

# Identificação de alterações nas condições de apoio de uma ponte ferroviária

P. Oliveira <sup>1</sup>

L. Santos <sup>2</sup>

L. Freire <sup>3</sup>

N. Lopes <sup>4</sup>

## RESUMO

A Monitorização da Integridade Estrutural (MIE) permite avaliar o desempenho das estruturas em serviço com base na medição de grandezas relevantes através de sistemas sensoriais instalados nas estruturas, recorrendo a algoritmos de análise que permitem identificar danos. Uma das abordagens mais utilizada recorre a métodos estatísticos para a extração de informação sensível a danos ou a parâmetros da resposta estrutural para classificação da condição estrutural.

Em pontes, as técnicas de identificação de dano mais utilizadas recorrem às características dinâmicas da estrutura obtidas através de métodos de identificação modal estocástica como parâmetros de entrada para a classificação da condição estrutural. Estas técnicas de identificação de dano baseiam-se na premissa de que alterações na massa, rigidez, amortecimento ou condições de fronteira do sistema estrutural provocam alterações detetáveis nas propriedades dinâmicas da estrutura, uma vez que as características modais são função destas propriedades.

No presente artigo apresenta-se uma aplicação prática que permitiu detetar alterações nas condições de apoio de uma ponte ferroviária através das suas frequências naturais de vibração. As características modais da estrutura foram obtidas experimentalmente através do método de identificação estocástica em subespaços, na sua variante SSI-COV. Por sua vez, a classificação da condição estrutural foi realizada através de testes estatísticos aplicados às séries de resíduos obtidas após a remoção dos efeitos provocados pelas variações operacionais e ambientais. São também apresentados os estudos numéricos desenvolvidos que permitiram determinar o tipo e a localização desta alteração estrutural.

**Palavras-chave:** Ponte Ferroviária; Monitorização Estrutural; Deteção de dano

## 1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a segurança das pontes ferroviárias tem sido alvo de diversos estudos [1], [2], uma vez que estas podem sofrer deterioração estrutural como resultado do envelhecimento dos materiais, ou devido às ações atuantes [2], [3]. Com o intuito de antecipar a evolução desta deterioração tem sido utilizada nas obras de arte de grande importância patrimonial a Monitorização da Integridade Estrutural, que permite avaliar o desempenho das estruturas em serviço com base na medição de grandezas relevantes recorrendo a sistemas sensoriais. O seu principal objetivo passa por caracterizar em tempo real o desempenho da estrutura, aumentando assim a segurança estrutural e reduzindo significativamente os custos operacionais durante o período de vida útil da obra, permitindo determinar

---

<sup>1</sup> Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal. [pmoliveira@lnec.pt](mailto:pmoliveira@lnec.pt)

<sup>2</sup> Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal. [luisosantos@lnec.pt](mailto:luisosantos@lnec.pt)

<sup>3</sup> Infraestruturas de Portugal, SA, Lisboa, Portugal. [luis.freire@infraestruturasdeportugal.pt](mailto:luis.freire@infraestruturasdeportugal.pt)

<sup>4</sup> Infraestruturas de Portugal, SA, Lisboa, Portugal. [nuno.lopes@infraestruturasdeportugal.pt](mailto:nuno.lopes@infraestruturasdeportugal.pt)

e classificar os danos (localização, tipo e severidade) de um sistema sujeito a condições ambientais e operacionais variáveis [4].

A ponte ferroviária sobre o rio Sado, incluída na Variante de Alcácer (Linha do Sul), possui uma extensão total de 2,7 km, incluindo os viadutos de acesso em ambas as margens e a ponte, constituída por três tramos com 160 m de vão.

A ponte propriamente dita está instrumentada desde a sua construção em 2009. O sistema de monitorização concebido e implementado à data visava acompanhar o processo construtivo da obra. Após a empreitada, o sistema foi alterado com vista a garantir o controlo da segurança estrutural da obra e a verificar as hipóteses de cálculo assumidas em projeto. O sistema atualmente em funcionamento permite avaliar a condição estrutural da obra a longo prazo através da medição das ações e das repostas estruturais da ponte, detetando atempadamente eventuais situações anómalas. No que diz respeito às ações, o sistema permite caraterizar a temperatura do ar e dos elementos estruturais e as ações ferroviárias. Em termos de repostas, o sistema permite caraterizar a resposta da estrutura em termos de extensões (no betão e no aço), rotações, acelerações e deslocamentos (verticais e horizontais). A partir das acelerações medidas é possível obter as características dinâmicas da estrutura, o que apresenta um elevado interesse para a caracterização global do estado das estruturas (massa e rigidez), uma vez que estas propriedades dinâmicas estão diretamente relacionadas com esse estado.

O presente trabalho visa apresentar o contributo da monitorização estrutural na deteção precoce de alterações do comportamento da estrutura, mais concretamente, a identificação de uma alteração nas condições de apoio da ponte ferroviária do Sado, observada a partir da monitorização das frequências naturais de vibração da estrutura. Assim, após uma breve descrição da obra e do sistema de monitorização atualmente em funcionamento, apresenta-se a análise dos dados a partir da qual se efetua a classificação do comportamento estrutural observado. Seguidamente são apresentados os estudos numéricos desenvolvidos que permitiram determinar o tipo e a localização da alteração estrutural observada. Por fim são apresentadas as principais conclusões obtidas.

## **2. CASO DE ESTUDO**

### **2.1 Descrição da estrutura**

A Ponte ferroviária sobre o Rio Sado, na variante de Alcácer do Sal, é uma estrutura mista aço-betão, com uma extensão total de 2 735 m, constituída por um longo viaduto de acesso em cada margem e pela ponte que transpõe o rio Sado.

A ponte que transpõe o rio Sado é uma estrutura do tipo “*bowstring*” de diretriz reta, com o tabuleiro suspenso axialmente através de dezoito pendurais, espaçados de 8,00 m, a partir de três arcos como se apresenta na Figura 1. Os três tramos vencem vãos de 160 m, perfazendo um comprimento total de 480 m. O seu tabuleiro é composto por uma secção mista aço-betão formada por um caixão metálico em “U”, com 2,60 m de altura, uma largura variável entre almas de 5,65 m a 7,75 m e três banzos em chapa metálica sobre os quais se apoia a laje de betão com 0,43 m de espessura máxima e uma largura total de 15,82 m. Sob cada pendural existe um diafragma para transmissão dos esforços das almas ao pendural, constituído por uma travessa superior, reforços de alma e banzo inferior e ainda duas diagonais de suspensão. Os três arcos da ponte estão posicionados no eixo da obra, têm geometria parabólica, em alçado, e uma secção transversal em caixão hexagonal, simétrico, com largura variável entre 1,49 m e 3,20 m, respetivamente para a base e o fecho, com alturas respetivas de 2,40 m e 1,80 m.

Os pilares da ponte são constituídos por fustes tubulares em betão armado, com uma envolvente hexagonal, uma largura de 8,50 m e uma altura que varia entre 4,70 m e 5,20 m. Os pilares dispõem de um embasamento elíptico com dimensões em planta de 8,0 m × 11,0 m. No topo dos pilares existe um maciço de betão armado com 3,5 m de espessura que acomoda os aparelhos de apoio, os aparelhos antissísmicos e o batente central. O apoio do tabuleiro no pilar de extremidade norte é fixo em ambas

as direções, enquanto nos restantes pilares o apoio é móvel, mas dispendo de aparelhos antissísmicos solidários ao fundo do caixão e ao batente transversal.



Figura 1. Ponte vista geral de jusante.

## 2.2 Descrição do sistema de monitorização

O sistema de monitorização da Ponte Ferroviária do Sado é constituído por diversos tipos de sensores, que permitem medir, em diversas secções do tabuleiro, acelerações, extensões, rotações, deslocamentos verticais e horizontais, temperatura e humidade relativa (ver Figura 2).

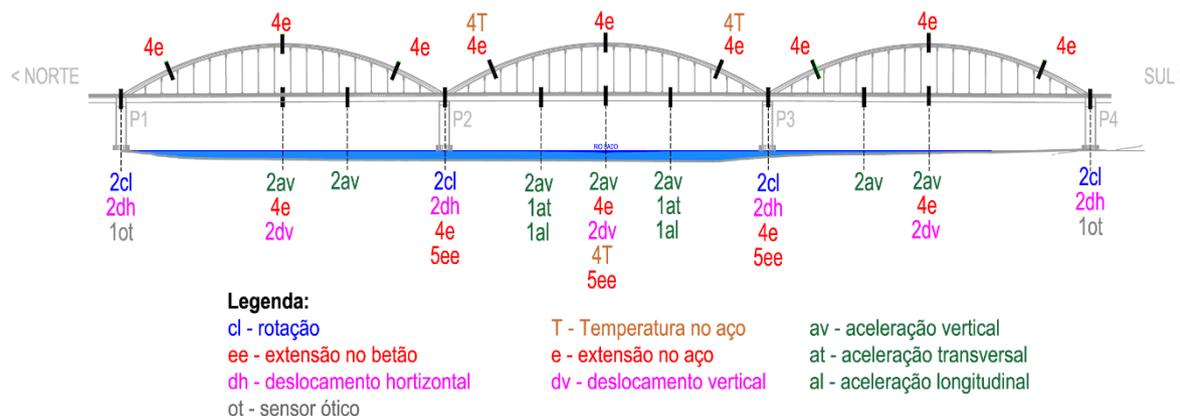


Figura 2. Plano geral de monitorização.

As extensões são medidas através de extensómetros de corda vibrante, no betão, e de pontes completas de extensómetros elétricos, no aço. Por sua vez, as temperaturas são adquiridas através de termístores e termómetros de platina do tipo PT100. Os deslocamentos verticais são medidos através de um sistema de nivelamento hidrostático, ao passo que os deslocamentos horizontais são avaliados através de transdutores de deslocamento magnetoestrictivos. As acelerações são medidas com recurso a acelerómetros uniaxiais e triaxiais tipo servo.

A aquisição de dados dos sensores instalados na Ponte ferroviária do Sado é efetuada por cinco unidades de aquisição da marca *Gantner Instruments* e por duas unidades de aquisição da marca *Datataker*. Estas unidades são controladas através de um computador industrial que, para além desta função, armazena e pré-processa os dados adquiridos em todos os sensores. Este computador controla o processo de aquisição dos dados em todos os sensores, que é feita a uma cadência de 500 leituras por segundo, por sensor. Os dados recolhidos por este sistema são alvo de filtragem, na qual se eliminam componentes

dos sinais com frequências superiores a 50 Hz, e de decimação com um fator de 5, resultando assim numa discretização no tempo de 100 leituras por segundo.

Os dados adquiridos são transferidos em tempo real e de forma totalmente automática para um servidor situado nas instalações do LNEC. Após a transmissão dos dados adquiridos e do seu tratamento no servidor do LNEC, estes são disponibilizados numa plataforma *on-line*.

### 3. DADOS ADQUIRIDOS

A apresentação dos dados adquiridos é feita nesta secção, tendo em mente a estratégia de controlo da segurança exposta nas secções seguintes, que consiste na apresentação dos dados caracterizadores das ações impostas à estrutura (temperatura) e da resposta estrutural (frequências naturais de vibração). Dada a elevada quantidade de dados adquiridos, este artigo focar-se-á apenas na extração das características dinâmicas a partir das acelerações medidas.

#### 3.1 Temperatura

As séries temporais dos valores medianos horários de temperatura registados durante o ano de 2023 na secção de meio vão do tramo central do tabuleiro e na secção de sexto de vão norte do arco do tramo central são apresentadas da Figura 3 à Figura 5. Da análise destas séries é possível observar que todas as séries exibem uma variabilidade sazonal idêntica. No entanto, em termos da variabilidade diária observa-se que os locais com maior amplitude ocorrem no banzo inferior do caixão metálico (*Tim.t2m* e *Tij.t2m*) e no arco (*Tim.as2n*, *Tij.as2n*, *Tsm.as2n* e *Tsj.as2n*) devido à exposição solar. Os sensores instalados no banzo superior do caixão e na laje de betão, exibem uma menor variabilidade diária por não terem exposição solar direta.

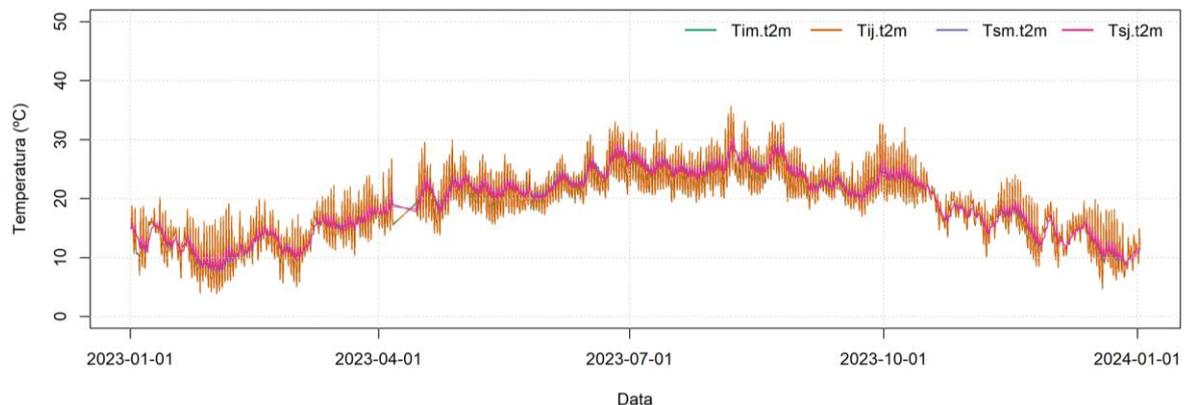


Figura 3. Séries temporais de temperatura no caixão metálico na secção de meio vão do tramo central.

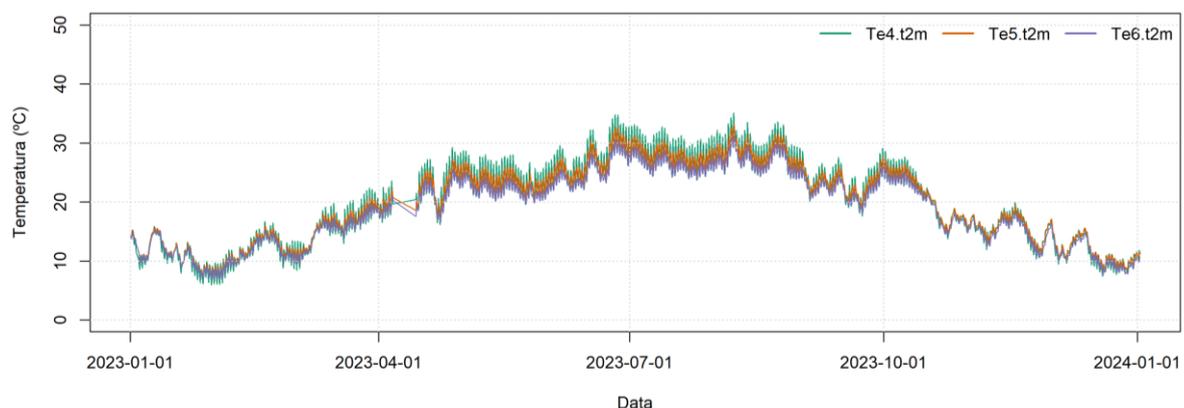


Figura 4. Séries temporais de temperatura na laje de betão na secção de meio vão do tramo central.

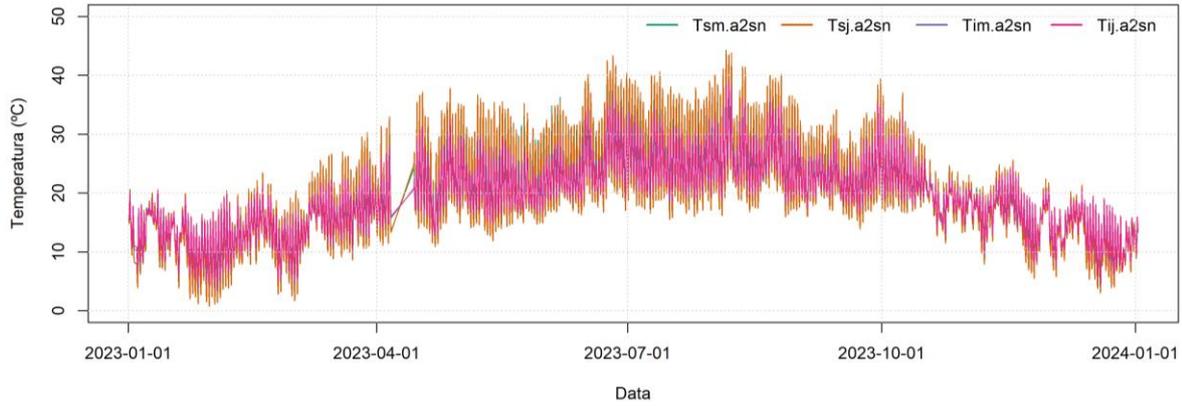


Figura 5. Séries temporais de temperatura no arco na secção de sexto de vão do tramo central.

### 3.2 Frequências naturais de vibração e configurações modais

As frequências naturais de vibração e as configurações modais foram obtidas a partir das acelerações adquiridas em vibração ambiente durante uma hora. A determinação automática das características modais foi realizada através da aplicação de métodos de identificação modal estocástica em subespaços, também designado abreviadamente por SSI-COV, na sua variante designada por realização em componentes principais [5]. Do conjunto alargado de estimativas de frequências, coeficientes de amortecimento e coordenadas modais foram traçados diagramas de estabilização [6], [7]. Os diagramas de estabilização permitem distinguir um modo de vibração da estrutura (polo estável) e do ruído (polo instável), com base em critérios de estabilização. No caso da Ponte Ferroviária do Sado foram considerados como critérios de estabilização variações de frequência inferiores a 1% entre polos consecutivos, variações de coeficiente de amortecimento inferiores a 5% entre polos consecutivos e valor mínimo de MAC (“modal assurance criterion”) de 99% também entre polos consecutivos. A identificação automática dos modos de vibração natural, ao longo do tempo, foi realizada com recurso a algoritmos de *clusters* aplicados aos polos estáveis identificados através dos diagramas de estabilização. Nesta análise foram utilizados como critérios de agregação o método de *Ward* e como função de comparação a distância euclidiana entre as frequências e o coeficiente MAC. A identificação automática dos modos de vibração natural da estrutura é realizada por comparação com uma base de referência previamente definida.

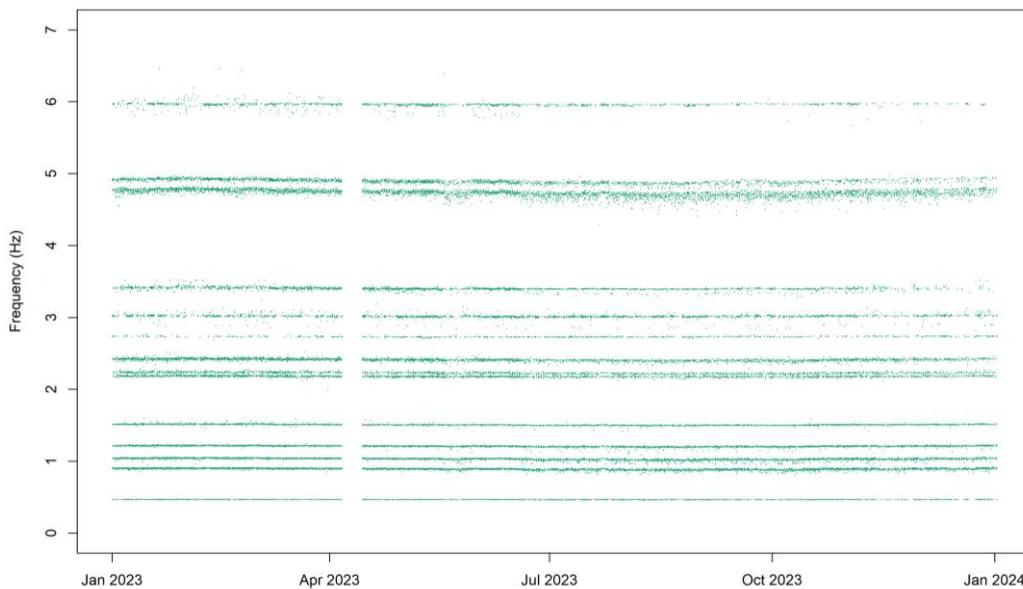


Figura 6. Séries temporais da frequência natural dos modos de vibração da ponte.

As séries temporais de frequências dos modos de vibração natural identificados através do sistema de monitorização durante o ano de 2023 estão apresentadas Figura 6. Conforme se pode observar a metodologia implementada permitiu identificar 14 modos naturais de vibração com frequências inferiores a 7 Hz. Da Figura 7 à Figura 10 estão apresentadas as séries temporais de frequências dos primeiros 4 modos identificados e as correspondentes configurações modais. Da análise destas séries é possível observar que as frequências dos modos de vibração natural variam sob efeito da temperatura.

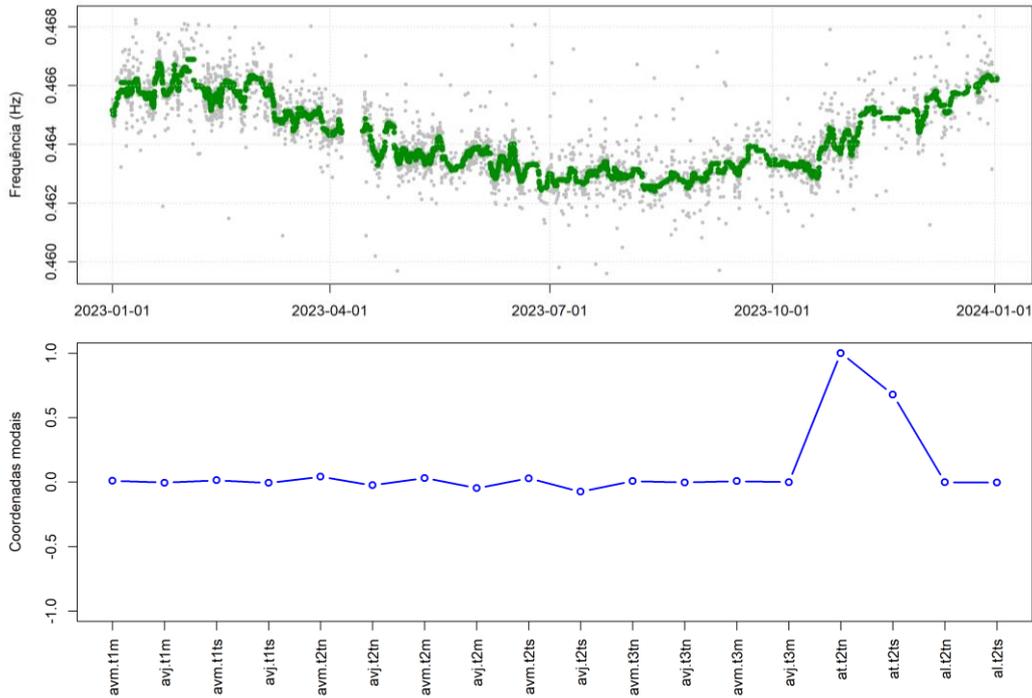


Figura 7. Frequência natural do 1º modo identificado e respetiva configuração modal (modo transversal).

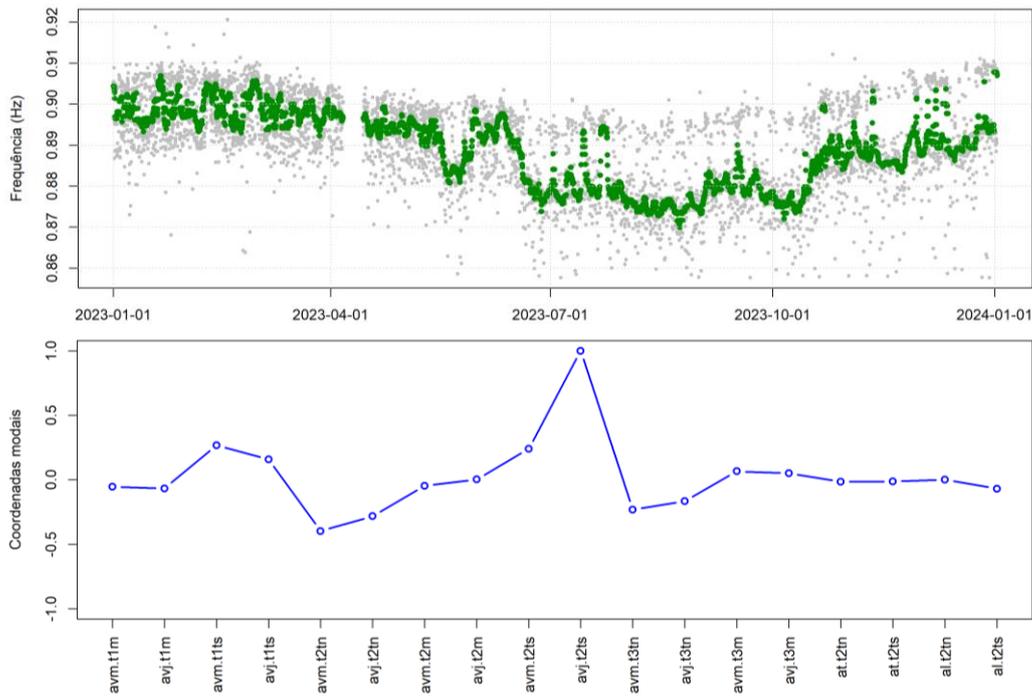


Figura 8. Frequência natural do 2º modo identificado e respetiva configuração modal (modo vertical).

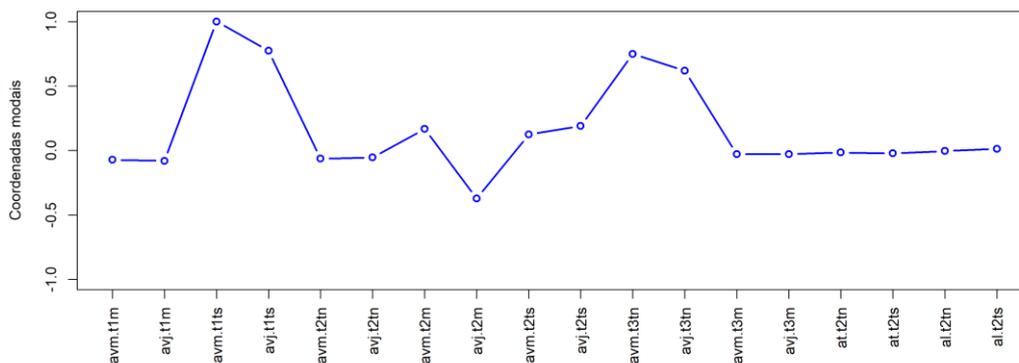


Figura 9. Frequência natural do 3º modo identificado e respetiva configuração modal (modo vertical).

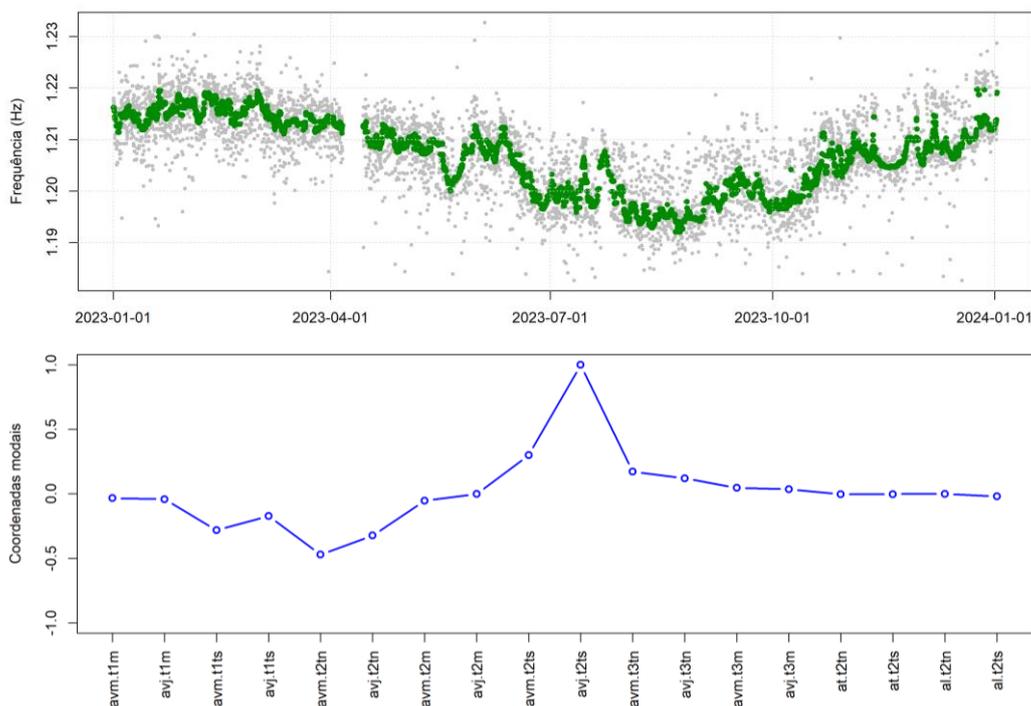


Figura 10. Frequência natural do 4º modo identificado e respetiva configuração modal (modo vertical).

#### 4. ANÁLISE DE DADOS E CLASSIFICAÇÃO DA RESPOSTA ESTRUTURAL

A avaliação da integridade da estrutura foi realizada com base numa abordagem “*data-driven*”, onde os dados medidos ou características extraídas destes numa dada condição são comparados com uma condição de referência. A metodologia utilizada baseia-se na modelação das respostas estruturais através do estabelecimento de relações entre os dados caracterizadores destas e das ações impostas à estrutura durante um período de referência (no presente caso foi considerado o ano de 2022). Os erros associados à modelação da resposta para o período de referência são em seguida caracterizados estatisticamente por forma a obter fronteiras de confiança para cada uma das respostas estruturais. As fronteiras de confiança são comparadas com as diferenças entre as respostas monitorizadas durante o período em análise e as previsões do modelo definido para o mesmo período. Caso estas diferenças não excedam os valores das fronteiras de confiança, considera-se que as ações usadas na regressão explicam as variações observadas nas respostas estruturais. Caso contrário, se as respostas apresentarem valores superiores aos das fronteiras de confiança são assinalados como alterações na resposta estrutural, devendo ser realizada uma análise mais pormenorizada.

No presente caso de estudo foram utilizados modelos de regressão linear multivariada - RLM, à semelhança da utilização apresentada em [8]. A sua escolha baseou-se na hipótese de que cada uma das ações impostas à estrutura gera um conjunto de efeitos com carácter linear, pois a estrutura encontra-se a funcionar em regime elástico. A classificação da condição estrutural é realizada através de testes de hipóteses aplicados aos desvios de estimação obtidos da modelação da resposta estrutural com RLM. Estes testes são aplicados aos valores esperados dos desvios de cada uma das grandezas caracterizadoras da resposta estrutural modelada, com um nível de confiança de 99% e assumindo que as amostras destes erros exibem uma distribuição Normal [8].

Seguidamente da Figura 11 à Figura 14 apresentam-se as séries temporais de desvio das frequências naturais de vibração dos primeiros 4 modos de vibração identificados e respetivos limites de confiança. Nestas figuras estão representados a azul as diferenças entre as respostas medidas e as previsões do modelo (desvios de estimação) e a verde os erros residuais de modelação para o período de referência. Conforme se pode observar, verifica-se que as séries dos desvios de estimação dos modos de vibração natural verticais apresentados (2º, 3º e 4º) apresentam valores que ultrapassam os limites de confiança, sensivelmente a partir de maio de 2023, o que pressupõe alteração no comportamento da estrutura.

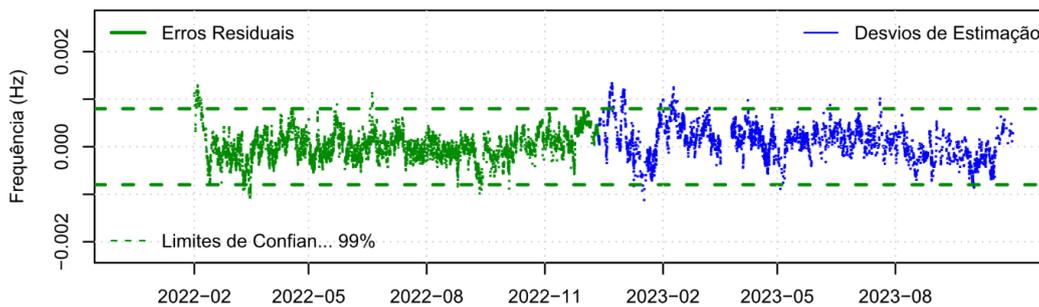


Figura 11. Séries temporais dos desvios de estimação da 1ª frequência natural identificada.

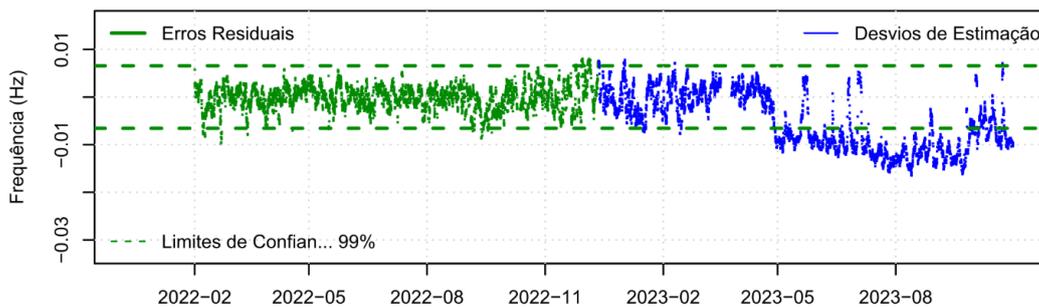


Figura 12. Séries temporais dos desvios de estimação da 2ª frequência natural identificada.

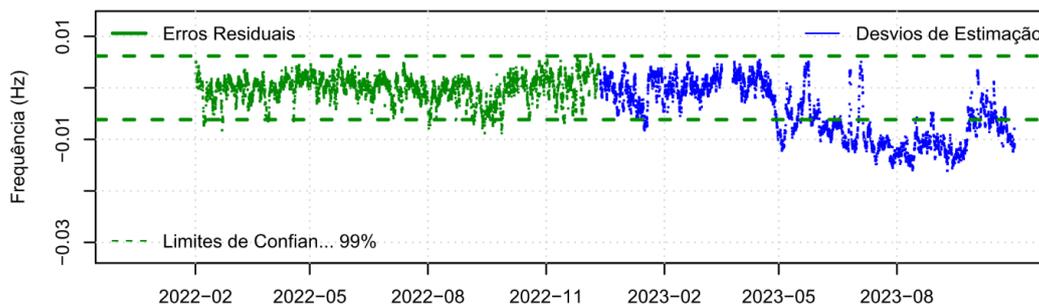


Figura 13. Séries temporais dos desvios de estimação da 3ª frequência natural identificada.

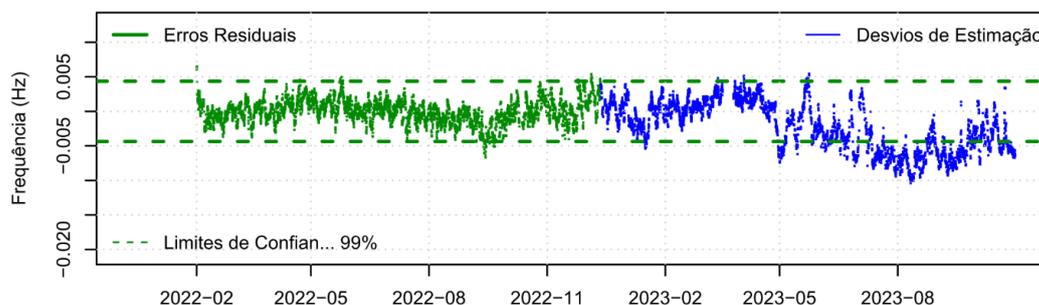


Figura 14. Séries temporais dos desvios de estimação da 4ª frequência natural identificada.

## 5. IDENTIFICAÇÃO DA ALTERAÇÃO ESTRUTURAL ATRAVÉS DO MODELO NÚMÉRICO

Por forma identificar a origem da alteração no comportamento da estrutura foram observados os restantes dados e simulados alguns cenários de dano através do modelo numérico desenvolvido e calibrado pelo LNEC (Figura 15). Com base nesta análise, foi possível constatar que a alteração observada estava subjacente a uma modificação da rigidez longitudinal dos aparelhos de apoio do pilar P2. No Quadro 1 são apresentados os valores das primeiras 14 frequências próprias da estrutura, determinadas a partir do modelo numérico da estrutura com os aparelhos de apoio bloqueados e livres, bem como a respetiva diferença em percentagem. Da análise deste quadro é possível constatar que o bloqueio dos aparelhos de apoio do pilar P2 provoca um aumento geral da rigidez da estrutura e, por conseguinte, um aumento das suas frequências próprias de vibração, sendo mais acentuadas nos modos verticais identificados com os n.ºs 4, 6 e 8 e nos modos transversais identificados com os n.ºs 5 e 13.

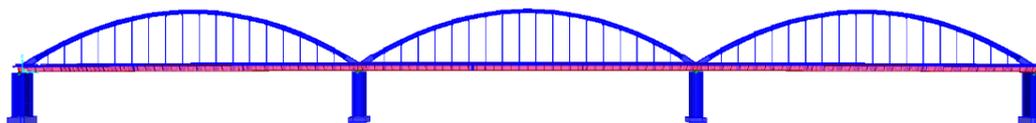


Figura 15. Modelo numérico da Ponte ferroviária sobre o rio Sado desenvolvido e calibrado pelo LNEC.

Quadro 1. Frequências obtidas numericamente para os cenários considerados.

Número	Modo vibração	P2 livre	P2 bloqueado	Diferença
1	transversal dos arcos	0,479	0,479	0,0%
2	transversal dos arcos	0,486	0,487	0,2%
3	transversal dos arcos	0,489	0,490	0,2%
4	vertical	0,854	0,946	<b>10,8%</b>
5	transversal do tabuleiro	1,070	1,099	<b>2,7%</b>
6	vertical	1,076	1,233	<b>9,3%</b>
7	transversal do tabuleiro	1,261	1,302	3,3%
8	vertical	1,166	1,350	<b>15,8%</b>
9	transversal dos arcos	1,406	1,408	0,1%
10	transversal dos arcos	1,409	1,414	0,4%
11	vertical	1,428	1,429	0,1%
12	transversal dos arcos	1,440	1,441	0,1%
13	transversal do tabuleiro	1,521	1,581	<b>3,9%</b>
14	vertical	1,810	1,812	0,1%

Comparando os resultados obtidos numericamente com os resultados medidos através do sistema de monitorização é possível constatar que os modos de vibração experimentais com alterações no comportamento estrutural correspondem aos modos de vibração mais suscetíveis ao bloqueio dos aparelhos de apoio do pilar P2, conforme se pode observar no Quadro 2. Neste quadro são apresentadas as frequências dos primeiros 5 modos fundamentais de vibração identificados através do sistema de monitorização instalado nos meses de abril e de junho de 2023, respetivamente antes e depois da alteração identificada.

Quadro 2. Frequências obtidas experimentalmente ante e após a alteração estrutural.

Número	Modo vibração	2023-04	2023-06	Diferença
1	transversal dos arcos	0.464	0.463	0.2%
4	vertical	0.894	0.882	<b>1.3%</b>
6	vertical	1.035	1.023	<b>1.2%</b>
8	vertical	1.210	1.202	0.7%
14	vertical	1.505	1.499	0.4%

Desta análise foi possível constatar que o bloqueio dos aparelhos de apoio do pilar P2 provoca um aumento geral da rigidez da estrutura e, por conseguinte, um aumento das suas frequências próprias de vibração, sendo mais acentuadas nos primeiros modos verticais.

## 6. CONCLUSÕES

O sistema de monitorização instalado na Ponte Ferroviária do Sado tem como finalidade a deteção precoce de alterações no comportamento da estrutura. Estas alterações podem indiciar não só anomalias de funcionamento em órgãos ou em elementos estruturais, mas também a degradação das propriedades mecânicas dos materiais e equipamentos utilizados. A deteção atempada de anomalias torna possível prevenir acidentes e intervir na fase inicial da sua ocorrência, permitindo, assim, reduzir os custos necessários aos trabalhos de reparação e manter os necessários níveis de segurança.

Recorrendo a uma análise do tipo “*data-driven*” aplicada aos desvios de estimação, do processo de normalização através de RLM, das frequências naturais de vibração, foi possível identificar uma alteração no comportamento da estrutura em relação à condição de referência. Esta capacidade de observar continuamente a estrutura e identificar alterações em estágios iniciais, é uma vantagem significativa em relação aos métodos convencionais baseados em inspeções visuais, para as obras de arte de grande importância patrimonial, elevado valor económico e conceção notável e singular, que justificam uma metodologia de acompanhamento particular e adaptada às suas características únicas.

## REFERÊNCIAS

- [1] Z. Sun, T. Nagayama, D. Su, and Y. Fujino, “A Damage Detection Algorithm Utilizing Dynamic Displacement of Bridge under Moving Vehicle,” *Shock and Vibration*, 2016.
- [2] B. Wu, G. Wu, C. Yang, and Y. He, “Damage identification method for continuous girder bridges based on spatially-distributed long-gauge strain sensing under moving loads,” *Mech Syst Signal Process*, vol. 104, pp. 415–435, 2018.
- [3] Y. An and J. Ou, “Experimental and numerical studies on damage localization of simply supported beams based on curvature difference probability method of waveform fractal dimension,” *J Intell Mater Syst Struct*, vol. 23, no. 4, pp. 415–426, 2012.
- [4] A. Rama Mohan Rao and K. Lakshmi, “Damage diagnostic technique combining POD with time-frequency analysis and dynamic quantum PSO,” *Meccanica*, vol. 50, no. 6, pp. 1551–1578, 2015.
- [5] J. Rodrigues, “Identificação Modal Estocástica: Métodos de Análise e Aplicações em Estruturas de Engenharia Civil,” 2004.
- [6] F. Magalhães, A. Cunha, and E. Caetano, “Vibration based structural health monitoring of an arch bridge: From automated OMA to damage detection,” *Mech Syst Signal Process*, vol. 28, pp. 212–228, Apr. 2012.
- [7] F. Ubertini, C. Gentile, and A. L. Materazzi, “Automated modal identification in operational conditions and its application to bridges,” *Eng Struct*, vol. 46, pp. 264–278, 2013.
- [8] J. P. Santos, “Smart Structural Health Monitoring Techniques for Novelty Identification in Civil Engineering Structures,” 2014.