



Monitorização e modelação do comportamento dinâmico da barragem do Cabril no período 2008-2020

Sérgio Oliveira

LNEC, Lisboa, Portugal, soliveira@lnec.pt

André Alegre

IST, Lisboa, Portugal, andrefalegre92@gmail.com

Ilídio Ferreira

EDP, Porto, Portugal, ilidio.ferreira@edp.com

Paulo Mendes

ISEL, Lisboa, Portugal, pmendes@dec.isel.ipl.pt

Jorge Proença

IST, Lisboa, Portugal, jorge.m.proenca@tecnico.ulisboa.pt

Resumo

Neste trabalho apresenta-se o sistema para monitorização em contínuo do comportamento dinâmico da barragem do Cabril que foi instalado em 2008, pelo LNEC e pela EDP, referindo alguns dos principais resultados que têm sido obtidos a partir da análise dos dados recolhidos entre 2008 e 2020, quer sob excitação ambiente/operacional, quer sob ações sísmicas. Trata-se de um sistema do tipo SSHM (“*Seismic and Structural Health Monitoring System*”) equipado com software que permite a comparação entre resultados observados e resultados previstos com base em modelos numéricos de elementos finitos. Salienta-se a importância do desenvolvimento de *software* para tratamento, análise e gestão automática dos dados e apresentam-se os programas computacionais que têm vindo a ser desenvolvidos no LNEC, em MATLAB, para apoio à análise dos dados recolhidos com este tipo de sistemas, nomeadamente um programa de identificação modal e um programa de elementos finitos tridimensionais para análise do comportamento dinâmico de sistemas barragem-fundação-albufeira (DamDySSA4.0), que inclui um módulo para análise modal complexa, um módulo para análise sísmica em regime linear e um módulo para apoio a estudos de verificação da segurança sísmica que permite efetuar cálculos sísmicos não lineares envolvendo movimentos de junta e roturas no betão, com base num modelo de dano.

Palavras-chave: Comportamento dinâmico de barragens; Monitorização de vibrações em contínuo; Evolução de frequências naturais; Modos de vibração; Resposta sísmica

1 INTRODUÇÃO

A monitorização da integridade estrutural de grandes barragens de betão com base em sistemas do tipo SSHM, “Seismic and Structural Health Monitoring”, iniciou-se, em Portugal, no final de 2008, quando o LNEC e a EDP instalaram um sistema pioneiro para monitorizar o comportamento dinâmico da barragem do Cabril [1,2,3,4]. Este sistema, concebido para monitorização da integridade estrutural da barragem recorrendo à monitorização de vibrações em contínuo, foi desenvolvido no âmbito de um programa de investigação [1] do LNEC, apoiado pela Eletricidade de Portugal (EDP) e pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT).

Em termos do hardware o sistema foi projetado e montado integralmente pelo Centro de Instrumentação Científica (CIC) do LNEC [5] e, quanto ao software, foi desenvolvido em conjunto pelo CIC e pelo DBB (Departamento de Barragens de Betão), por forma a efetuar automaticamente a análise das séries temporais de aceleração medidas, de hora em hora, tendo em vista a deteção de eventos sísmicos e a identificação dos principais parâmetros modais [3].

A evolução temporal das principais frequências naturais identificadas, geralmente influenciadas pelas variações do nível da albufeira, é automaticamente comparada com as frequências naturais calculadas numericamente usando um modelo EF3D do conjunto barragem-fundação-fundação, considerando os níveis de água efetivamente registados.

Em face do sucesso do sistema SSHM instalado na barragem do Cabril [6, 7 e 8], a EDP decidiu instalar sistemas completos similares noutras barragens, nomeadamente nas barragens do Baixo Sabor (2015) [9] e Foz Tua (2017). Outros sistemas para medição de vibrações sísmicas em barragens estão também instalados noutras grandes barragens portuguesas como é o caso, por exemplo, das barragens de Alqueva, Alto Ceira II e Ribeiradio.

2 COMPORTAMENTO DINÂMICO DE GRANDES BARRAGENS DE BETÃO. ANÁLISE MODAL E RESPOSTA SÍSMICA

Nas grandes barragens de betão, a instalação de sistemas do tipo SSHM para monitorização em contínuo de vibrações visa a medição e análise dos registos de acelerações em vários pontos da barragem e da fundação, para diferentes níveis de excitação ambiental/operacional e para sismos de diferentes magnitudes. As medições devem ser realizadas em tantos pontos quanto possível, a fim de obter resultados fiáveis que facilitem a aplicação das metodologias de identificação modal. A eficiência destes sistemas de monitorização depende fortemente do uso de software adequado para análise e gestão dos dados recolhidos. Assim é da maior importância desenvolver ferramentas computacionais, adaptadas a cada barragem, para análise automática e/ou interativa dos dados [3,4,6,7], visando: a) identificar os principais parâmetros modais da barragem (frequências naturais, configurações modais e amortecimento), com base em métodos de identificação modal no domínio da frequência e/ou no domínio do tempo [10,11], e estudar a sua evolução ao longo do tempo, considerando o nível da água e as variações térmicas sazonais, ou para detetar possíveis alterações estruturais devido aos processos de deterioração [6,7] ; b) medir a resposta dinâmica da barragem para diferentes níveis de água, permitindo avaliar a amplificação das acelerações registadas na fundação e na barragem, bem como estudar a influência da interação barragem-albufeira. Além disso, o software desenvolvido deve permitir a comparação entre a resposta dinâmica da barragem e

seu comportamento dinâmico conforme previsto numericamente com base em programas de elementos finitos: estes estudos comparativos são de grande interesse para validar e calibrar os modelos numéricos, que são usados para simular o comportamento dinâmico de sistemas barragem-fundação-albufeira e para efetuar estudos de verificação da segurança sísmica das obras.

3 SISTEMA SSHM INSTALADO NA BARRAGEM DO CABRIL

A barragem do Cabril (Fig.1) localiza-se no rio Zêzere e está em funcionamento desde 1954. Trata-se de uma barragem de dupla curvatura, com fundação em rocha de granito. Trata-se de uma abóbada com a particularidade de apresentar uma maior espessura no coroamento (como se pode ver no corte pela secção central que se mostra na Fig.1). Tem 132 m de altura máxima acima da fundação e um comprimento ao nível do coroamento de 290 m.

A consola central tem uma largura máxima de 20 m na base e uma largura mínima de 4,5 m abaixo do coroamento. Durante o primeiro enchimento ocorreu fendilhação horizontal significativa na zona central superior, entre as cotas de 280 m e 290 m. Além disso, foi detetado um processo expansivo desde o final dos anos 90. Em 2008 foi instalado na barragem do Cabril um sistema de monitorização dinâmica (Fig. 2) do tipo SSHM.

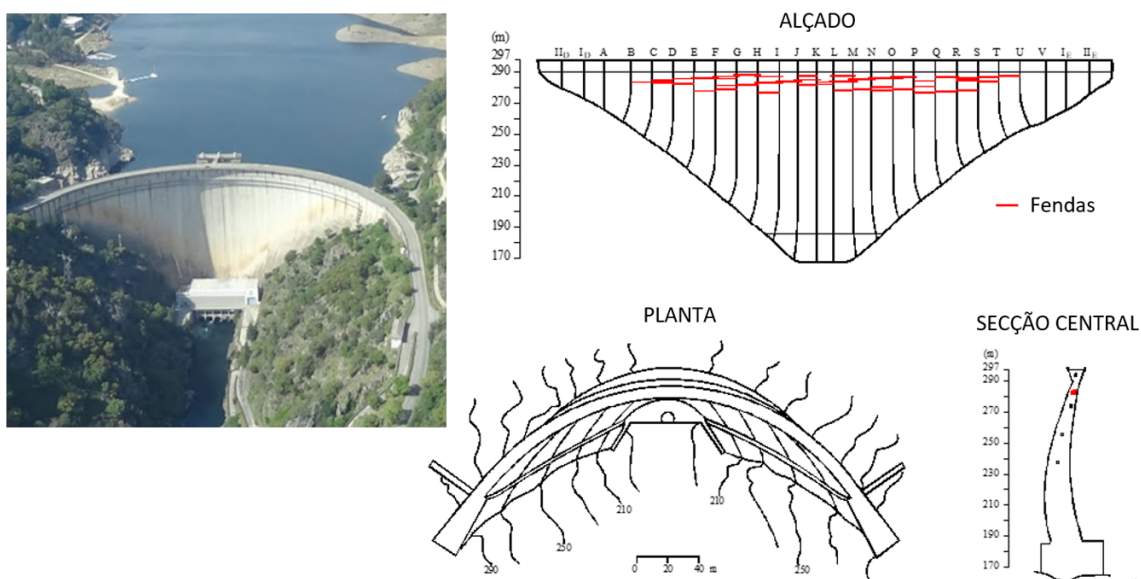


Figura 1. Barragem do Cabril. a) Vista aérea (em que é visível a torre de tomada de água).
b) Alçado, planta e corte pela consola central.

A configuração adotada para este sistema baseou-se na experiência recolhida no LNEC ao longo dos anos, referente a dados da monitorização e a resultados de simulações numéricas [3,4,5,6]. O objetivo foi implementar um sistema com alta gama dinâmica, capaz de medir, em contínuo e com boa precisão, a resposta da barragem para vários tipos de excitação dinâmica: excitação ambiente/operacional e sismos de várias magnitudes. Este sistema inclui 16 acelerómetros uniaxiais e 3 triaxiais e foi projetado para medir acelerações na zona superior da barragem e junto à inserção, com uma taxa de amostragem de 1000 Hz.

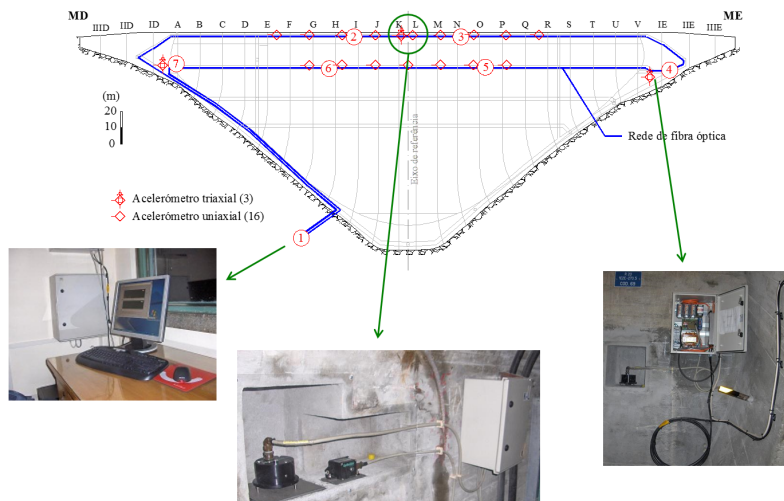


Figura 2. Sistema SSHM instalado na barragem do Cabril, em 2008

Os acelerómetros uniaxiais (medem vibrações na direção radial) estão distribuídos na parte superior da barragem por duas galerias, acima e abaixo da zona fendilhada. Quanto aos acelerómetros triaxiais, um está localizado na consola central (galeria superior), enquanto os outros dois estão instalados junto à inserção, em ambas as margens. Os acelerómetros estão ligados a um sistema modular composto por unidades de aquisição/digitalização, as quais são controladas por 4 concentradores de dados. Esses dados são enviados através de uma rede local de fibra ótica (intranet) para um computador no posto de observação e controlo (POC), localizado na central. No total são gravados continuamente, hora a hora, ficheiros com dados de 25 acelerogramas. O armazenamento e gestão dos dados recolhidos é efetuado no servidor localizado no POC, utilizando *software* apropriado desenvolvido no LNEC. No que diz respeito ao controlo remoto do sistema, é importante referir que o servidor pode ser acedido via internet a partir do LNEC por computador ou até por *smartphone*, utilizando *software* adequado.

Como salientado atrás, o *hardware* para medição das acelerações e o *software* de aquisição de dados correspondente deve ser complementado com *software* adequado para análise e gestão automática dos dados recolhidos, para garantir a eficiência do sistema de monitorização dinâmica. Para o caso da barragem do Cabril, foram desenvolvidos em MATLAB programas de identificação modal baseados no método de decomposição no domínio da frequência (FDD) e na técnica de Decomposição em Valores Singulares (FDD) da matriz Densidade Espectral de Potência (PSD) [10, 11].

4 MODELO ADOTADO PARA SIMULAR A RESPOSTA DINÂMICA DO SISTEMA BARRAGEM-FUNDAÇÃO-ALBUFEIRA

O comportamento dinâmico do sistema barragem-fundação-albufeira é simulado através de um modelo *coupled* baseado numa formulação de EF3D (Fig.3) em deslocamentos (domínio sólido - barragem e fundação) e pressões (domínio fluido - albufeira), utilizando o programa DamDYSSA4.0. São definidas condições de fronteira específicas para simular a pressão hidrostática e hidrodinâmica na face a montante da barragem, considerando a interação dinâmica barragem-albufeira com propagação das ondas de pressão no reservatório e o efeito de amortecimento da radiação. Utiliza-se a técnica de subestruturação no cálculo da fundação como uma subestrutura elástica e sem massa, considerando a introdução de componentes de rigidez e amortecimento diretamente na interface barragem-rocha, enquanto o *input* sísmico é aplicado admitindo distribuição espacial uniforme. O programa DamDySSA4.0 envolve três módulos: (i) análise modal com amortecimento

generalizado, usando uma formulação de estado para resolver o problema de valores e vetores próprios complexos e calcular frequências naturais, modos não estacionários e fatores de amortecimento modal; (ii) análise sísmica linear, utilizando um método de discretização temporal para integração numérica com base no método de Newmark, assumindo comportamento elástico linear no betão e nas juntas; e (iii) análise sísmica não linear, combinando o referido método de Newmark e o método de *stress-transfer* (para simular a redistribuição de tensões desequilibradas), considerando o comportamento do betão até a rotura com base num modelo de dano isotrópico com enfraquecimento e duas variáveis de dano independentes (d^+ para tração e d^- para compressão), e movimentos da junta de abertura/fecho/ deslizamento, utilizando elementos de junta e a lei de Mohr-Couloumb, nas juntas de contração verticais, na superfície de inserção da barragem e nas fendas existentes.

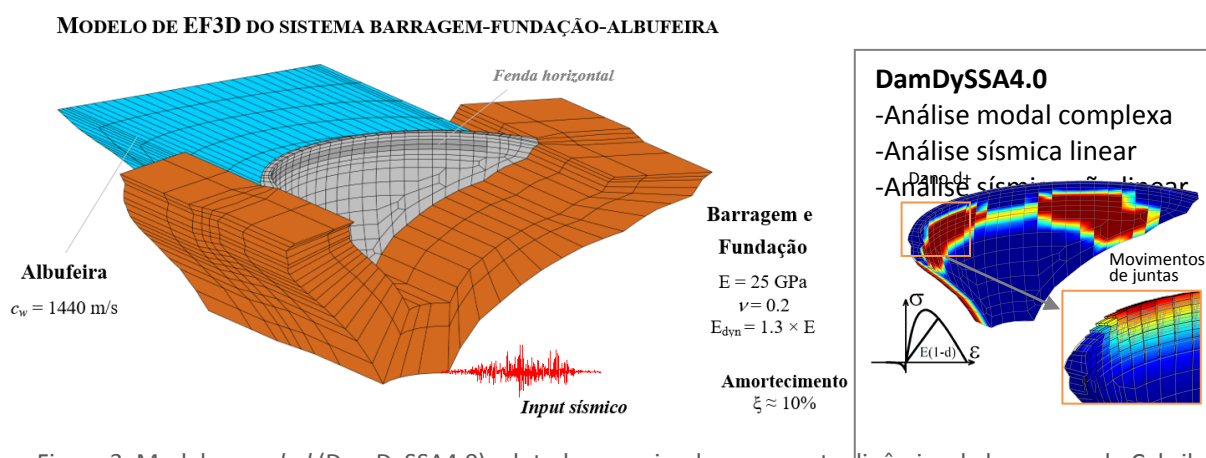


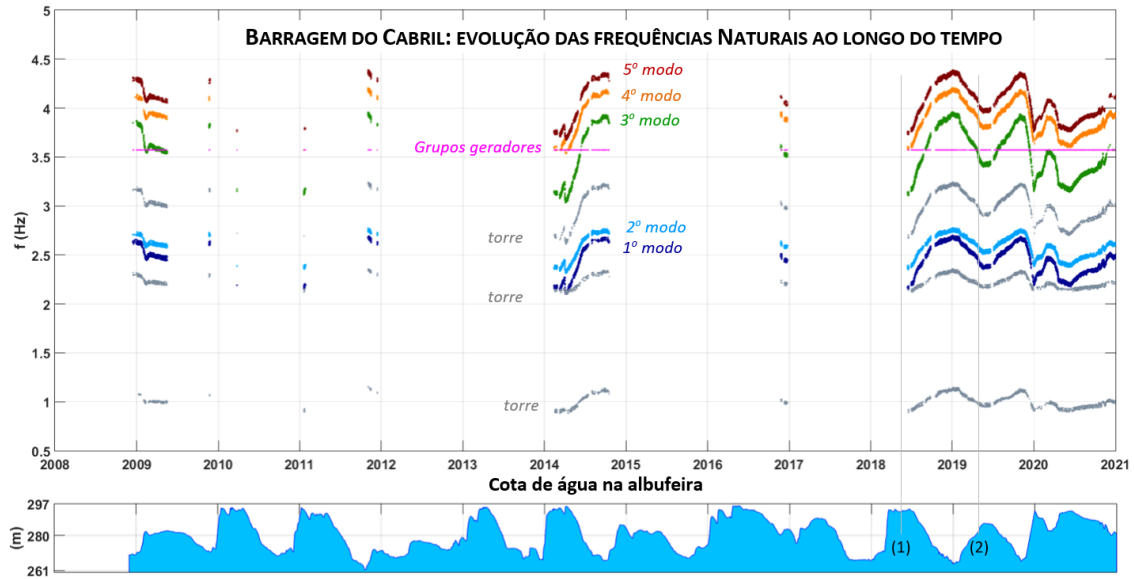
Figura 3. Modelo *coupled* (DamDySSA4.0) adotado para simular a resposta dinâmica da barragem do Cabril

5 ANÁLISE MODAL. EVOLUÇÃO DAS FREQUÊNCIAS NATURAIS AO LONGO DO TEMPO

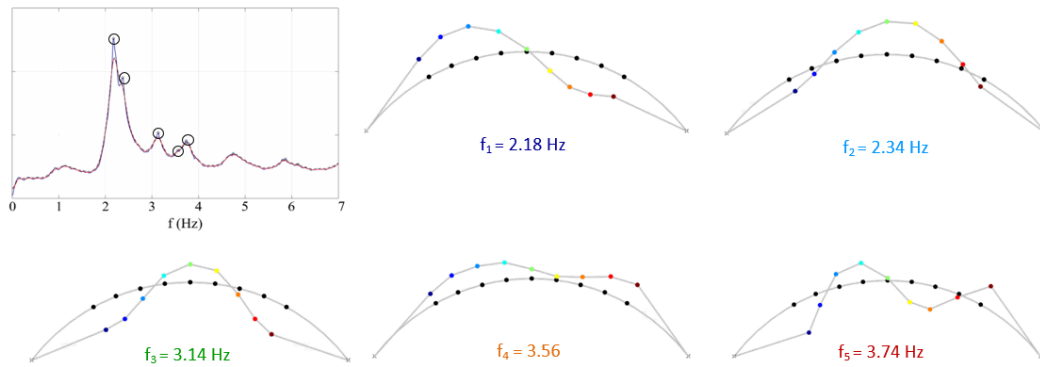
Na Fig.4 apresenta-se a evolução das frequências naturais identificadas para os primeiros cinco modos de vibração da barragem do Cabril, para o período 2008-2020, assim como as frequências e configurações modais estimadas a partir das acelerações medidas em 16/jun/2018 (17h-18h), e em 4/mai/2019 (4h-5h). Pode-se verificar que configuração do 4º modo é claramente influenciada pela fendilhação horizontal existente na barragem (oscilação da parte superior da barragem).

Na Fig.5 apresenta-se a comparação entre as frequências naturais calculadas (linhas) e identificadas ao longo do tempo (círculos) assim como as frequências e configurações modais calculadas para a albufeira às cotas 293,5 m e 285,0 m. Esta figura permite verificar que existe uma boa concordância entre as frequências e configurações modais identificadas e calculadas para os cinco primeiros modos, especialmente para os níveis de água mais elevados (menor interação com a torre).

Na Fig.6 mostra-se como o uso combinado de resultados da monitorização de vibrações em contínuo e de resultados de simulações dinâmicas de elementos finitos pode ser de grande valor para analisar a integridade estrutural. A frequência natural do 1º modo identificada automaticamente ao longo do tempo (a vermelho) é comparada com a frequência calculada (a azul) utilizando um modelo de referência, sem dano, e um modelo de teste considerando dano evolutivo de 0 e 5%. No período em análise (2008-2020) é obtido um bom ajuste com o modelo sem dano o que permite concluir que o comportamento estrutural da obra não foi significativamente afetado por eventual deterioração.



Resultados da identificação modal: acelerações medidas 16/jun/2018, 17h às 18h, água à cota 294 m (1)



Resultados da identificação modal: acelerações medidas 4/mai/2019, 4h às 5h, água à cota 285,1 m (2)

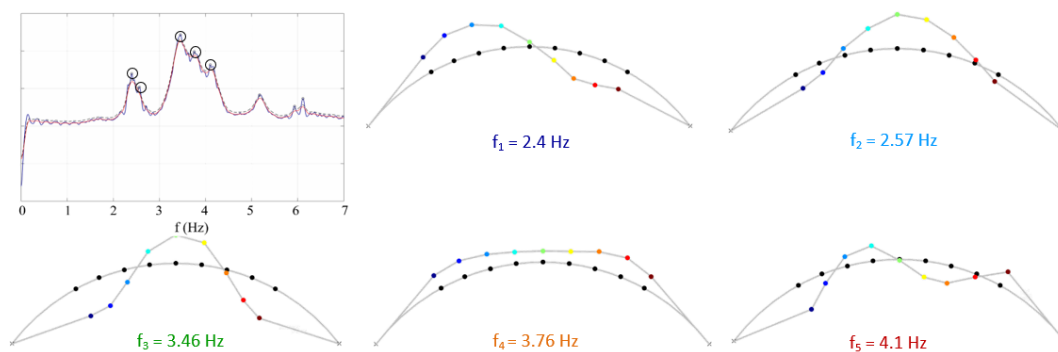
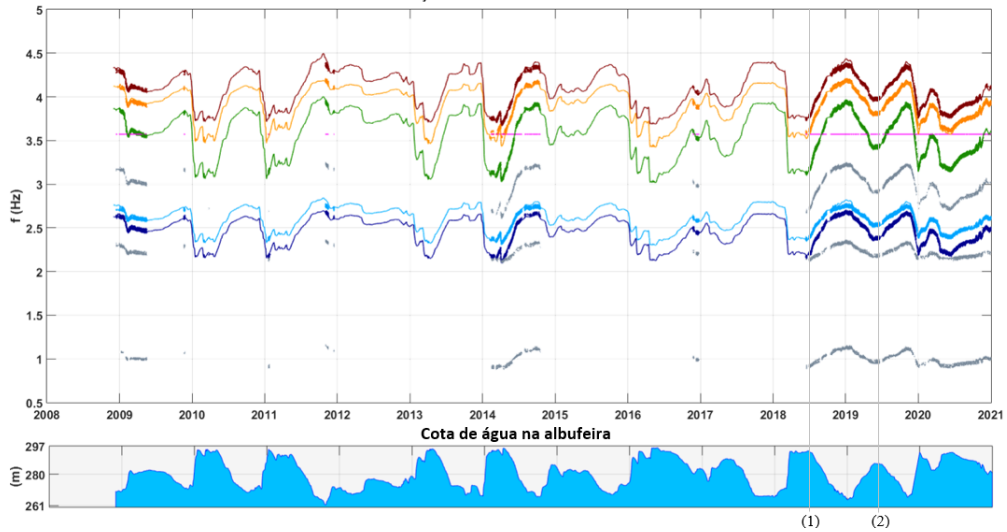
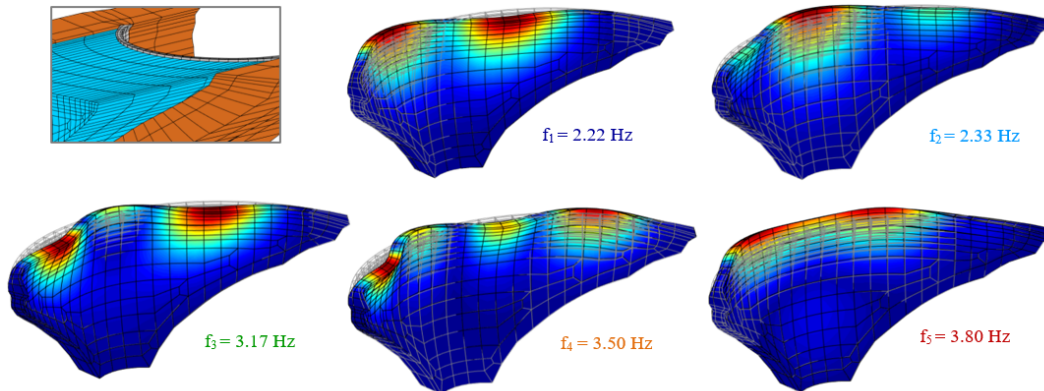


Figura 4. Resultados da monitorização em contínuo da barragem do Cabril: evolução das frequências naturais identificadas ao longo do tempo (2008-2020). Espectros de valores singulares da matriz DEP, frequências naturais identificadas e configurações modais em 16/jun/2018 e em 4/mai/2019.

COMPARAÇÃO ENTRE FREQUÊNCIAS NATURAIS IDENTIFICADAS E CALCULADAS
EVOLUÇÃO AO LONGO DO TEMPO



Resultados da análise modal para a água à cota 293,5 m (1)



Resultados da análise modal para a água à cota 285 m (2)

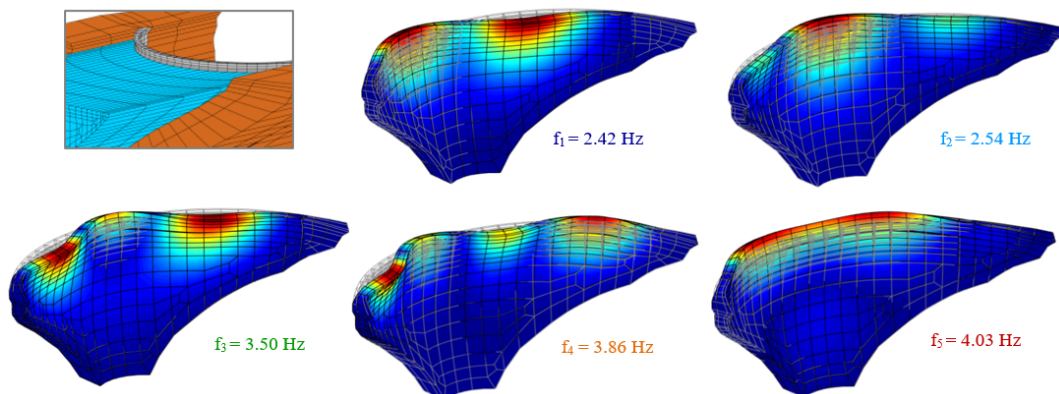


Figura 5. Comparação entre frequências naturais calculadas e identificadas em obra ao longo do tempo. Configurações modais calculadas com o MEF, para duas cotas de água.

DETEÇÃO DE DANO COM BASE NA MEDIÇÃO DE VIBRAÇÕES

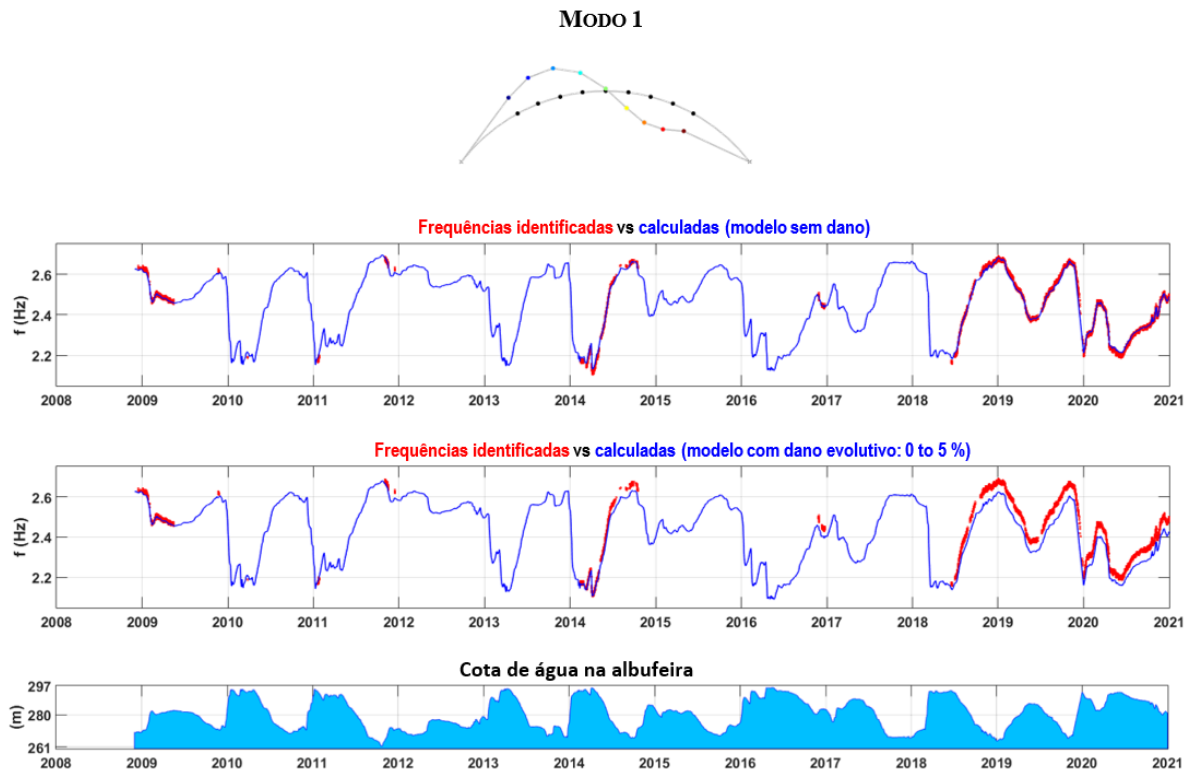


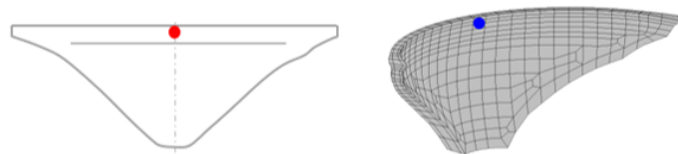
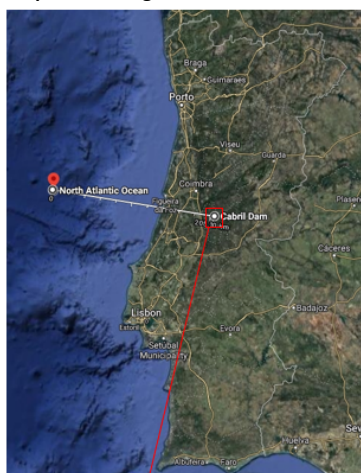
Figura 6. Detecção de dano com base na medição e análise de vibrações. Evolução da frequência natural do 1º modo de vibração identificada ao longo do tempo (2008 to 2020) e comparação com as frequências calculadas numericamente (MEF) usando um modelo sem dano e um modelo com dano evolutivo (0 to 5 %).

6 RESPOSTA SÍSMICA

Neste ponto analisa-se a resposta sísmica da obra para o sismo que ocorreu em 4/set/2018, de magnitude 4,6 na escala Richter, com epicentro na região abissal de Peniche, a cerca de 205 km do local da barragem (Fig.7). Na figura 7 é possível ver o bom acordo que foi obtido entre as acelerações medidas no topo da consola central e as correspondentes acelerações calculadas considerando como *input* no modelo de EF3D (fig.3) as acelerações que foram medidas junto à inserção, na base do encontro direito. A maior aceleração de pico foi registada no topo da consola central, com um valor de 3,62 mg, na direção radial: comparando esta aceleração com a aceleração de pico na rocha sob o encontro da MD, na mesma direção (1,31 mg), verifica-se que o fator F_a de amplificação entre a aceleração na inserção e no topo da consola central é de, aproximadamente, $F_a=2,8$, idêntico ao fator calculado com o modelo de EF adotado. Com base nos registos de aceleração apresentados, pode-se verificar que as maiores acelerações foram registadas na parte superior da barragem, conforme esperado. Esta análise mostra a capacidade do sistema SSHM da barragem do Cabril para medir vibrações induzidas por eventos sísmicos, mesmo vibrações de baixa amplitude para sismos com epicentros a grande distância do local da barragem e mostra o interesse deste tipo de registos medidos *in-situ* para validar e calibrar os modelos numéricos adotados para simulação da resposta sísmica de barragens o que é essencial para a realização de estudos de verificação da segurança.

SISMO DE MAGNITUDE 4.6
4 DE SETEMBRO DE 2018.
DISTÂNCIA: 206 km

Epicentro: Região abissal de Peniche



Acelerações no topo da consola central

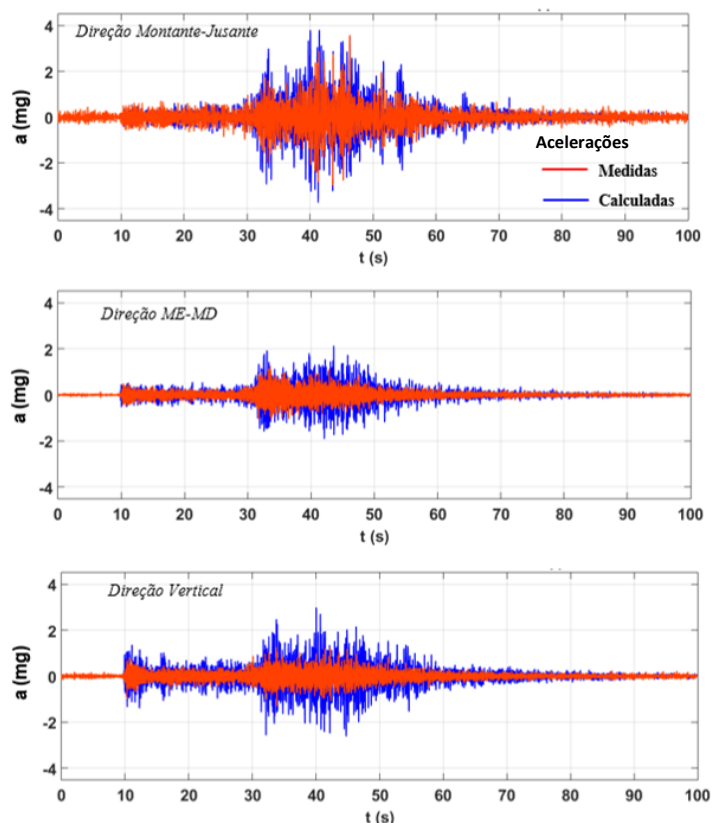


Figura 7. Comparação da resposta sísmica medida e calculada com o DamDySSA4.0 (sismo 4/set/2018, M4.6)

7 CONCLUSÕES

Neste trabalho apresentaram-se alguns dos principais resultados da monitorização dinâmica em contínuo obtidos ao longo dos últimos 12 anos na barragem do Cabril. Os registos de acelerações medidos foram utilizados para estudar o comportamento dinâmico da barragem sob vibrações ambientais/operacionais, visando avaliar a evolução das frequências naturais e configurações modais ao longo do tempo, considerando a influência do nível de água da albufeira, bem como analisar a resposta medida durante eventos sísmicos. Foi efetuada uma comparação sistemática entre resultados experimentais e numéricos sendo estes calculados com um modelo *coupled* de EF3D, que permite simular a interação dinâmica barragem-albufeira. Mostrou-se que, em geral, é obtida uma boa concordância entre a resposta medida e a resposta calculada numericamente, quer em termos de frequências naturais e modos de vibração quer em termos de acelerações sísmicas. Com base na evolução das frequências naturais da barragem do Cabril foi possível concluir que os fenómenos de

deterioração existentes não têm progredido significativamente e não afetam a integridade estrutural da obra.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Eletricidade de Portugal (EDP) todo o apoio fornecido na instalação e manutenção do sistema SSHM da barragem do Cabril e à Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) o financiamento inicial para compra de equipamento (REEQ/815/ECM/ 2005) e o financiamento do trabalho de investigação através da bolsa de doutoramento SFRH/BD/116417/2016.

REFERÊNCIAS

- [1] Oliveira, S. (2002). Continuous monitoring system for the dynamic performance assessment of arch dams. Sub-program D, in “Study of evolutive deterioration processes in concrete dams. Safety control over time”. National Program for Scientific Re-equipment funded by FCT, REEQ/815/ECM/2005, LNEC-FEUP (in Portuguese).
- [2] Oliveira, S., Rodrigues, J., Mendes, P., Costa, A. (2003). Monitoring and modelling the dynamic behaviour of concrete dams. VII Congress Applied and Computational Mechanics, University of Évora (in Portuguese).
- [3] Mendes, P. (2010). Observação e análise do comportamento dinâmico de barragens de betão. PhD Thesis, Univ. do Porto (FEUP/LNEC)
- [4] Oliveira, S.; Silvestre, A. (2017). Cabril dam. System for continuous vibrations monitoring. LNEC Report 205/2017 - DBB/NMMR, LNEC (in Portuguese).
- [5] Oliveira, S., Mendes, P., Garret, A., Costa, O. (2011). Long-term dynamic monitoring systems for the safety control of large concrete dams. The case of Cabril dam, Portugal. 6th Int. Conference on Dam Engineering, LNEC, Lisbon.
- [6] Oliveira, S.; Alegre, A. (2018). Vibrations in large dams. Monitoring and modelling. 26th Congress and 86th Annual Meeting. 1st-7th July, Vienna, Austria.
- [7] Oliveira, S.; Alegre, A., (2019). ‘Seismic and Structural Health Monitoring of Dams in Portugal’, In Seismic Structural Health Monitoring - From Theory to Successful Applications, M.P. Limongelli and M. Celebi (Eds.), Springer, Chapter 4, 2019.
- [8] Oliveira, S., Ferreira, I., Berberan, A., Mendes, P., Boavida, J., Baptista, B. (2010). Monitoring the structural integrity of large concrete dams. The case of Cabril dam, Portugal. Hydro2010, Lisbon.
- [9] Gomes, J. P., Palma, J., Magalhães, F., Pereira, S., Monteiro, G., Matos, D. (2018). Seismic monitoring system of Baixo Sabor scheme for structural dynamic behavior monitoring and risk management. ICOLD 26th Congress and 86th Annual Meeting. 1st-7th July, Vienna, Austria.
- [10] Peeters, B., 2000 – System identification and damage detection in civil engineering. S.l.: Tese de doutoramento, Univ. Católica de Lovaina, Bélgica, 2000.
- [11] Brincker, R., Ventura, C. (2015). Introduction to Operational Modal Analysis. John Wiley & Sons.