

MONITORIZAÇÃO ESTRUTURAL DA PONTE DO FREIXO



Tiago Coelho

Eng. Civil
Laboratório Nacional de
Engenharia Civil
Lisboa
tcoelho@lnec.pt



Paulo Silveira

Investigador Principal
Laboratório Nacional de
Engenharia Civil
Lisboa
paulo.silveira@lnec.pt



Min Xu

Investigadora Auxiliar
Laboratório Nacional de
Engenharia Civil
Lisboa
xumin@lnec.pt



Luís Freire

Gestor de Unidade de
Supervisão e Inspeção
Sul
Infraestruturas de
Portugal
Lisboa
luis.freire@infraestrutura
sdeportugal.pt

SUMÁRIO

A presente comunicação descreve os resultados obtidos com o sistema de monitorização da integridade estrutural instalado na Ponte do Freixo, sobre o rio Douro. Trata-se de uma estrutura de betão armado pré-esforçado, composta por dois tabuleiros geminados. Estes tabuleiros têm uma extensão total de 705 m e são constituídos por uma viga em caixão unicelular de 8 tramos, de secção variável em altura.

Os dados obtidos a partir dos sensores instalados possibilitaram efetuar uma avaliação da integridade estrutural ao longo do tempo, tirando-se partido da semelhança existente entre os dois tabuleiros da ponte para comparação de resultados. A monitorização desta obra compreende a identificação das características dinâmicas da estrutura.

Palavras-chave: Pontes; Monitorização Estrutural; Comportamento Dinâmico

1. INTRODUÇÃO

Nesta comunicação apresentam-se os resultados da monitorização estrutural da Ponte do Freixo sobre o Rio Douro no âmbito de um contrato de monitorização estrutural celebrado com a Infraestruturas de Portugal (IP-S.A.).

O sistema de monitorização instalado na Ponte do Freixo tem como principal objetivo detetar alterações no comportamento estrutural que possam indiciar eventuais danos na estrutura.

Com a deteção atempada de anomalias torna-se possível prevenir acidentes e intervir na fase inicial da ocorrência de deficiências, com a conseqüente redução dos custos nos trabalhos de reparação necessários [1], [2].

O facto desta estrutura ser composta por dois tabuleiros idênticos permite efetuar uma comparação direta entre os seus comportamentos, facilitando a identificação de eventuais problemas estruturais. Neste sentido, a distribuição dos sensores é igual nos dois tabuleiros, com a exceção da medição das temperaturas que é efetuada apenas do tabuleiro jusante.

Os resultados apresentados são referentes ao período compreendido entre 2019-04-19 e 2022-06-01 (3 anos) e refletem o comportamento global da estrutura. A monitorização estrutural desta obra compreende a medição das temperaturas no interior do betão e acelerações verticais e transversais dos tabuleiros, com a determinação das respetivas características dinâmicas.

2. CARACTERIZAÇÃO DA OBRA DE ARTE

2.1 Descrição da estrutura

Esta ponte sobre o rio Douro, que liga o Porto, na zona do Freixo, a Vila Nova de Gaia, é uma estrutura de betão armado pré-esforçado, composta por dois tabuleiros geminados correspondendo cada um deles a um sentido de circulação. Os tabuleiros têm uma extensão total de 705 m e são constituídos por uma viga em caixão unicelular de 8 tramos com os seguintes comprimentos: 55 m; 72,5 m; 72,5 m; 115 m; 150 m; 115 m; 72,5 m; 52,5 m, referenciados de sul para norte (Figura 1).

Cada tabuleiro tem 18 m de largura e a altura das vigas caixão varia entre 7,5 m e 4,3 m no tramo de 150 m, entre 7,5 m e 3,5 m nos tramos de 115 m, atingindo uma altura mínima de 2,5 m nos tramos extremos, junto aos encontros.

Os tabuleiros são pré-esforçados longitudinalmente com cabos aderentes, existindo ainda um pré-esforço exterior, efetuado por meio de cabos não aderentes, nos tramos com 115 m e 150 m. A laje superior dos caixões é pré-esforçada transversalmente, sendo também pré-esforçadas verticalmente as aduelas situadas junto dos apoios.

Os oito pilares têm secção elíptica oca, com 6,00 m de diâmetro na direção transversal. O valor do diâmetro, na direção longitudinal, está compreendido entre 2,50 m e 4,50 m, dependendo do pilar em questão. As ligações ao tabuleiro são monolíticas no caso dos pilares P4 a P7, em que se apoiam os três tramos maiores, sendo nos restantes pilares do tipo articulada móvel, de modo a permitir deslocamentos longitudinais, ou então articulada fixa.

As ações horizontais sobre o tabuleiro, tanto de origem sísmica, como decorrentes do tráfego (arranque, frenagem), são absorvidas com auxílio de aparelhos dissipadores hidráulicos (oleodinâmicos) que transmitem os esforços rápidos, mas não restringem as variações de comprimento devidas às variações de temperatura do tabuleiro. Estes dispositivos foram montados no encontro do lado do Porto e no pilar de transição (P1) do lado de Vila Nova de Gaia.



Figura 1. Alçado jusante da Ponte do Freixo

2.2 Descrição do sistema de monitorização

O sistema de monitorização abrange os três tramos de maior dimensão dos tabuleiros de montante e de jusante (P4 a P7). Dele fazem parte, um computador industrial que controla todo o equipamento, um router GSM para transmissão de dados e acesso remoto ao sistema, uma unidade de controlo com uma resolução de 19 bits, diversas subunidades de aquisição, 16 acelerómetros e 6 termómetros (Figura 2). A recolha dos sinais dos transdutores é efetuada a uma taxa de 100 Hz através de uma rotina de aquisição e tratamento de sinal instalada no PC industrial (Figura 4). Os dados adquiridos são posteriormente enviados para um servidor instalado no LNEC [3].

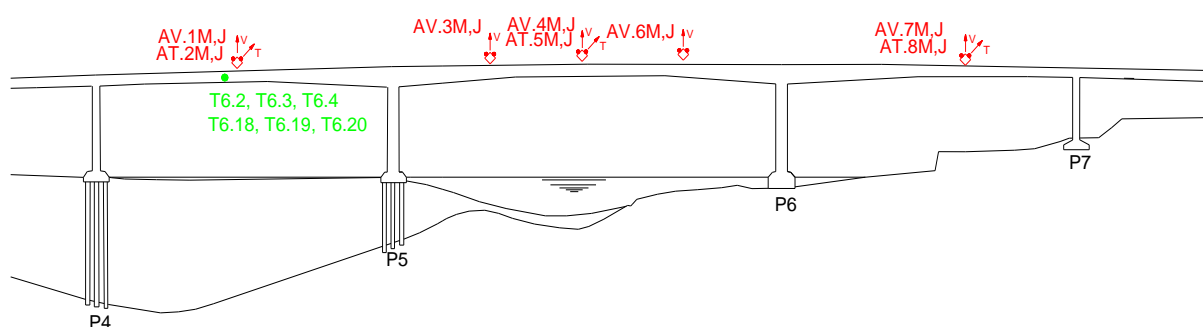


Figura 2. Distribuição dos sensores do sistema de monitorização

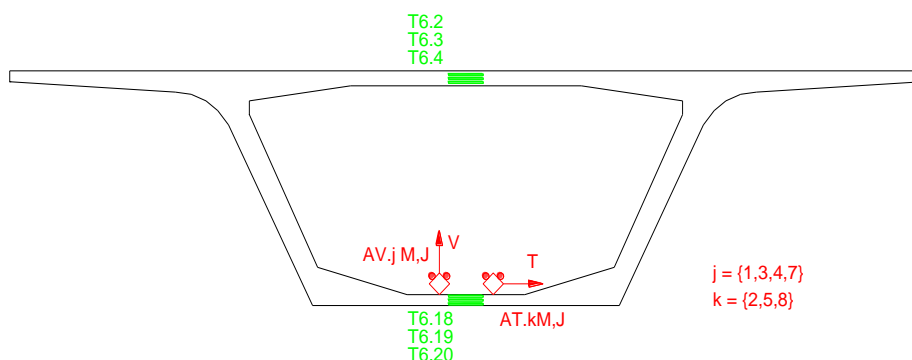


Figura 3. Distribuição dos sensores na secção transversal

As características modais do tabuleiro são determinadas através da análise dinâmica dos registos de acelerações obtidos a partir dos acelerómetros do tipo Single Axis MEMS DC, com sensibilidade de 2000 mV/g e campo de +/-2 g. Em cada tabuleiro estão instalados 8 acelerómetros, 5 verticais e 3 transversais. Nos meios-vãos dos tramos P4-P5, P5-P6 e

P6-P7 estão instalados acelerómetros verticais e transversais. Os restantes dois acelerómetros verticais encontram-se nos quartos de vão do tramo P5-P6.

As temperaturas do interior do betão são medidas com termómetros de resistência de platina (PT100). No total, registam-se os dados da temperatura a partir de 6 termómetros instalados na laje superior e inferior do tabuleiro jusante, a meio-vão do tramo P4-P5.

No Quadro 1 apresenta-se a tipologia dos vários sensores pelos dois tabuleiros, no qual os acelerómetros são representados por “AV” e “AT”, os termómetros por “T”. É também indicado o tabuleiro no qual estão instalados os sensores pelas letras M para montante e J para jusante.



Figura 4. Unidade central de aquisição e PC industrial

Quadro 1. Distribuição dos sensores pelos tabuleiros da ponte

	Acelerómetros	Termómetros
Tabuleiro jusante	AV.1J, AV.3J, AV.4J, AV.6J, AV.7J AT.2J, AT.5J, AT.8J	T6.2, T6.3, T6.4, T6.18, T6.19, T6.20
Tabuleiro montante	AV.1M, AV.3M, AV.4M, AV.6M, AV.7M AT.2M, AT.5M, AT.8M	-

3. MEDIÇÕES REALIZADAS E ANÁLISE DE RESULTADOS

3.1 Considerações gerais

O sistema de monitorização instalado realiza a recolha de leituras de trinta em trinta minutos das diversas grandezas. A cada trinta minutos são determinados os valores medianos dos termómetros para um período de vinte segundos. No caso das acelerações, são registados períodos de 15 minutos de vibração ambiental devida à ação do vento e ao tráfego rodoviário, para posterior processamento recorrendo a uma análise modal operacional. A análise destes dados tira ainda partido do facto de serem analisadas duas estruturas muito semelhantes, designadamente os dois tabuleiros que constituem a ponte, permitindo a comparação dos resultados obtidos.

3.2 Temperaturas

Na Figura 5 é apresentada a evolução da temperatura do betão, entre 2019-04-22 e 2022-06-01, através dos dados obtidos com os seis termómetros instalados nos banzos superior e inferior da secção transversal a meio vão do tramo P4 – P5. Como se pode verificar, a variação anual da temperatura no interior do betão foi de cerca de 35°C, sendo que, no banzo superior a temperatura ultrapassa 40°C no verão.

Na Figura 6 apresenta-se um excerto inicial dos dados adquiridos no período de 2019-04-22 a 2019-05-20 relativos às leituras de 30 em 30 minutos, com o intuito de ilustrar as variações diárias das temperaturas medidas com estes sensores. Neste gráfico é possível observar as diferenças significativas nas medições efetuadas com os termómetros dos banzos inferior e superior do tabuleiro, verificando-se que nos termómetros da laje superior são notórias as variações diárias da temperatura, enquanto na laje inferior essas variações são mais atenuadas, resultando num gradiente térmico na estrutura.

As maiores variações diárias da temperatura observam-se nos meses com temperaturas mais elevadas, e poderão ser justificadas pela exposição do banzo superior do tabuleiro à radiação solar, resultando em maiores amplitudes térmicas. Em alguns períodos, nomeadamente no inverno, verifica-se uma aproximação do valor médio das temperaturas, podendo indiciar o caso de dias com maior nebulosidade e uma conseqüente exposição solar de menor intensidade (Figura 6).

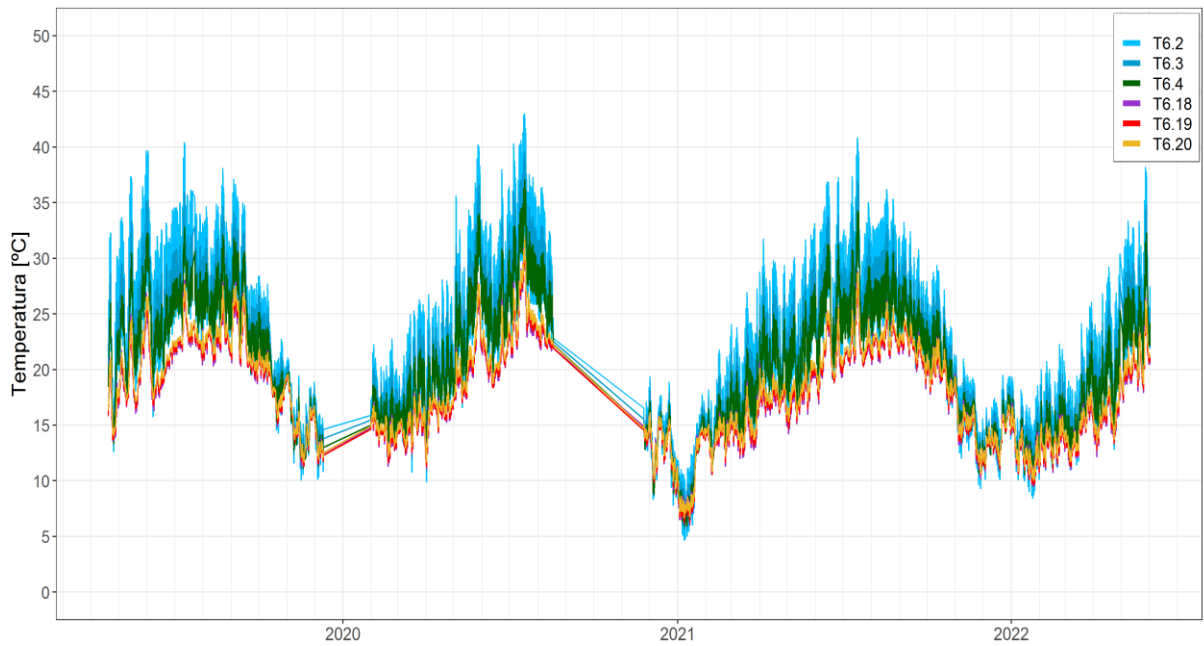


Figura 5. Séries temporais das temperaturas no interior do betão

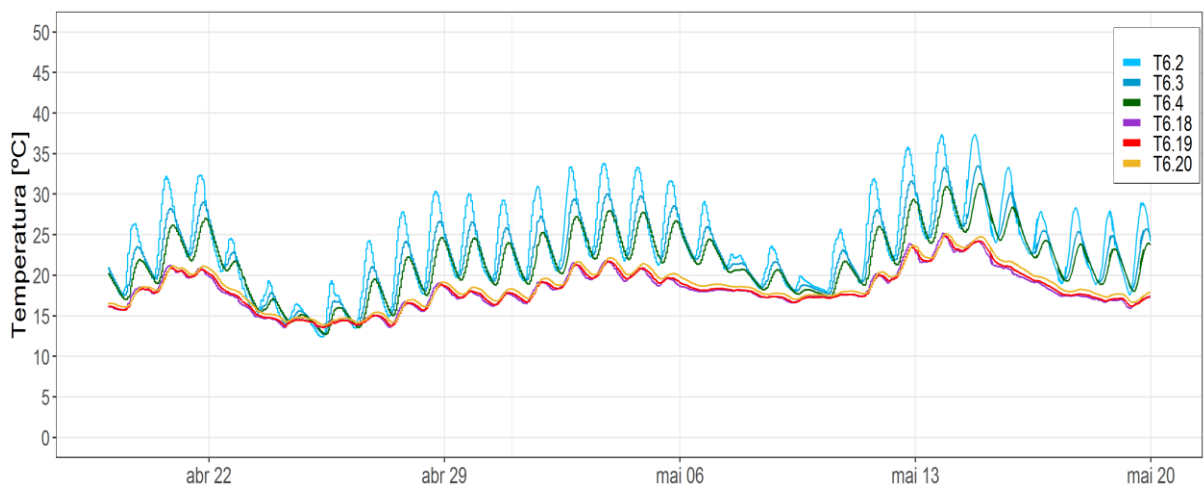


Figura 6. Variação diária da temperatura no interior do betão

3.3 Características modais dos tabuleiros

3.3.1 Considerações gerais

O tratamento dos dados recolhidos é feito em duas etapas. Na primeira é realizado um pré-processamento ainda no computador instalado na obra, que consiste na remoção de tendências lineares e na aplicação de um filtro “passa-baixo” do tipo butterworth de grau 8, com frequência de corte igual a 20 Hz [2]. Por fim os registos são decimados para uma frequência de amostragem de 50 Hz, permitindo deste modo a compactação dos dados enviados e maior rapidez de processamento nas tarefas subsequentes. Na segunda fase é realizada uma análise de clusters para construção de séries temporais de características modais num servidor situado no LNEC.

Os registos das acelerações do tabuleiro são adquiridos a cada trinta minutos, durante quinze minutos, registando as vibrações ambientais e as devidas à passagem do tráfego. Através destes registos é possível determinar as frequências naturais de vibração da estrutura e, a partir daí, identificar eventuais alterações estruturais ao longo do tempo [2].

3.3.2 Identificação modal

O processamento das acelerações medidas denomina-se por análise modal operacional, cuja metodologia permite aferir as características modais a partir das vibrações registadas na estrutura, resultantes das ações ambientais, tais como a ação do vento e as sobrecargas rodoviárias. Após a definição das séries temporais de acelerações, o passo seguinte consiste na realização de uma análise modal utilizando o método de identificação estocástica em subespaços, na sua vertente de realizações em componentes principais (SSI-COV) [2].

A construção das séries temporais de frequências consistiu na aplicação do método SSI-COV aos registos obtidos durante os quinze minutos de aquisição. Deste método resulta a representação das frequências em função da ordem do modelo SSI, tendo-se definido 50 como o valor máximo de ordem. A partir desses resultados são construídos diagramas de estabilização, nos quais é feita uma filtragem das estimativas de modo de vibração (designadas de polos) com fim de obter apenas as estimativas estáveis, associados a modos naturais de vibração da estrutura em causa [2], [4]. Os polos são considerados estáveis se as diferenças de frequência, coeficiente de amortecimento e configuração modal entre as estimativas obtidas em diversas ordens, não excederem limites pré-definidos. Nesta análise adotaram-se, como critérios de polos estáveis, variações de frequência inferior a 1%, variações de coeficiente de amortecimento inferior a 5% e valores mínimos de MAC de 98% entre polos de ordens consecutivas.

3.3.3 Séries temporais de frequência

A construção das séries temporais de frequência é realizada de forma automática e consiste em duas etapas. Numa primeira fase, procede-se à identificação automática das frequências relativas aos polos estáveis presentes no diagrama de estabilização, através da utilização de algoritmos de *clustering* [1], com os quais são agrupados todos os polos que apresentem características dinâmicas semelhantes, tais como frequências e configurações modais, sendo que o valor da frequência e a configuração modal do *cluster* identificado corresponde ao polo de ordem mais elevada. Para verificar as eventuais alterações das características dinâmicas da ponte, os modos identificados são comparados ao longo do tempo.

Para efeito foram definidos os modos de vibração de referência com base nos valores obtidos nos primeiros seis meses de monitorização (2019-04-19 a 2019-10-19). Estes valores de referência são utilizados para alocar cada um dos valores de frequência determinados através do método SSI-COV ao respetivo modo de vibração ao longo do tempo, tendo como critérios de comparação o coeficiente MAC e o valor das frequências.

O resultado deste processo encontra-se representado, para cada um dos tabuleiros, na Figura 7 e Figura 8, nas quais estão apresentadas as frequências dos modos de vibração

identificados, através de gráficos de dispersão com pontos. Nestes gráficos apresentam-se, igualmente, as séries temporais de medianas móveis com janelas de 25 horas, com a remoção do efeito da temperatura representado pelos gráficos de linhas, utilizando uma regressão linear multivariada tendo como variáveis independentes os sensores de temperatura.

Analisando estes resultados gráficos é possível verificar que as frequências mantêm um comportamento maioritariamente constante ao longo do período em análise, não indiciando sinais de anomalias estruturais.

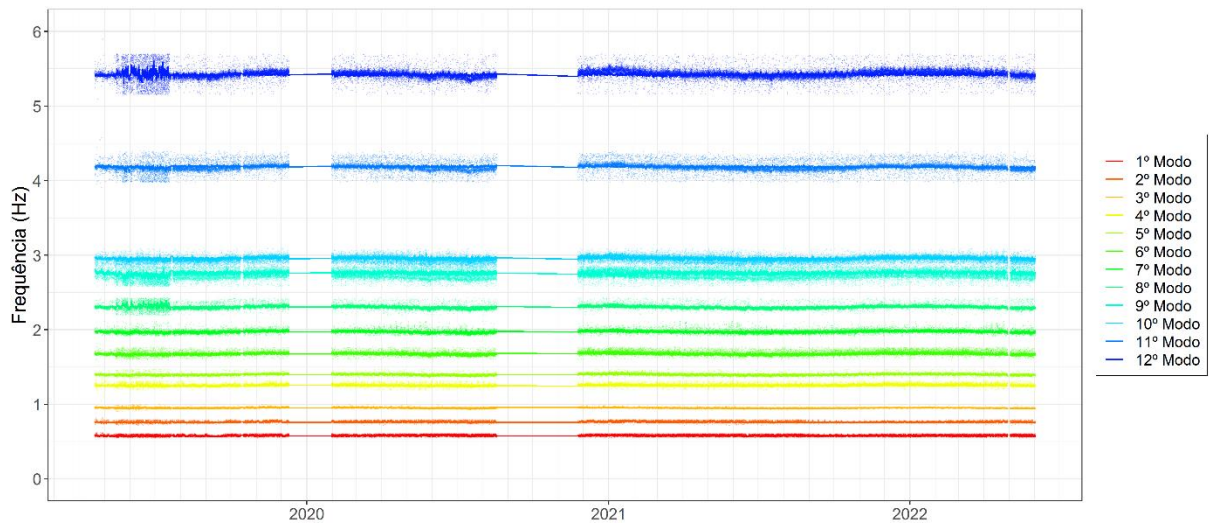


Figura 7. Séries temporais de frequência do Tabuleiro jusante

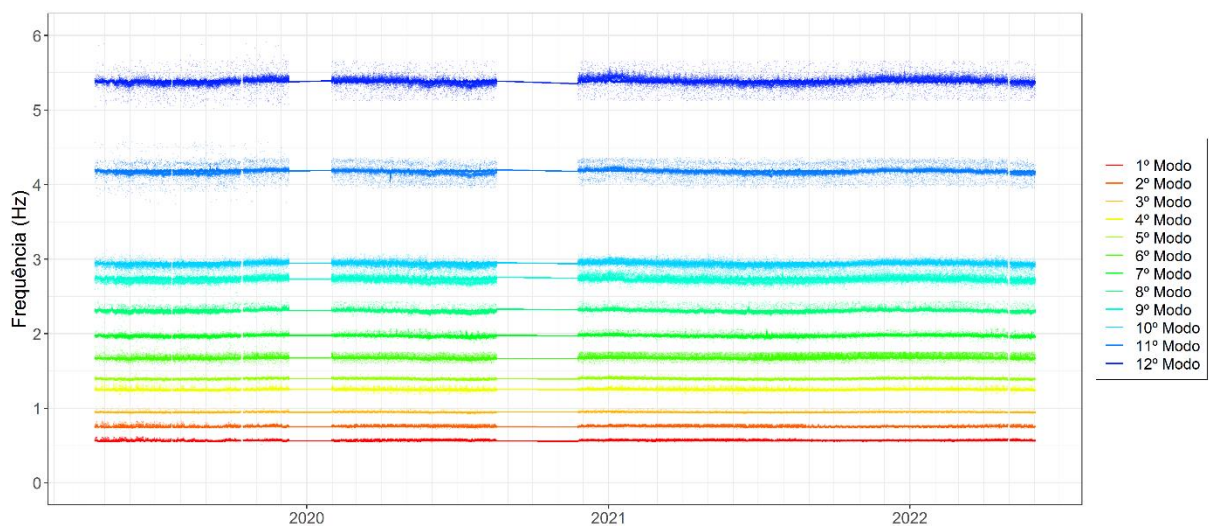


Figura 8. Séries temporais de frequência do Tabuleiro montante

Como complemento, apresentam-se no Quadro 2 os valores médios das séries temporais de medianas móveis das frequências dos modos de vibração identificados no tabuleiro montante e no tabuleiro jusante. Incluem-se igualmente os valores de MAC (*modal assurance criteria*) que permitem avaliar a semelhança dos modos de vibração entre os dois tabuleiros. As configurações modais identificadas nos dois tabuleiros, relativamente aos modos transversais e modos verticais estão representadas na Figura 11 e Figura 10.

Quadro 2. Valores medianos das medianas móveis de frequências para o período em análise

Modo de vibração	Valor mediano da frequência [Hz]	Valor mediano da frequência [Hz]	MAC	Modo de vibração	Valor mediano da frequência [Hz]	Valor mediano da frequência [Hz]	MAC
	Tabuleiro Jusante	Tabuleiro Montante			Tabuleiro Jusante	Tabuleiro Montante	
1 (H)	0.58	0.56	0.973	7 (V)	1.97	1.98	0.954
2 (H)	0.76	0.75	0.994	8 (V)	2.31	2.31	1.000
3 (V)	0.95	0.95	0.999	9 (V)	2.77	2.74	0.992
4 (H)	1.25	1.25	1.000	10 (V)	2.96	2.94	0.996
5 (V)	1.40	1.40	1.000	11 (H)	4.19	4.18	0.995
6 (V)	1.68	1.67	1.000	12 (V)	5.42	5.39	0.990

Como representação estatística das séries temporais de frequências, apresentam-se na Figura 9 diagramas de extremos e quartis¹ para as séries temporais de frequência de cada um dos doze modos de vibração identificados, após a remoção do efeito da temperatura.

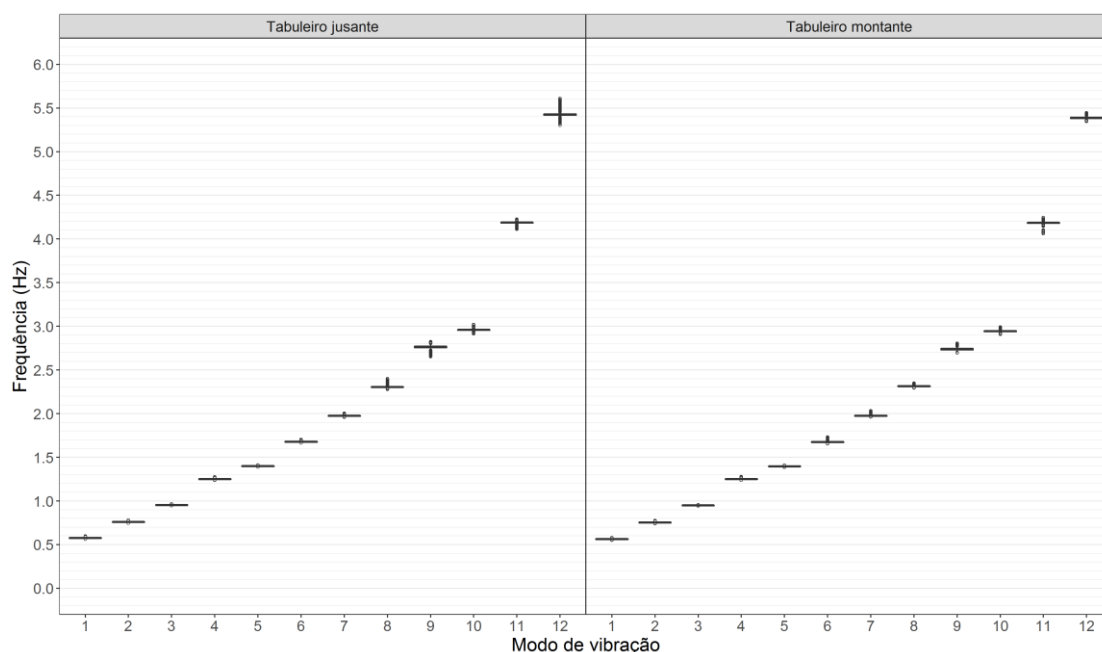


Figura 9. Diagrama de extremos e quartis das medianas móveis das frequências de vibração, após correção do efeito da temperatura

¹ Representação gráfica de uma série de dados de uma variável numérica, na qual os limites da caixa representam os quartis e o traço intermédio a mediana. As extremidades dos traços verticais representam os valores dos quartis de 25% e 75% somado a 1.5xIQR (IQR=Distância entre quartis). Os pontos representam valores aberrantes que excedem 1.5xIQR.

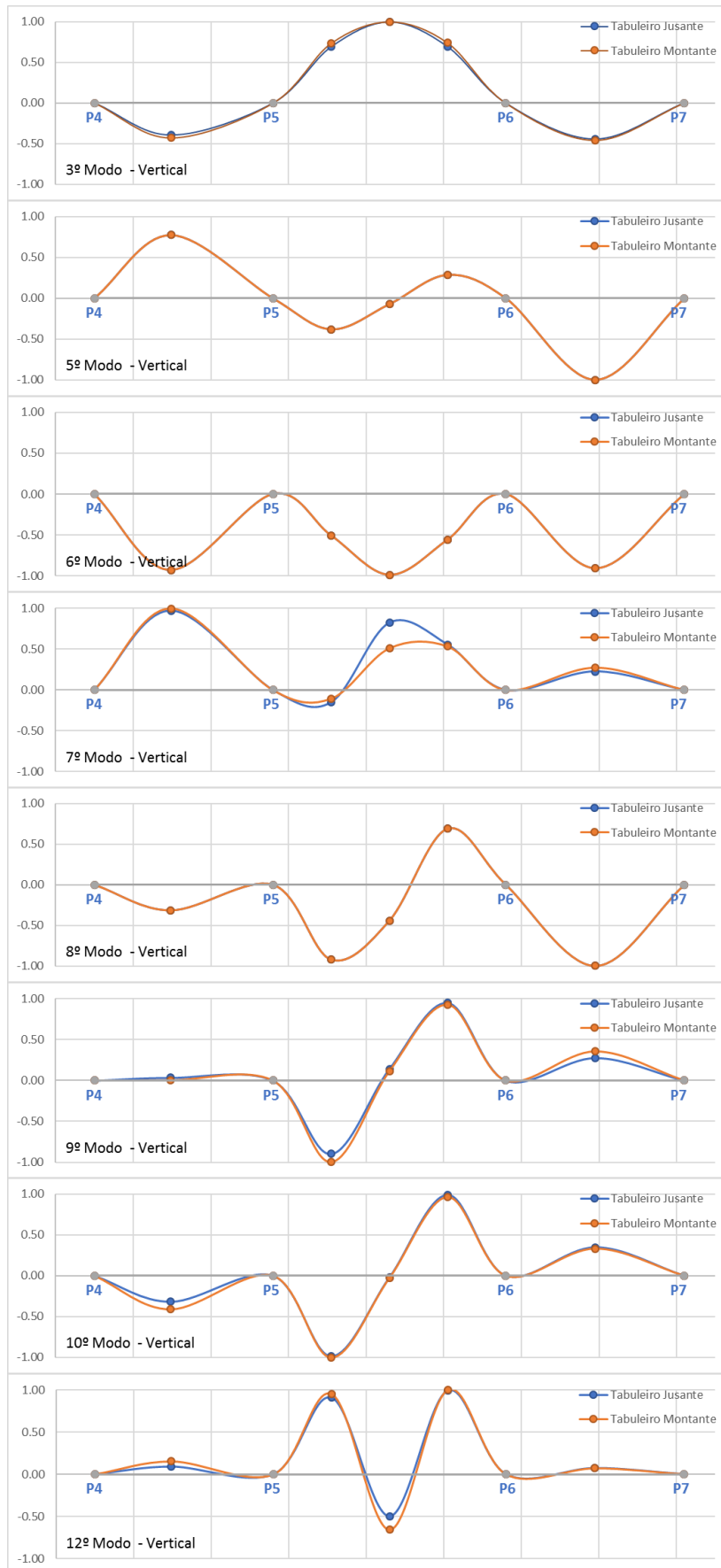


Figura 10. Modos de vibração verticais

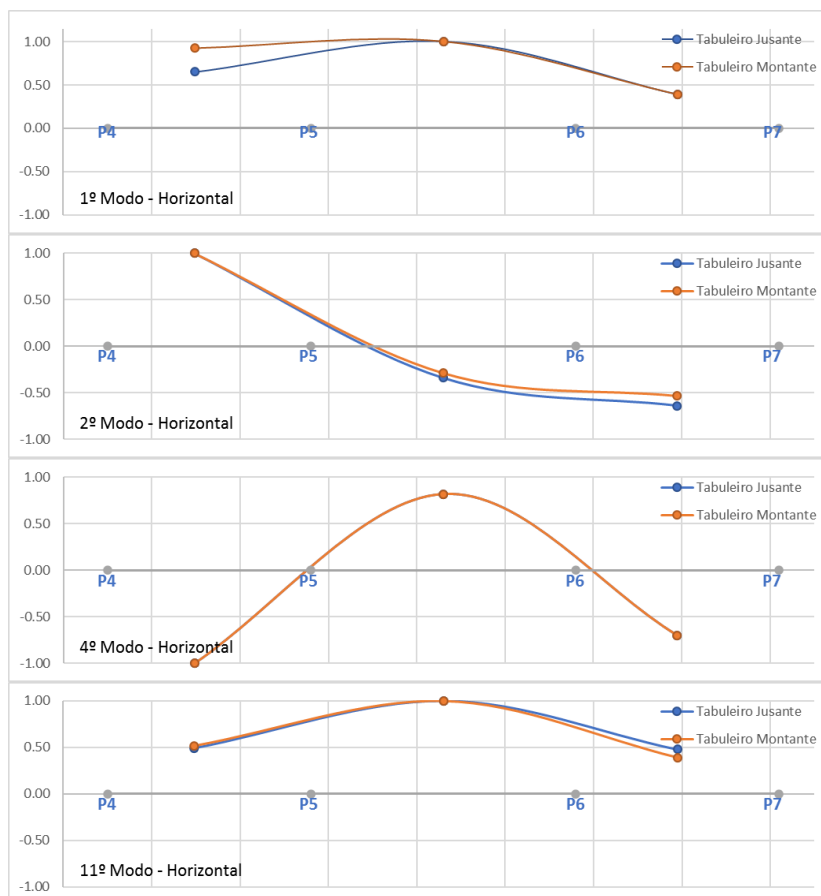


Figura 11. Modos de vibração horizontais

A partir da análise da Figura 9 e do Quadro 2 verifica-se que os valores médios das frequências naturais correspondentes aos modos de vibração identificados para os dois tabuleiros são bastante próximos, revelando assim uma boa concordância de resultados para os dois tabuleiros.

4. CONCLUSÕES

Os resultados aqui apresentados referem-se à monitorização das grandezas referidas, tendo sido adquiridos num período de 19 meses, compreendido entre 2019-04-19 e 2022-06-01.

O presente trabalho descreve a implementação de um sistema de monitorização, por solicitação da Infraestruturas de Portugal, composto por hardware e rotinas de processamento e análise de dados, desenvolvido com o objetivo de monitorizar a segurança e a integridade da Ponte do Freixo. Os resultados obtidos com este sistema, até à presente data, permitem concluir que apesar do número reduzido de sensores instalados em cada tabuleiro, é possível efetuar o controlo da sua integridade de forma automática e precisa.

A comparação direta entre as frequências naturais de vibração sob efeito das ações ambientais e do tráfego rodoviário permitem concluir que os dois tabuleiros que constituem a ponte exibem frequências de vibração com valores idênticos e apresentam um comportamento quase constante ao longo do período de observação, permitindo assim

afirmar que nenhum destes terá sofrido alterações importantes do seu comportamento estrutural global.

Refira-se ainda que, os resultados apresentados nesta comunicação são ainda disponibilizados ao cliente através de uma plataforma digital de visualização dos dados da monitorização no *website* <http://shm.lnec.pt>, encontrando-se atualizados a cada 30 minutos.

REFERÊNCIAS

- [1] J. Santos, “Smart Structural Health Monitoring Techniques for Novelty Identification in Civil Engineering Structures,” 2014.
- [2] Jorge Rodrigues, “Identificação modal estocástica métodos de análise e aplicações em estruturas de engenharia civil,” 2004.
- [3] Paulo Silveira e Pedro Oliveira, “Sistema de Monitorização Estrutural da Ponte do Freixo,” Lisboa, 2018.
- [4] Filipe Magalhães, “OPERATIONAL MODAL ANALYSIS FOR TESTING AND MONITORING OF BRIDGES AND SPECIAL STRUCTURES,” Universidade do Porto Faculdade de Engenharia, Porto, 2010.