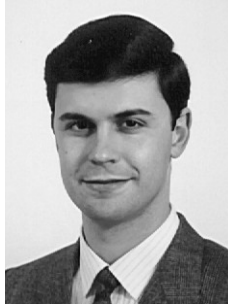


ENSAIOS ESTÁTICOS E DINÂMICOS DA PONTE SOBRE O RIO CORGO



L. O. SANTOS
Investigador Auxiliar
LNEC
Lisboa



J. RODRIGUES
Assist. Investigação
LNEC
Lisboa



XU MIN
Doutora Eng. Civil
LNEC
Lisboa

SUMÁRIO

Apresentam-se os ensaios de carga estáticos e dinâmicos a que foi submetida a ponte sobre o rio Corgo no final da construção. Caracterizam-se as solicitações a que a estrutura foi sujeita, descreve-se a instrumentação instalada e apresentam-se alguns dos resultados obtidos que são comparados com os resultados obtidos através do modelo numérico utilizado.

1. INTRODUÇÃO

A Ponte sobre o rio Corgo é uma estrutura de betão armado pré-esforçado, integrada no lanço Vila Real - Régua do IP 3, que vence o vale do rio Corgo. A obra apresenta uma acentuada curvatura em planta (Figura 1) e é constituída por uma superestrutura contínua, formada por dois tabuleiros em caixão unicelular, cuja directriz tem um comprimento de 625 metros entre eixos de apoio extremos, que se divide em três tramos interiores com vãos de 145 m e em vãos extremos de 95 m. Em cada tabuleiro os apoios intermédios são materializados por um pilar, cuja altura máxima é de 67 m. A descrição detalhada da estrutura bem como do seu processo construtivo é apresentada por Rito *et al* [1].

No final da construção, em Fevereiro de 2004, foram realizados ensaios estáticos e dinâmicos. Os ensaios estáticos incidiram apenas sobre o tabuleiro direito, destinado ao tráfego descendente, tendo particular interesse a utilização de acelerómetros para a medição de rotações conjuntamente com clinómetros eléctricos e mecânicos, para além da medição de deslocamentos verticais através de nivelamento hidrostático. Os ensaios dinâmicos realizados em ambos os tabuleiros permitiram a determinação da frequência e configuração dos principais modos de vibração.



Figura 1: Vista geral da Ponte sobre o rio Corgo

2. MODELO NUMÉRICO

Com o objectivo de estimar e interpretar os resultados obtidos durante os ensaios foi analisado o comportamento da estrutura através de um modelo numérico tridimensional [2], tendo-se efectuado os cálculos correspondentes às situações de ensaio a que a estrutura foi sujeita.

A definição da estrutura foi efectuada com base nas características geométricas definidas no projecto [3]. O tabuleiro foi modelado através de elementos finitos de casca e os pilares foram modelados através de elementos de barra, tendo sido devidamente consideradas as armaduras passivas. Os pilares foram considerados perfeitamente encastrados na base, tendo-se utilizado elementos de ligação não linear para modelar os aparelhos de apoio existentes na ligação entre o tabuleiro e o pilar P4.

3. ENSAIOS ESTÁTICOS

3.1 Ensaios realizados

A realização dos ensaios estáticos foi dividida em duas fases: na primeira fase recorreu-se a uma carga concentrada, constituída por uma linha de três camiões carregados, perfazendo uma carga total de 789 kN, com a qual se pretendeu determinar uma linha de influência das diversas grandezas observadas; na segunda fase utilizou-se uma carga distribuída materializada por doze camiões dispostos em três colunas (Figura 2), constituindo uma carga total de 3114 kN. Foram ainda efectuados alguns carregamentos excêntricos (Figura 3).

3.2 Instrumentação

No planeamento deste ensaio houve o cuidado de utilizar equipamento com alguma redundância, combinando diferentes tipos de equipamentos, de forma a possibilitar a aferição



Figura 2: Comboio de carga

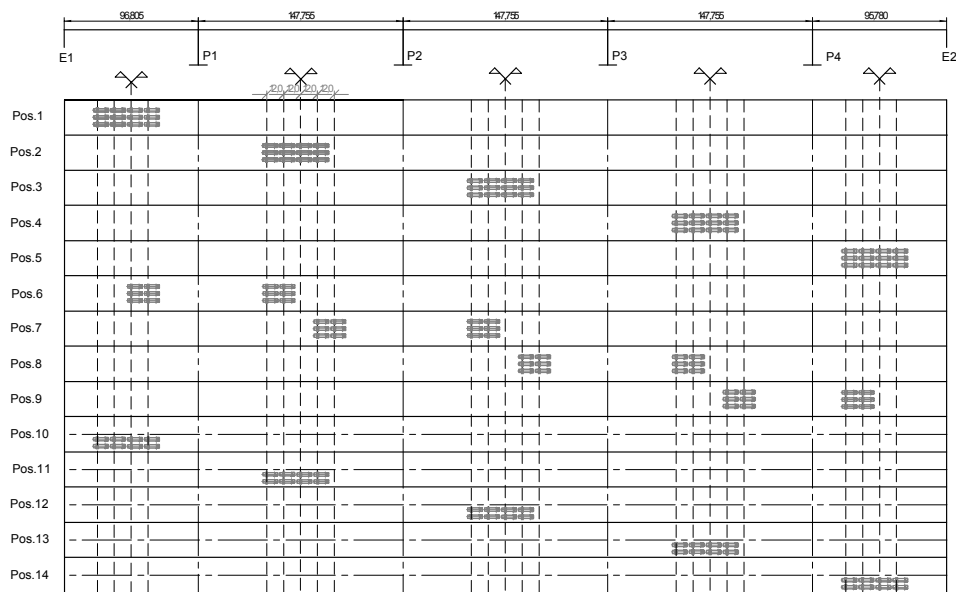


Figura 3: Posições ocupadas pelo comboio de carga durante o ensaio

dos resultados obtidos. Esta preocupação foi particularmente acentuada na medição das rotações, dado o carácter inovador da metodologia utilizada.

A medição de deslocamentos verticais foi realizada através de três sistemas de nivelamento hidrostático, associados a células de pressão, centrados no topo dos pilares P1, P3 e P4, que mediram os deslocamentos nos tramos adjacentes. Nas secções de meio vão foram colocadas duas células, uma a jusante e outra a montante, tal como está representado na Figura 4. No tramo entre o pilar P4 e o encontro E2 foram também utilizados deflectómetros registadores.

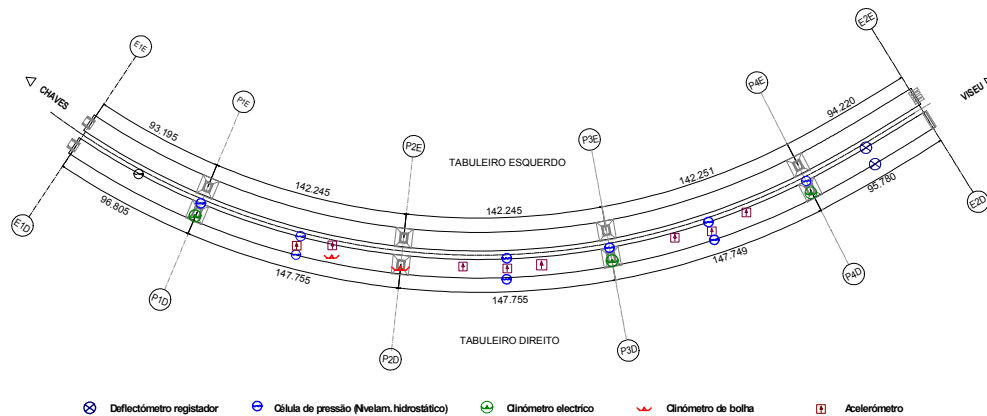


Figura 4: Plano geral de instrumentação durante o ensaio estático

A medição de rotações longitudinais e transversais no topo dos pilares foi efectuada através de clinómetros eléctricos (P1, P3 e P4) e de clinómetros de bolha de ar (P2). Foram ainda utilizados acelerómetros uniaxiais do tipo *force-balance* para medir a rotação nas secções de $\frac{1}{2}$ e $\frac{1}{4}$ de vão dos tramos entre os pilares P1 e P4. Este procedimento é bastante interessante por permitir utilizar no ensaio estático equipamento que só seria utilizado no ensaio dinâmico.

A aquisição das leituras efectuadas pelas células de pressão do sistema de nivelamento hidrostático, dos clinómetros eléctricos e dos pares termoelectrónicos foi efectuada através de três *dataloggers*, permitindo centralizar estas medições num computador portátil. A aquisição dos acelerómetros foi efectuada pelo sistema de aquisição utilizado nos ensaios dinâmicos.

3.3 Resultados

Os ensaios realizados proporcionaram um volume considerável de informação, pelo que do conjunto dos resultados obtidos se seleccionaram apenas alguns considerados mais relevantes. Assim, das linhas de influência obtidas através do posicionamento sucessivo ao longo do tabuleiro da carga de faca constituída por três camiões, apresenta-se na Figura 6 a linha de influência relativa ao deslocamento vertical na secção de $\frac{1}{2}$ vão do tramo entre os pilares P2 e P3, enquanto que na Figura 6 se incluem três linhas de influência referentes à rotação longitudinal do tabuleiro: a dois terços do tramo P1-P2, a meio vão do tramo P3-P4 e sobre o pilar P4. Nestas figuras, além dos valores experimentais, está representada, em contínuo, a linha de influência resultante do modelo de cálculo idealizado. A análise destas figuras evidencia a boa concordância entre os valores experimentais e calculados.

A utilização do comboio de carga constituído por dozes camiões induziu esforços e deformações muito significativas na estrutura, apresentando-se na Figura 7 os valores medidos quando os camiões estavam posicionados no tramo central (P2-P3), bem como a deformada resultante do modelo de cálculo. Também aqui é evidente a boa concordância entre os valores medidos através do sistema de nivelamento hidrostático e os valores calculados.

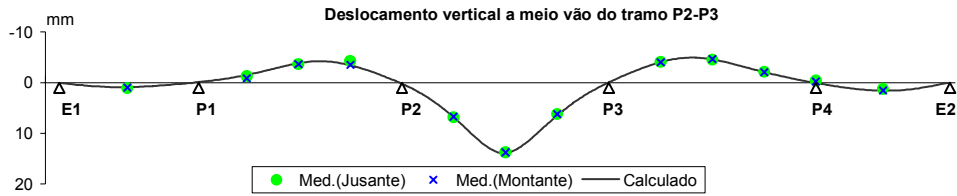


Figura 5: Linhas de influência do deslocamento vertical na secção de meio vão do tramo P2-P3

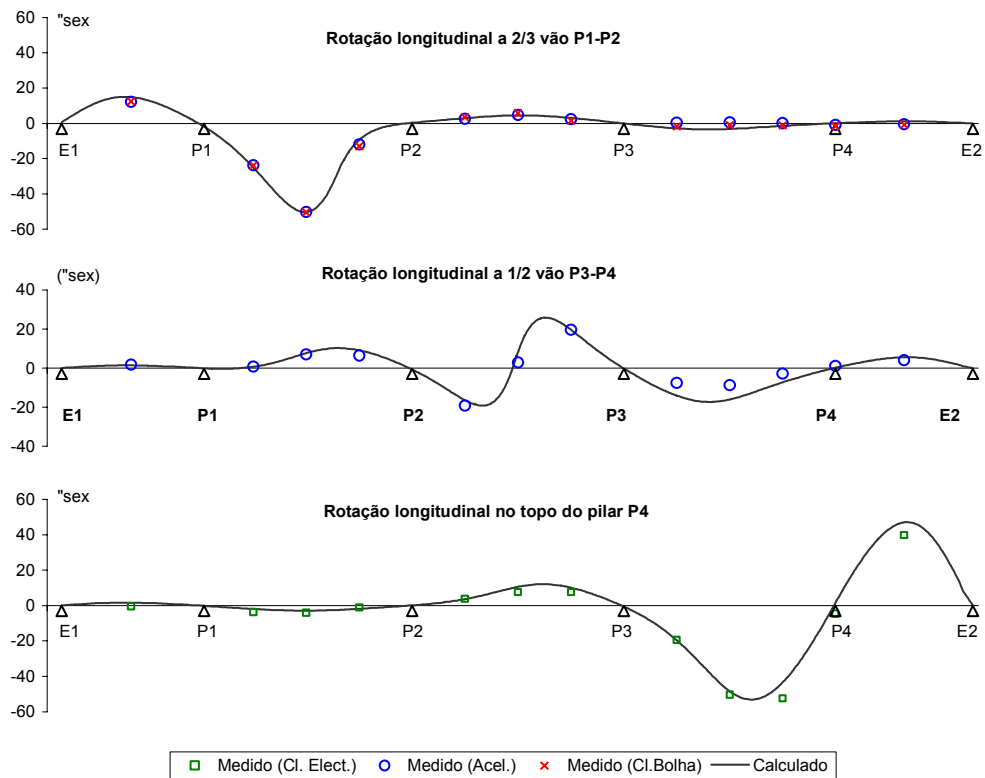


Figura 6: Linhas de influência da rotação longitudinal

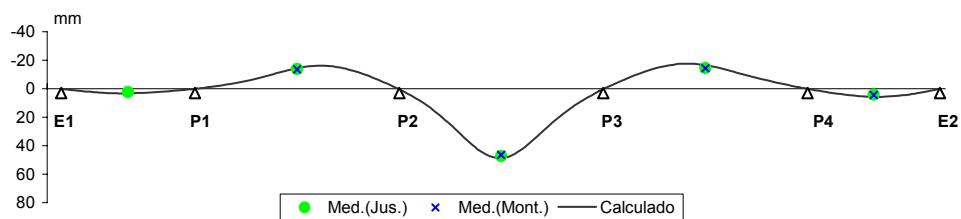


Figura 7: Deformada do tabuleiro para a posição de carga 3

4. ENSAIOS DINÂMICOS

4.1 Ensaios realizados

Os ensaios dinâmicos tiveram como objectivo a avaliação experimental das frequências, configurações e coeficientes de amortecimento dos principais modos de vibração dos dois tabuleiros da ponte sobre o rio Corgo. Em cada tabuleiro foram efectuados cinco ensaios de medição de acelerações induzidas pelas acções ambientais. Nestes ensaios, três transdutores permaneceram numa secção escolhida para referência, enquanto os restantes foram sendo colocados em diversas secções ao longo do tabuleiro. No total foram instrumentadas, dentro do caixão, 27 secções em cada tabuleiro. 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 total de 30 minutos.

4.2 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:

- remoção das componentes contínuas ou de tendências lineares;
- filtragem passa-baixo a 6,25 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 15,625 Hz.

Para a identificação das frequências, coeficientes de amortecimento e configurações dos modos de vibração dos tabuleiros, foi utilizado o método aperfeiçoado de decomposição no domínio da frequência (EFDD) implementado no programa *ARTEMIS – Output-only modal identification*. Para a aplicação do método EFDD foram estimadas as funções de densidade espectral dos registos de acelerações, considerando amostras com 2048 valores o que corresponde a uma resolução em frequência de 0,0076 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 que são apresentados na Figura 8.

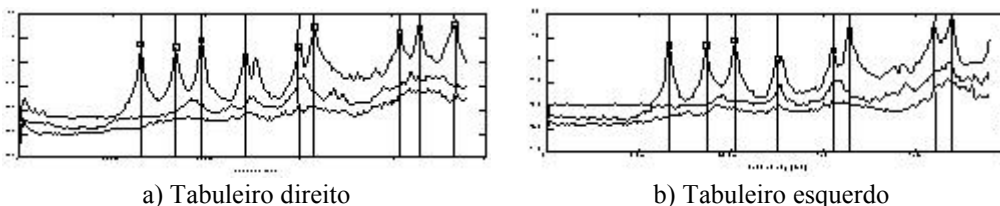


Figura 8: Espectros de valores singulares da matriz de funções de densidade espectral

Analisando os espectros de valores singulares e os vectores singulares correspondentes aos seus picos de ressonância, foram identificados 24 e 18 modos de vibração, nos tabuleiros direito e esquerdo, respectivamente.

Na tabela 1 estão indicados os valores das frequências e coeficientes de amortecimento dos 8 primeiros modos identificados para cada um dos tabuleiros, apresentando-se também as frequências calculadas com os modelos de elementos finitos.

Tabela 1 Frequências e coeficientes de amortecimento experimentais e frequências calculadas

tipo de modo	Tabuleiro direito			Tabuleiro esquerdo		
	Ensaio		Modelo	Ensaio		Modelo
	f (Hz)	ξ (%)	f (Hz)	f (Hz)	ξ (%)	f (Hz)
trans. 1	0,52	0,98	0,52	0,53	1,03	0,55
trans. 2	0,67	1,04	0,67	0,69	0,90	0,70
vert. 1	0,78	0,70	0,74	0,82	0,70	0,80
trans. 3	0,97	0,88	1,02	1,00	0,79	1,06
trans. 4	1,20	0,66	1,18	1,24	0,64	1,26
vert. 2	1,27	0,72	1,22	1,31	0,61	1,31
vert. 3	1,63	0,66	1,55	1,68	0,62	1,64
vert. 4	1,72	0,61	1,81	1,75	0,88	1,93

Algumas das configurações modais identificadas são apresentadas na figura 9. Note-se que as configurações identificadas para os modos de vibração de cada um dos tabuleiros são muito semelhantes, sendo representadas na figura 9 as configurações relativas ao tabuleiro esquerdo.

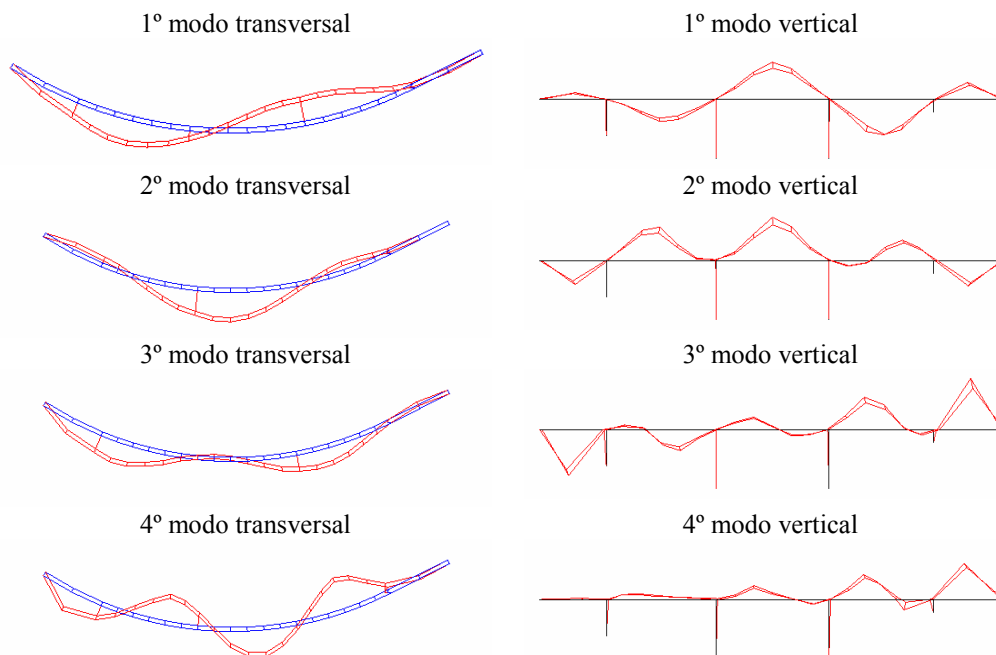


Figura 9: Configurações identificadas para alguns modos de vibração

5. CONCLUSÕES

Nesta comunicação descreveram-se e apresentaram-se os resultados obtidos nos ensaios estáticos e dinâmicos efectuados na ponte sobre o rio Corgo. Para além da realização do trabalho experimental foi também desenvolvido um modelo numérico tridimensional cujos resultados foram comparados com os valores experimentais.

Obeve-se uma boa concordância entre os valores medidos e os calculados com o modelo numérico, tanto no que se refere aos ensaios estáticos como aos ensaios dinâmicos.

A utilização de acelerómetros do tipo *force-balance* para a medição de rotações em regime estático revelou ser uma técnica fiável que foi comprovada por outros equipamentos. Na medição de deslocamentos verticais, o sistema de nivelamento hidrostático associado a células de pressão, demonstrou a sua eficácia, tal como em trabalhos realizados anteriormente [6].

A avaliação das características dinâmicas dos tabuleiros da ponte sobre o rio Corgo 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 de ambas as estruturas. É ainda de salientar que através das técnicas utilizadas foi possível distinguir as diferenças existentes nas frequências dos modos de vibração dos dois tabuleiros da ponte, resultantes das diferenças entre os seus vãos.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem os apoios recebidos para a realização deste trabalho, nomeadamente por parte do Eng^o Armando Rito, projectista da obra, e da Norinter, empresa construtora.

7. REFERÊNCIAS

- [1] Rito, A.; Cabral, P.; Bispo, S.; Monteiro, M. – “A construção da Ponte sobre o rio Corgo”, *Betão Estrutural 2004*, FEUP, Porto, 2004.
- [2] CSI, *SAP2000 – Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures*, 2000.
- [3] Rito, A. – IP3-SCUT Interior Norte: Ponte sobre o rio Corgo. Projecto de execução, 2001.
- [4] Structural Vibration Solutions (SVS) – *ARTeMIS Extractor Handy*, Release 3.1, Denmark, 2002.
- [5] Rodrigues, J. – *Identificação Modal Estocástica. Métodos de Análise e Aplicações em Estruturas de Engenharia Civil*, Dissertação de doutoramento, FEUP, Porto, 2004.
- [6] Santos, L. O.; Xu, M.; Fernandes, J. A. – “Ensaio de Carga da Ponte Salgueiro Maia”, *Betão Estrutural 2002*, LNEC, Lisboa, 2002.