

Ensaaios Estáticos e Dinâmicos da Ponte sobre o Rio Lis na Auto-Estrada A17



Jorge Rodrigues¹



Máira Ledesma²

RESUMO

Antes da sua entrada em serviço, a Ponte sobre o Rio Lis, na auto-estrada A17, foi submetida a ensaios estáticos e dinâmicos, efectuados com vista a avaliar o seu comportamento sob a acção de cargas estáticas significativas e a identificar as suas características dinâmicas. Para além do trabalho experimental, o estudo desenvolvido nesta obra de arte, envolveu também a elaboração dum modelo de elementos finitos da estrutura, o qual constituiu um elemento de apoio importante para a preparação dos ensaios e para a interpretação dos seus resultados.

Nos ensaios estáticos mediram-se deslocamentos verticais, rotações e extensões. Para tal, utilizaram-se deflectómetros registadores de funcionamento mecânico, clinómetros de gravidade e extensómetros de fibra óptica. Aplicaram-se cargas verticais, materializadas através de doze camiões carregados perfazendo um peso total de cerca de 3450 kN.

No que se refere aos ensaios dinâmicos, foram efectuados ensaios de registo de vibrações ambiente (devidas essencialmente à acção do vento) e também ensaios de passagem de camiões carregados, que circularam sobre a ponte com velocidades de 20, 40, 60 e 80 km/h.

Na presente comunicação descrevem-se os ensaios realizados na Ponte sobre o Rio Lis e apresentam-se alguns dos valores medidos nos ensaios estáticos e algumas das características dinâmicas identificadas através da análise dos registos medidos nos ensaios dinâmicos.

PALAVRAS-CHAVE

Ensaio e monitorização de pontes, observação do comportamento estático, ensaios dinâmicos, identificação modal, acção do tráfego rodoviário.

¹ Investigador Auxiliar - LNEC, Departamento de Estruturas, 1700-066 Lisboa, Portugal. jorge.rodrigues@lnec.pt

² Bolseira - LNEC, Departamento de Estruturas, 1700-066 Lisboa, Portugal. mledesma@lnec.pt

1. INTRODUÇÃO

Os ensaios *in situ* para verificação do comportamento estrutural de pontes rodoviárias recentemente construídas têm grande interesse para a validação de hipóteses e modelos estruturais considerados no projecto dessas obras, e também para a caracterização do seu estado inicial, com base na qual se poderá efectuar um acompanhamento mais adequado dessas estruturas ao longo da sua vida. Para além da observação e verificação do comportamento estrutural, os ensaios realizados *in situ* permitem também caracterizar melhor os efeitos das acções a que as obras estão sujeitas, como, por exemplo, os efeitos dinâmicos do tráfego rodoviário.

Esta comunicação refere-se assim aos ensaios estáticos e dinâmicos realizados numa obra de arte, a Ponte sobre o rio Lis integrada na auto-estrada A-17, relatando as técnicas de ensaio e os métodos aplicados na análise da informação experimental. Os resultados observados nos ensaios, ou decorrentes do processamento da informação neles obtida, são também comparados com os calculados com um modelo de elementos finitos da estrutura.

Note-se que na obra em causa, para além de equipamentos de observação e técnicas de ensaio, de cuja aplicação já se dispõe de uma experiência considerável, utilizaram-se também extensómetros de fibra óptica, de tipo *Rede de Bragg*, colocados numa secção do tabuleiro da ponte.

2. DESCRIÇÃO DA PONTE SOBRE O RIO LIS

A Ponte sobre o Rio Lis [1], integrada no sublanço Marinha Grande / Monte Redondo da auto-estrada A17, é uma obra de betão armado pré-esforçado com um comprimento total de 220 m, que se divide em três tramos de, respectivamente, 60 m, 100 m e 60 m (ver 'Fig. 1').

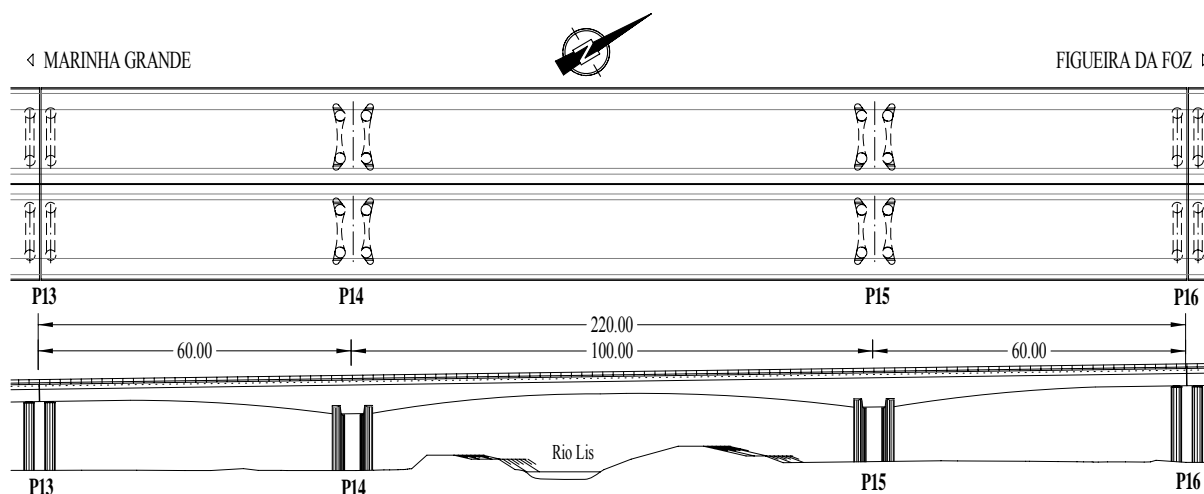


Figura 1. Planta e alçado da Ponte sobre o Rio Lis.

A secção transversal do tabuleiro da ponte tem uma largura de 18,10 m e é constituída por uma viga caixão unicelular, com duas almas com 0,45 m de espessura, as quais estão ligadas inferiormente por uma laje de espessura variável desde 0,60 m junto aos pilares até 0,25 m nos vãos, e superiormente pela laje que comporta a faixa de rodagem, as bermas e os passadiços. Esta laje é de secção variável com 0,65 m, nos esquadros junto às almas e constante, com 0,35 m de espessura, na zona correspondente ao interior do caixão. As consolas são também de secção variável entre 0,50 m junto ao encastramento nas almas e 0,20 m nas suas extremidades. Estas suportam, além de uma parte da faixa de rodagem, os perfis de segurança, os passadiços, as vigas de bordadura e as guardas.

O tabuleiro rodoviário da ponte compreende uma zona de passadiço com 0,95 m, uma berma exterior de 3,00 m, três faixas de rodagem com 3,75 m cada uma, uma berma interior de 1,00 m e uma zona de separador central com 1,90 m.

Na ‘Fig. 2’ apresentam-se duas secções transversais do tabuleiro, à esquerda a secção a meio vão do tramo central e à direita a secção junto ao apoio dos pilares P14 e P15.

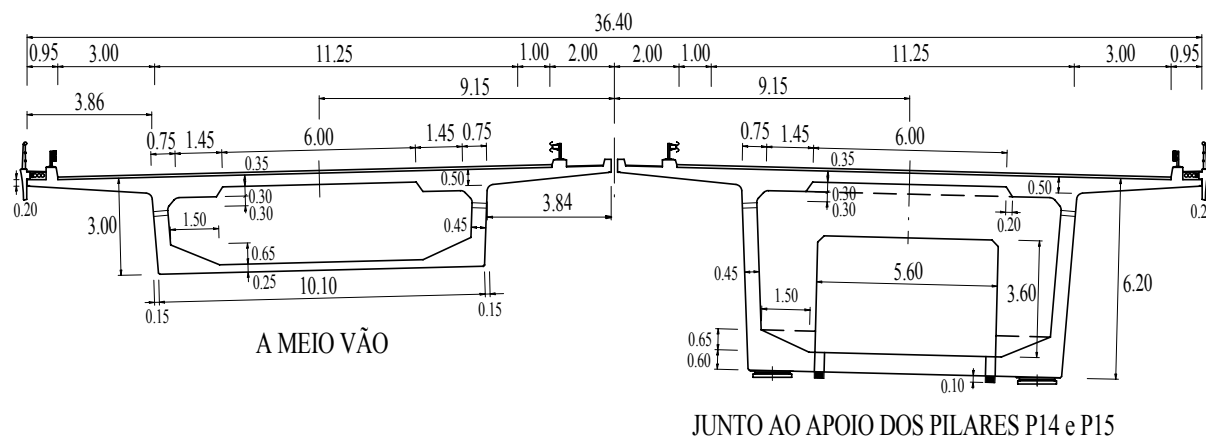


Figura 2. Secções transversais do tabuleiro da Ponte sobre o Rio Lis.

Os pilares centrais (P14 e P15) são em betão armado e dão continuidade às estacas de fundação, isto é, as estacas são, elas próprias, os pilares. Em cada um desses pilares há quatro estacas com 2,00 m de diâmetro. O tabuleiro apoia no coroamento desses pilares através de aparelhos de apoio do tipo "pot-bearing", os quais são fixos em ambas as direcções.

Na transição da ponte para os viadutos de acesso existem dois grupos paralelos de pilares, afastados longitudinalmente de 4,00 m. Transversalmente distam de 9,10 m entre eixos e são ligados por travessas de betão armado a cerca de 0,50 m abaixo do terreno natural. A sua secção é circular com 2,00 m de diâmetro. A ligação do tabuleiro aos pilares de transição é efectuada através de aparelhos de apoio do tipo "pot-bearing", os quais são livres na direcção longitudinal e fixos na direcção transversal.

Relativamente aos materiais, o projecto [1] preconizou a utilização de aço da classe A500 NR em todas as peças de betão armado. Nas armaduras de pré-esforço utilizou-se aço da classe Y1860S7. O betão utilizado é da classe C30/37 para as fundações e pilares e da classe C40/50 para a viga caixão.

3. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS DA PONTE SOBRE O RIO LIS

Para auxiliar a preparação e interpretação dos resultados dos ensaios, o comportamento estrutural da Ponte sobre o Rio Lis foi analisado através de um modelo numérico tridimensional, desenvolvido com o programa SAP2000 [2]. Este modelo foi utilizado para calcular os deslocamentos e esforços na estrutura quando solicitada pelos diversos carregamentos considerados nos ensaios estáticos, assim como para determinar as frequências e as configurações dos seus modos naturais de vibração. Um dos aspectos importantes da utilização do modelo foi a comparação dos efeitos das cargas de ensaio com os das sobrecargas rodoviárias regulamentares [3] para as quais a estrutura foi projectada.

No modelo elaborado, a estrutura da ponte é simulada com elementos de barra e elementos de casca (ver a ‘Fig. 3’ onde os elementos do modelo são representados com expressão do seu volume). Os elementos de barra são utilizados para modelar o esquadro nos vértices inferiores da viga caixão, os

pilares e os lancis. Os elementos de casca são utilizados para modelar as almas, os banzos e as consolas laterais da viga caixão do tabuleiro.

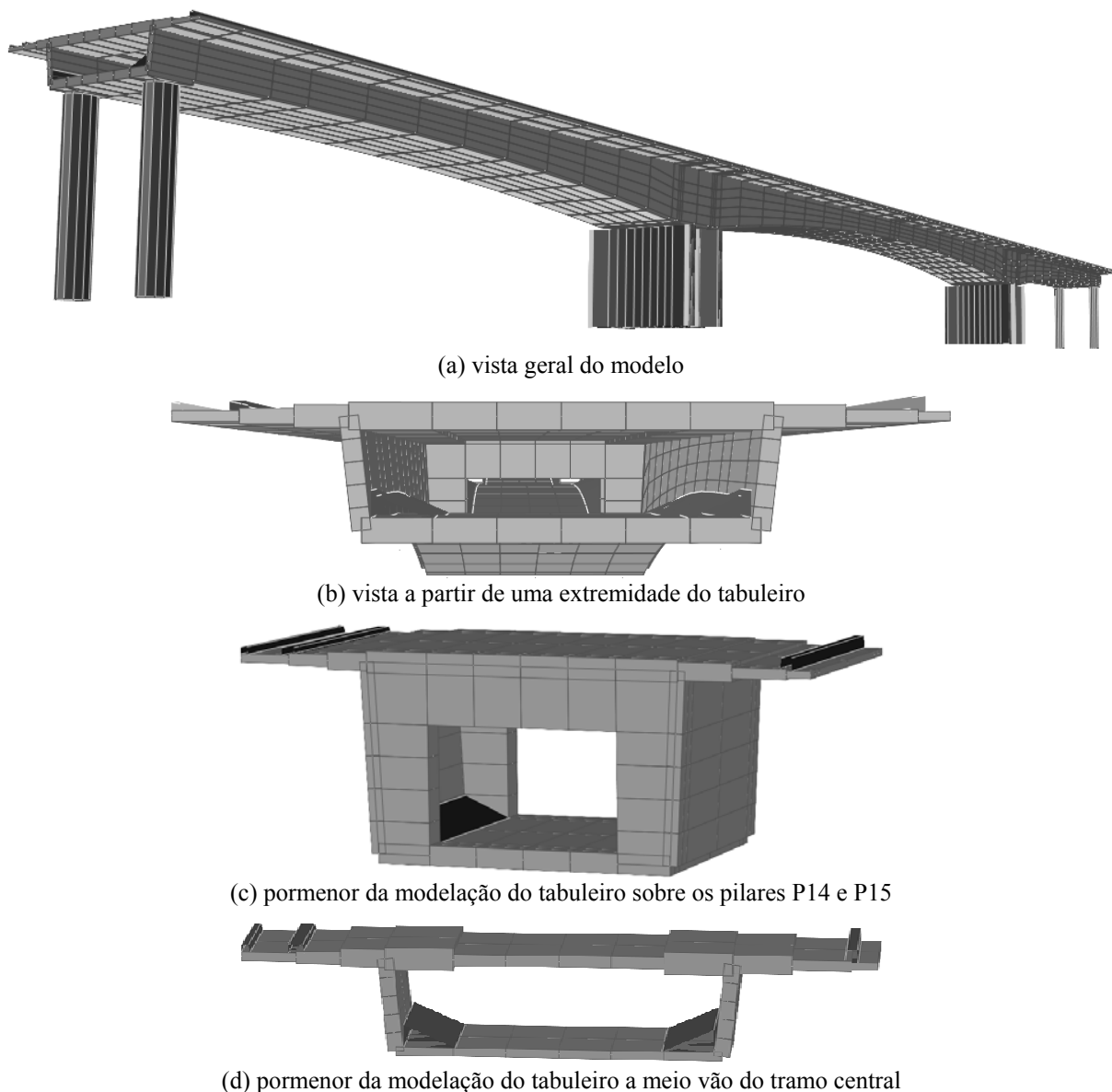


Figura 3. Alguns aspectos do modelo de elementos finitos da Ponte sobre o Rio Lis.

No modelo considerou-se um módulo de elasticidade de 42 GPa para a viga caixão e os lancis e de 38 GPa para os pilares. Com estes valores obteve-se um bom ajuste entre os valores calculados com o modelo e os resultados dos ensaios estáticos e dinâmicos.

A ligação do tabuleiro aos pilares e aos pilares de transição é modelada através de elementos de tipo “link”, que simulam o funcionamento dos aparelhos de apoio, que, neste caso, são em número de dois em cada secção de apoio. Nos pilares centrais da ponte esses elementos foram considerados como rígidos em ambas as direcções horizontais, enquanto que nos pilares de transição foram considerados como rígidos na direcção transversal e com uma rigidez de 10^6 kN/m na direcção longitudinal.

As fundações dos pilares e dos pilares de transição são modeladas com apoios elásticos (“spring”) com rigidez de, respectivamente, 3×10^7 kN.m/rad e 10^7 kN.m/rad, para a rotação longitudinal e com apoios rígidos para os demais graus de liberdade.

4. ENSAIOS ESTÁTICOS

4.1 Descrição geral dos ensaios estáticos

Os ensaios estáticos tiveram como objectivo a avaliação do comportamento estrutural da ponte quando sujeita a cargas estáticas significativas, posicionadas de forma a introduzir esforços com valores importantes em diversos dos seus elementos, mas que não fossem passíveis de provocar fendilhação precoce.

As cargas utilizadas nos ensaios estáticos foram materializadas através de doze camiões, com um peso médio de 288 kN cada um. A carga máxima aplicada à estrutura foi assim de cerca de 3450 kN.

Os ensaios estáticos consistiram num total de doze posições de carga. Nas primeiras sete posições (ver 'Fig. 4') procurou-se maximizar os esforços axiais nos pilares e os momentos flectores no tabuleiro, a meio vão dos três tramos, e também nas secções sobre os pilares. As últimas seis posições de carga consistiram na aplicação de cargas excêntricas.

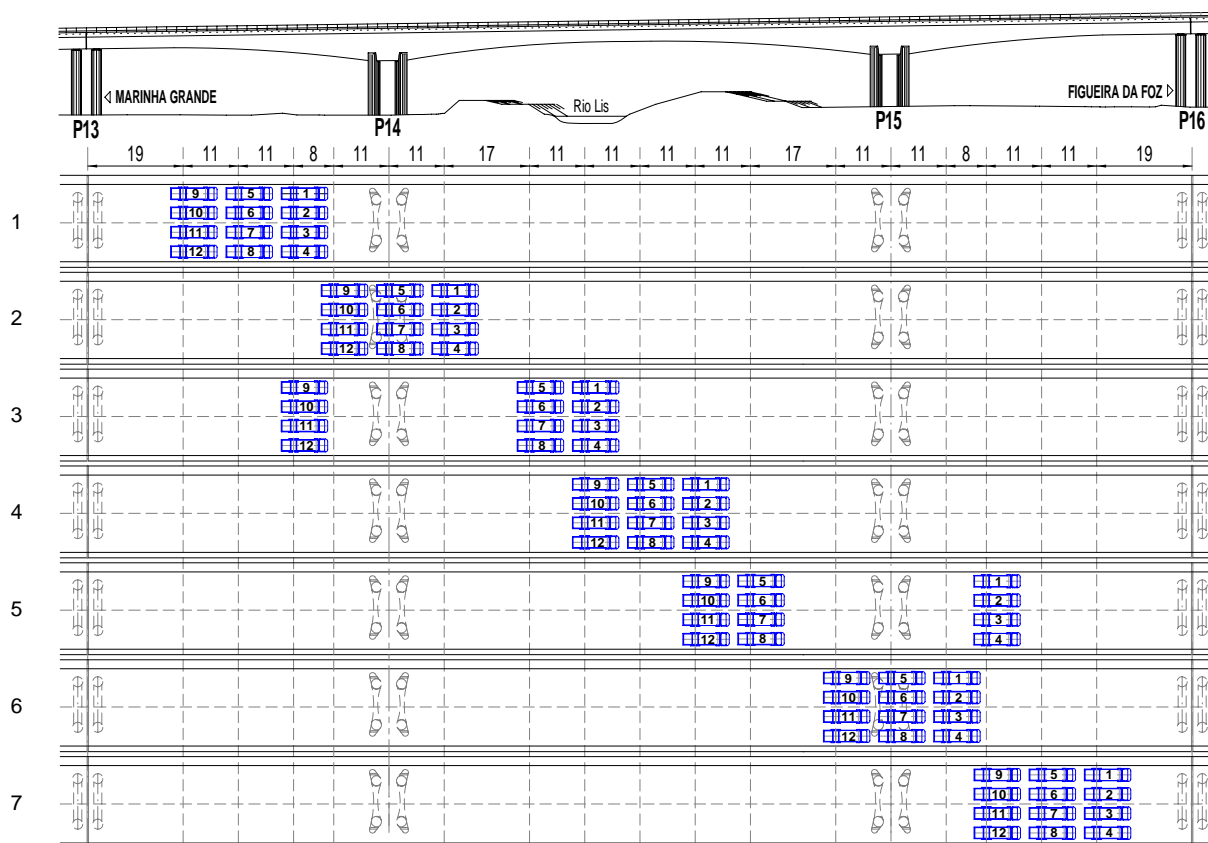


Figura 4. Posições de carga 1 a 7 dos ensaios estáticos.

4.2 Equipamento utilizado nos ensaios estáticos

Nos ensaios estáticos mediram-se os deslocamentos verticais em catorze pontos localizados a meio vão dos três tramos, sobre os pilares P14 e P15 e a quartos de vão do tramo central. Para medir os deslocamentos verticais utilizaram-se deflectómetros registadores de funcionamento mecânico, os quais foram configurados para medir com uma resolução de 0,1 mm. Os pontos de fixação dos fios de invar ligados aos deflectómetros localizaram-se junto ao banzo inferior da viga caixão do tabuleiro.

Mediram-se também as rotações em quatro secções, sobre os pilares P14 e P15, a meio vão do tramo central e a quartos de vão entre o pilar P14 e o meio vão do tramo central. Para medir as rotações utilizaram-se clinómetros de gravidade da marca Schaevitz modelo T233, os quais permitem medir rotações em relação a dois eixos ortogonais entre si, com uma precisão de 0,2 “sex. Para a leitura dos valores das rotações, os clinómetros foram ligados a fontes de alimentação apropriadas e a um sistema de leitura automática de dados (sistema e.bloxx da marca Gantner Instruments, incluindo um módulo e.gate DP e vários módulos e.bloxx A1) que esteve ligado a um computador portátil.

Foram ainda efectuadas medições de extensões na secção de meio vão do tramo central, tendo-se colocado dois extensómetros no banzo inferior e dois extensómetros no banzo superior da viga caixa. Para a medição de extensões utilizaram-se extensómetros de fibra óptica do tipo rede de Bragg, da marca FiberSensing, modelo FS 6200 embebidos em material compósito. Estes extensómetros foram ligados a uma unidade de leitura também da marca FiberSensing, modelo FS 5500 – Benchtop BraggScope com um multiplexer para 4 canais.

4.3 Principais resultados dos ensaios estáticos

No quadro 1 apresentam-se os valores dos deslocamentos verticais medidos nas posições de carga 1 a 7 dos ensaios estáticos, com os delectómetros colocados nas secções de meio vão dos três tramos da ponte (D01, D02, D07, D08, D13 e D14). Nesse quadro indicam-se também os valores correspondentes calculados com o modelo de elementos finitos. Como se pode verificar as flechas máximas observadas nos ensaios tiveram um valor de 6,2 mm a meio vão dos tramos laterais e de 16,2 mm a meio vão do tramo central. Da ‘Fig. 5’ à ‘Fig. 7’ comparam-se as deformadas calculadas (representadas com uma linha contínua vermelha) com os deslocamentos medidos (representados com uma circunferência azul) nas posições de carga 1, 4 e 7.

Quadro 1. Deslocamentos verticais medidos e calculados [mm].

Posição	D01		D02		D07		D08		D13		D14	
	med.	calc.	med.	calc.	med.	calc.	med.	calc.	med.	calc.	med.	calc.
1	-6,2	-6,1	-6,1	-6,3	3,4	3,0	3,3	3,0	-0,6	-0,5	-0,6	-0,5
2	-0,3	-0,1	-0,3	-0,2	-0,6	-0,7	-0,8	-0,8	0,2	0,1	0,1	0,1
3	1,2	1,2	1,2	1,1	-7,7	-7,6	-8,0	-7,8	1,6	1,3	1,5	1,3
4	3,6	3,1	3,6	3,1	-15,9	-15,7	-16,2	-16,0	3,8	3,3	3,8	3,3
5	1,4	1,2	1,4	1,2	-6,8	-6,9	-7,2	-7,1	1,1	0,9	0,9	0,8
6	0,0	0,0	0,1	0,0	-0,3	-0,1	-0,4	-0,2	-0,4	-0,3	-0,6	-0,4
7	-0,6	-0,5	-0,6	-0,5	3,3	3,0	3,3	3,0	-6,2	-6,1	-6,2	-6,3

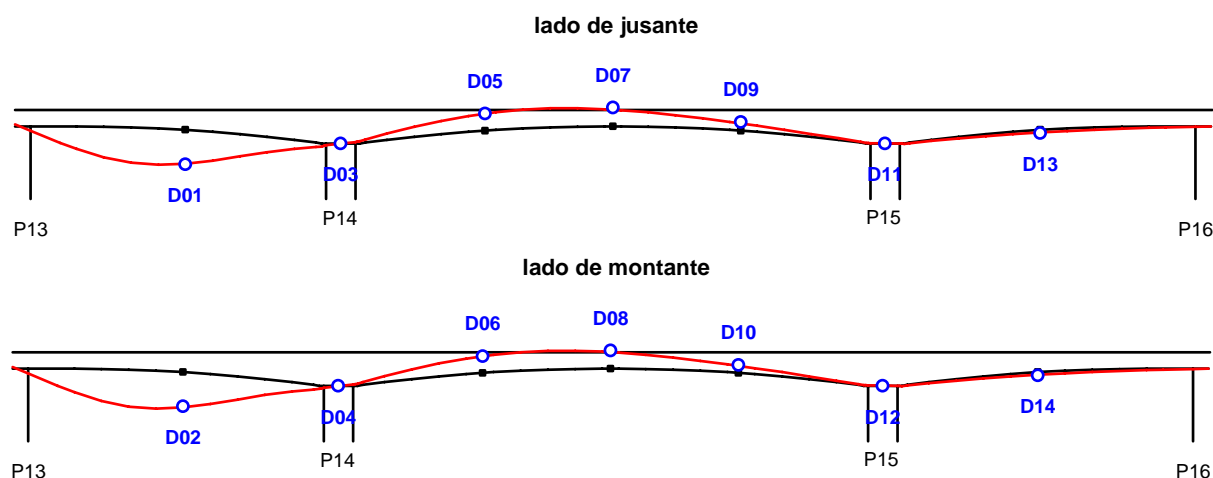


Figura 5. Deformadas calculadas e deslocamentos medidos na posição de carga 1.

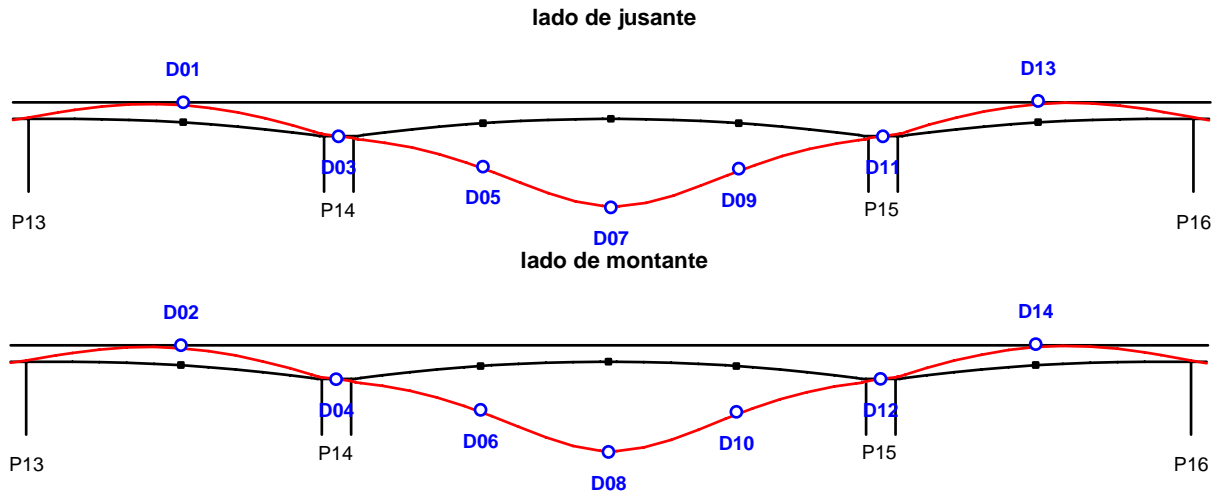


Figura 6. Deformadas calculadas e deslocamentos medidos na posição de carga 4.

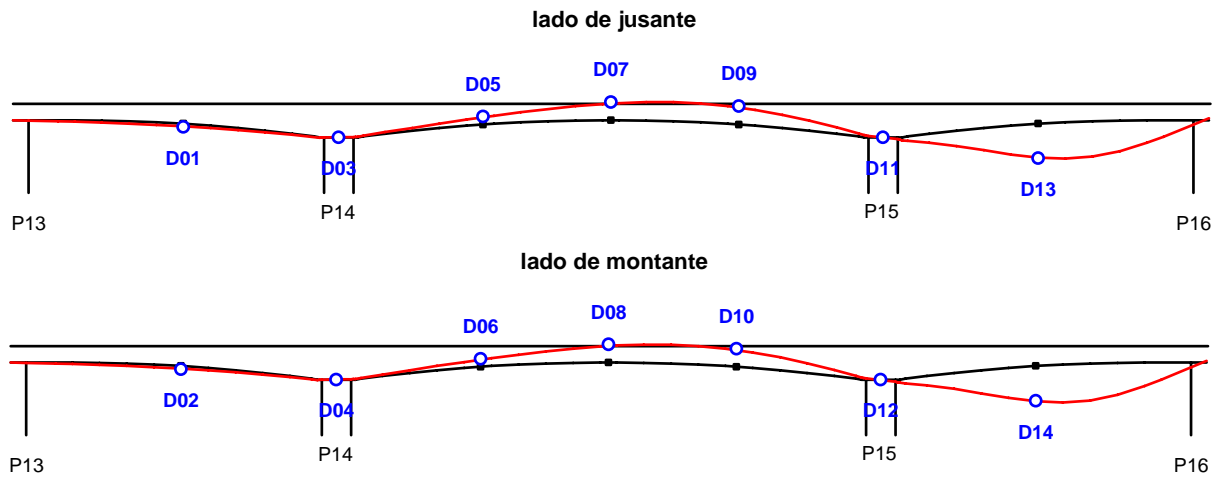


Figura 7. Deformadas calculadas e deslocamentos medidos na posição de carga 7.

Analisando os valores apresentados no quadro 1 e da 'Fig. 5' à 'Fig. 7' pode-se verificar que os deslocamentos verticais medidos nos ensaios têm uma boa concordância com os valores calculados com o modelo de elementos finitos.

No quadro 2 apresentam-se os valores das rotações longitudinais medidas nas posições de carga 1 a 7 dos ensaios estáticos, assim como os correspondentes valores calculados com o modelo da estrutura. Como se pode verificar há uma razoável concordância entre as rotações observadas nos ensaios e as calculadas com o modelo.

Quadro 2. Rotações longitudinais medidas e calculadas ["sex.].

Posição	Clin.1 (P14)		Clin.2 ($\frac{1}{4}$ vão)		Clin.3 ($\frac{1}{2}$ vão)		Clin.4 (P15)	
	med.	calc.	med.	calc.	med.	calc.	med.	calc.
1	-32	-24	-21	-14	4	13	8	4
2	6	2	6	3	1	-4	3	-1
3	21	15	52	58	-17	-24	-12	-11
4	34	27	87	92	4	5	-35	-29
5	15	10	32	36	28	23	-8	-14
6	0	0	0	1	6	1	6	1
7	-6	-4	-14	-15	-9	-13	28	24

No quadro 3 apresentam-se os valores das extensões medidas nas posições de carga 1 a 7 dos ensaios estáticos, assim como os correspondentes valores calculados com o modelo de elementos finitos. Como se pode verificar há uma razoável concordância entre as extensões medidas nos ensaios e as calculadas com o modelo.

Quadro 3. Extensões medidas e calculadas [10^{-6}].

Posição	Ext. E01 (B.Inf.)		Ext. E02 (B.Sup.)		Ext. E03 (B.Sup.)		Ext. E04 (B.Inf.)	
	med.	calc.	med.	calc.	med.	calc.	med.	calc.
1	-4	-6	3	2	3	2	-4	-6
2	-2	1	-1	0	-1	0	-2	1
3	16	22	-6	-10	-7	-9	17	22
4	44	57	-10	-13	-9	-14	42	57
5	16	20	-4	-8	-7	-8	14	20
6	-2	0	2	0	-2	0	-1	0
7	-6	-6	3	2	1	2	-6	-6

Nos ensaios estáticos efectuados na Ponte sobre o Rio Lis verificou-se também que após a retirada das cargas de ensaio a estrutura apresentou uma boa recuperação das deformações.

5. ENSAIOS DINÂMICOS

5.1 Considerações gerais

Na Ponte sobre o Rio Lis foram efectuados ensaios dinâmicos de dois tipos: 1) ensaios de registo de vibrações ambiente (devidas essencialmente à acção do vento); e também 2) ensaios de passagem de camiões carregados, que circularam sobre a ponte com velocidades de 20, 40, 60 e 80 km/h. No primeiro tipo de ensaios mediram-se acelerações utilizando 15 acelerómetros uniaxiais de marca Kinematics e modelo EpiSensor (ES-U) [4]. No segundo tipo de ensaios mediram-se acelerações, com esses mesmos acelerómetros, e também rotações e extensões em regime dinâmico, com os clinómetros e dois dos extensómetros utilizados nos ensaios estáticos.

Os ensaios dinâmicos de medição de vibrações ambiente tiveram como principal objectivo a avaliação experimental das características dinâmicas globais da estrutura, nomeadamente, das frequências, coeficientes de amortecimento e configurações dos seus principais modos de vibração. Os ensaios dinâmicos com passagem de camiões com velocidades conhecidas, de valor crescente, tiveram como objectivo a avaliação de níveis de vibração induzidos na estrutura pela acção do tráfego rodoviário e de efeitos de amplificação dinâmica associados a essa acção.

5.2 Técnica de realização dos ensaios

Os ensaios dinâmicos de medição de vibrações ambiente consistiram na medição de acelerações na estrutura, provocadas pela acção do vento e também pelas actividades associadas a alguns trabalhos ainda a decorrer na obra. Foram assim medidas acelerações num total de 46 pontos do tabuleiro localizados no interior da viga caixão. Estes ensaios incluíram uma série de quatro ensaios destinados a identificar as características dos modos de vibração verticais e uma série de dois ensaios para identificar os modos de vibração essencialmente longitudinais e transversais. Nestas duas séries de ensaios utilizou-se uma técnica em que se escolheram pontos de referência (evitando escolher nodos dos principais modos de vibração da estrutura) onde se colocaram transdutores que aí permaneceram em todos os ensaios, enquanto que os restantes transdutores foram colocados, em cada ensaio, em pontos diferentes ao longo da ponte. A frequência de amostragem utilizada na aquisição de dados foi de 1000 Hz e em cada ensaio obtiveram-se registos com 30 minutos de duração total.

Os ensaios dinâmicos com passagem de camiões consistiram na medição, em regime dinâmico, das rotações, extensões e acelerações induzidas pela passagem de camiões. Utilizaram-se dois camiões carregados, com pesos totais de 291 kN e 283 kN, que circularam na ponte com velocidades de 20, 40, 60 e 80 km/h, com vista a avaliar os efeitos do incremento da sua velocidade de circulação nas grandezas de resposta estrutural observadas. Registaram-se um total de 24 passagens destes camiões, 16 delas com apenas um camião e 8 com os dois camiões a circular ao lado um do outro.

5.3 Identificação das características dinâmicas

As acelerações registadas nos ensaios de medição de vibrações ambiente foram analisadas com vista a identificar as características dinâmicas da ponte. Essa análise de identificação modal foi efectuada com o programa ARTEMIS Extractor [5], tendo consistido na aplicação do método aperfeiçoado de decomposição no domínio da frequência (método EFDD) que envolve a decomposição em valores singulares da matriz de funções de densidade espectral das acelerações medidas nos ensaios. Foram assim identificadas as características de 8 modos naturais de vibração da ponte (1 modo longitudinal, 4 modos verticais e 3 modos transversais), cujas frequências são indicadas no quadro 4. Na 'Fig. 8' e na 'Fig. 9' comparam-se as configurações identificadas e calculadas para dois modos de vibração.

Quadro 4. Características dinâmicas da Ponte sobre o Rio Lis.

n.º	tipo de modo	valores identificados		valores calculados
		f [Hz]	ξ [%]	f [Hz]
1	longitudinal	1,31	2,7	1,32
2	vertical	1,74	1,3	1,77
3	transversal	2,02	1,9	1,92
4	vertical	3,22	1,0	3,15
5	vertical	3,77	0,9	3,66
6	transversal	4,50	1,9	5,09
7	vertical	5,10	1,4	5,02
8	transversal	6,47	1,7	5,56

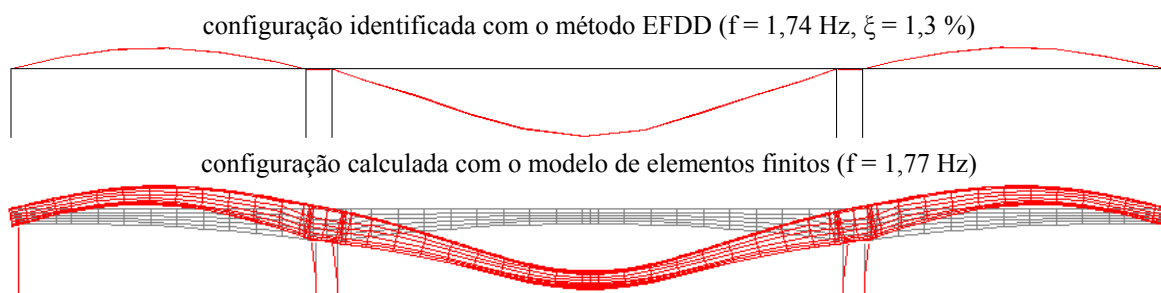


Figura 8. Configurações identificada e calculada para o 1º modo vertical.

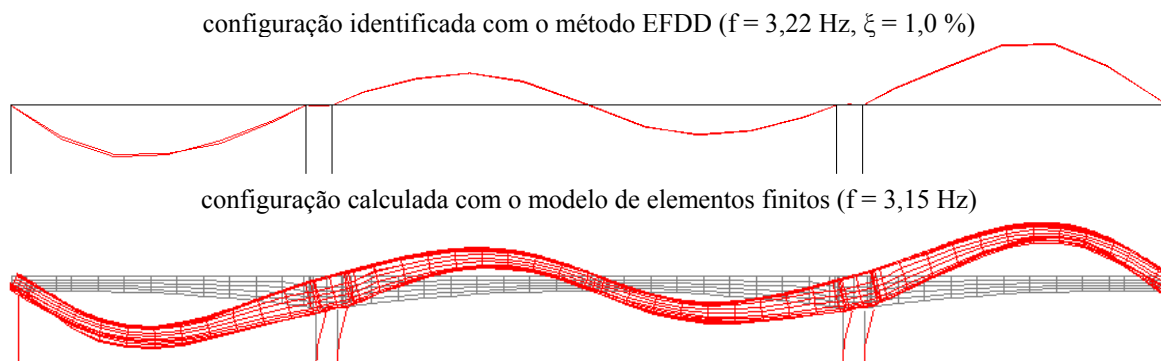


Figura 9. Configurações identificada e calculada para o 2º modo vertical.

6. CONCLUSÕES

Nesta comunicação apresentaram-se os ensaios estáticos e dinâmicos da Ponte sobre o Rio Lis, integrada no sublanço Marinha Grande / Monte Redondo da auto-estrada A17, efectuados pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) antes da entrada em serviço dessa obra de arte.

Os deslocamentos verticais medidos nos ensaios estáticos mostraram uma boa concordância com os calculados com um modelo de elementos finitos da estrutura. No que se refere às rotações e extensões observadas experimentalmente nos ensaios estáticos, verificou-se que os seus valores estão em razoável concordância com os calculados com o modelo. Os resultados obtidos nos ensaios revelam também que a estrutura apresentou uma boa recuperação das deformações após a retirada das cargas.

Analisando os registos de acelerações obtidos nos ensaios dinâmicos de medição de vibrações ambiente, foi possível identificar as frequências, coeficientes de amortecimento e configurações de 8 modos naturais de vibração da ponte (1 modo longitudinal, 4 modos verticais e 3 modos transversais). Estas características dinâmicas identificadas estão em boa concordância com as calculadas com o modelo de elementos finitos, tanto em termos das frequências dos modos de vibração, bem como das respectivas configurações.

Nos ensaios dinâmicos com passagem de camiões efectuou-se a medição, em regime dinâmico, das rotações, extensões e acelerações induzidas pela passagem de camiões carregados, que circularam sobre a ponte com velocidades de 20, 40, 60 e 80 km/h. Constatou-se, nas diversas grandezas observadas, que, em geral, há um ligeira tendência de aumento com o incremento da velocidade de circulação dos camiões. Verificou-se também uma razoável concordância entre as rotações longitudinais e extensões registadas nos ensaios e as linhas de influência, dessas grandezas, calculadas com o modelo, para as cargas correspondentes aos camiões utilizados nos ensaios.

Os resultados obtidos com os ensaios estáticos e dinâmicos efectuados na Ponte sobre o Rio Lis constituem um contributo importante para caracterizar o comportamento estrutural e o estado desta obra de arte após o final da sua construção e antes do início da sua entrada em serviço, permitindo assim estabelecer uma referência para, ao longo da sua vida, proceder a análises do comportamento desta estrutura, com vista à avaliação das suas condições de segurança.

REFERÊNCIAS

- [1] Armando Rito Lda. - A17 - Auto-Estrada Marinha Grande / Mira, sublanço Marinha Grande - Monte Redondo, Ponte sobre o Rio Lis, Projecto de Execução, Outubro de 2005.
- [2] CSI - SAP2000 Integrated Software for Structural Analysis and Design, version 11, 2007.
- [3] RSA - Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes, Decreto-lei nº235/83, INCM, Lisboa, 1983.
- [4] Kinematics, Inc. - EpiSensor Force-Balance Accelerometer. Model FBA ES-U - User Guide, Kinematics Inc, 2000.
- [5] SVS - Structural Vibration Solutions - ARTeMIS Extractor Pro, Release 3.5, Denmark, 2005.