

Caracterização Dinâmica da Ponte Luiz Bandeira em Sejães

Luís F. Ramos, José Sena-Cruz, Rui M. Ferreira
ISISE, Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Guimarães

RESUMO: A Ponte Luiz Bandeira, localizada na N333-3 sobre o Rio Vouga próxima da localidade de Sejães (Oliveira de Frades), é hoje considerada como a mais antiga ponte de betão armado em utilização no nosso país, e uma das mais velhas da Europa. Recentemente foram realizados na Ponte Luiz Bandeira um conjunto de ensaios de inspecção e diagnóstico estrutural que incluíram, entre outros, uma identificação dinâmica para a determinação das frequências naturais, modos de vibração e coeficientes de amortecimento. Para a elaboração da campanha experimental, primeiramente foi efectuada uma análise numérica de sensibilidade da resposta dinâmica da ponte, que permitiu melhor definir os procedimentos de ensaio em campo. Na ponte foram efectuados dois tipos de ensaios dinâmicos: ensaios com ruído ambiente e ensaios para a determinação dos coeficientes de amortecimento com recurso à passagem de um automóvel sobre uma prancha no pavimento a diferentes velocidades. Posteriormente, os resultados da identificação dinâmica foram utilizados para a calibração do modelo numérico que permitiu aferir, juntamente com os restantes ensaios de inspecção e diagnóstico, o estado de conservação estrutural da ponte Luiz Bandeira. A presente comunicação apresenta e descreve detalhadamente todas as fases de estudo referentes à caracterização dinâmica da ponte.

1 INTRODUÇÃO

A identificação dinâmica ou identificação modal é uma ferramenta que combina técnicas experimentais com métodos analíticos para determinar as propriedades dinâmicas das estruturas (frequências naturais, modos de vibração e coeficientes de amortecimento). A identificação modal é frequentemente usada na inspecção e diagnóstico de estruturas, com particular interesse quando se pretende estudar comportamento face a acções dinâmicas, como é o caso da acção dos sismos, ou quando se pretende de uma forma não destrutiva conhecer a rigidez da estrutura.

Para estimar os parâmetros modais existem técnicas avançadas de identificação *output-only*. Nestas técnicas, apenas se medem com sensores muito sensíveis a resposta dinâmica das estruturas (por exemplo acelerações) sem provocar uma excitação artificial. Neste caso, a excitação é a natural ou ambiente, provocada pela acção do vento, tráfego automóvel ou até das vibrações induzidas pela própria utilização das estruturas. Desta forma, a excitação não é medida mas é considerada como um ruído branco.

A robustez dos resultados, a não obrigatoriedade de parar a utilização da estrutura e a economia da sua execução, fazem com que as técnicas de identificação *output-only* sejam frequentemente utilizadas para analisar estruturas de grande porte, tais como pontes e edifícios de grande altura.

Quando as propriedades modais são conhecidas, é possível calibrar um modelo numérico (e.g. modelo de elementos finitos), através de um processo de optimização numérica. Uma vez calibrado, o modelo poderá ser usado para a análise da segurança ou para comparar várias condições estruturais, a fim de se identificar possíveis problemas, como por exemplo a detecção de dano estrutural.

No caso da Ponte de Sejães e conhecida em detalhe a sua geometria, é possível calibrar um modelo de elementos finitos para posteriores análises com os seguintes fins:

- Localizar zonas com potenciais anomalias estruturais;
- Avaliar qualitativamente a constituição da estrutura através da correlação directa com os resultados de outros ensaios realizados, tais como ensaios laboratoriais [Sena-Cruz e Ferreira 2011];
- Determinar para diferentes níveis de excitação os coeficientes dinâmicos da estrutura; e
- Averiguar as condições de fronteira da estrutura.

2 DESCRIÇÃO DA PONTE

A Ponte Luiz Bandeira, em Sejães, localiza-se na EN333-3 e no vale do rio Vouga, a Nordeste do lugar desta freguesia, no concelho de Oliveira de Frades, distrito de Viseu. É considerada como sendo a mais antiga ponte de betão armado em utilização no nosso país, e uma das mais velhas da Europa. A descrição completa da ponte e da história da sua construção encontra-se apresentada em [Sena-Cruz e Ferreira 2011].

Em termos da sua geometria, a estrutura tem cerca de 44 m de comprimento, 4.5 m de largura, dos quais 0.75 m são para cada um dos dois passeios, com uma única faixa de rodagem com 3 m de largura. A ponte é constituída por dois arcos paralelos entre si com 32 m de abertura e uma flecha de 6.4 m. Estes arcos encontram-se unidos entre si por um conjunto de vigas transversais. O tabuleiro assenta em duas vigas longitudinais, apoiadas nas extremidades em dois contrafortes de betão (revestidos a betão), a meio pelo arco e entre estes por um conjunto de pilares travados por vigas longitudinais e transversais. A espessura da laje do passeio é de 0.10 m, e a do pavimento é de 0.12 m. Uma imagem tridimensional da ponte e uma representação em alçado encontram-se apresentadas na Figura 1.

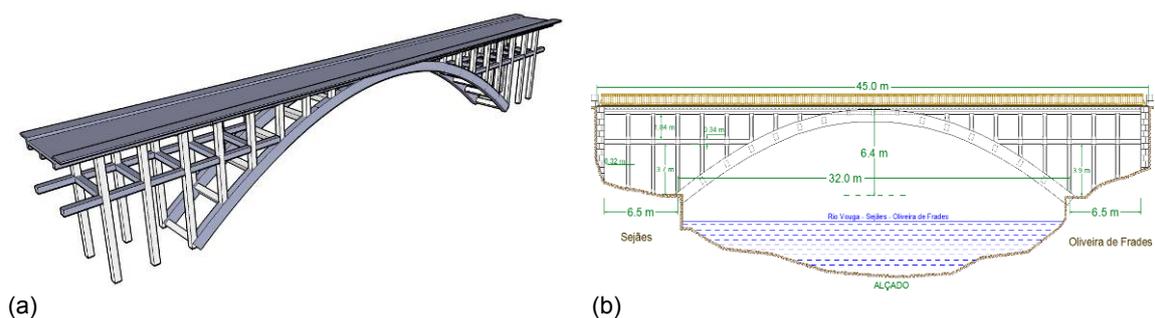
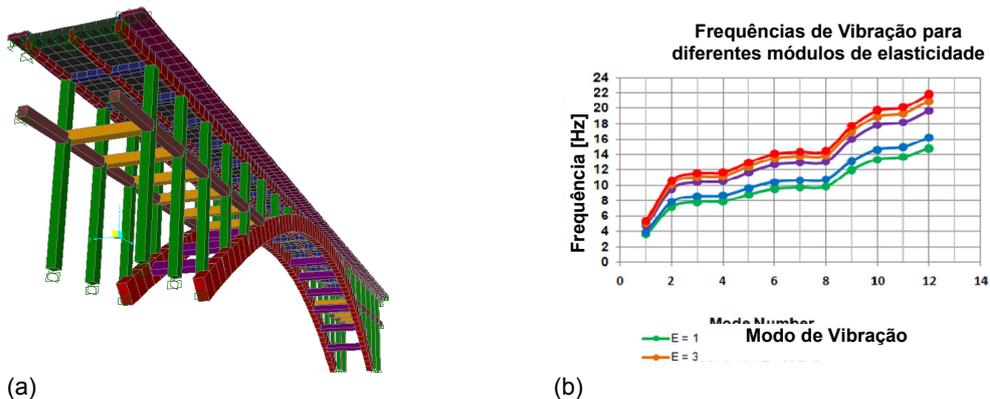


Figura 1. Geometria da ponte: (a) perspectiva; e (b) alçado montante.

3 ESTUDOS PRELIMINARES

Para uma melhor caracterização dinâmica da ponte e numa fase anterior à realização dos ensaios dinâmicos, foi construído um modelo numérico em elementos finitos no software SAP2000 [2009], ver Figura 2a. Neste modelo identificou-se o valor

aproximado das frequências naturais e as respectivas configurações modais para uma melhor localização dos sensores na ponte, tendo em vista uma correcta estimativa dos principais modos de vibração. Realizou-se também uma análise de sensibilidade da resposta dinâmica, em termos de frequências, variando o módulo de elasticidade da estrutura e a rigidez das ligações entre o tabuleiro, os elementos lineares (pilares e vigas sob o tabuleiro) e os arcos da ponte. A título de exemplo, apresenta-se na Figura 2b o resultado da variação das frequências em função do módulo de elasticidade, sendo que o intervalo espectável situava-se entre os 2 e os 20 Hz.



(a) (b)
Figura 2. Análise modal preliminar: (a) modelo numérico; e (b) análise de sensibilidade fazendo variar os modos de vibração.

A análise preliminar foi relevante para a escolha das características dos sensores (acelerómetros), para a definição do tempo de aquisição e frequência de amostragem e para a definir a posição dos acelerómetros de referência ao longo dos sucessivos setups de ensaio.

4 ENSAIOS DINÂMICOS

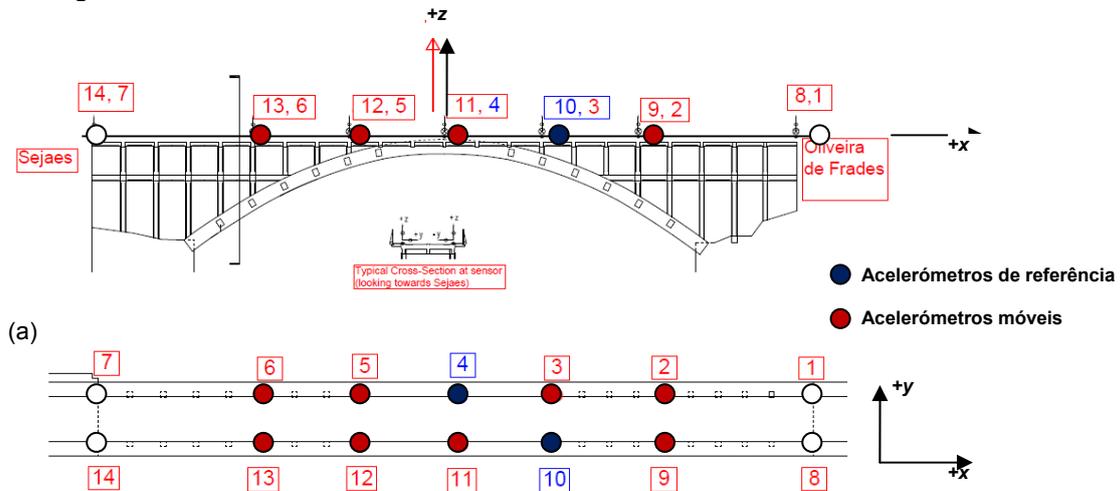
4.1 Descrição da execução dos ensaios

Com a caracterização dinâmica efectuada pretendeu-se determinar as frequências naturais, os correspondentes coeficientes de amortecimento, e os modos de vibração. Estes resultados foram posteriormente usados na calibração do modelo numérico desenvolvido na análise preliminar. Para a caracterização dinâmica realizaram-se dois tipos de ensaios: de vibração ambiente e de vibração livre.

No ensaio de vibração ambiente determinaram-se os modos de vibração, as respectivas frequências e os coeficientes de amortecimento da estrutura. Este ensaio de vibração ambiental possibilitou, através da utilização de acelerómetros de elevada sensibilidade e da aplicação de técnicas de identificação adequadas, a obtenção de estimativas bastante rigorosas das frequências naturais e dos modos de vibração da estrutura. Neste ensaio mediu-se a resposta da estrutura sujeita apenas ao ruído ambiente, ou seja, a excitações naturais que esta está submetida durante a sua normal utilização. Deste modo, estes ensaios não necessitam de equipamento de excitação artificial, nem condicionam a utilização da estrutura, apenas se aproveitaram as excitações induzidas pelo vento, ruído ambiental, pequenas vibrações do solo e tráfego de veículos ou de pessoas.

Os ensaios de vibração livre foram realizados para determinar o coeficiente de amortecimento da estrutura quando esta é solicitada por maiores excitações. Estes ensaios permitiram medir o amortecimento da ponte através uma acção dinâmica de impacto sobre o tabuleiro, provocada pela passagem de um veículo ligeiro, a diferentes velocidades, sobre uma prancha de madeira.

Dado o tipo de estrutura em causa, as frequências espectáveis encontram-se compreendidas no intervalo de 2 a 20 Hz. Deste modo, a resposta dinâmica foi medida no tabuleiro da ponte e segundo duas direcções ortogonais (y e z), conforme se ilustra na Figura 3.



(b) Figura 3. Configuração adoptada nos ensaios dinâmicos: (a) alçado da ponte; e (b) planta com a localização dos sensores.

Para medir as vibrações foram utilizados acelerómetros com uma sensibilidade de 10 V/g (sendo g a aceleração gravítica igual a 9.81 m/s^2) e com uma resolução de $7 \mu\text{g}$ (Figura 4a,b), ligados a um sistema de aquisição de dados composto por um digitalizador de sinais analógicos de 16 bit, com filtros *anti-aliasing* e com controlo da largura da banda de digitalização. O sistema de aquisição de dados estava ligado por cabo USB a um computador portátil para o armazenamento de dados (Figura 4c).

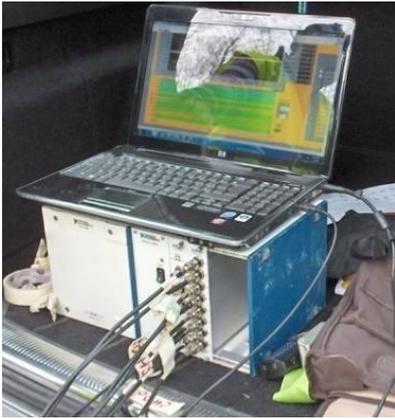
Dado o tipo de excitação utilizada (ruído branco), registaram-se as acelerações durante um período de 10 minutos (600 segundos). A frequência de amostragem foi de 200 Hz. No caso da excitação livre, a frequência de amostragem do de ensaio foi igual a 5000 Hz. A Figura 4c ilustra um dos ensaios de vibração livre com um veículo ligeiro a passar sobre um prancha de madeira colocada a 1/3 do vão do arco.



(a)



(b)



(c)



(d)

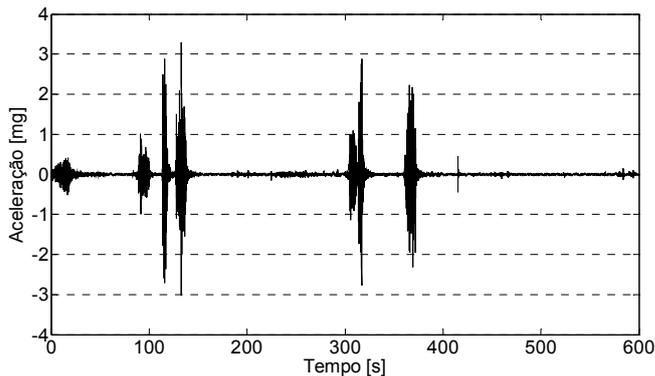
Figura 4. Execução dos ensaios dinâmicos: (a) pormenor dos acelerómetros; (b) localização dos sensores ao longo da ponte; (c) equipamento de leitura; e (d) ensaio de vibração livre.

4.2 Resultados obtidos com excitação natural

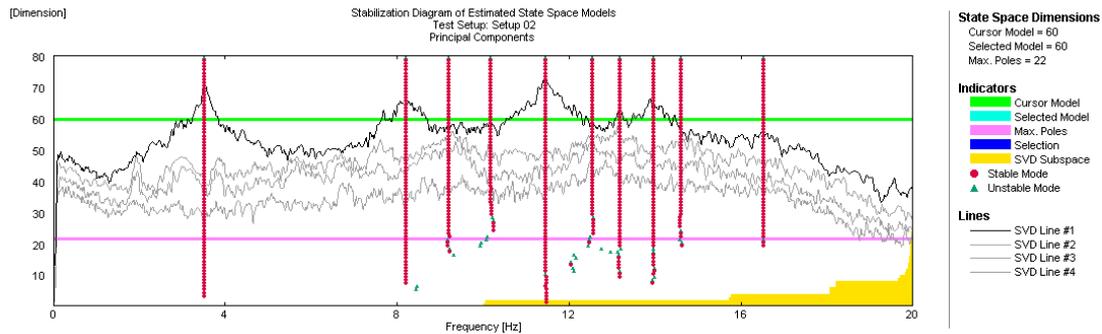
Para o processamento dos dados utilizaram-se os métodos o *Enhanced Frequency Domain Decomposition* (EFDD) e o método estocástico por sub-espacos, também designado por *Stochastic Subspace Identification* (SSI) *method* [Peeters e Roeck, 1999; Peeters, 2000], disponível do software ARTeMIS Extractor [SVS, 2009].

A título de exemplo dos sinais registados nos sensores de aceleração, apresenta-se na Figura 5a o valor das acelerações do sensor posicionado no ponto 4 (ver Figura 3) na direcção vertical. Conforme se pode observar, no sinal da excitação ambiente verifica-se algumas perturbações ao ruído branco devido à passagem de veículos na ponte. Contudo, o valor máximo da excitação ambiente é inferior a 4 mg.

Na Figura 5b apresenta-se os resultados da identificação modal com o método SSI, em termos do diagrama de estabilização de pólos (frequências) para um dos setups de configuração experimental. É possível observar a existência de pólos estabilizados entre dos 3 e os 20 Hz. Dentro deste intervalo foram identificadas 6 frequências de ressonância.



(a)



(b)

Figura 5. Processamento de sinais: (a) sinais no domínio do tempo; (b) diagrama de estabilização de polos (frequências) do método SSI para o setup 3

Na Tabela 1 apresentam-se as 6 primeiras formas modais, frequências (f) e os respectivos coeficientes de amortecimento (ξ). A partir dos resultados obtidos observa-se uma boa concordância entre os métodos de identificação usados.

A média do coeficiente de amortecimento igual a 3.2%, sendo um valor expectável para este tipo de estruturas, embora os resultados apresentem alguma variabilidade.

Quanto às componentes modais, foi possível verificar que existem componentes em todas as direcções e com a existência de um elevado número de potenciais modos com componentes de torção.

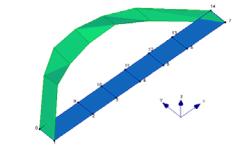
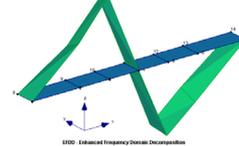
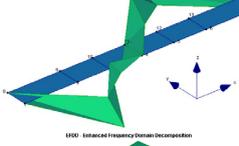
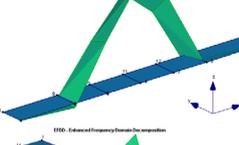
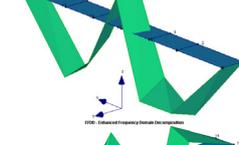
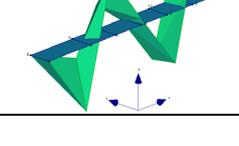
4.3 Resultados obtidos com excitação livre

Este ensaio foi realizado para várias velocidades de passagem de um veículo ligeiro, no intervalo de 20 km/h a 50 km/h. Neste ensaio foram determinados os valores do coeficiente de amortecimento (ξ), através do ensaio realizado para a velocidade de 50 km/h. Para esta velocidade de 50 km/h foram verificados os valores das frequências de vibração mais elevadas à passagem do veículo na ponte.

O cálculo dos valores do coeficiente de amortecimento (ξ) foi realizado através da aplicação do método do decremento logarítmico, utilizando os dados obtidos por cada um dos acelerómetros instalados nos pontos 4, 6, 9 e 10, tanto no sentido transversal y como no sentido vertical z .

Na Figura 6 representa-se graficamente o resultado de um dos ensaios de vibração livre realizado na ponte. Nesta representação gráfica é possível observar a aceleração provocada pelo veículo em movimento na estrutura em função do tempo, para o sensor 4 na direcção vertical z (ver Figura 3). Os valores de aceleração mais elevados (ou de pico) representam o instante em que o veículo passa sobre o ressalto de madeira. Após o impacto verifica-se que a vibração da estrutura foi amortecida, através da diminuição dos valores da aceleração ao longo do tempo. O amortecimento foi determinado por uma aproximação exponencial.

Tabela 1. Modos de vibração, frequências modais e coeficientes de amortecimento.

Modo	Representação gráfica	Descrição	Método EFDD		Método SSI	
			f (Hz)	ξ (%)	f (Hz)	ξ (%)
1		Modo Lateral	3.47	1.98	3.52	2.75
2		Modo Vertical - Anti-simétrico	8.07	3.62	8.16	2.60
3		Modo Lateral - Anti-simétrico	8.95	1.74	9.03	2.51
4		Modo Vertical - Simétrico	11.49	2.25	11.49	1.32
5		Modo Vertical - Simétrico	13.91	1.58	12.91	2.24
6		Modo Vertical - Anti-simétrico	18.89	1.47	16.78	2.53

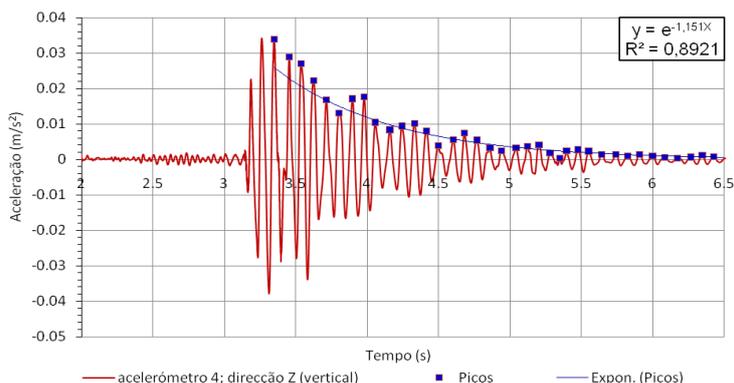


Figura 6. Resultado dos ensaios de vibração livre.

A Tabela 2 apresenta os resultados dos coeficientes de amortecimento obtidos para os sinais dos acelerómetros. Nesta tabela apresenta-se o valor do coeficiente de amortecimento cada uma das direcções medidas (horizontal y e vertical z) e os valores finais do coeficiente de amortecimento médio obtido. Para cada uma das direcções horizontal (y) e vertical (z), obtiveram-se valores médios do coeficiente de amortecimento de 2.14% e 1.51%, respectivamente. O coeficiente de amortecimento ($\xi_{y,médio}$) determinado para a direcção horizontal (y) está associado ao primeiro modo de vibração (modo lateral), enquanto o coeficiente de amortecimento ($\xi_{z,médio}$)

determinado para a direcção vertical (z) está associado aos restantes modos de vibração (modos verticais).

Tabela 2. Coeficientes de amortecimento.

Acelerómetro	Direcção	ξ (%)	ξ_y , médio	ξ_z , médio
4	y	2.25	2.14%	1.51%
	z	1.60		
6	y	2.19		
	z	1.54		
9	y	1.70		
	z	1.36		
10	y	2.40		
	z	1.54		

Na Tabela 3 apresenta-se uma comparação dos valores finais dos coeficientes de amortecimento obtidos pelos três métodos de identificação. Assim, podem-se observar que os resultados obtidos, nos dois tipos ensaios realizados, são relativamente próximos, verificando-se valores superiores para os ensaios com ruído ambiente.

Tabela 3. Comparação entre os coeficientes de amortecimento obtidos com diferentes métodos.

Modo de Vibração	Observações	Vibração Livre	Vibração Ambiente	
		$\xi_{\text{médio}}$	ξ_{EFDD}	ξ_{SSI}
1	Lateral	2.14%	1.98%	2.75%
2	Vertical - Anti-simétrico	1.51%	3.62%	2.60%
3	Vertical - Simétrico	1.51%	2.25%	1.32%
4	Vertical - Simétrico	1.51%	1.58%	2.24%

5 CALIBRAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

Antes da verificação da segurança da ponte, o modelo numérico apresentado na Secção 2 foi calibrado com os resultados experimentais da identificação dinâmica.

Dada a complexidade da estrutura em termos das suas ligações, a calibração foi realizada manualmente através da consideração de diferentes modelos estruturais, fazendo variar as condições de apoio, a ligação entre elementos estruturais e os módulos de elasticidades de diferentes partes da estrutura. Esta calibração baseou-se na verificação da coerência entre os resultados numéricos e experimentais, nomeadamente na similaridade dos modos de vibração e das respectivas frequências naturais,

Para os valores dos módulos de elasticidade das diferentes partes da estrutura (tabuleiro, pilares, vigas e arco) foram utilizados os resultados obtidos nos ensaios não destrutivos e de laboratório, descritos em [Sena-Cruz e Ferreira 2011].

Após sucessivas iterações e análises, o modelo que melhor se aproximou do comportamento dinâmico experimental foi aquele em que se simulou as vigas superiores com elementos de casca, com a existência uma ligação inclinada entre as lajes dos passeios e da faixa de rodagem. As condições de apoio relativas à laje e às vigas longitudinais inferiores, nos encontros, foram simuladas com movimento livre de translação segundo x e de rotação segundo y, e com movimento impedido segundo as restantes direcções. As vigas longitudinais superiores, nos encontros, foram simuladas com movimento livre de rotação segundo y, e um movimento impedido segundo as restantes direcções. No tabuleiro impediu-se o movimento de translação na direcção longitudinal x para permitir um aumento das frequências modais.

Na Figura 7 apresenta-se graficamente os resultados finais obtidos pela calibração do modelo numérico em comparação com os resultados obtidos experimentalmente, pelos dois métodos SSI e EFDD, onde se observa uma aproximação bastante razoável entre as frequências obtidas numericamente e as obtidas pelos ensaios dinâmicos.

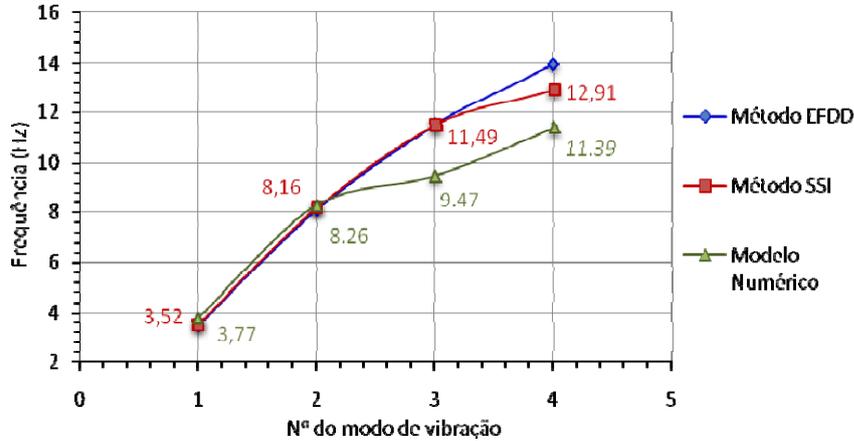


Figura 7. Resultados finais após a calibração do modelo estrutural dinâmico.

Na Figura 8 apresenta-se dos modos de vibração e das respectivas frequências modais obtidos numericamente. De salientar que a 1ª e 2ª frequência modal, obtidas numericamente, aproximam-se melhor aos resultados obtidos experimentalmente pelo método SSI.

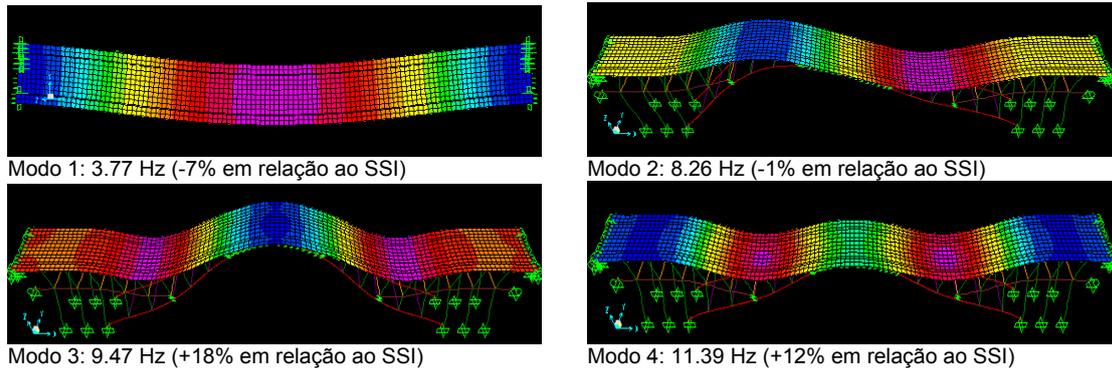


Figura 8. Modos numéricos do modelo calibrado.

6 CONCLUSÕES

Na presente comunicação descreveu-se a campanha experimental para a caracterização dinâmica da ponte Luiz Bandeira em Sejães.

Primeiramente foi efectuada uma análise numérica de sensibilidade da resposta dinâmica da ponte, que permitiu melhor definir os procedimentos de ensaio em campo.

Na ponte foram efectuados dois tipos de ensaios dinâmicos: ensaios com ruído ambiente e ensaios de vibração livre para a determinação do coeficiente de amortecimento. Os ensaios de vibração livre foram realizados com recurso à passagem de um automóvel sobre uma prancha no pavimento a diferentes velocidades.

As frequências obtidas variam entre 3.5 Hz a 12.5 Hz. Os coeficientes de amortecimento variam entre 1.5% a 2.7%.

Posteriormente, os resultados da identificação dinâmica foram utilizados para a calibração do modelo numérico que permitiu aferir, juntamente com os restantes ensaios de inspecção e diagnóstico, o estado de conservação estrutural da ponte Luiz Bandeira.

AGRADECIMENTOS

Os autores do presente trabalho agradecem às seguintes pessoas que tornaram este estudo possível, nomeadamente o Rafael Aguilar e o Márcio Pereira. Os autores do presente trabalho agradecem ainda às Estradas de Portugal (EP) e em particular à Eng.^a Elisabete Lopes, por terem autorizado o estudo da ponte e pelos elementos facultados.

7 REFERÊNCIAS

- Peeters, B. 2000. System Identification and Damage Detection in Civil Engineering, PhD Thesis, Catholic University of Leuven, Belgium
- Peeters, B.; and De Roeck, G. 1999. Reference-Based Stochastic Subspace Identification for Output-Only Modal Analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 13(6), pp. 855-878
- SAP2000 2009. SAP2000 Advanced User Manuals, Release 10.0.5, CSI Computers & Structures, Inc
- Sena-Cruz, J., e Ferreira, R.M. 2011. Estudos da Ponte Luiz Bandeira em Seções. *Artigo submetido ao ASCP2011*.
- SVS 2009. ARTeMIS Extractor Pro User Manual, Release 5, Structural Vibration Solutions, Aalborg, Denmark