

Monitorização dinâmica contínua da barragem de Foz Tua: Instalação e resultados preliminares

Continuous dynamic monitoring system of Foz Tua arch dam: Installation and first results

Sérgio Pereira
Filipe Magalhães
Jorge P. Gomes
Álvaro Cunha
José Paixão
José V. Lemos

Resumo

O aproveitamento hidroelétrico de Foz Tua, concluído em 2017, está situado no norte de Portugal, e representa um ativo importante na capacidade de produção de energia elétrica no país.

A barragem foi equipada com um sistema de monitorização da condição estrutural baseado em vibrações composto por um conjunto de acelerómetros que foram dispostos radialmente sobre as duas galerias de visita superiores. Os acelerómetros estão ligados a um conjunto de digitalizadores distribuídos pela barragem, sendo a sincronização dos dados assegurada por sinal de GPS.

Este artigo descreve o sistema de monitorização instalado e os resultados obtidos durante os primeiros meses de operação, tais como a caracterização das acelerações (valores máximos e efetivos) e a identificação automática das propriedades modais da barragem. Adicionalmente, é abordada a influência das condições operacionais nas propriedades modais, nomeadamente através do efeito da variação do nível de água da albufeira nas frequências naturais da estrutura.

Abstract

The Foz Tua hydroelectric development, concluded in 2017, is located in the north of Portugal and it constitutes an important asset in the country's energy production capacity.

The arch dam has been equipped with a vibration-based structural health monitoring system, which is composed of a set of accelerometers that were radially disposed over the two upper visit galleries. The accelerometers are connected to a set of digitizers distributed in the dam, being the synchronization of the data assured by GPS.

This paper describes the addressed monitoring system, as well as the results obtained during the first months of operation, such as the characterization of accelerations (maximum and effective values) and the automatic identification of the dam modal properties. Additionally, the influence of operational conditions on modal properties is preliminarily studied, nam.

Palavras-chave: Engenharia de barragens / Análise modal operacional / Monitorização da condição estrutural / Efeitos ambientais e operacionais

Keywords: Dam engineering / Operational modal analysis / Structural health monitoring / Operational and environmental effects

Sérgio Pereira

CONSTRUCT-ViBest, Faculdade de Engenharia
da Universidade do Porto (FEUP)
Porto, Portugal
sbp@fe.up.pt

Filipe Magalhães

CONSTRUCT-ViBest, Faculdade de Engenharia
da Universidade do Porto (FEUP)
Porto, Portugal
filipema@fe.up.pt

Jorge P. Gomes

Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC)
Lisboa, Portugal
jgomes@lnec.pt

Álvaro Cunha

CONSTRUCT-ViBest, Faculdade de Engenharia
da Universidade do Porto (FEUP)
Porto, Portugal
acunha@fe.up.pt

José Paixão

EDP Gestão da Produção de Energia S.A.
Porto, Portugal
jose.paixao@edp.com

José V. Lemos

Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC)
Lisboa, Portugal
vlemos@lnec.pt

Aviso legal

As opiniões manifestadas na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Legal notice

The views expressed in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.

PEREIRA, S., [et al.] – Monitorização dinâmica contínua da barragem de Foz Tua: Instalação e resultados preliminares. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 19. ISSN 2183-8488. (julho 2022) 57-64.

1 Introdução

A central hidroelétrica de Foz Tua é uma das mais recentes em Portugal e representa um contributo relevante para o sector hidroelétrico do país. Com o propósito de avaliar a condição estrutural da barragem de Foz Tua e o efeito de eventos excecionais no seu comportamento através do estudo das propriedades dinâmicas da barragem e da sua evolução ao longo do tempo, está a ser efetuada pelo ViBest-FEUP (Laboratório de Vibrações e Monitorização Estrutural da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto) e pelo LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil), a monitorização dinâmica contínua da estrutura, que leva em consideração a variação das condições ambientais e operacionais.

Os sistemas de monitorização integrados que consideram dados em tempo real obtidos diretamente de estruturas, como o implementado na barragem de Foz Tua, são muito importantes para a gestão a longo prazo de grandes infraestruturas civis [1]. Muitos sistemas baseados em vibrações foram já implementados com sucesso em diferentes tipos de estruturas no passado, como pontes [2], turbinas eólicas [3], edifícios [4], coberturas de estádios [5] ou torres sineiras [6]. Estes sistemas de monitorização da condição estrutural baseados em vibrações dependem da aplicação de análise modal operacional para identificar propriedades modais em contínuo, que podem ser usadas como recursos de monitorização para avaliar a evolução da condição estrutural ao longo do tempo.

No caso de barragens, no passado, a análise modal experimental baseada em ensaios de vibração forçada foi muito comum, sendo ainda hoje utilizada [7] para identificar as propriedades dinâmicas mais relevantes destas estruturas massivas, com o objetivo principal de estabelecer correlações com previsões numéricas ou calibrar modelos de elementos finitos. Por outro lado, existem já alguns exemplos de sistemas de monitorização da condição estrutural baseados em vibrações que foram implementados com sucesso em barragens com características geométricas semelhantes à da barragem de Foz Tua [8] [9], tendo-se conseguido uma boa correspondência na comparação de resultados obtidos através da aplicação de análise modal experimental e de análise modal operacional a uma barragem de betão [10].

Neste sentido, os bons resultados alcançados com a monitorização dinâmica contínua da barragem de Foz Tua mostram-se em concordância com o estado de arte, que indica que este tipo de sistemas de monitorização da condição estrutural baseados em vibrações é adequado a barragens de betão. Desta forma, este artigo apresenta uma breve descrição do sistema de monitorização dinâmica instalado nesta barragem e os resultados obtidos durante os primeiros meses de monitorização contínua, incluindo a caracterização dos níveis de vibração, identificação modal e estudo da evolução das propriedades modais.

2 Barragem instrumentada e sistema de monitorização

O aproveitamento hidroelétrico de Foz Tua localiza-se no norte de Portugal, na foz do rio Tua, um afluente do rio Douro. O aproveitamento está equipado com 270 MW de potência, o que o

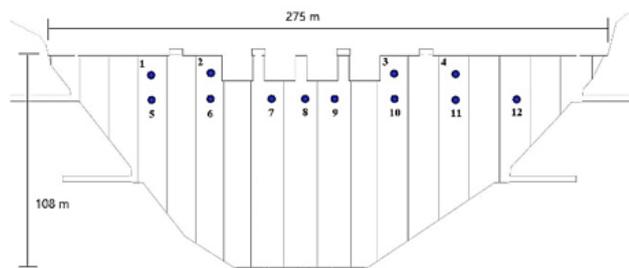
torna num ativo muito importante para a capacidade de produção de energia elétrica do país. A albufeira de 27 km de extensão e com capacidade para 106 milhões de metros cúbicos de água é conseguida através de uma barragem abóbada em betão com 108 m de altura, cuja construção foi concluída em 2017. O complexo está equipado com um sistema de bombagem que permite a recuperação de água a jusante, contribuindo para otimizar a gestão da produção de energia elétrica na bacia do Douro.

A barragem tem 275 m de comprimento (ao longo do coroamento) e é composta por 18 blocos de betão, separados por juntas de contração verticais, incluindo ainda galerias de visita em seis níveis diferentes, além da galeria geral para drenagem. O nível pleno de armazenamento é de 172 m (medidos a partir do nível do mar). A Figura 1a mostra uma fotografia da barragem e de parte do seu reservatório.

Para garantir uma boa caracterização do comportamento dinâmico da barragem, a abóbada foi equipada com um sistema de monitorização da condição estrutural baseado em vibrações. Este equipamento é composto por um conjunto de 12 acelerómetros que foram dispostos radialmente sobre as duas galerias de visita superiores, 4 na galeria de visita superior (GV1), estando metade deles de cada lado dos descarregadores, e os restantes 8 acelerómetros na segunda galeria de visita (GV2). Todos os acelerómetros estão ligados a um conjunto de digitalizadores, e a sincronização dos dados é garantida por sinal GPS. O sistema adquire dados continuamente com uma taxa de aquisição de 50 Hz, produzindo ficheiros de dados a cada 30 minutos.



a)



b)

Figura 1 Barragem de Foz Tua: a) vista aérea [11]; b) posição dos acelerómetros marcada com pontos azuis

A Figura 1b caracteriza a posição dos acelerómetros, marcados a azul num esquema da barragem. Existe um acelerómetro extra do lado esquerdo da estrutura, seguindo a geometria da barragem, que não é totalmente simétrica. O sistema de monitorização dinâmica contínua da barragem de Foz Tua está configurado para registar séries temporais de acelerações com duração de 30 minutos em todos os pontos instrumentados, o que corresponde a um período adequado para a aplicação das técnicas utilizadas no seu tratamento, embora possa ser ajustado, se necessário. As séries de acelerações obtidas são pré-processadas, o que inclui a eliminação de tendências, a aplicação de um filtro Butterworth passa-baixa de oitava ordem e uma reamostragem com uma frequência de 25 Hz. Após esta etapa, o processamento automático realizado avalia cada grupo de séries de acelerações de 30 minutos individualmente, com o objetivo de obter propriedades modais e medidas que caracterizem os níveis de vibração. Todos os dias 48 valores são obtidos para cada parâmetro.

Na secção seguinte, os níveis de vibração da barragem são avaliados e as suas propriedades modais são identificadas e estudadas ao longo do tempo.

3 Monitorização dinâmica contínua

3.1 Caracterização dos níveis de vibração

Durante o período de monitorização, a barragem foi submetida apenas à vibração ambiental, ou seja, não foi induzida nenhuma excitação na estrutura de forma intencional com a finalidade de realizar a identificação modal. Neste sentido, as vibrações na estrutura foram causadas exclusivamente pelas condições do ambiente natural envolvente, como vento, pequena sismicidade ou tráfego rodoviário próximo, entre outros, e pelo funcionamento normal da central hidroelétrica subjacente à barragem. No caso específico da central, além das atividades humanas comuns, a principal fonte de excitação vem do circuito de produção de energia, pelo que se espera encontrar a frequência de rotação das turbinas (185,5 rpm) como frequência predominante nas séries temporais medidas. Para cada série temporal de 30 minutos, a aceleração máxima medida por cada sensor e o valor eficaz (RMS) das acelerações nesse período foram respetivamente identificadas e calculadas, permitindo caracterizar a intensidade das vibrações medidas. Embora este processamento tenha sido realizado para todo o período de monitorização, a representação da sua evolução ao longo do tempo, apresentada na Figura 2, compreende apenas dois meses entre 20 de janeiro e 20 de março, para se poder obter uma figura mais clara e de fácil análise. Cada um dos 12 canais de medição é representado por uma cor diferente e curtos períodos sem dados referem-se a situações de falha do sistema ou manutenção.

As partes superior e inferior da Figura 2 complementam-se. Enquanto as informações sobre as acelerações máximas medidas por cada sensor permitem verificar a adequação do sistema de monitorização à aplicação estudada e verificar a atividade anormal em torno dos sensores ou qualquer mau funcionamento, os valores eficazes fornecem ao analista uma visão mais precisa do nível geral de vibração da estrutura durante cada período registado.

A análise da evolução dos valores eficazes apresentada na Figura 2 sugere que as condições de operação podem ser divididas em três

cenários distintos:

- De 11 de janeiro até 3 de fevereiro (parte central da figura) são obtidos níveis de vibração com valores que se consideram médios a elevados, com diferenciação clara e constante das acelerações medidas em cada sensor, indicando um funcionamento ininterrupto do sistema de produção de energia. Este tipo de excitação pode criar obstáculos para realizar com sucesso a identificação modal automatizada [12];
- De 12 de dezembro a 11 de janeiro e de 3 de fevereiro a 5 de março (à esquerda e à direita do período mencionado no ponto anterior) são registados níveis de vibração muito mais baixos, a par de acelerações altas distribuídas de forma dispersa, sugerindo vibração ambiental pura como a principal fonte de excitação estrutural, ocasionalmente complementada com excitação devida à operação do sistema de produção de energia;
- Por volta de 13 de março (parte direita da figura), níveis de vibração muito altos são medidos continuamente durante períodos curtos. Esta fonte massiva de energia corresponde à abertura dos descarregadores de cheias da barragem, durante períodos de chuvas intensas.

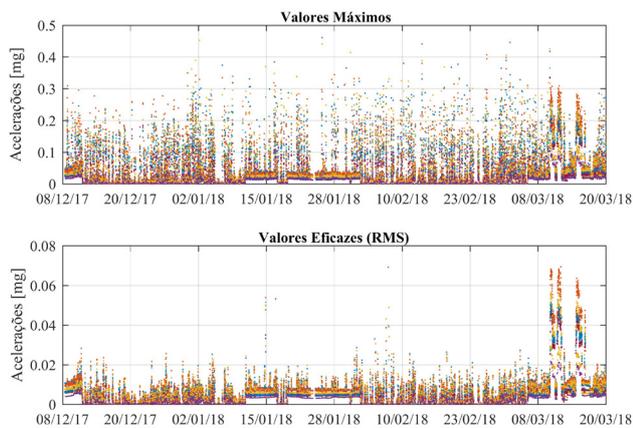


Figura 2 Acelerações máximas e eficazes medidas entre 08/12/2017 e 20/03/2018

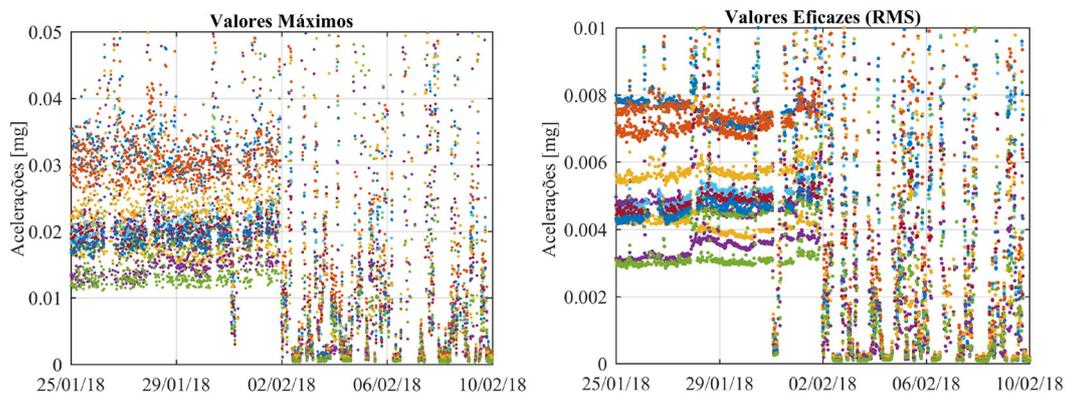


Figura 3 Acelerações máximas e eficazes medidas entre 25/01/2018 e 10/02/2018

Uma ampliação na transição das condições operacionais descritas em a) para as condições descritas em b) é apresentada na Figura 3. Torna-se claro que os níveis de vibração variam largamente dependendo da situação operacional. Os valores eficazes das acelerações medidas diminuí de alguns micro “g” para intensidades 10 vezes menores quando as turbinas param de operar. Adicionalmente, a predominância da excitação proveniente do sistema de produção de energia torna-se evidente considerando que cada sensor regista uma intensidade de aceleração quase constante durante dias consecutivos, implicando que a mesma fonte de vibração esteja presente.

3.2 Análise modal operacional automatizada e efeitos das condições de operação

Podem-se obter estimativas das propriedades modais a partir das séries temporais de acelerações, usando métodos de identificação de última geração. Visto que diferentes etapas de análise requerem abordagens distintas, ao começar a analisar um conjunto de dados, é importante aplicar métodos mais simples, que forneçam resultados preliminares, mas ainda assim sólidos o suficiente para permitir a preparação de outras análises mais profundas e detalhadas.

Um exemplo de tais métodos simples consiste na aplicação da decomposição em valores singulares a cada série temporal de acelerações. A aglomeração consecutiva dos primeiros valores singulares de cada grupo de séries temporais permite a construção de mapas de cores como o apresentado na Figura 4, onde as cores são função da intensidade, com cores quentes (vermelho) associadas a valores mais elevados. As zonas vermelhas indicam a existência de mais energia nas bandas de frequência a que estão associadas, proporcionando assim estimativas aproximadas das frequências naturais da estrutura e dos harmónicos presentes na excitação, motivados pelo funcionamento das turbinas na central de produção de energia.

A Figura 4 refere-se aos primeiros 10 dias de monitorização dinâmica contínua, de 08/12/2017 a 18/12/2017. Existem dois alinhamentos vermelhos horizontais evidentes, muito próximos um do outro, entre 2 e 4 Hz, que provavelmente correspondem aos dois primeiros modos de vibração da barragem, e mais dois alinhamentos

vermelhos entre 4 e 6 Hz, potencialmente indicando o terceiro e o quarto modos de vibração. Alguns outros alinhamentos parecem existir entre 6 e 10 Hz, porém, apresentam variações consideráveis de frequência durante o período analisado, não sendo possível com esta análise preliminar identificar distintamente quantos modos de vibração estariam ocultos neste intervalo mal definido. Além disso, aparecem ocasionalmente entre os dois primeiros alinhamentos, linhas horizontais de cor vermelho-escuro, muito bem definidas, provavelmente correspondendo à frequência de rotação da turbina (185,5 rpm - 3,09 Hz).

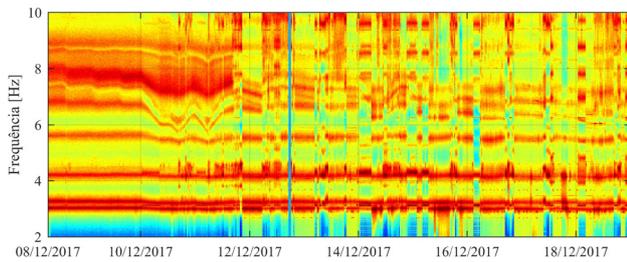


Figura 4 Mapa de cores com a evolução da frequência entre 08/12/2017 e 18/12/2017

Após a primeira análise, a identificação modal foi realizada usando o método de identificação estocástica em sub-espacos a partir das

correlações (conhecido como SSI-Cov). O SSI-Cov é um método paramétrico no domínio do tempo que identifica um modelo de estado a partir das correlações das respostas da estrutura.

O algoritmo parte do pressuposto que as funções de correlação relativas à resposta de uma estrutura sujeita a uma excitação do tipo ruído branco podem ser expressas através da soma de sinusóides com decaimento exponencial, relacionadas com cada um dos modos de vibração da estrutura, sendo portanto possível, a partir delas, determinar os seus parâmetros modais [13].

Os primeiros cinco modos de vibração foram identificados a partir das séries temporais medidas a 8 de dezembro, primeiro dia de monitorização, tendo sido obtidas frequências naturais, valores de amortecimento e configurações modais. Uma representação das configurações modais está apresentada na Figura 5. As ordenadas modais obtidas a partir da identificação modal são representadas com pontos pretos e as configurações modais completas foram obtidas através de interpolações (representadas a vermelho). Apenas os sensores entre o número 5 e o número 12 (ver Figura 1) foram usados nesta representação para facilitar a distinção entre formas simétricas e antissimétricas. Todas as configurações obtidas são claras e inequívocas. O primeiro e o quarto modos são antissimétricos e o segundo, o terceiro e o quinto são modos de vibração simétricos.

Para seguir continuamente as propriedades modais da estrutura, o

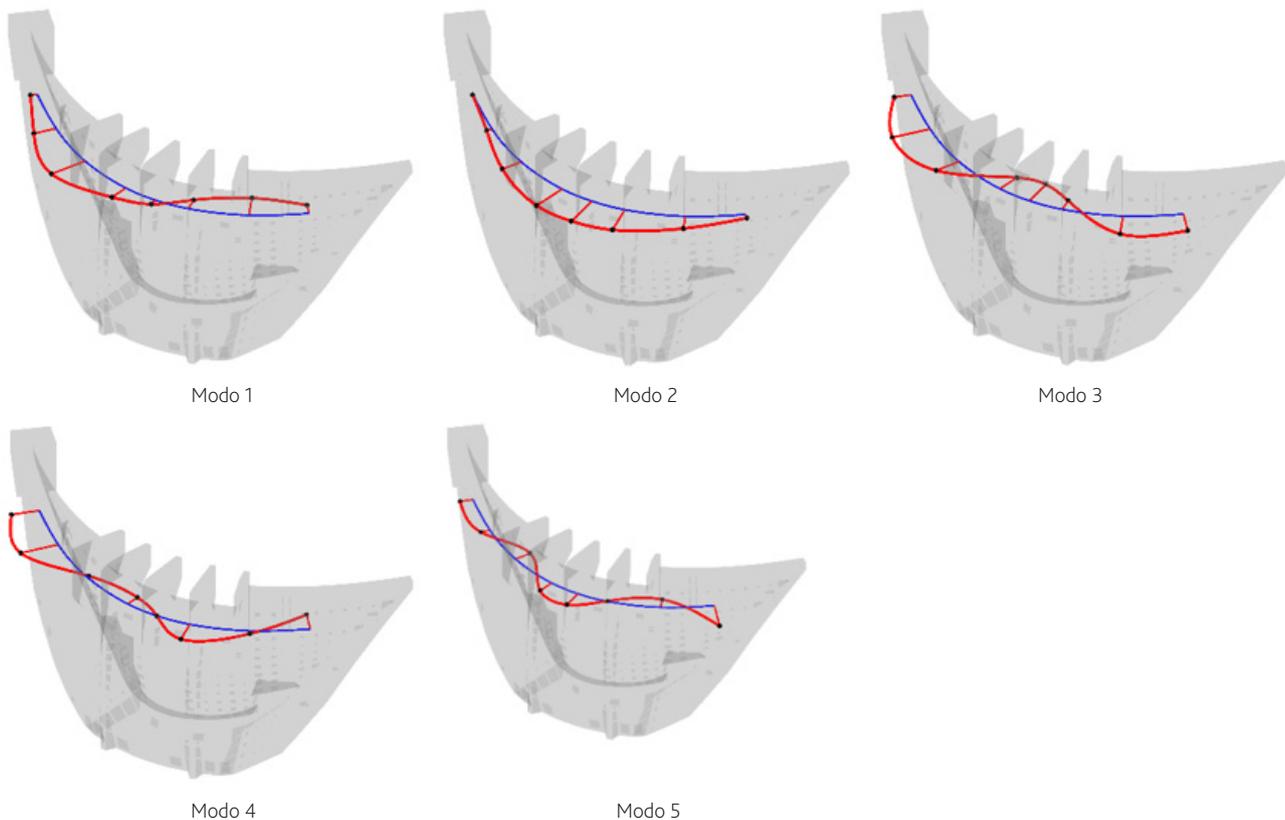


Figura 5 Ordenadas modais dos primeiros cinco modos de vibração dos pontos instrumentados na barragem de Foz Tua

método SSI-Cov foi combinado com uma rotina baseada em análise de clusters que automatiza a sua aplicação. A análise de clusters é um método exploratório que consiste em agrupar elementos em grupos de forma que cada elemento pertencente a um determinado grupo seja semelhante a todos os outros pertencentes ao mesmo grupo e diferente daqueles que pertencem aos outros grupos. Desta forma, é possível agrupar consistentemente as estimativas de parâmetros modais fornecidas pelo SSI-Cov, considerando as frequências naturais e as configurações modais como características distintivas de cada modo de vibração em determinado momento. Esta abordagem e o seu desenvolvimento teórico são descritos em pormenor no seguinte trabalho [14].

As frequências naturais, os valores de amortecimento e as configurações modais foram obtidas para os primeiros cinco modos, durante um período de mais de três meses. As médias das frequências naturais (f) e dos amortecimentos (d) e os respetivos desvios-padrão (std) estão apresentadas na Tabela 1, juntamente com a descrição da forma de cada modo, apresentada anteriormente. As frequências naturais identificadas enquadram-se nos intervalos definidos pela avaliação do mapa de cores, demonstrando a relevância desta ferramenta simples em análises preliminares. Enquanto a frequência natural para os quatro primeiros modos apresenta valores de desvio-padrão entre 0,029 e 0,081 Hz, para o quinto modo apresenta um desvio-padrão de quase 0,3 Hz, indicando oscilações significativas deste modo durante o período analisado. Além disso, os amortecimentos dos cinco modos apresentam valores médios entre 1,1 e 1,5 %, o que é comum para este tipo de estrutura, e desvios-padrão entre 0,3 e 0,4 %. A identificação de outros modos, embora possível, é condicionada pelo número de sensores disponíveis no mesmo alinhamento horizontal (GV2), dificultando a identificação correta da configuração modal de modos de ordem superior.

É ainda importante notar que a frequência de rotação da turbina polui a série temporal de acelerações, tornando-se uma fonte de erros durante o processo de identificação automática. Foram desenvolvidos diferentes procedimentos para minimizar o impacto deste efeito parasita, considerando que as estimativas que lhes estão associadas apresentam valores muito baixos de amortecimento [9], assim como incertezas associadas aos parâmetros modais também muito baixas [12]. Neste contexto, conseguiram-se bons resultados através da eliminação de estimativas com frequência igual a 3,09 Hz e amortecimento abaixo de 0,4 %.

No entanto, é mais fácil entender a evolução das propriedades modais quando representada graficamente. Portanto, a evolução temporal das primeiras cinco frequências naturais é caracterizada na Figura 6 usando médias móveis de 6 horas. Com a média móvel, obtém-se uma figura visualmente limpa sem perder a precisão na caracterização das flutuações das frequências naturais. Conseguem-se distinguir pequenas variações nos três primeiros modos, e variações consideráveis ocorrem com o quarto modo, o que explica o valor do seu desvio-padrão de 0,081 Hz. Porém, as maiores variações são apresentadas pelo quinto modo de vibração, cujo valor

de frequência natural varia dentro de uma faixa de cerca de 1 Hz. Embora ocorram variações de frequência muito diferentes entre os modos, em termos de amplitude, é importante notar que a forma da representação da evolução é consistente entre os modos, indicando que as variações de frequência nos cinco modos são provocadas pelo mesmo fenómeno físico. Neste sentido, é apresentada na Figura 7a uma ampliação de quatro dias na evolução das frequências dos cinco modos, lado a lado com a evolução do nível de água na albufeira (Figura 7b), durante os mesmos quatro dias. Focando o quinto modo, que apresenta as maiores variações, fica clara a relação inversa que existe entre a frequência natural e o nível de água na albufeira: quando o nível de água sobe, o valor da frequência natural diminui e vice-versa.

Tabela 1 Propriedades modais dos primeiros cinco modos de vibração da barragem de Foz Tua

Modo	$f_{média}$ [Hz]	f_{std} [Hz]	$d_{média}$ [%]	d_{std} [%]	Descrição
1	3,02	0,029	1,12	0,410	Antissimétrico
2	3,25	0,036	1,38	0,433	Simétrico
3	4,19	0,043	1,45	0,322	Simétrico
4	5,55	0,081	1,52	0,317	Antissimétrico
5	6,49	0,288	1,25	0,405	Simétrico

Assim, foi estudada a relação entre estas duas variáveis, tendo-se encontrado uma forte relação quadrática entre elas, com um coeficiente de determinação de quase 0,99 (ver Figura 8). Este resultado é consistente com as relações que se encontraram entre o nível de água na albufeira e as frequências naturais da barragem do Baixo Sabor [9], mas no caso em apreço são necessárias menores variações do nível de água para provocar flutuações de frequência de maior relevância. Principalmente no caso do quinto modo, que diminuiu cerca de 13 %, de 6,67 Hz para 5,78 Hz em apenas 18 horas.

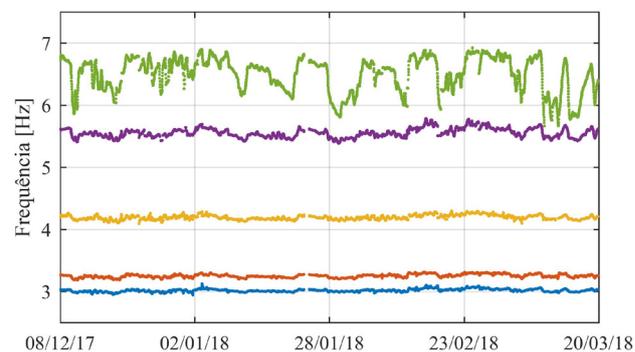


Figura 6 Evolução temporal da média móvel de 6h das frequências naturais

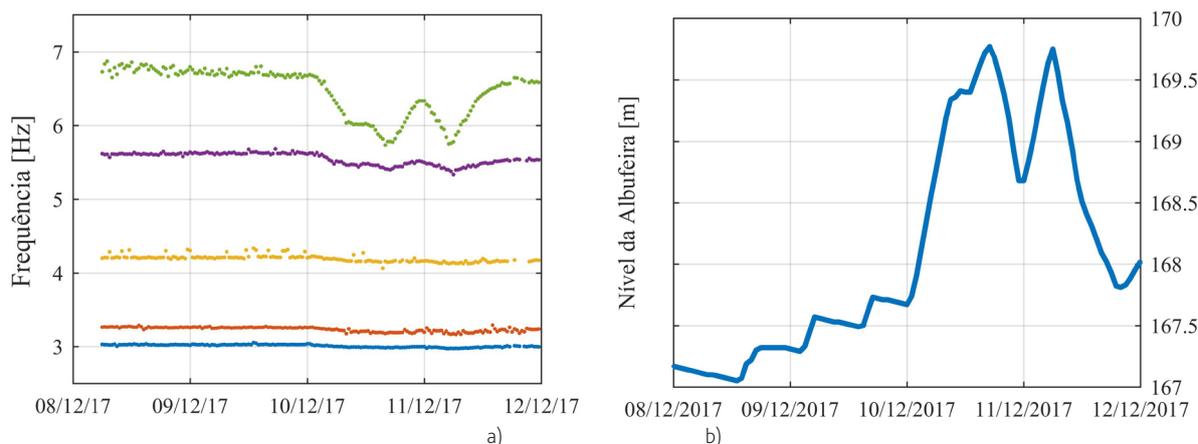


Figura 7 a) Evolução das frequências naturais durante 4 dias; b) Evolução do nível de água na albufeira durante 4 dias

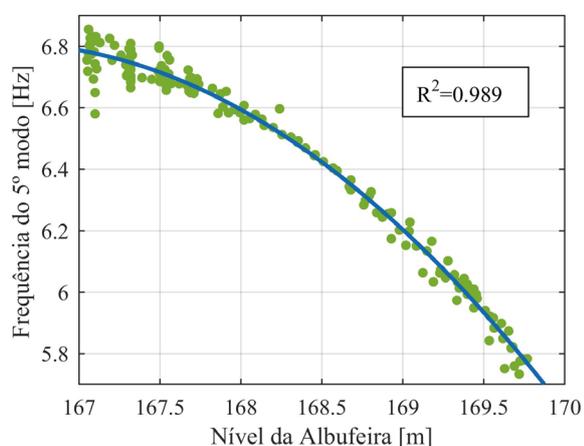


Figura 8 Relação entre o nível de água na albufeira e a frequência do quinto modo de vibração

4 Conclusão e desenvolvimentos futuros

O sistema de monitorização dinâmica instalado na barragem de Foz Tua foi descrito e os resultados principais obtidos durante os primeiros meses de monitorização foram apresentados. O processamento das séries temporais de acelerações medidas em contínuo durante este período e os bons resultados obtidos demonstram que o sistema de monitorização dinâmica está a funcionar adequadamente e a registar vibrações em condições operacionais muito distintas entre si.

As referidas condições de operação apresentam diversos níveis de aceleração e o sistema de monitorização tem sido capaz de os caracterizar a todos. As acelerações medidas quando o sistema de produção de energia elétrica está em operação são cerca de dez vezes superiores às medidas quando a barragem é submetida apenas à excitação ambiental. Os períodos em que as turbinas estão em operação são facilmente identificados em mapas de cores de valores singulares, uma vez que a frequência de rotação e os seus harmónicos são representados por linhas vermelhas finas, mas bem definidas.

Os resultados da identificação modal mostram uma estreita relação entre o nível de água na albufeira e os valores das frequências de vibração, em concordância com resultados obtidos numa aplicação semelhante. É importante notar as enormes variações de frequência do quinto modo de vibração durante o período estudado quando o nível de água na albufeira variou menos de 4 metros, estando a análise deste fenómeno ainda em desenvolvimento.

No futuro, as relações estatísticas desenvolvidas entre o nível de água e as frequências naturais serão utilizadas para minimizar o efeito do primeiro sobre as segundas, criando assim variáveis sensíveis a pequenas flutuações, que podem ser utilizadas para detetar comportamento estrutural anormal.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC), ao abrigo do projeto PTDC/ECI-EST/29558/2017, e por Financiamento Base – UIDB/04708/2020 e Financiamento programático – UIDP/04708/2020 da Unidade de Investigação CONSTRUCT – Instituto de I&D em Estruturas e Construções – financiada por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC).

Os autores gostariam ainda de agradecer a colaboração e o apoio prestados pela EDP Produção e pela Engie/Movhera.

Referências

- [1] Gomes, J.P.; Palma, J.; Magalhães, F.; Pereira, S.; Monteiro, G.; Silva Matos, D. – Seismic monitoring system of Baixo Sabor scheme for structural dynamic behaviour monitoring and risk management [Système de surveillance sismique de l'aménagement de Baixo Sabor pour le suivi du comportement dynamique structurel et la gestion des risques]. in 26th International Congress on Large Dams (26th ICOLD), 2018, Vienna, Austria.
- [2] Magalhães, F.; Cunha, A.; Caetano, E. – Vibration based structural health monitoring of an arch bridge: From automated OMA to damage detection. Mechanical Systems and Signal Processing, 2012. 28: p. 212-228.

- [3] Oliveira, G.; Magalhães, F.; Cunha, A.; Caetano, E. – Development and implementation of a continuous dynamic monitoring system in a wind turbine. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 2016. 6(3): p. 343-353.
- [4] Rainieri, C.; Fabbrocino, G.; Manfredi, G.; Dolce, M. – Robust output-only modal identification and monitoring of buildings in the presence of dynamic interactions for rapid post-earthquake emergency management. *Engineering Structures*, 2012. 34: p. 436-446.
- [5] Martins, N.; Caetano, E.; Diord, S.; Magalhães, F.; Cunha, A. – Dynamic monitoring of a stadium suspension roof: Wind and temperature influence on modal parameters and structural response. *Engineering Structures*, 2014. 59: p. 80-94.
- [6] Ubertini, F.; Comanducci, G.; Cavalagli, N. – Vibration-based structural health monitoring of a historic bell-tower using output-only measurements and multivariate statistical analysis. *Structural Health Monitoring*, 2016. 15(4): p. 438-457.
- [7] Gomes, J.P.; Lemos, J.V. – Characterization of the dynamic behavior of a concrete arch dam by means of forced vibration tests and numerical models. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2020. 49(7): p. 679-694.
- [8] Mendes, P. – Observação e Análise do Comportamento Dinâmico de Barragens de Betão. 2010, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Portuguese.
- [9] Pereira, S.; Magalhães, F.; Gomes, J.P.; Cunha, A.; Lemos, J.V. – Dynamic monitoring of a concrete arch dam during the first filling of the reservoir. *Engineering Structures*, 2018. 174: p. 548-560.
- [10] Gomes, J.; Pereira, S.; Magalhães, F.; Lemos, J.V.; Cunha, A. – Input-Output vs Output-only modal identification of Baixo Sabor concrete arch dam, in 9th European Workshop on Structural Health Monitoring. 2018: Manchester, United Kingdom.
- [11] EDP – Energias de Portugal [visitado em 01/10/2021]; disponível em: <https://www.edp.com/pt-pt/historias-edp/foz-tua-quando-a-relacao-com-o-rio-muda>.
- [12] Pereira, S.; Reynders, E.; Magalhães, F.; Cunha, A.; Gomes, J.P. – The role of modal parameters uncertainty estimation in automated modal identification, modal tracking and data normalization. *Engineering Structures*, 2020. 224, 10.1016/j.engstruct.2020.111208.
- [13] Peeters, B. – System Identification and Damage Detection in Civil Engineering, PhD Thesis, 2000. Katholieke Universiteit Leuven, Leuven, Belgium.
- [14] Magalhães, F.; Cunha, A.; Caetano, E. – Online automatic identification of the modal parameters of a long span arch bridge. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2009. 23(2): p. 316-329.