

## Observação e Análise do Comportamento dinâmico da Ponte Ferroviária de São João, sobre o rio Douro



Xu Min<sup>1</sup>



L. Oliveira Santos<sup>2</sup>



Naim Suleyman<sup>3</sup>

### Resumo

A ponte ferroviária de S. João, sobre o rio Douro, na cidade do Porto, é uma estrutura de betão armado pré-esforçado, contínua com os viadutos de acesso, com uma extensão total de 1028,8 m. Projetada pelo Prof. Edgar Cardoso, esta obra de arte foi inaugurada em 1991.

A ponte foi instrumentada durante a construção tendo em vista a caracterização experimental do seu comportamento estrutural estático, com base em campanhas periódicas. Em 2007 foi efetuada a modernização do sistema instalado, visando fundamentalmente a automatização das medições, a possibilidade de acesso remoto aos dados obtidos bem como o seu processamento em tempo real. Posteriormente foi instalado o equipamento necessário à monitorização do comportamento dinâmico da ponte, através da medição de acelerações verticais e transversais no tramo central do tabuleiro. Tendo em vista o processamento automático da informação assim recolhida, foi desenvolvido um procedimento para extrair as características dinâmicas da estrutura a partir das acelerações medidas, com base no método de identificação estocástica em subespaços com base nas funções de correlação (SSI-COV) e na análise de *clusters*.

Nesta comunicação será apresentada a metodologia utilizada para o processamento de dados e a identificação de características dinâmicas da estrutura em tempo real, bem como uma análise dos resultados obtidos durante um ano e meio de observação.

**Palavras-chave:** Ponte ferroviária, Monitorização dinâmica contínua, Análise modal operacional, Ensaios de vibração ambiental

---

<sup>1</sup> Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Estruturas, Lisboa, Portugal; e-mail: xumin@lnec.pt

<sup>2</sup> Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Estruturas, Lisboa, Portugal; e-mail: luis.osantos@lnec.pt

<sup>3</sup> Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, Portugal; e-mail: naim.suleyman.ss@gmail.com

## 1. INTRODUÇÃO

A caracterização experimental do comportamento dinâmico das estruturas é uma ferramenta eficaz na avaliação da segurança estrutural. O progressivo desenvolvimento de técnicas de identificação dos parâmetros modais da estrutura, designadamente as frequências e configurações dos modos de vibração e os coeficientes de amortecimento, e a sua aplicação com sucesso na realização de ensaios ambientais motivaram a sua progressiva integração em sistemas da monitorização de integridade estrutural, em particular de obras de grande importância, dimensão ou complexidade.

O elevado volume de informação gerado por um sistema de monitorização dinâmica torna necessário o desenvolvimento de algoritmos que realizem de forma automática o processamento dessa informação, extraindo os parâmetros modais da estrutura e possibilitando, desta forma, a avaliação da integridade estrutural.

A ponte de São João sobre o rio Douro, no Porto foi instrumentada durante a construção, tendo sido observado o seu comportamento estrutural estático desde então. Mais recentemente foi introduzida uma componente dinâmica no sistema de monitorização, que embora de pequena expressão, permite complementar significativamente a informação sobre o comportamento estrutural desta obra de arte. Nestas circunstâncias foi desenvolvido um procedimento para estimar de forma automática e integrada os parâmetros modais a partir das acelerações medidas, baseada no método de identificação estocástica em subespaços com base nas funções de correlação (SSI-COV) e na análise de *clusters*.

Na presente comunicação, após uma breve descrição da ponte de São João e do seu sistema de monitorização dinâmico, apresenta-se a metodologia desenvolvida para a extração automática das características modais da estrutura, bem como os resultados obtidos nesta ponte durante o período de um ano.

## 2. DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA

A ponte ferroviária de S. João (Figura 1), sobre o rio Douro, na cidade do Porto, é uma estrutura de betão armado pré-esforçado. Projetada pelo Prof. Edgar Cardoso, a ponte é contínua com os viadutos de acesso, com uma extensão total de 1028,8 m [1].



Figura 1. Vista geral da ponte de S. João

O atravessamento do rio Douro realiza-se através de um tramo principal com 250 m de vão e dois tramos adjacente com 125 m de vão (Figura 2). O tabuleiro é constituído por uma viga caixão bicelular, cuja altura varia entre 14 m, sobre os pilares, e 7 m, a meio vão. Nos três tramos centrais da ponte foi aplicado um sistema de pré-esforço exterior constituído por 14 cabos de 5000 kN, divididos

pelo interior das duas células, estando prevista, em caso de necessidade, a possibilidade de aumentar este número até 20 cabos [2].

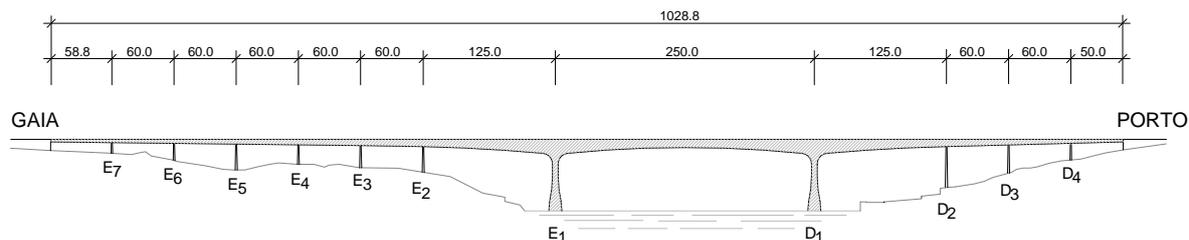


Figura 2. Alçado da ponte de S. João

Os pilares principais E1 e D1 têm uma altura de 50 m, com uma secção transversal que é circular na base do pilar, passando a retangular com o seu desenvolvimento em altura.

A ligação do tabuleiro aos pilares é contínua nos pilares centrais (E1 e D1), sendo efetuada através de aparelhos de apoio fixos nos restantes casos, com exceção do pilar E7 onde há um apoio “pendular”.

Nos extremos do tabuleiro, junto aos encontros, existem sistemas de ligação especiais que permitem a livre deformação do tabuleiro para solicitações lentas, como a temperatura e os efeitos diferidos, mas que asseguram a transmissão de esforços horizontais resultantes de ações rápidas, como frenagens ou sismos.

### 3. O SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL

Os trabalhos de observação da estrutura realizados pelo LNEC iniciaram-se em Outubro de 1986, tendo a instalação de equipamento decorrido ao longo da construção, até à entrada em serviço da ponte, em Junho de 1991 [3]. A observação do comportamento estrutural consistiu na medição de extensões e temperaturas em diversas secções da estrutura: 10 secções no tabuleiro e 4 nos dois pilares principais (Figura 3). Na base e no topo dos pilares principais foram instaladas bases de clinómetro de bolha de ar.

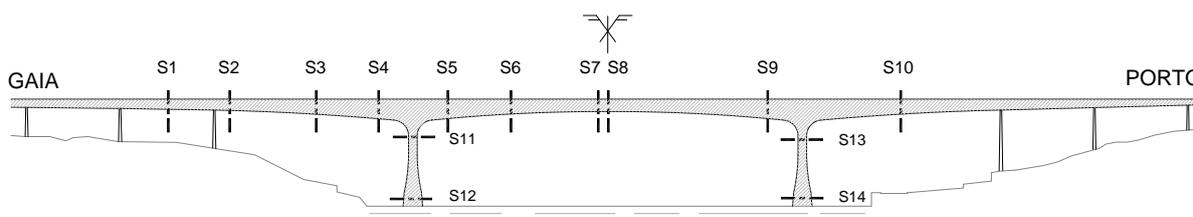


Figura 3. Ponte de S. João: localização das secções instrumentadas

Em 2007 foi efetuada a modernização da instrumentação efetuada, visando fundamentalmente a automatização das medições, o acesso remoto aos dados bem como o seu processamento em tempo real. Para este efeito, foram instalados novos sensores para a medição de deslocamentos verticais, dos movimentos das juntas de dilatação e das rotações, bem como uma rede local em fibra ótica, os *loggers* necessários à automatização das medições, um *router* e um computador industrial [4].

Em 2014, foi instalado um sistema de monitorização dinâmica permanente, constituído por seis acelerómetros uniaxiais e um sistema de aquisição *Gantner* [5]. Os acelerómetros foram instalados no tramo principal, três orientados transversalmente, nas secções junto aos pilares E1 e D1 e de meio-vão, e três verticalmente, nas secções de quarto de vão e de meio vão do tramo central.

O processo de aquisição é controlado por um programa desenvolvido no LNEC [6]. A frequência de aquisição é de 250 Hz e, conseqüentemente, em cada hora são obtidos ficheiros de registo em formato binário com cerca de 24 MB.

## 4. ANÁLISE MODAL OPERACIONAL

### 4.1. Considerações gerais

A Análise Modal Operacional (*Operational Modal Analysis, OMA*) é um procedimento de identificação de características dinâmicas de estrutura baseada nas respostas das estruturas quando excitadas em condições de operação, como é o caso das ações ambientais ou de tráfego. Utilizando a técnica de identificação modal estocástica, são estimados parâmetros modais dos modos de vibração naturais, tais como frequências, configurações e coeficientes de amortecimento.

Sendo um método paramétrico no domínio do tempo, o método de identificação estocástica em subespaços (SSI) consiste na identificação das matrizes da representação de estado de sistemas estocásticos no tempo discreto, ou seja, apenas com base na resposta dos sistemas [7]. A identificação modal é efetuada em duas fases: são estimadas as funções de covariância (ou funções de correlação, para os processos estocásticos com média nula) e, em seguida, é efetuado o ajuste de modelos com vista à identificação dos parâmetros modais dos sistemas.

### 4.2. Pré-processamento de dados

Antes da análise de identificação modal, os registos de aceleração são objeto de um pré-processamento que consistiu nas seguintes operações:

- Remoção da componente continua ou de tendências lineares;
- Filtragem passa-baixo com um filtro de tipo Butterworth de ordem 8 para remover componentes de alta frequência que não têm interesse para a banda de frequências que se pretende analisar;
- Decimação dos registos para reduzir o tempo do processamento sem que haja qualquer perda de informação na banda de frequências de interesse para a estrutura em causa.

A identificação modal estocástica é efetuada com base na resposta das estruturas às ações ambientais, assumindo-se a hipótese das forças de excitação serem idealizáveis através de um processo estocástico gaussiano de tipo ruído branco (com densidade espectral constante) com média nula. Contudo, no caso das pontes ferroviárias, a vibração da estrutura registada durante o seu funcionamento não se enquadra totalmente nesta condição, uma vez que ocorrem três tipos de vibração:

- Vibração forçada durante a passagem de comboio;
- Vibração livre imediatamente depois do comboio sair da ponte;
- Vibração ambiental causada pela ação de vento nos intervalos de passagem de comboios.

A passagem dos comboios, particularmente, comboios de carga, introduz um acréscimo de massa considerável na estrutura, que provoca alterações no seu comportamento dinâmico. A amplitude das vibrações também aumenta significativamente durante essas passagens. Na Ponte de São João, por exemplo, a aceleração vertical a meio vão do tramo central pode ser superior a 300 mg durante a passagem de comboio, enquanto nos intervalos entre as passagens não ultrapassa 1 mg.

Apesar da sua curta duração, o valor eficaz (RMS) das vibrações forçadas é significativamente maior do que o das vibrações ambientais, o que introduz perturbações nas características dinâmicas da estrutura a identificar.

A eliminação das vibrações provocadas pelas passagens de comboio é efetuada com base no critério de valor eficaz (RMS) dos dados pré-processados. O valor máximo do RMS para que a vibração seja considerada ambiental é ajustado para a obra em monitorização. Para a Ponte de São João, considera-se a vibração ambiental se o RMS de aceleração for inferior a 0,2 mg (Figura 4).

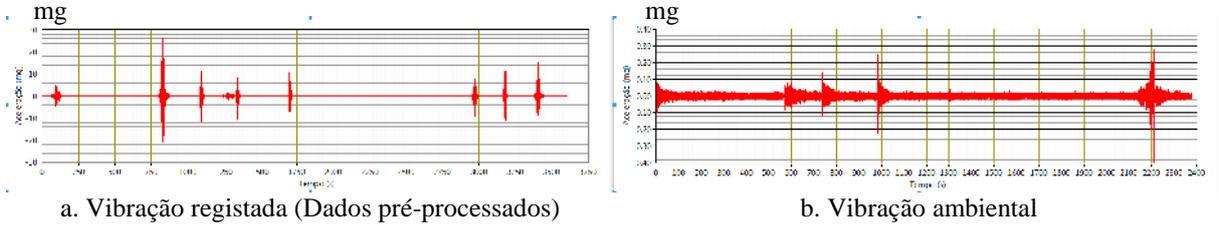


Figura 4. Pré-processamento e separação das vibrações ambientais.

### 4.3. Método de Decremento Aleatório

Na metodologia apresentada, para estimar funções de correlação das respostas estruturais é utilizada a técnica de Decremento Aleatório (*Random Decrement RD*). Nos processos estocásticos estacionários gaussianos de média nula, as funções de Decremento Aleatório (RD) são proporcionais às funções de correlação das respostas ou às suas primeiras derivadas em relação ao tempo [8],[9].

As funções RD são calculadas através duma média de amostras dos registos de resposta, sob uma condição inicial, neste caso, de passagem por um nível. Para a minimização da variância das funções RD, o nível ótimo que deve ser considerado é  $a = \sqrt{2}\sigma_x$ , onde  $\sigma_x$  é o desvio padrão da série que está a ser analisada [10].

### 4.4. Método de identificação estocástica em subespaços (SSI-COV)

O método de identificação estocástica em subespaços baseado na análise das funções de correlação da resposta dos sistemas (SSI-COV) baseia-se fundamentalmente na expressão de factorização das funções de correlação  $R$ , em que  $C$  é matriz de resposta,  $A$  é matriz de estado e  $G$  é a matriz de covariância entre os estados seguintes e as respostas:

$$R_k = CA^{k-1}G \quad (1)$$

As funções de correlação são organizadas numa matriz de *Hankel*  $H$  sob a seguinte forma:

$$H_0 = \begin{bmatrix} R_1 & R_2 & R_3 & \dots & R_q \\ R_2 & R_3 & R_4 & \dots & R_{q+1} \\ R_3 & R_4 & R_5 & \dots & R_{q+2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ R_p & R_{p+1} & R_{p+2} & \dots & R_{p+q-1} \end{bmatrix} \quad H_1 = \begin{bmatrix} R_2 & R_3 & R_4 & \dots & R_{q+1} \\ R_3 & R_4 & R_5 & \dots & R_{q+2} \\ R_4 & R_5 & R_6 & \dots & R_{q+3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ R_{p+1} & R_{p+2} & R_{p+3} & \dots & R_{p+q} \end{bmatrix} \quad (2)$$

onde  $H_1$  é deslocado por um intervalo de tempo em relação à matriz  $H_0$ .

Verifica-se que a matriz de *Hankel* das funções de correlação é o produto da matriz de observabilidade ( $O_p$ ) e da matriz de controlabilidade estocástica ( $\Gamma_q$ ):

$$H_0 = O_p \Gamma_q ; \quad H_1 = O_p A \Gamma_q \quad (3)$$

Aplicando o algoritmo de decomposição em valores singulares (SVD) à matriz de *Hankel*  $H_0$ , pode-se determinar as matrizes  $O_p$  e  $q$  e, conseqüentemente, os parâmetros modais  $(\zeta, \omega_n)$  [8].

#### 4.5. Automatização do processo de identificação modal

Nos métodos paramétricos, a análise modal é efetuada para modelos paramétricos de ordens crescentes. Os polos obtidos são comparados entre si, em termos de frequências, coeficientes de amortecimento e configurações modais.

Para avaliar a semelhança entre as configurações modais dos polos  $i$  e  $j$  utiliza-se coeficiente  $MAC_{ij}$  (*Modal Assurance Criterion* [11]):

$$MAC_{ij} = \frac{|\mu_i^T \mu_j|^2}{(\mu_i^T \mu_i)(\mu_j^T \mu_j)} \quad (4)$$

No caso dos modos complexos, aplica-se o critério  $MACX_{ij}$  [12]:

$$MACX_{ij} = \frac{(|\mu_i^* \mu_j| + |\mu_i^T \mu_j|)^2}{(\mu_i^* \mu_i + |\mu_i^T \mu_i|)(\mu_j^* \mu_j + |\mu_j^T \mu_j|)} \quad (5)$$

onde  $\mu_i$  e  $\mu_j$  são vetores associados aos polos  $i$  e  $j$ ,  $*$  é o conjugado transposto do vetor complexo e  $T$  é matriz transposta.

Se a diferença entre polos de ordens sequenciais é inferior a um critério pré-definido, então esses polos são considerados estáveis. A visualização do diagrama de estabilização permite a identificação dos modos de vibração naturais da estrutura e a eliminação dos polos numéricos ou de ruído, uma vez que os polos que correspondem ao mesmo modo de vibração da estrutura têm parâmetros modais semelhantes em várias ordens (Figura 5).

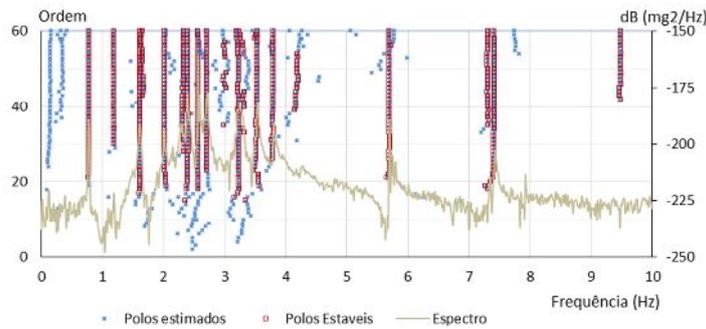


Figura 5. Diagrama de estabilização.

Para automatizar o processo da identificação dos modos de vibração naturais, na metodologia proposta a seleção dos polos estáveis é efetuada com a técnica de análise *cluster*, utilizando o critério de Distância Euclidiana [13]:

$$d_{i-j} = \left| \frac{f_i - f_j}{f_i} \right| + (1 - MAC_{ij}) \quad (6)$$

onde  $f_i$  e  $f_j$  são as frequências estimadas.

Quando mais pequena for a distância entre dois polos,  $d_{ij}$ , será maior grau de semelhança entre os modos que esses polos representam. Se a  $d_{ij}$  é inferior a um limite pré-estabelecido, consideram-se que os modos são semelhantes e os correspondentes polos são reunidos no mesmo grupo (*cluster*).

Para efeito, o critério de distância Euclidiana deve ser escolhido de forma a evitar a inclusão de polos que correspondem a diferentes modos de vibração no mesmo grupo. No entanto, se a distância for demasiado pequena, pode-se correr o risco de separar os polos que estão associados ao mesmo modo de vibração. No procedimento proposto, o limite de distância Euclidiana é ajustado para 0,01. A separação dos grupos (*clusters*) é efetuada em duas fases.

Na primeira fase, são formados grupos (*clusters*), em que a distância mínima entre um polo e os outros é inferior ao limite pré-definido. Nesta fase, não se avaliam os coeficientes de amortecimento modal. Contudo, os polos com coeficiente de amortecimento superior a 10% são eliminados.

Os modos de vibração naturais estão presentes nos modelos de diferentes ordens e, em muitos casos, a partir da baixa ordem (Figura 5). Assim, é expectável que os grupos correspondem aos modos de vibração reais sejam aqueles que com maior número de polos. No entanto, os modos pouco excitados (com pouco peso na resposta estrutural) são apenas estabilizados em ordens superiores. Se se pretende identificar um maior número possível dos modos de vibração deve-se seleccionar um número mais abrangente de grupos (Figura 6), o que pode levar a incluir grupos que não estejam associados com modos de vibração reais.

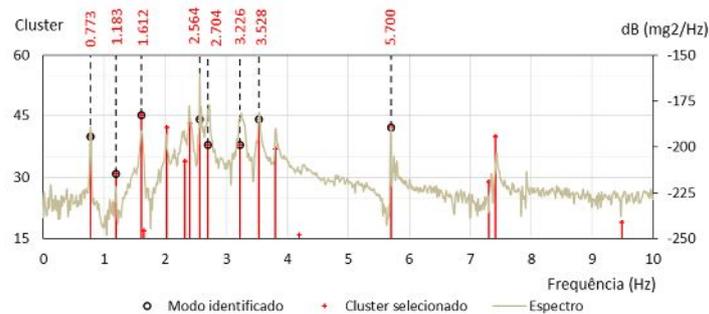


Figura 6. *Clusters* selecionados e frequências medianas dos modos verticais identificados.

Na fase seguinte, é avaliada a convergência dos polos dos grupos selecionados. Nesta fase, a convergência dos coeficientes de amortecimento também é analisada.

Considera-se que dois polos do mesmo *cluster* são convergentes se a distância Euclidiana entre eles está dentro do limite da distância Euclidiana definido e que a diferença dos seus coeficientes de amortecimento modais é inferior a 5%. Se um polo não se converja com um determinado número dos elementos do mesmo grupo, esse polo será eliminado.

Como resultado final, são obtidos modos de vibração representados pelos polos convergidos. Os parâmetros modais (frequência natural, coeficiente de amortecimento e configuração modal) são valores medianos de cada grupo.

## 5. IDENTIFICAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DINÂMICAS DA PONTE DE SÃO JOÃO

### 5.1. Considerações gerais

A aplicação da metodologia desenvolvida à Ponte de São João foi acompanhada da modelação numérica do comportamento dinâmico da ponte e da realização de um ensaio dinâmico ambiente, no qual foram medidas as acelerações verticais, transversais e longitudinais em diversas secções dos três tramos principais, que permitiram a determinação das configurações dos modos de vibração globais.

## 5.2. Modelação numérica

A análise do comportamento estrutural da ponte de São João foi efetuada com base num modelo numérico da estrutura, desenvolvido no LNEC [14]. Para a interpretação dos resultados obtidos pelo sistema de monitorização de integridade estrutural e do ensaio dinâmico de vibração, o modelo foi aperfeiçoado e ajustado, recorrendo ao programa SAP2000 [15]. O tabuleiro e os pilares foram modelados através de 154 elementos de barra de secção variável (Figura 7).

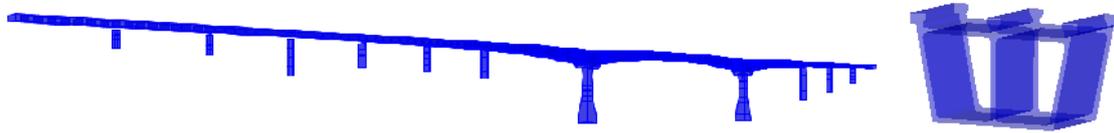


Figura 7. Modelo numérico da ponte de São João.

A ligação entre o tabuleiro e os pilares principais E1 e D1 é rígida, materializada através de *Body Constraints*. Os apoios do tabuleiro sobre os restantes pilares e os encontros foram modelados através de elementos de ligação, admitindo-se livres as respetivas rotações.

Os apoios do tabuleiro nos encontros são móveis na direção longitudinal. No entanto, foi considerada uma rigidez nessa direção nos elementos de ligação linear, simulando a contribuição dos aparelhos antissísmicos. Todos os pilares foram considerados encastrados na base.

Devido à elevada percentagem de aço incorporado na estrutura, o peso volúmico do betão foi considerado de  $26 \text{ kN/m}^3$ . Ainda considera-se massas adicionais de  $30 \text{ kN/m}$ , correspondentes às restantes cargas permanentes.

Os valores obtidos são apresentados juntamente com os valores experimentais.

## 5.3. Ensaio de medição de vibração ambiental

No ensaio de medição de vibração ambiente foram utilizados 8 acelerómetros unidireccionais (modelo *EpiSensor ES-U*), dos quais dois mantiveram-se fixos em pontos de referência pré-definidos, enquanto os restantes acelerómetros foram sendo sucessivamente colocados em diferentes pontos para medição das vibrações verticais, transversais e longitudinais. No total, foram efetuados 9 *setups* e foram registadas acelerações em 20 pontos, distribuídos ao longo do tabuleiro dos três tramos principais.

A identificação da frequência, coeficiente de amortecimento e configuração dos modos de vibração, foi efetuada através do método aperfeiçoado de decomposição no domínio da frequência (EFDD) implementado no programa *ARTEMIS Extractor* [16].

Foram assim identificados 28 modos naturais de vibração, cujas frequências e coeficientes de amortecimento são comparados no item seguinte com os valores identificados pelo sistema de monitorização de integridade estrutural.

## 5.4. Características identificadas ao longo do tempo

O processamento automático dos registos, que se efetua separadamente para as acelerações verticais e transversais, inicia-se com o seu pré-processamento, que consiste na utilização de um filtro passa-baixo a 10 Hz e na sua decimação para uma frequência de amostragem de 25 Hz, após o que são eliminadas as vibrações associadas às passagens de comboio.

Os ficheiros binários e os dados pré-processados são guardados no computador local durante um período, previamente definido em função do espaço disponível do disco. Os valores máximos e RMS

das acelerações, os resultados obtidos pelo método de identificação estocástica em subespaços (SSI-COV) e os modos identificados são enviados para um servidor de base de dados.

A Figura 8 apresenta as frequências medianas dos *clusters* selecionados a partir das acelerações verticais e transversais, utilizando a metodologia proposta. As frequências correspondentes aos modos de vibração globais estão presentes de forma contínua ao longo do período em apreço.

Recorrendo ao modelo numérico e comparando com os resultados do ensaio dinâmico de vibração é possível confirmar que essas frequências realmente correspondem aos modos de vibração globais da estrutura, como se apresenta na Figura 9. Nota-se um melhoramento na identificação dos modos de vibração globais a partir de julho de 2015, efeito do aperfeiçoamento do processamento automático, nomeadamente, a eliminação das vibrações excessivas e o aumento da ordem dos modelos paramétricos de 40 para 60.

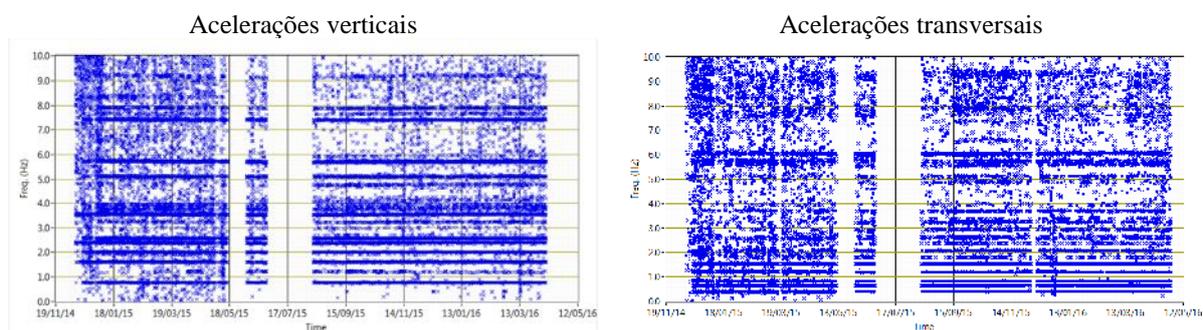


Figura 8. Frequências dos *clusters* selecionados

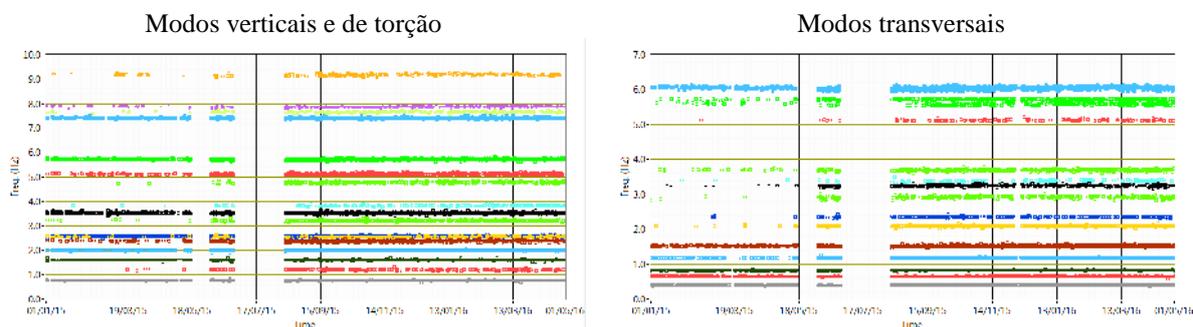


Figura 9. Frequência dos modos de vibração globais da Ponte de São João.

Os valores medianos e os desvios padrão das frequências e os coeficientes de amortecimento dos modos identificados são apresentados no Quadro 1. Verifica-se que as frequências dos modos de vibração variam pouco ao longo do tempo, sendo os desvios padrão inferiores a 0,03 Hz.

A temperatura e a humidade relativa afetam as propriedades do material. A intensidade de tráfego pode alterar o comportamento dinâmico da estrutura. Todos estes fatores podem influenciar os parâmetros modais. Mas a temperatura é um dos principais fatores que está na origem da variação das frequências identificadas, como se mostra a Figura 10.

A relação entre a temperatura e a frequência é quase linear. Este comportamento verifica-se em todos os modos de vibração identificados e a sensibilidade térmica aumenta para os modos de vibração de ordem superior.

As frequências calculadas são comparadas com as frequências medianas identificadas ao longo do tempo, através do sistema de monitorização, e do ensaio de vibração (Quadro 1). Verifica-se uma boa concordância entre os valores obtidos experimentalmente e através do modelo numérico.

Quadro 1. Frequência e coeficiente de amortecimento dos modos de vibração.

N°	SHM				Ensaio de vibração		Modelo
	f (Hz)		$\xi$ (%)		f (Hz)	$\xi$ (%)	f (Hz)
	Media	SD	Media	SD			
Modos transversais							
1	0,406	0,002	0,07	0,06	0,405	1,96	0,406
2	0,656	0,002	0,10	0,07	0,675	1,26	0,684
3	0,825	0,002	0,08	0,04	0,823	1,05	0,829
4	1,196	0,004	0,09	0,05	1,193	0,73	1,160
5	1,530	0,010	0,26	0,19	1,530	0,95	1,516
6	2,086	0,011	0,31	0,38	2,089	0,66	1,935
7	2,366	0,015	0,45	0,37	2,364	0,89	2,261
8	2,918	0,026	0,68	0,54	2,958	1,11	2,965
9	3,251	0,024	0,80	0,45	3,247	1,07	3,395
10	3,700	0,016	0,47	0,47	3,711	0,43	3,818
11	5,669	0,068	0,92	0,79	5,727	0,36	-
12	6,045	0,030	1,62	0,61	6,020	0,94	6,268
Modo longitudinal							
1	1,213	0,023	0,52	0,29	1,223	1,86	1,229
Modos verticais							
1	0,772	0,003	0,09	0,05	0,770	1,08	0,770
2	1,608	0,008	0,25	0,21	1,605	0,85	1,715
3	2,011	0,008	0,18	0,14	2,004	0,90	1,881
4	2,389	0,016	0,23	0,26	2,395	0,61	2,244
5	2,555	0,012	0,25	0,16	2,494	0,46	2,544
6	3,226	0,023	0,59	0,58	3,242	0,68	3,362
7	3,533	0,020	0,60	0,62	3,521	0,37	3,693
8	5,124	0,021	0,47	0,23	5,154	0,85	5,248
9	5,717	0,018	0,48	0,26	5,700	0,29	5,877
10	7,405	0,016	0,42	0,62	7,412	0,48	7,658
11	9,181	0,043	1,40	1,03	8,966	0,13	9,648
Modos de torção							
1	3,826	0,019	0,36	0,35	3,827	0,60	-
2	4,788	0,035	0,88	0,67	4,708	0,89	-
3	7,658	0,029	0,79	0,95	7,667	0,41	-
4	7,886	0,024	0,55	0,61	7,891	0,23	-

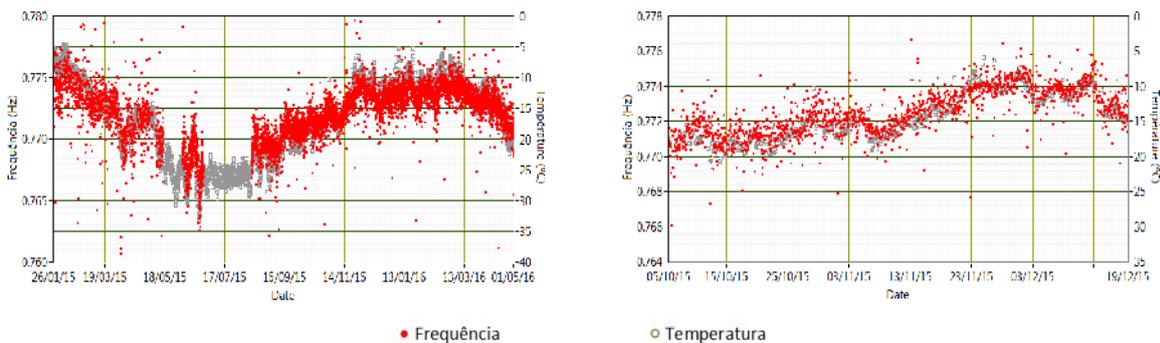


Figura 10. Frequência do 1º modo de vibração vertical e temperatura

As configurações dos 1º e 2º modos verticais e transversais, identificadas no ensaio e pelo SHM estão apresentadas na Figura 11, juntamente com as configurações obtidas pelo modelo numérico.

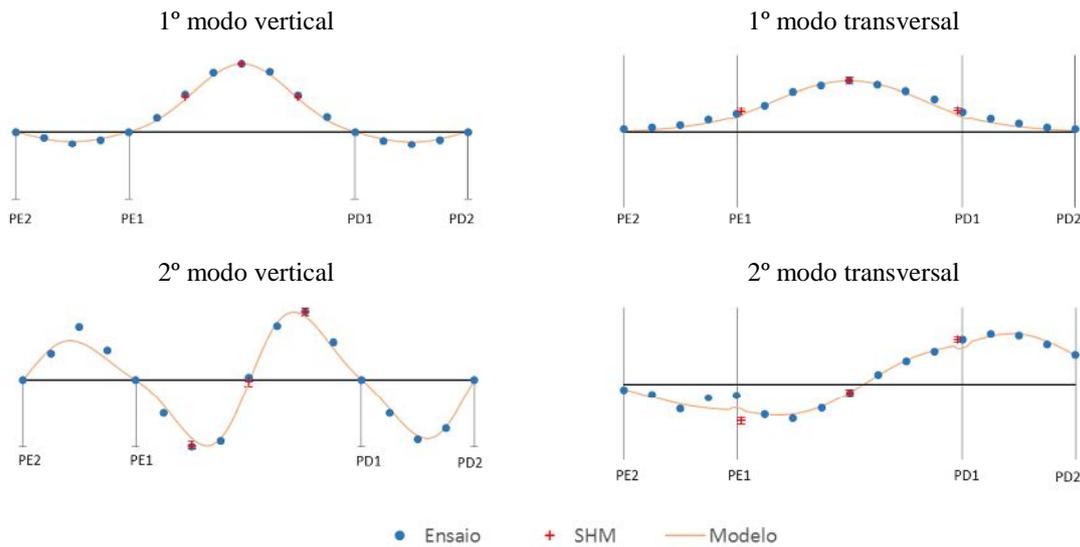


Figura 11. Configuração dos modos identificados.

## 6. CONCLUSÕES

A caracterização dinâmica da estrutura, baseada nas vibrações registadas durante o seu funcionamento, permite uma avaliação do estado global da estrutura em tempo real.

Foi desenvolvido um processamento automático de análise modal operacional, associado ao sistema de monitorização dinâmica permanente. O método proposto usa o método de identificação estocástica em subespaços com base nas funções de correlação (SSI-COV), recorrendo à técnica de Decremento Aleatório (RD) para obter funções de correlação das respostas estruturais. A seleção automática dos parâmetros modais é realizada através da análise de *clusters* baseada nos critérios de distância Euclidiana.

O ensaio dinâmico de vibração foi realizado com objetivo de obter os parâmetros modais, possibilitando a calibração do modelo numérico. O modelo numérico calibrado é uma importante referência para a interpretação dos resultados experimentais.

Os resultados obtidos na ponte ferroviária de São João, no Porto, permitiram verificar a eficácia do método desenvolvido. Com efeito, com apenas três acelerómetros em cada direção, foi possível identificar um número significativo dos modos de vibração, embora nestas circunstâncias as configurações modais sejam obtidas com pouca definição, o que dificultaria a correspondência entre os modos identificados e os calculados. Neste sentido a realização de um ensaio com um maior número de pontos de medição afigura-se da maior utilidade.

A evolução parâmetros modais durante um ano de medições evidencia a influência da temperatura nos parâmetros modais. Esta influência tem de ser considerada num procedimento de identificação de danos.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Infraestruturas de Portugal a possibilidade de apresentar este trabalho.

## REFERÊNCIAS

- [1] Cardoso, Edgar (1984). *Ponte sobre o rio Douro e seus acessos*. Projecto de execução. Lisboa.

- [2] BASTOS, Jorge (1993). "External prestressing system in the new S. João Bridge". *Workshop Behaviour of External Prestressing in Structures* (pp. 397-404). Saint-Rémy-lès-Chevreuse, France: Association Française Pour la Construction.
- [3] Castanheta, M. (1993). *Observação da nova ponte ferroviária sobre o rio Douro*, Relatório 52/93-NOE, LNEC.
- [4] Santos L.O.(2009). "Upgrading of São João Bridge Structural Health Monitoring System" in *IABSE International Symposium on Sustainable Infrastructure: Environment Friendly, Safe and Resource Efficient*, Bangkok, Thailand.
- [5] Gantner Instruments GmbH (2011). *Q.series / e.series System Guide*, Vers.No.1.31.
- [6] Reis, J.; Costa C. Oliveira (2009). *CABRIAQUIS. Manual do utilizador*. Relatório 211/2009 – NSE. LNEC.
- [7] Peeters B. (2000). *System Identification and Damage Detection in Civil Engineering*. PhD Thesis, Department of Civil Engineering, K. U. Leuven, Belgium.
- [8] Rodrigues J. (2004). *Identificação Modal Estocástica – Métodos de Análise e Aplicações em Estruturas de Engenharia Civil*. Tese de doutoramento, Universidade do Porto
- [9] Rodrigues J.; Brincker R. (2005). "Application of the Random Decrement Technique in Operational Modal Analysis". *Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Operational Modal Analysis Conference*.
- [10] Asmussen J.C. (1997). *Modal Analysis Based on the Random Decrement Technique – Application to Civil Engineering Structures*. PhD Thesis, Department of Building Technology and Structural Engineering, University of Aalborg, Denmark.
- [11] Allemang R. J.; Brown D. L. (1982). "A Correlation Coefficient for Modal Vector Analysis". *IMAC I*, Orlando, USA.
- [12] Vacher P.; Jacquier B.; Bucharles A. (2010). "Extensions of the MAC criterion to complex modes". *ISMA2010-USD2010*, Leuven, Belgium.
- [13] Magalhães F. (2010). *Operational modal analysis for testing and monitoring of bridges and special structures*. PhD Thesis, Faculty of Engineering, University of Porto, Portugal.
- [14] Santos, L. O. (2001). *Observação e análise do comportamento diferido de pontes de betão*, Tese de doutoramento. IST, Portugal
- [15] Computers and Structures (2010). *SAP2000 Structural Analysis Program*. Version 17.3.0.
- [16] Structural Vibration Solutions (2005). *ARTEMIS Extractor Handy*, Release 3.5, Denmark.