

Monitorização dinâmica e análise modal automáticas do viaduto de Santana do Cartaxo

Tiago Coelho

Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Estruturas, Lisboa

João Santos

Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Estruturas, Lisboa

Paulo Silveira

Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Estruturas, Lisboa

Pedro Oliveira

Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Estruturas, Lisboa

RESUMO: O presente artigo descreve o sistema de monitorização estrutural instalado no viaduto ferroviário de Santana do Cartaxo assim como os procedimentos desenvolvidos para a extração automática de informação com carácter modal e estático ao longo do tempo. Esta monitorização tem como objetivo o controlo da segurança da estrutura em tempo real, tendo para isso sido instalados acelerómetros uniaxiais a partir dos quais é realizada análise modal operacional, para determinar as características dinâmicas da estrutura, e transdutores de deslocamentos, para estudar as variações impostas aos aparelhos de apoio. Dá-se, no presente artigo, maior importância à descrição dos procedimentos de extração automática de informação modal, com base no método de identificação estocástica em subespaços (SSI) e na análise de *clusters*.

1 INTRODUÇÃO

A monitorização da integridade estrutural (MIE) é um tema com importância crescente no âmbito da segurança de estruturas de engenharia civil. Esta disciplina consiste na avaliação da segurança a partir da informação obtida por meio de sensores instalados nas obras e possibilita a prevenção de acidentes através da deteção de danos e anomalias numa fase inicial, facto que pode levar a uma redução significativa dos custos necessários aos trabalhos de reparação [Frangopol, Ghosn, Hearn, & Andrzej S. Nowak, 1998; J. P. Santos, 2014].

De entre as abordagens de monitorização da integridade estrutural, a análise modal operacional associada a monitorização dinâmica a longo prazo tem sido a mais utilizada em estruturas de pontes por permitir medir grandezas com carácter global e por fornecer grandezas (frequências, modos, etc) que estão diretamente relacionadas com a rigidez e a massa das estruturas [Rodrigues, 2004; J. Santos, Crémona, Orcesi, & Silveira, 2013].

Um dos problemas que se coloca durante a definição de um plano de monitorização da integridade de uma estrutura consiste na escolha da quantidade e precisão dos sensores necessários para uma correta interpretação dos dados adquiridos, sendo que esta está diretamente relacionada com o encargo global de monitorização. Neste sentido, este trabalho tem como objetivo a apresentação de um caso prático onde se avalia a eficácia de monitorização estrutural realizada com um número relativamente reduzido de sensores instalados.

Neste artigo é apresentado o sistema de monitorização instalado no Viaduto de Santana do Cartaxo, que é constituído por oito módulos independentes, e exposta com

maior detalhe a análise dinâmica realizada. Para a aquisição de dados necessários para a identificação das propriedades dinâmicas da estrutura, foram instalados 3 acelerómetros uniaxiais apenas nos sete tramos com maior comprimento. As características dinâmicas de cada um destes módulos foram obtidas com recurso à metodologia de análise modal SSI-COV e a sua identificação automática efetuada através de uma análise de *clusters* [J. Santos, Orcesi, Crémona, & Silveira, 2015; J. P. Santos, 2014], tendo como propósito a construção de séries temporais das frequências dos modos naturais de vibração das estruturas.

Em resultado da monitorização realizada, e sabendo que o Viaduto de Santana do Cartaxo é composto por vários módulos idênticos, é possível analisar a condição estrutural dos viadutos por comparação direta entre os respetivos comportamentos. O presente artigo divide-se em 5 secções. Após esta breve introdução, a secção 2 descreve o caso de estudo. Na secção 3 são descritas as etapas de pré-processamento dos dados adquiridos e a metodologia utilizada na análise modal operacional. Na secção 4 são apresentados os resultados da implementação da análise de *clusters* para determinação automática de frequências e definição de séries temporais, e verificada a sua aplicabilidade no controlo da segurança da estrutura. Por último, na secção 5, são exibidas as principais conclusões.

2 CASO DE ESTUDO

2.1 Sistema estrutural

A estrutura monitorizada neste trabalho é o viaduto ferroviário de Santana do Cartaxo, inserido no troço 1.4 na Linha do Norte entre o Pk 58+286 e Pk 59+597 (Figura 1).

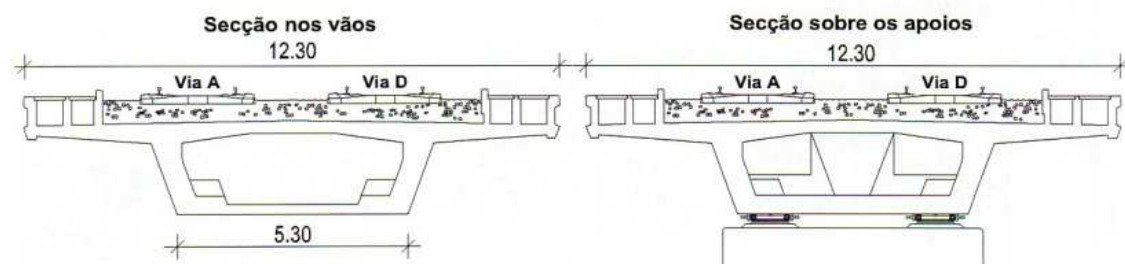
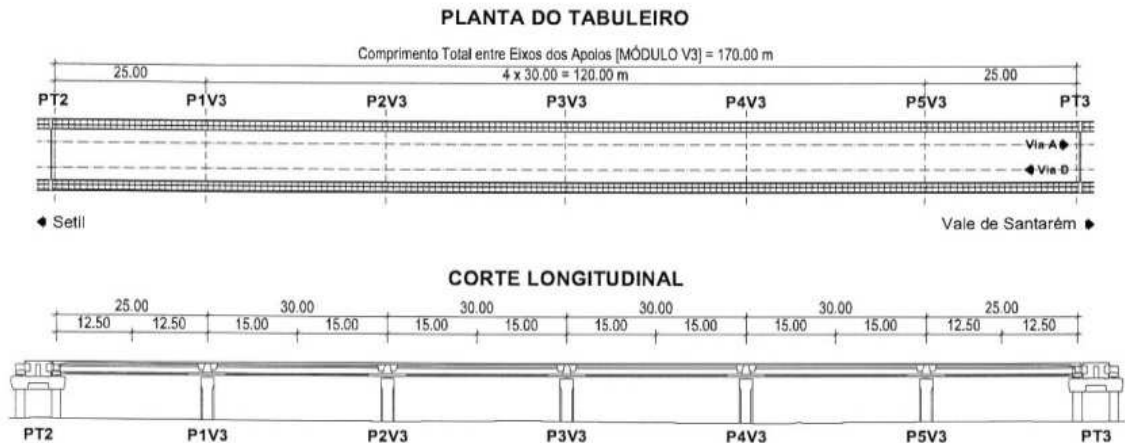
O viaduto é composto por oito módulos independentes de betão armado e pré-esforçado, apresentando uma extensão total de 1300 m. O primeiro módulo, situado na extremidade sul tem 80 m e dos restantes têm 170 m, sendo que cada módulo apresenta tramos intermédios com 30 m e tramos extremos com 25 m (Figura 2).

O eixo longitudinal do viaduto é retilíneo nos cinco primeiros módulos e ligeiramente curvo nos restantes três, com um raio máximo de 1750 m.

A secção transversal do tabuleiro consiste numa viga em caixão unicelular com 2,30 m de altura e 12,20 m de largura, prolongando-se a laje superior, por meio de consolas com 2,90 m, para ambos os lados do caixão.



Figura 1 – Viaduto de Santana do Cartaxo [Silva, 2007]



Os pilares intermédios de cada módulo são de fuste único, cuja secção de encontra inscrita num retângulo de 2,20 m x 6,00 m e assentam sobre duas estacas de 1,50 m. Os pilares de transição são do tipo pilar-estaca, constituídos por seis estacas sobre as quais se apoia uma laje com 2,25 m de espessura.

A transmissão de cargas do tabuleiro para os apoios é realizada através de aparelhos de apoio fixos e aparelhos de apoio móveis. Os aparelhos de apoio fixos são do tipo panela, com fusível viscoelástico e dissipador elastoplástico (PND), e encontram-se instalados nos três pilares centrais de cada módulo. Os aparelhos de apoio móveis são do tipo panela unidireccionais, com fusível viscoelástico e dissipador elastoplástico (PNUD).

2.2 Sistema de monitorização

O sistema de monitorização instalado no Viaduto de Santana do Cartaxo tem como principal objetivo detetar alterações no comportamento estrutural que possam indicar eventuais danos estruturais ou nos equipamentos instalados, mais especificamente nos aparelhos de apoio.

Atualmente os sensores instalados consistem em transdutores de deslocamentos horizontais do tipo magnetoestrutivo instalados para medida dos movimentos das juntas de dilatação, acelerómetros uniaxiais do tipo servo-controlado, com uma gama dinâmica de 145 dB, configurados na máxima precisão (0.025 g/V), para medição acelerações verticais do tabuleiro (Figura 4) e termómetros de resistência para registo da temperatura no interior do betão [Silveira, Coelho, & Oliveira, 2015].

Dada a extensão da obra, este sistema de monitorização foi projetado de modo a retirar a maior quantidade de informação necessária com o menor número de sensores possível. Com recurso a resultados obtidos a partir dum ensaio dinâmico efetuado pelo LNEC aos módulos 3 e 7, foi possível identificar que com a utilização de apenas 3 acelerómetros é possível identificar os primeiros 4 modos de vibração vertical [Rodrigues, 2009]. Deste modo foram instalados 3 acelerómetros, em cada um dos sete módulos de 170 m, nos três tramos centrais, resultando num total de 21

acelerómetros. Além destes sensores, estão distribuídos ao longo do viaduto 16 medidores de juntas, um em cada uma das extremidades dos módulos. Na Figura 6 apresenta-se, para os módulos 2 e 3, a disposição dos sensores na estrutura, que se repete para os restantes módulos e na qual os acelerómetros são representados por “AC” e os transdutores de deslocamentos por “DL”. Todos os sensores estão ligados a unidades de aquisição da *Gantner Instruments* com resolução igual a 19 bits controlados por um computador industrial instalado em obra (Figura 5). Os dados adquiridos são por sua vez enviados para um servidor FTP através de um Router HSDPA, permitindo ainda o acesso remoto ao computador.

A aquisição dos sinais dos transdutores é efetuada continuamente a uma taxa de de 200 Hz através de uma rotina de *LabView* [National Instruments, 1998] desenvolvida no LNEC (Figura 7). Esta rotina tem como função guardar registos de 4 minutos a cada hora e efetuar o seu pré-processamento.



Figura 4 – Acelerómetro uniaxial



Figura 5 – Sistema de aquisição: caixa central

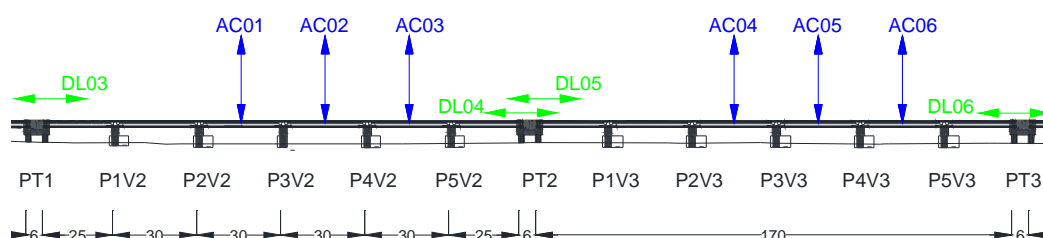


Figura 6 – Esquema de instalação dos sensores nos módulos 2 e 3

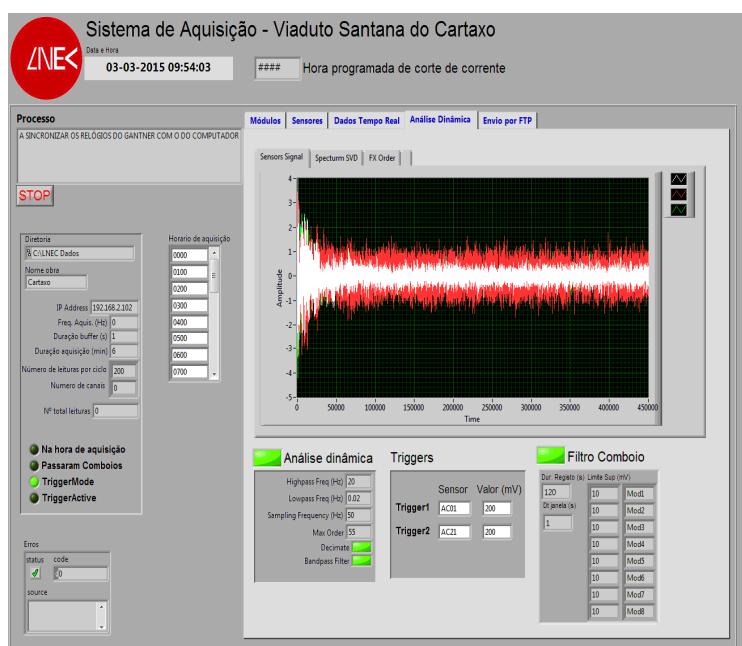


Figura 7 – Sistema integrado de aquisição e pré-processamento

3 PROCESSAMENTO AUTOMÁTICO DE DADOS

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 estrutura e, na segunda fase é realizada uma análise de *clusters* para construção de séries temporais de características modais num servidor situado no LNEC. No caso dos medidores de juntas e termómetros, o pré-processamento consiste na remoção de *outliers* com base num filtro de medianas [J. Santos & Silveira, 2012]. Relativamente aos dados recolhidos pelos acelerómetros, estes são alvo de uma série de etapas até se obter as estimativas das características modais através do método SSI-COV.

Através da análise de um conjunto de registos de aceleração obtidos em vibração ambiente, verificou-se não ser possível identificar modos de vibração além do 1º modo vertical. Contrariamente, observou-se também que análise dinâmica em regime forçado não é possível por não se conhecer com exatidão o carregamento dinâmico gerado pela passagem de cada comboio. Deste modo, optou-se por utilizar as acelerações resultantes da vibração livre da estrutura após a passagem de cada comboio. Esta metodologia foi implementada com recurso ao desenvolvimento de um “trigger” cujo funcionamento se descreve abaixo.

3.2 Dados adquiridos e pré-processamento

Neste ponto são apresentados alguns resultados respeitantes aos primeiros 18 dias de aquisição de dados, no mês de janeiro de 2015.

Os dados relativos aos deslocamentos das juntas do tabuleiro e à temperatura apresentam-se na Figura 8, onde se podem observar as variações de comprimento de cada um dos módulos do viaduto em relação ao valor inicial, representadas pela soma dos valores medidos nas extremidades de cada módulo, no qual um declive positivo representa um alongamento do tabuleiro. É igualmente apresentada a evolução da temperatura medida na laje inferior (PT02). Neste gráfico é notória a correlação existente entre as variações de comprimento dos módulos e a variação da temperatura. A validade destes resultados é rapidamente aferida através de um cálculo expedito da variação do comprimento de um módulo com 170 m. Considerando o período entre 20 de janeiro e 31 de janeiro correspondente a uma variação de temperatura aproximadamente igual a 3,5 °C e considerando um coeficiente linear de dilatação térmica do betão igual a $10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ obtém-se uma variação de comprimento de 5,95 mm, idêntica à variação de comprimento observada na Figura 8.

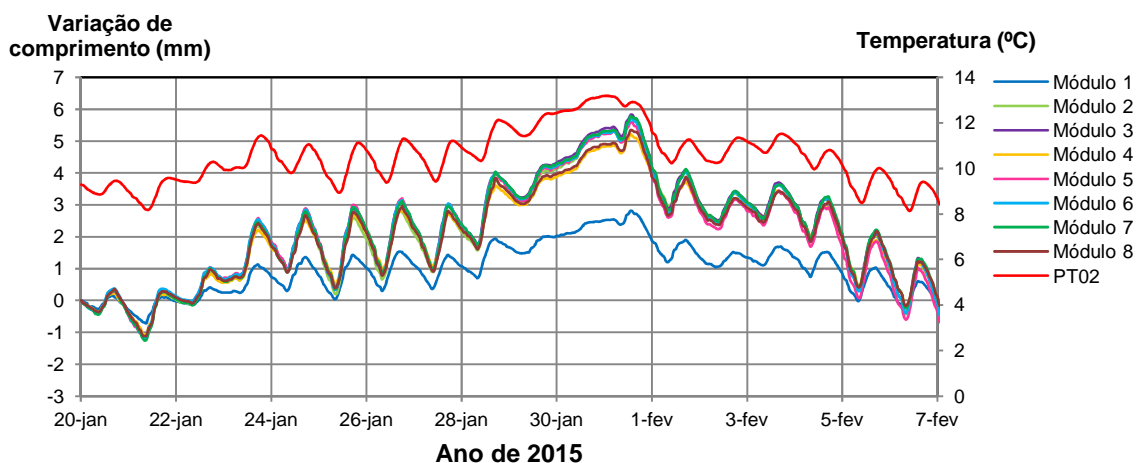


Figura 8 - Variações de comprimentos dos módulos dos viadutos

As acelerações são adquiridas em períodos de quatro minutos durante a passagem de cada comboio. O pré-processamento dos registos das acelerações, efetuado no computador instalado em obra, é composto por quatro etapas. A primeira consiste em remover o efeito da vibração forçada imposta pela passagem do comboio. Desta resulta um registo de acelerações em regime livre, obtidas imediatamente após a passagem do comboio, tal como exemplificado na Figura 9. Em seguida são removidas tendências lineares e aplicado um filtro “passa-baixo” do tipo *butterworth* de grau 8, com frequência de corte igual a 20 Hz. Por fim os registos são decimados para uma frequência de amostragem de 50 Hz, permitindo deste modo uma maior rapidez de processamento nas tarefas subsequentes.

Um exemplo de um registo de acelerações obtido a partir da metodologia descrita é apresentado na Figura 10. Esta série temporal diz respeito às acelerações registadas no módulo 3 devidas à vibração da estrutura em regime livre após a passagem de um comboio. A partir destes resultados é então realizada uma análise modal através do método de identificação estocástica em subespaços (SSI-COV).

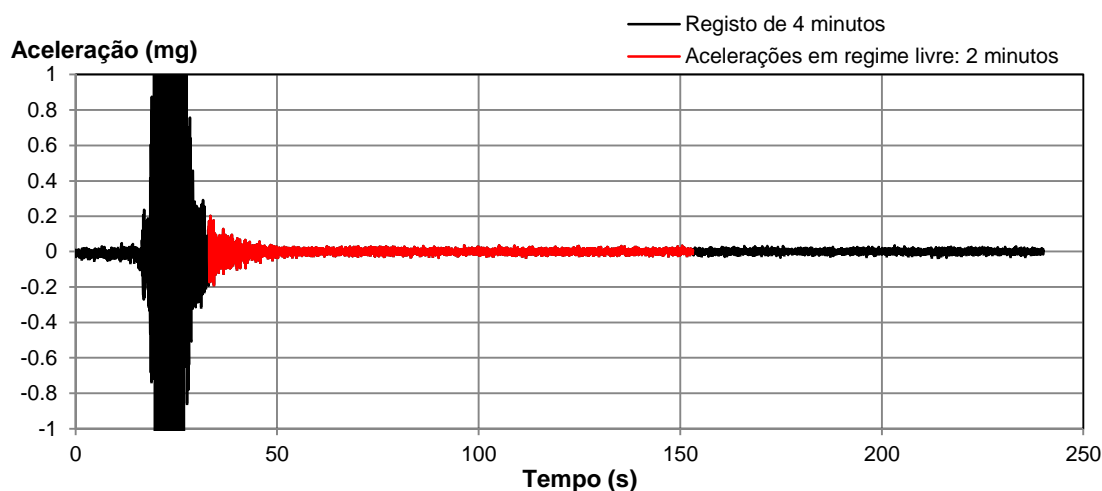


Figura 9 – Exemplo da remoção das acelerações verticais devidas ao comboio

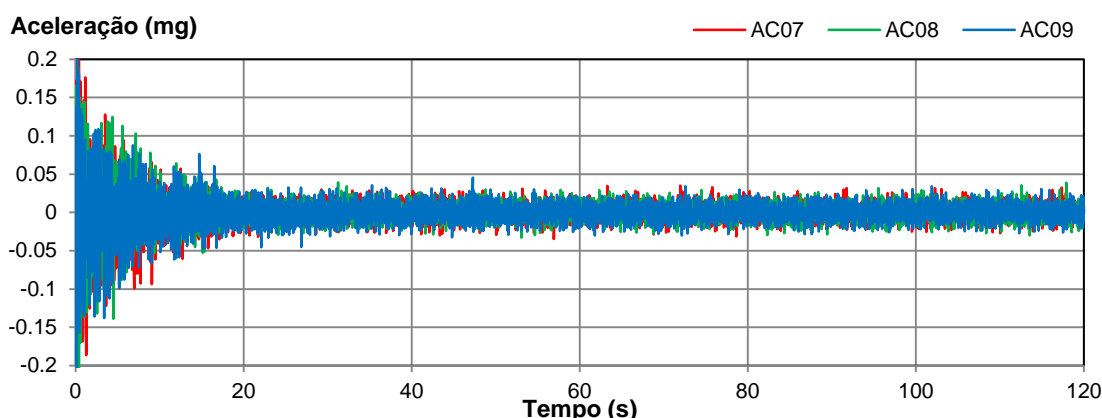


Figura 10 – Série temporal de acelerações do módulo 3

3.3 Identificação modal

A identificação das características dinâmicas realizadas neste artigo é efetuada tendo como base de referência as determinadas nos ensaios dinâmicos efetuados pelo LNEC em 2009 aos módulos 3 e 7 [Rodrigues, 2009]. Com base nestes ensaios foi desenvolvido e devidamente calibrado, no LNEC, um modelo numérico (Figura 11) no qual as frequências dos modos naturais de vibração vertical exibem valores de

5,09 Hz, 5,87 Hz, 6,94 Hz e 8,07 Hz, respetivamente para os 1º, 2º, 3º e 4º modo de vibração. Da análise experimental realizada nesse ensaio, foram identificadas as configurações para o módulo 3 a partir de vibrações em regime livre, nos quais se registaram frequências de 5,11 Hz, 5,62 Hz, 6,24 Hz e 6,90 Hz, respetivamente para o 1º, 2º, 3º e 4º modo verticais.

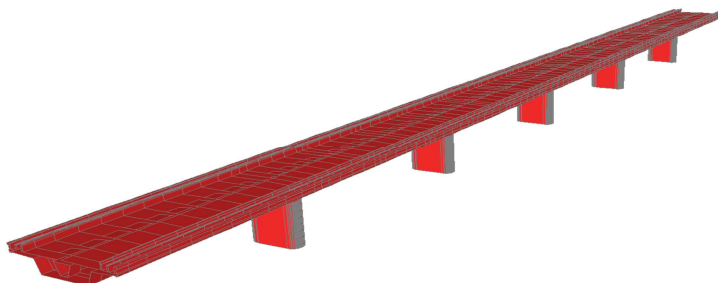


Figura 11 - Representação gráfica do modelo numérico de elementos finitos

Como referido, a identificação das características dinâmicas dos módulos consistiu na utilização do método SSI-COV [Magalhães, 2010; Rodrigues, 2004] a partir do qual foram traçados diagramas de estabilização.

Nos diagramas de estabilização é feita a distinção entre polos que possam indicar um modo de vibração da estrutura (polo estável) e polos associados a ruído (polo instável) [Rodrigues, 2004]. A comparação é realizada para polos de ordens consecutivas, sendo que os polos são considerados estáveis se as diferenças entre eles, em termos de frequência, amortecimento e configuração modal, não excederem limites pré-definidos. Nesta análise adotaram-se como critérios de estabilização, coeficientes de amortecimento inferiores a 20%, variações de frequência inferior a 1% entre polos consecutivos, variações de coeficiente de amortecimento inferior a 5% entre polos consecutivos e valor mínimo de MAC de 99,9% também entre polos consecutivos [Rodrigues, 2004].

Na Figura 12 é apresentado, a título de exemplo, um diagrama de estabilização relativo a uma série temporal de acelerações adquiridas do módulo 3. Esta série de acelerações é semelhante à apresentada na **Error! Reference source not found..** Neste diagrama os pontos representados com quadrados vermelhos são referentes a polos que cumprem os três critérios de estabilidade em simultâneo e que se assume estarem associados a modos de vibração verticais. Este diagrama é representativo dos resultados observados nas passagens de comboios, onde apenas a frequência do 1º modo vertical (5,1 Hz) é identificada com clareza. Embora sejam identificados alguns polos estáveis para o 2º e 3º modo de vibração, não se verifica, contudo, a estabilidade dos polos respetivos ao longo das ordens crescentes do modelo.

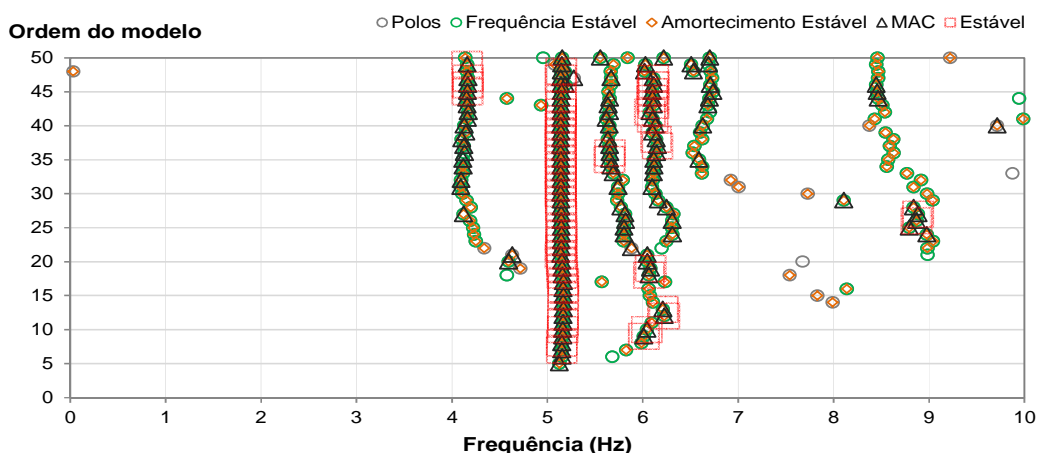


Figura 12 - Diagrama de estabilização SSI-COV do módulo 3

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS PARA CONTROLO DA SEGURANÇA

Como referido no início deste artigo, o controlo da segurança das estruturas pode ser realizado interpretando a evolução das características dinâmicas ao longo do tempo, sendo as frequências dos modos naturais de vibração um dos indicadores.

Uma vez que esta estrutura é composta por sete módulos estruturalmente idênticos, o objetivo passa por tirar partido desse aspeto para o controlo da segurança, criando bases de referência a partir dos resultados obtidos para os vários módulos, o que permite efetuar uma comparação com a evolução individual de cada módulo.

4.1 Identificação automática de frequências

Para a identificação automática dos modos de vibração natural presentes no diagrama de estabilização recorreu-se à utilização de algoritmos de *clusters* [J. P. Santos, 2014]. Nesta metodologia são agrupados todos os polos que apresentem características dinâmicas idênticas. Neste caso, estas características traduzem-se em frequências e configurações modais semelhantes. A análise de *clusters* é realizada apenas para os polos que são considerados estáveis, com os critérios já referidos, a comparação entre cada polo i e j consiste numa distância que tem em conta a distância euclidiana (d) entre as frequências (f) e o coeficiente MAC, expressa através da seguinte equação:

$$d = \frac{|f_i - f_j|}{f_j} + 1 - MAC. \quad (1)$$

A identificação do número de subgrupos (*clusters*) de modos de vibração consiste num processo iterativo onde são considerados, pelo menos, dois grupos até um número máximo de *clusters* definido pelo utilizador, sendo portanto necessário um conhecimento mínimo das características dinâmicas da estrutura, mais especificamente sobre o número de modos de vibração presentes. Sabendo à partida que na estrutura seria possível identificar quatro modos de vibração verticais, foi este o número de subgrupos pré-definido para a análise de *clusters*. Nesta análise foram apenas considerados polos estáveis.

4.2 Séries temporais de frequência

As séries temporais de frequências resultaram da alocação das frequências identificadas em cada um dos diagramas de estabilização aos diversos *clusters* ao longo do tempo. Considerou-se que a frequência natural associada a cada *cluster* de polos é a do polo de ordem mais elevada que lhe foi alocado.

Na Figura 13 estão representados os diversos polos obtidos a partir dos diagramas de estabilização, ao longo dos 18 dias em análise. Neste gráfico pode observar-se com clareza a presença do primeiro modo de vibração vertical correspondente a uma frequência próxima dos 5,0 Hz. No entanto, são também visíveis as frequências dos 3 modos de vibração vertical consequentes.

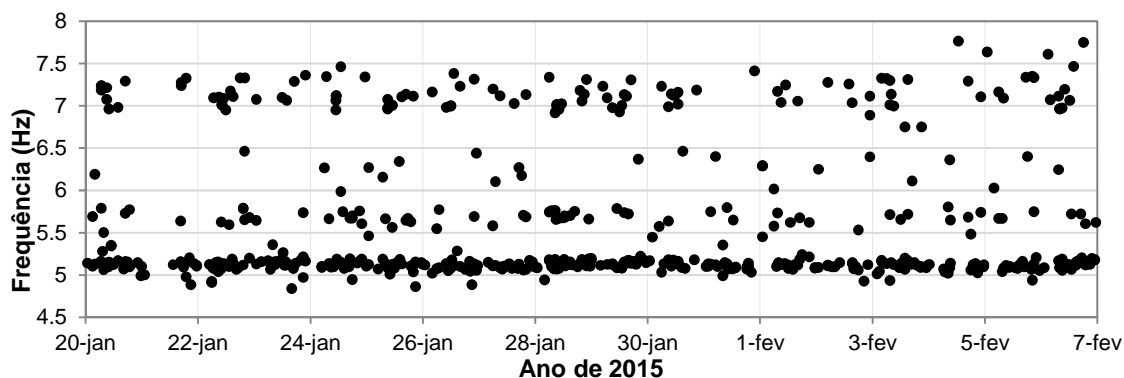


Figura 13 – Série temporal de frequências do módulo 3

Na Figura 14, estão identificados os quatro *clusters*, correspondentes ao mesmo número de modos de vibração. Observou-se que os valores médios de frequência natural correspondentes se encontram próximos dos resultados obtidos no ensaio de 2009 [Rodrigues, 2009].

A dificuldade encontrada em obter as frequências dos modos de vibração de frequências mais elevadas, para a vibração livre da estrutura, é visível na Figura 14, onde se verifica um menor número de frequências obtidas e também grande dispersão, comparativamente com a frequência do primeiro modo de vibração, representada pela série com pontos verdes.

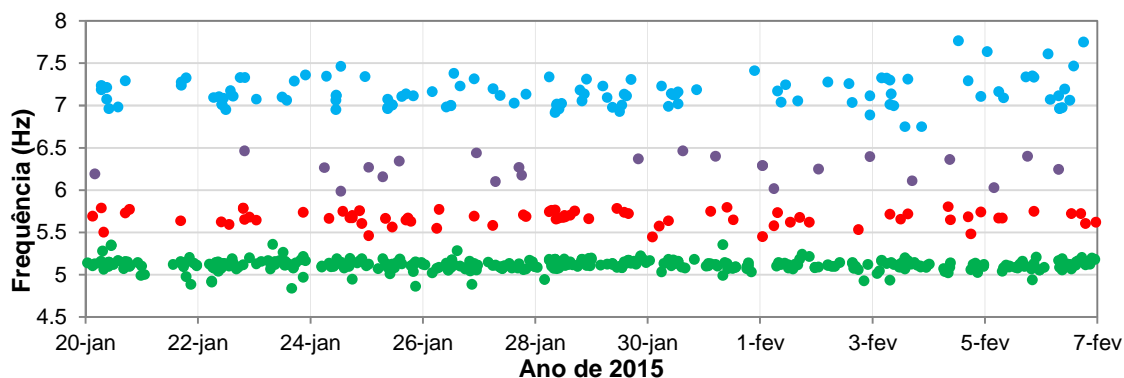


Figura 14 - Identificação automática de frequências: módulo 3

Na Figura 15, são apresentados a título de exemplo resultados idênticos aos apresentados na Figura 14, obtidos nos módulos 2, 3 e 4 referentes à identificação automática de frequências. Tal como referido, o modo de vibração que apresenta maior consistência ao longo do tempo é o 1º modo vertical. No caso particular do módulo 2, não foi possível identificar os valores de frequência associados ao 3º modo de vibração vertical, onde seria esperado encontrar frequências próximas dos 6,20 Hz. As dificuldades encontradas na identificação das frequências naturais de vibração poderão estar associadas à elevada rigidez da estrutura e consequente necessidade de realizar a identificação modal para vibrações em regime livre.

Os resultados obtidos das análises realizadas aos primeiros 18 dias de monitorização de vibrações sob efeito da passagem de comboios permitem concluir que os sete viadutos independentes e idênticos exibem frequências de vibração com valor semelhante. Este fato permite concluir que nenhuma delas terá sofrido danos estruturais importantes.

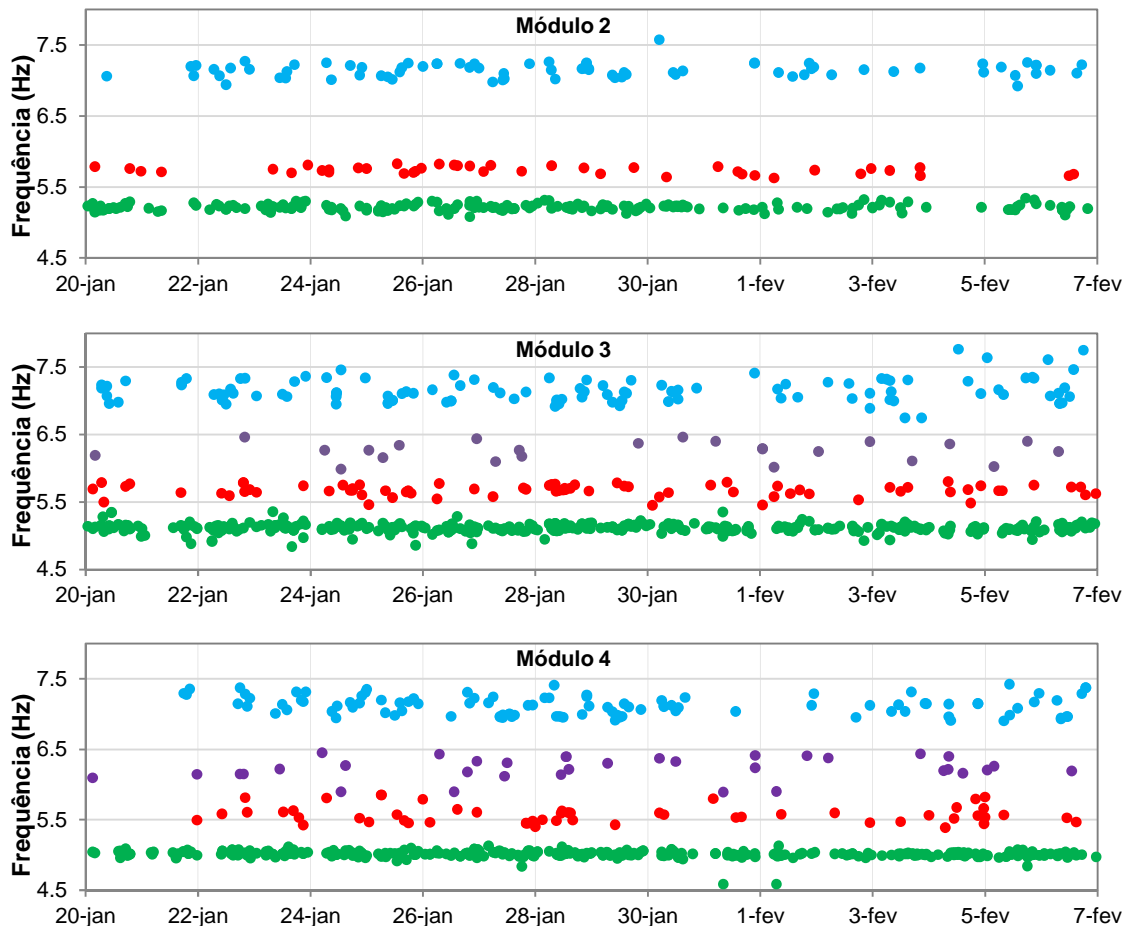


Figura 15 – Identificação automática de frequências: módulo 2, 3 e 4.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

O presente trabalho descreve a implementação de um sistema de monitorização, composto por *hardware* e rotinas de processamento e análise de dados, desenvolvido com o objetivo de monitorizar a segurança e a integridade de um viaduto longo composto por sete estruturas (módulos) independentes. Os resultados obtidos com este sistema, até à presente data, permitem concluir que apesar do número reduzido de sensores instalados em cada estrutura, é possível efetuar o controlo da sua integridade de forma automática e precisa.

O sistema desenvolvido baseia-se grandemente na análise de vibrações estruturais. Foram instalados, em cada estrutura independente, três acelerómetros com os quais foram medidas vibrações em regime livre após a passagem de comboios. Destes registos foi possível identificar quatro modos de vibração. Foram também utilizados transdutores de deslocamentos horizontais, cujos registos permitiram observar uma elevada correlação entre temperatura e movimento horizontal dos tabuleiros e concluir, também, sobre a integridade das estruturas.

A automatização dos processos de aquisição e pré-processamento foi conseguida com recurso à utilização de um sistema integrado desenvolvido para monitorização e pré-processamento automático em tempo real, evitando-se, deste modo, uma fase inicial de tratamento de dados. Observou-se que, até à data, este se encontra a funcionar sem erros.

A comparação direta entre as frequências naturais de vibração, obtidas para os diferentes módulos independentes, evidencia que as estruturas exibem respostas estruturais idênticas, sugerindo que estas se encontram estruturalmente íntegras.

6 REFERÊNCIAS

- Frangopol, D. M., Ghosn, M., Hearn, G., & Andrzej S. Nowak. 1998. Bridge Reliability Assessment Based on Monitoring. *Journal Of Bridge Engineering*, 3(4), 151–154.
- Magalhães, F. 2010. *Operational Modal analysis for testing and Monitoring of Bridges and Special structures*. University of Porto, Faculty of Engineering.
- Rodrigues, J. 2004. *Identificação Modal Estocástica Métodos de análise e aplicações em estruturas de engenharia civil*. University of Porto, Faculty of Engineering.
- Rodrigues, J. 2009. *Ensaio Dinâmicos dos Módulos V3 e V7 do Viaduto de Santana do Cartaxo*. LNEC.
- Santos, J., Crémona, C., Orcesi, A. D., & Silveira, P. 2013. Multivariate Statistical Analysis for Early Damage Detection. *Engineering Structures*, 56, 273–285.
- Santos, J., Orcesi, A. D., Crémona, C., & Silveira, P. 2015. Baseline-free real-time assessment of structural changes. *Structure and Infrastructure Engineering: Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance*, 11(2), 145–161. doi:10.1080/15732479.2013.858169
- Santos, J. P. 2014. *Smart Structural Health Monitoring Techniques for Novelty Identification in Civil Engineering Structures*. Instituto Superior Técnico - University of Lisbon.
- Santos, J., & Silveira, P. 2012. A SHM framework comprising real time data validation. In *IALCCE 2012 - 3rd International Symposium on Life Cycle Civil engineering*. Vienna, Austria: IALCCE - International Association for Life-Cycle Civil Engineering.
- Silva, M. 2007. *Viaduto Ferroviário de Santana do Cartaxo*.
- Silveira, P., Coelho, T., & Oliveira, P. 2015. *Sistema de Monitorização Estrutural do Viaduto de Santana do Cartaxo*. LNEC.