



## Monitorização da integridade estrutural da ponte ferroviária das Pirâmides

**Pedro Oliveira**

*Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, [pmoliveira@lnec.pt](mailto:pmoliveira@lnec.pt)*

**João Santos**

*Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, [josantos@lnec.pt](mailto:josantos@lnec.pt)*

**Paulo Silveira**

*Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, [paulo.silveira@lnec.pt](mailto:paulo.silveira@lnec.pt)*

**Manuel Pipa**

*Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, [mpipa@lnec.pt](mailto:mpipa@lnec.pt)*

**Luís Freire**

*Infraestruturas de Portugal, Lisboa, Portugal, [luis.freire@infraestruturasdeportugal.pt](mailto:luis.freire@infraestruturasdeportugal.pt)*

### Resumo

O presente artigo descreve o estudo realizado com vista a avaliar o comportamento estrutural da Ponte Ferroviária das Pirâmides com base nos dados adquiridos através do sistema de monitorização instalado, assim como os procedimentos desenvolvidos para a extração automática de informação com carácter dinâmico e estático ao longo do tempo.

A Ponte Ferroviária das Pirâmides está situada em Aveiro, mais precisamente no Ramal de ligação entre o Porto de Aveiro e a Linha do Norte. Esta ponte é uma estrutura em betão armado pré-esforçado, atirantada, com uma extensão total de 175,0 m. A obra é monitorizada através de um sistema que permite medir diretamente acelerações, rotações, deslocamentos verticais e horizontais, temperatura e humidade relativa e indiretamente frequências naturais de vibração e a força de tração instalada nos tirantes.

As características dinâmicas da ponte foram obtidas com recurso à identificação estocástica em subespaços, na sua variante SSI-COV, e no tratamento automático esta informação através de análises de *clusters*. A força instalada nos tirantes foi determinada indiretamente a partir das frequências naturais de vibração destes elementos, com base na teoria das cordas vibrantes. Estas frequências foram obtidas através da análise no domínio da frequência, realizada com base na transformada rápida de Fourier. A metodologia de análise dos dados e a classificação do comportamento estrutural baseou-se na modelação das respostas estruturais através do estabelecimento de relações entre os dados que as caracterizam e as ações impostas à estrutura, e na posterior análise das diferenças entre as respostas adquiridas *in situ* e as previsões obtidas com os modelos definidos.

**Palavras-chave:** Ponte atirantada; Monitorização; Análise dinâmica; Comportamento estrutural

## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a segurança das infraestruturas ferroviárias, em especial as pontes, tem sido alvo de diversos estudos [1], [2], uma vez que estas podem sofrer deterioração estrutural como resultado do envelhecimento dos materiais, ou da falta de manutenção adequada [2], [3]. Com o intuito de antecipar a evolução desta deterioração surge a Monitorização da Integridade Estrutural, que possibilita a avaliação do 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 de uma estrutura, garantindo assim a sua segurança, podendo ainda contribuir para uma redução significativa dos custos operacionais durante o período de vida útil da obra [4]. A Monitorização da Integridade Estrutural permite determinar e classificar os danos (localização, tipo e severidade) de um sistema sujeito a condições ambientais e operacionais variáveis [4].

A Ponte das Pirâmides está situada no Ramal de ligação do Porto de Aveiro à da Linha do Norte para o transporte de mercadorias. Esta obra de arte é constituída por uma estrutura em betão armado pré-esforçado, atirantada, com uma extensão total de 175,0 m.

O seu sistema de monitorização está em funcionamento desde 2018 e foi concebido com o intuito de 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 caracterizar a temperatura do ar no exterior e no interior do betão e ainda a humidade relativa ambiente. Em termos de respostas, o sistema permite caracterizar a resposta da estrutura em termos de deslocamentos, rotações, acelerações e forças instaladas nos tirantes.

A partir das acelerações medidas no tabuleiro 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 [5].

Para o presente caso de estudo, a classificação da condição estrutural da obra foi realizada com base em testes de hipóteses aplicados aos desvios de estimação obtidos da modelação da resposta estrutural com regressão linear multivariada, através do estabelecimento de relações lineares entre os dados caracterizadores das respostas e das ações impostas.

Dada a elevada quantidade de dados adquiridos, este artigo focar-se-á apenas na extração das características dinâmicas a partir das acelerações e na determinação da força dos tirantes a partir das acelerações medidas.

O presente artigo divide-se em 5 secções. Após esta breve introdução, a secção 2 descreve o caso de estudo. Na secção 3 são apresentados os dados adquiridos no ano de 2020, em termos de ações e respostas. Na secção 4 descreve-se a análise dos dados a partir da qual se efetua a classificação do comportamento estrutural observado. Na secção 5 são apresentadas as principais conclusões obtidas.

## 2 CASO DE ESTUDO

A Ponte das Pirâmides está situada entre o km 3+500 e o km 3+675 do Ramal de acesso ao Porto de Aveiro. Este ramal faz ligação com a Linha do Norte, ao km 274+600, no terminal multimodal de Cacia, possui uma extensão total de cerca de 9 km e foi construído para o transporte de mercadorias.

### 2.1 Sistema estrutural

A Ponte Ferroviária das Pirâmides (Figura 1) é uma estrutura em betão armado pré-esforçado, atirantada, com uma extensão total de 175,0 m entre juntas. A obra transpõe o canal das Pirâmides da Ria de Aveiro, a Estrada Nacional nº 235, uma estrada municipal e um parque de estacionamento. O seu perfil transversal é constituído por uma plataforma balastrada de via única, com 4,4 m de largura e por duas calçadas técnicas com 0,55 m de largura, que permitem a circulação pedonal junto à via.

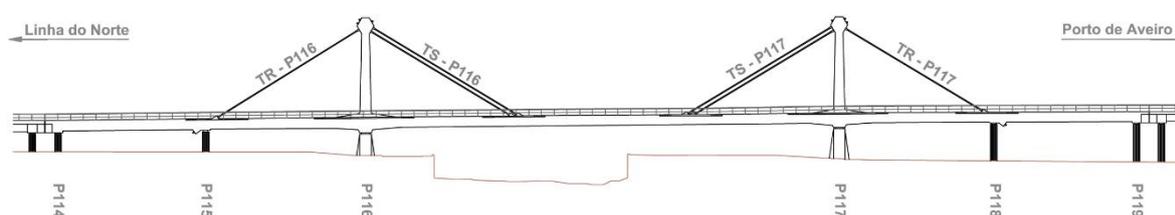


Figura 1. Alçado longitudinal da Ponte Ferroviária das Pirâmides

A ponte é constituída por cinco tramos, tendo o tramo central 75,0 m de comprimento e os tramos laterais 25,0 m. A secção transversal do tabuleiro da ponte é constante, apresenta uma forma em “U” com 7,80 m de largura total e é constituída por duas almas com 1,20 m de largura e 1,60 m de altura, e uma laje de espessura variável entre 0,40 m, sob as vigas, e 0,45 m na zona central. O tabuleiro é pré-esforçado longitudinalmente através de quatro cabos com traçado parabólico, dois por cada viga. Os cabos são constituídos por cordões de 15,2 mm de diâmetro, possuindo nos tramos laterais 31 cordões e no tramo central 37 cordões [6].

Os pilares laterais (P114, P115, P118 e P119) são cilíndricos do tipo pilar-estaca e os pilares centrais (P116 e P117), que recebem as cargas transmitidas pelos mastros, são troncos de pirâmide. Os mastros têm aproximadamente 15 m de altura acima do tabuleiro ao qual se encontram monoliticamente ligados.

O apoio do tabuleiro nos pilares laterais é realizado por meio de aparelhos de apoio tipo panela unidireccionais, ao passo que nos pilares centrais é realizado através de aparelhos de apoio tipo panela fixos, no pilar P116, e de aparelhos de apoio unidireccionais equipados com dispositivos hidráulicos que bloqueiam os deslocamentos rápidos, no pilar P117.

Em cada mastro estão ancorados dois tirantes de suspensão e dois tirantes de retenção, sendo cada um deles constituído por 37 cordões de 15,7 mm de diâmetro, auto protegidos e envolvidos por uma bainha de polietileno [6].

## 2.2 Sistema de monitorização instalado

O sistema de monitorização da Ponte Ferroviária das Pirâmides é constituído por diversos tipos de sensores, que permitem avaliar, em diversas secções do tabuleiro e dos tirantes, acelerações, rotações, deslocamentos verticais e horizontais, temperatura e humidade relativa [7] (ver Figura 2).

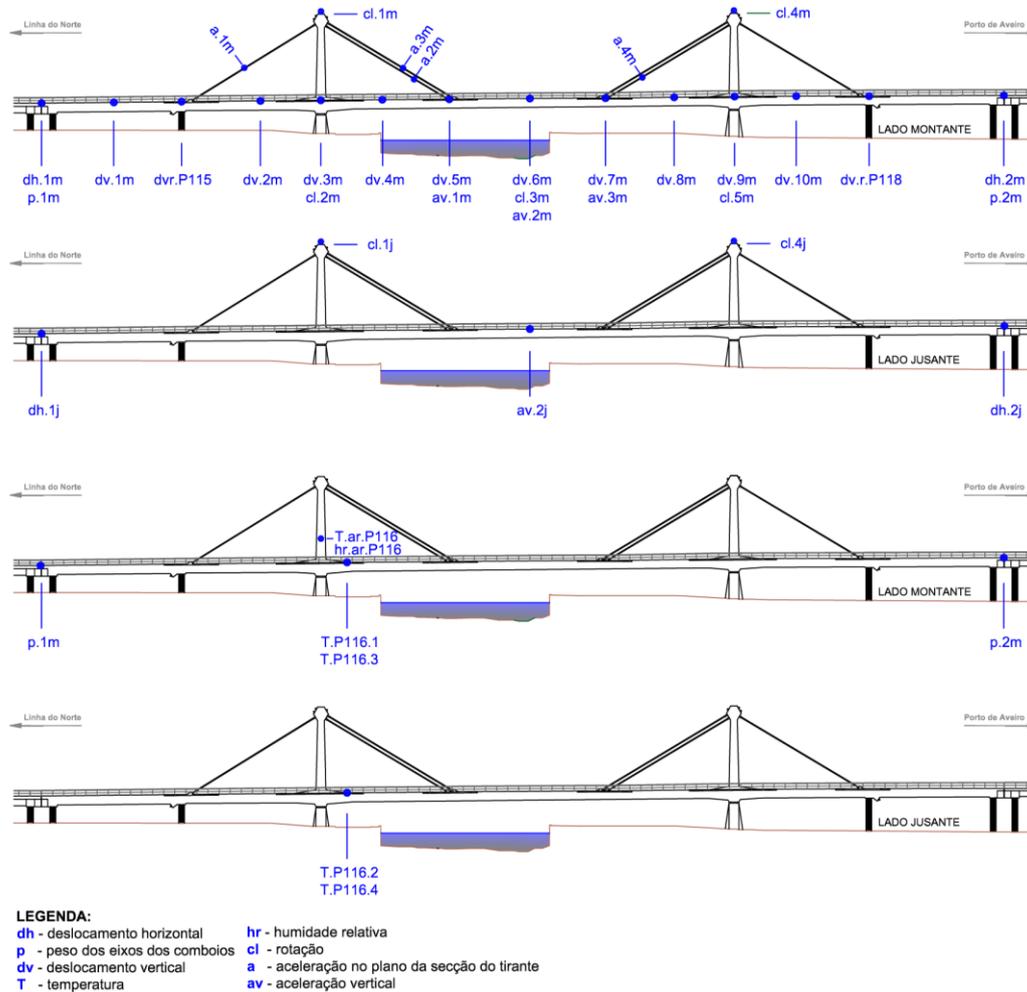


Figura 2. Plano geral de monitorização

A aquisição de dados dos sensores instalados na Ponte Ferroviária das Pirâmides é efetuada por uma unidade de aquisição da marca *Gantner Instruments* e por uma unidade 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.

O sistema de aquisição e processamento *Gantner Instruments* foi configurado para adquirir dados com uma frequência de amostragem de 200 Hz. Os dados recolhidos por este sistema são alvo de filtragem, na qual se eliminam componentes dos sinais com frequências superiores 20 Hz, e de decimação com um fator de 4, resultando assim numa discretização no tempo de 50 leituras por segundo.

A unidade de aquisição *Datataker* DT515 tem uma configuração própria que lhe permite trabalhar sem ligação permanente ao computador. A sua velocidade de aquisição de dados é baixa, mas adequada à medição das variações de temperatura.

A transferência de ficheiros dos dados adquiridos faz-se com cadência horária 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 *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, coeficientes de amortecimento e forças instalada nos tirantes).

#### 3.1.1 Temperatura

As séries temporais de temperatura e humidade relativa adquiridas durante o ano de 2020 estão apresentadas na Figura 3 e na Figura 4.

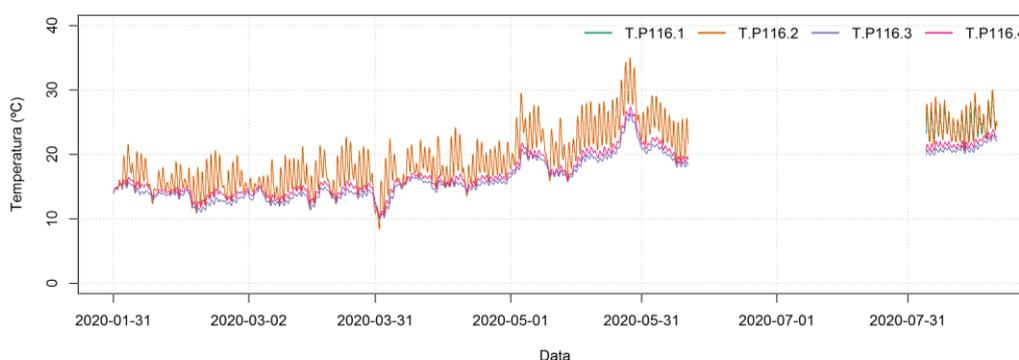


Figura 3. Séries temporais da variação da temperatura no interior do betão

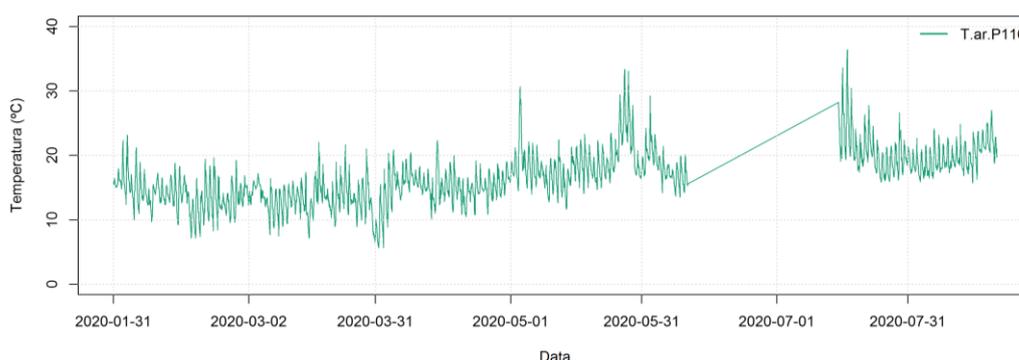


Figura 4. Séries temporais da variação da temperatura do ar

#### 3.1.2 Frequências naturais de vibração e coeficientes de amortecimento

As frequências naturais de vibração e os coeficientes de amortecimento foram obtidos através das acelerações adquiridas em vibração ambiente durante 10 minutos em cada hora.

Estas características dinâmicas da estrutura dependem diretamente da sua massa e da sua rigidez, pelo que são particularmente apropriadas para deteção de anomalias estruturais e controlo da

segurança das estruturas, assumindo a premissa de que as alterações estruturais geram variações da rigidez estrutural [8], [9].

A determinação automática das características modais da Ponte Ferroviária das Pirâmides foi realizada através da aplicação de métodos de identificação modal estocástica em subespaços, também designados abreviadamente por SSI-COV, na sua variante designada por realização em componentes principais. Do conjunto alargado de estimativas de frequências, coeficientes de amortecimento e coordenadas modais foram traçados diagramas de estabilização [10], [11]. Os diagramas de estabilização permitem distinguir os modos de vibração natural da estrutura (polo estável) dos falsos modos gerados por ruído (polo instável) [5], [12], com base em critérios de estabilização. No presente caso de estudo 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 de 99% também entre polos consecutivos [9], [12]. 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. Os algoritmos de *cluster* são previamente ajustados por forma a criar uma base de referência que posteriormente é usada na identificação automática dos modos de vibração. Na análise de *clusters* 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.

As séries temporais de frequências dos modos de vibração natural, identificados através do sistema de monitorização, estão apresentadas Figura 5. Estas séries foram filtradas com recurso a médias móveis com duração de 1 dia, por forma a reduzir a influência de valores anómalos. Da análise destas séries é possível verificar que as frequências dos modos de vibração natural variam sob efeito da temperatura. De igual modo, as séries temporais dos coeficientes de amortecimento estão apresentadas na Figura 6, e da sua análise é possível verificar que estas também são influenciadas pela temperatura. Na Tabela 1 são apresentados os valores médios de frequência e dos coeficientes de amortecimento obtidos durante o período em análise. Destes diagramas é possível constatar que a variabilidade da frequência de cada modo é reduzida, quando comparada com a amplitude do domínio de frequências em análise (0 a 14 Hz). Importa ainda referir que os coeficientes de amortecimento determinados para os modos de vibração identificados apresentam valores bastantes reduzidos, não ultrapassando os 3,5%.

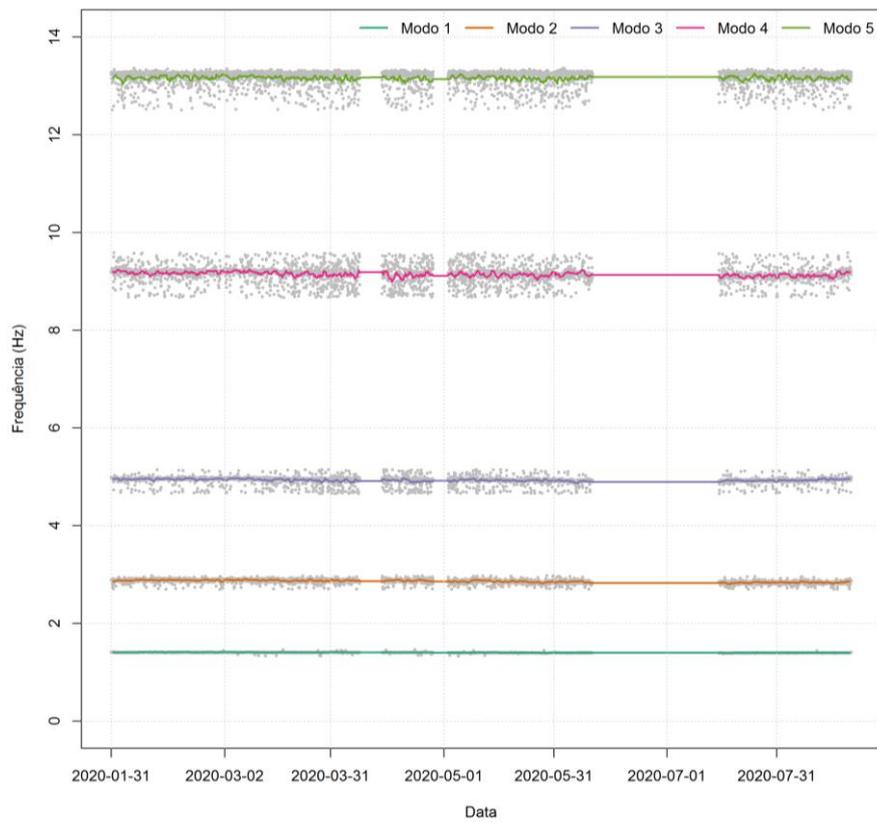


Figura 5. Séries temporais da frequência natural dos modos de vibração da ponte

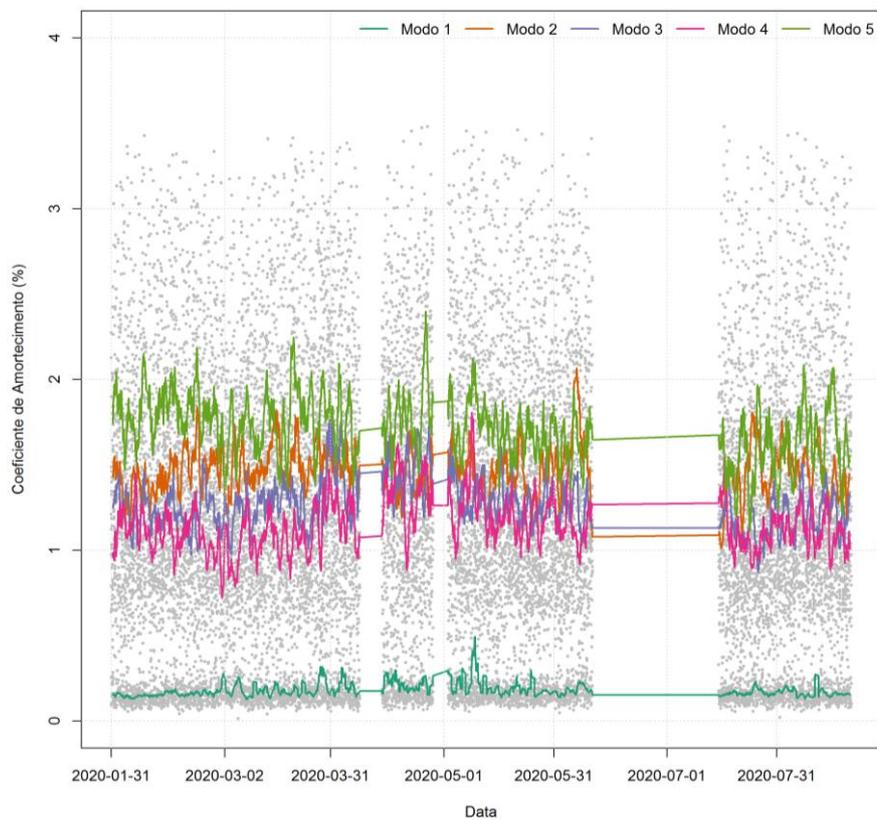


Figura 6. Séries temporais dos coeficientes de amortecimento de cada modo de vibração

Tabela 1. Valores médios das frequências de vibração natural e dos coeficientes de amortecimento identificados na Ponte Ferroviária das Pirâmides

Modo de vibração	Frequência [Hz]	Amortecimento [%]
1	1,40	0,2
2	2,86	1,5
3	4,93	1,2
4	9,15	1,1
5	13,14	1,7

### 3.1.3 Força de tração instalada nos tirantes

A força instalada nos tirantes foi determinada indiretamente a partir das frequências de vibração natural destes elementos, obtidas a partir das transformadas discretas de Fourier, calculadas através do algoritmo da transformada rápida de Fourier, mais conhecido por FFT [5].

Nas séries das estimativas de amplitude das funções de densidade espectral foram identificados os máximos locais que, quando comparados com uma base de referência dos modos de vibração dos tirantes previamente definida, permitiu identificar as frequências naturais de vibração destes elementos.

A estimativa de forças foi obtida com base nas frequências naturais de vibração dos tirantes, assumindo o modelo de corda vibrante, segundo o qual os tirantes são idealizados como elementos com inércia de flexão desprezável, não se tendo considerado o efeito da flecha do tirante. Estas hipóteses fazem com que o modelo não seja totalmente aplicável nalguns casos, nomeadamente em tirantes curtos, existindo para estas situações formulações alternativas que permitem determinar, a partir da aplicação de fatores corretivos, as frequências de um modelo de corda vibrante equivalente. A formulação matemática do método aplicado neste caso de estudo está apresentada em [13], [14].

A estimativa das forças instaladas baseou-se no ajuste das curvas teóricas entre as frequências naturais dos cabos e os modos de vibração, determinadas de acordo com [13], [14], às frequências naturais identificadas *in situ*. Este ajuste foi realizado de forma totalmente automática, incluindo critérios de validação do ajuste.

As séries temporais das forças de tração estimadas estão apresentadas na Figura 7. Nestas séries é possível constatar que não existe nenhuma tendência sazonal associada à variação de temperatura, existe apenas uma variação diária, associada ao aquecimento e arrefecimento do aço que constitui os tirantes. Estas séries foram filtradas com recurso a médias móveis com duração de 1 dia, por forma a reduzir a influência de valores aberrantes.

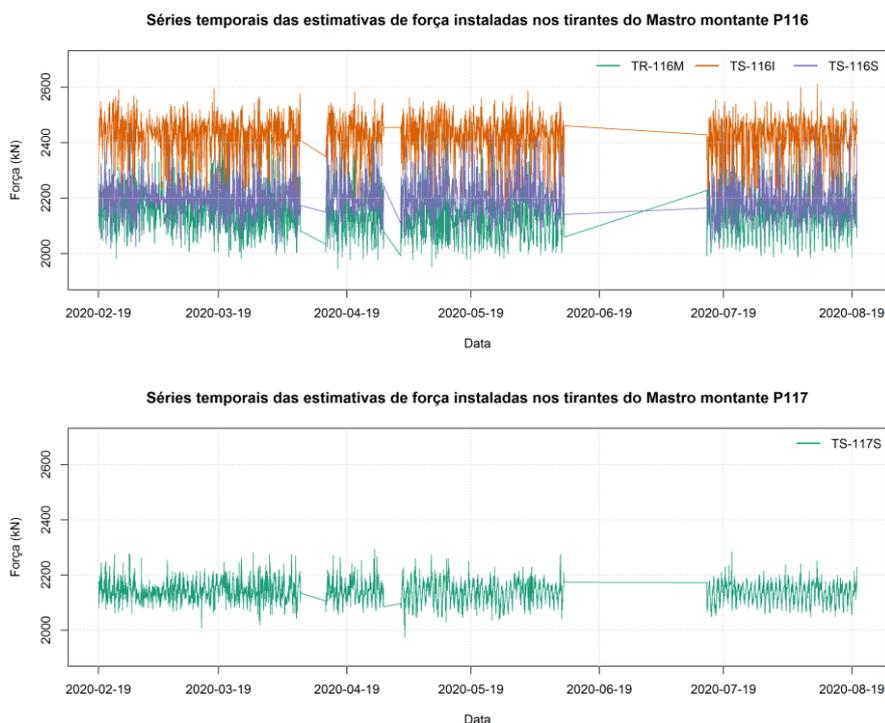


Figura 7. Séries temporais dos das estimativas de força instalada nos tirantes monitorizados (localização de cada cabo apresentada na Figura 1)

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

A metodologia de análise dos dados para aferição da segurança e da integridade estruturais baseia-se na modelação das respostas estruturais através do estabelecimento de relações entre os dados caracterizadores destas respostas e as ações impostas à estrutura durante um período de referência. Os erros associados à modelação da resposta para o período de referência, são em seguida caracterizados estatisticamente por forma a obter fronteiras estatísticas de confiança para cada uma das respostas estruturais em análise. 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.

No presente caso de estudo foram utilizados modelos de regressão linear multivariada - RLM, à semelhança da utilização apresentada em [15]. A sua escolha baseou-se na hipótese de que cada uma das ações impostas à estrutura gera um conjunto de efeitos com caráter 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 feitos 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 [15].

Seguidamente apresenta-se a classificação da condição estrutural determinada para as respostas em estudo.

#### 4.1 Frequências naturais de vibração

A modelação das frequências naturais de vibração observadas foi aplicada às séries temporais de frequência filtradas com recurso a médias móveis com duração de 1 dia, tendo-se obtido os resíduos de modelação apresentados na Figura 8. É possível observar que os modos naturais de vibração com frequências características superiores (nomeadamente os modos 4 e 5) exibem variações dos resíduos também superiores. Em termos estruturais, é possível observar que no período em análise as séries temporais dos resíduos não exibem tendências ou variações monótonas, que ultrapassem os limites definidos com base no período de referência, o que pressupõe que não tenha ocorrido nenhuma variação no comportamento estrutural da ponte.

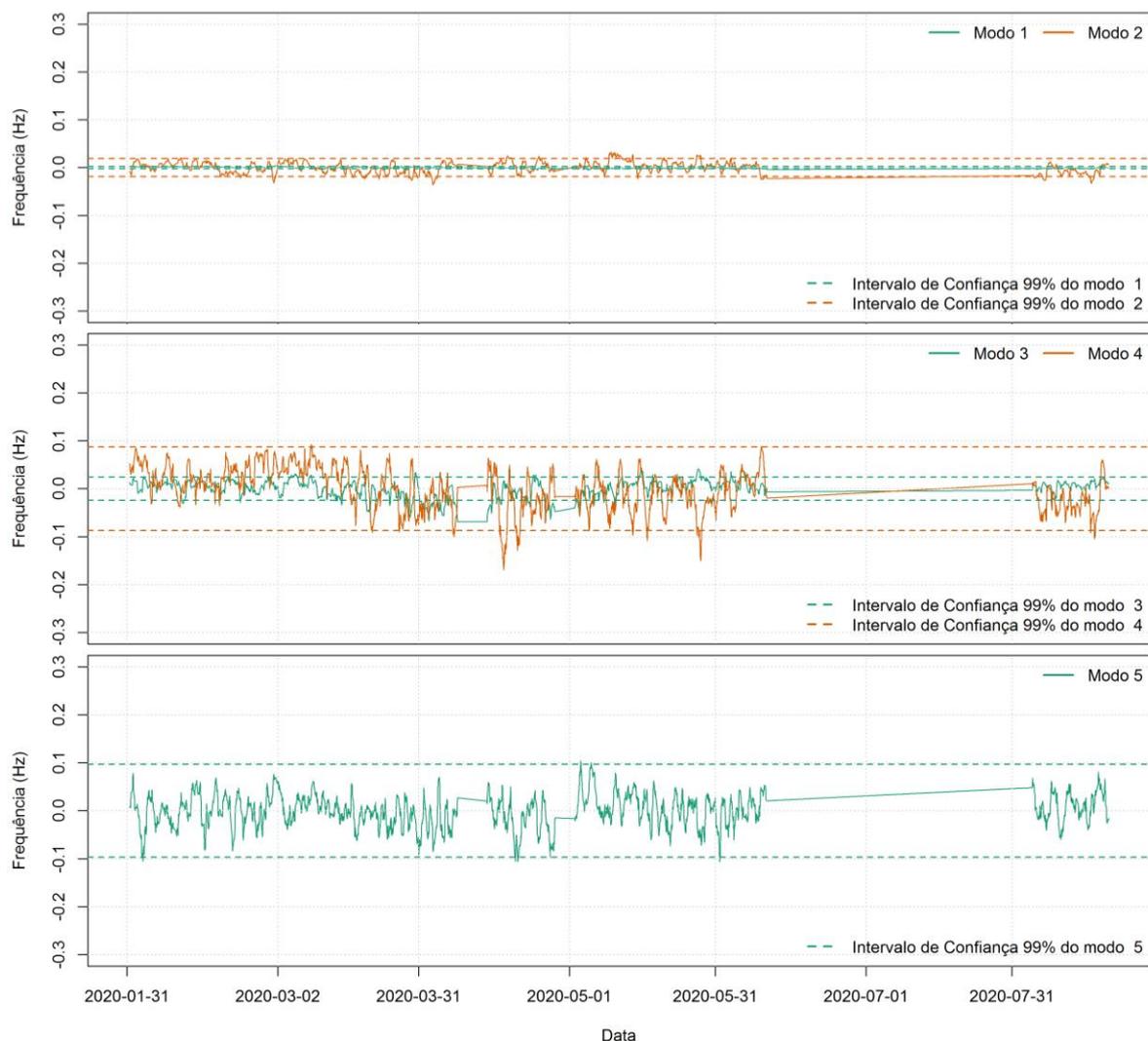


Figura 8. Séries temporais dos desvios de estimação das frequências naturais identificadas

#### 4.2 Força de tração instalada nos tirantes

Na Figura 9 apresentam-se as séries temporais dos desvios de estimação obtidos da modelação através de RLM das estimativas das forças instaladas nos tirantes. Destas séries temporais é possível constatar

que a ordem de grandeza dos desvios é muito semelhante à ordem de grandeza das séries temporais adquiridas, pelo que se pode afirmar que as ações medidas não são explicativas das variações obtidas. No entanto, pode observar-se que os resíduos apresentados não exibem tendências ou variações monótonas que ultrapassem os limites definidos, o que pressupõe que não tenham ocorrido alterações no comportamento estrutural destes elementos.

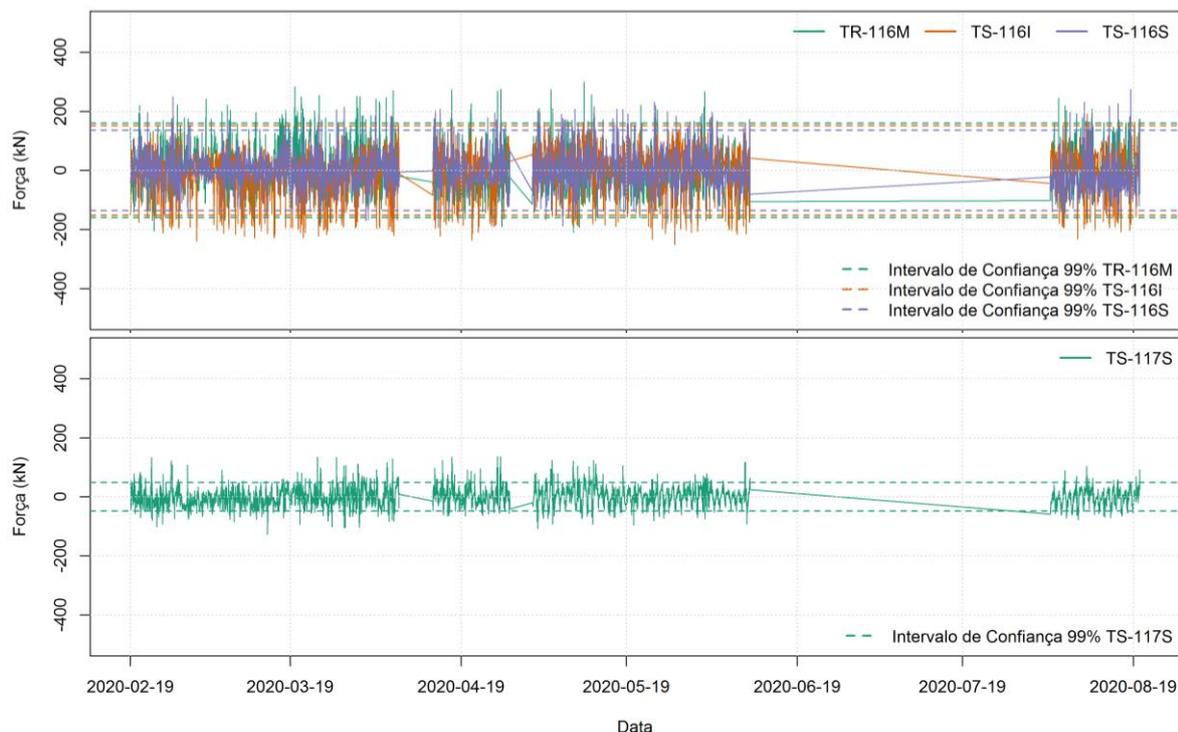


Figura 9. Séries temporais dos desvios de estimação das estimativas de força dos tirantes

## 5 CONCLUSÕES

A Ponte das Pirâmides possui um sistema de monitorização que 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.

A classificação da condição estrutural foi realizada através de testes de hipóteses aplicados aos valores esperados dos desvios de estimação obtidos da modelação das respostas estruturais, através do estabelecimento de relações entre os dados caracterizadores destas e das ações impostas. Esta classificação permitiu concluir que, com um nível de confiança de 99%, não existiram variações monótonas importantes nas séries dos desvios de estimação das frequências naturais dos modos de vibração e forças instaladas nos tirantes, que ultrapassem os limites de confiança definidos.

## REFERÊNCIAS

- [1] Z. Sun, T. Nagayama, D. Su, and Y. Fujino, "A Damage Detection Algorithm Utilizing Dynamic Displacement of Bridge under Moving Vehicle," *Shock Vib.*, vol. 2016, no. March, 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, May 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] J. L. Câncio Martins Projeto de Estruturas Lda, "Ligação ferroviária de acesso ao Porto de Aveiro. Obras de arte especiais – Ponte das Pirâmides. Projeto de execução," 2005.
- [7] P. Oliveira, T. Coelho, and P. Silveira, "Sistema de monitorização da integridade estrutural da Ponte Ferroviária das Pirâmides – Plano de instrumentação e resultados obtidos até 11 de dezembro de 2018," *Relatório 414/2018 - DE/NOE, LNEC*, 2018.
- [8] H. Sohn, C. R. Farrar, F. Hemez, and J. Czarnecki, "A review of structural health monitoring literature : 1996-2001," *Library.Lanl.Gov*, pp. 1–7, 2001.
- [9] J. P. Santos, C. Crémona, A. D. Orcesi, and P. Silveira, "Multivariate statistical analysis for early damage detection," *Eng. Struct.*, vol. 56, pp. 273–285, 2013.
- [10] 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, 2012.
- [11] 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.
- [12] T. Coelho, J. Santos, P. Silveira, and P. Oliveira, "Monitorização dinâmica e análise modal automáticas do viaduto de Santana do Cartaxo," pp. 339–349, 2015.
- [13] J. L. Robert, D. Bruhat, J. P. Gervais, and J. Chatelain, "Mesure de la tension des cables par methode vibratoire," *Bull. liaison des Lab. des ponts chaussees*, no. 173, pp. 109–114, 1991.
- [14] A. Mehrabi, "Unified Finite Difference Formulation for Free Vibration of Cables," *J. Struct. Eng.*, 1998.
- [15] J. P. Santos, "Smart Structural Health Monitoring Techniques for Novelty Identification in Civil Engineering Structures," PhD Thesis. Instituto Superior Técnico - University of Lisbon, 2014.