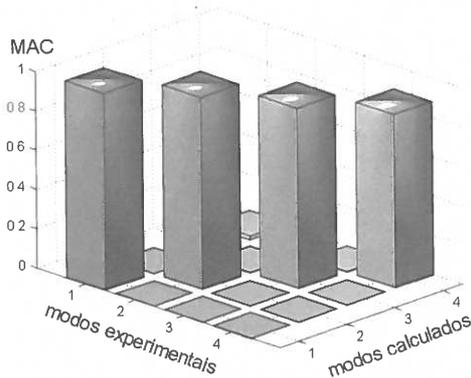


Fig. 38 – Coeficientes MAC para modos verticais

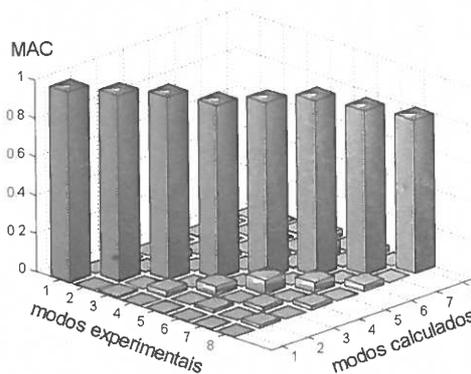


Fig. 39 – Coeficientes MAC para modos de torção

7 - CONCLUSÕES

Com base na análise de registos de acelerações obtidos em ensaios realizados *in-situ*, foram identificadas as características de 12 modos de vibração da PS17.

As características dinâmicas identificadas experimentalmente foram também comparadas com as avaliadas com um modelo de elementos finitos, verificando-se uma boa concordância entre resultados experimentais e analíticos.

As características dinâmicas identificadas com base nos ensaios realizados, constituem um contributo importante para a caracterização global do comportamento e do estado da PS17, após as obras de construção e no início da sua utilização. O acompanhamento da evolução dessas características dinâmicas ao longo da vida da obra permitirá avaliar a evolução do estado da estrutura, podendo ser efectuado através da realização de ensaios de medição de vibrações ambiente (que poderão ser realiza-

dos sem qualquer interrupção do seu funcionamento normal).

AGRADECIMENTOS

Ao Eng.º Jorge Pires da BRISA pelo apoio e fornecimento de elementos necessários à realização deste trabalho. Ao Eng.º João Falcão do LNEC e aos experimentadores Armindo António e José Maria Fidalgo, pela sua colaboração nos ensaios.

Os métodos de identificação modal aplicados neste estudo, foram desenvolvidos no âmbito do projecto Europeu FUDIDCOEEF e do projecto de investigação programada do LNEC, 35/11/14745 - Identificação Dinâmica de Estruturas de Engenharia Civil.

REFERÊNCIAS

- Rodrigues, J., Ensaio de Caracterização Dinâmica da Passagem Superior PS17 do Sublanço S^{ta}. Eulália - Coimbra (Norte) da Auto-Estrada A14, Relatório 1/2001 NOE/NAE, LNEC, 2001
- Ventura, C. e Brincker, R., Modal Identification of Output Only Systems – Course Notes, Short Course, Universidad Politecnica de Madrid, 5 e 6 de Junho, 2000
- Andersen, P., Brincker, R., Peeters, B., De Roeck, G., Hermans, L., Kramer, C., Comparison of System Identification Methods Using Ambient Bridge Test Data, IMAC XVII, Kissimmee, EUA, 1999
- Rodrigues, J., Ensaio de Caracterização Dinâmica da Ponte Salgueiro Maia Sobre o Rio Tejo em Santarém, Relatório 271/2000 – NOE/NAE, LNEC, 2000
- Felber, A. e Cantieni, R., Advances in Ambient Vibration Testing: Ganter Bridge, Switzerland, Structural Engineering International 3/96, IABSE, págs. 187-190, 1996
- Bendat, J. S. e Piersol, A. G., Random Data - Analysis and Measurement Procedures, 3rd edition, Wiley Series in Probability and Statistics, John Wiley & Sons, Inc., 2000
- Paultre, P., Proulx, J., Talbot, M., Dynamic Testing Procedures for Highway Bridges Using Traffic Loads, Journal of Structural Engineering, Vol. 121, N. 2, ASCE, págs. 362-376, 1995
- Delaunay, D., Grillaud, G., Biétry, J., Sacré, C., Wind Response of Long-Span Bridges: In-Situ Measurements and Modal Analysis, IMAC XVII, Kissimmee, EUA, 1999

