



Comportamento dinâmico da barragem de Cahora Bassa sob excitação ambiente e sob ações sísmicas

André Alegre

IST, Lisboa, Portugal, andrefalegre92@gmail.com

Sérgio Oliveira

LNEC, Lisboa, Portugal, soliveira@lnec.pt

Ezequiel Carvalho

HCB, Songo, Moçambique, ezequiel. carvalho@hcb.co.mz

Paulo Mendes

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

Jorge Proença

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

Resumo

Em face do elevado risco potencial geralmente associado às grandes barragens, de acordo com a ICOLD é fundamental avaliar continuamente o desempenho destas obras, durante toda a fase de exploração, para situações correntes e excecionais, nomeadamente, envolvendo fenómenos de deterioração progressiva e/ou a ocorrência de ações excecionais, como é o caso, por exemplo, de sismos intensos. Desta forma, o controlo da segurança de grandes barragens deve apoiar-se: (i) na monitorização com sistemas do tipo SSHM (“*Seismic and Structural Health Monitoring*”) equipados com *software* adequado para gestão e análise automática dos dados recolhidos continuamente; e (ii) na comparação entre os resultados da monitorização com resultados numéricos de modelos de elementos finitos (EF3D). Neste trabalho apresentam-se diversos resultados de medições *in-situ* referentes à caracterização do comportamento dinâmico da barragem de Cahora Bassa (em Moçambique), uma barragem abóbada de dupla curvatura com 170 m de altura na qual está instalado, desde 2010, um sistema do tipo SSHM para monitorização de vibrações em contínuo. Analisa-se, em particular, a evolução das principais frequências naturais ao longo do tempo, considerando as variações do nível da albufeira, e a resposta sísmica da obra durante um evento sísmico de baixa intensidade, com base em acelerações medidas na rocha e no corpo da barragem. Os resultados das medições em obra são comparados com resultados numéricos obtidos com um modelo de EF3D. Apresentam-se ainda resultados de uma análise sísmica não linear considerando o método “*Endurance Time Analysis*” (ETA) que permite estudar com elevada eficiência computacional a resposta da obra para sismos com aceleração de pico crescente.

Palavras-chave: Sistemas do tipo SSHM para monitorização de vibrações em barragens; Modelos de EF3D; Evolução de frequências naturais; Modos de vibração; Análise sísmica com o método ETA

1 INTRODUÇÃO

A monitorização da integridade estrutural e o controlo da segurança de grandes barragens apoia-se atualmente na utilização de sistemas de monitorização automática para controlar continuamente o desempenho das obras para solicitações estáticas e dinâmicas, utilizando, nomeadamente, os denominados sistemas do tipo SSHM (“*Seismic and Structural Health Monitoring*”) para medição de vibrações. O conceito de SSHM é bastante recente, referindo-se à implementação de procedimentos e estratégias para caracterizar o comportamento dinâmico dessas estruturas em condições de operação e durante eventos sísmicos, com base em dados da monitorização de vibrações contínuo [1,2,3]. Com os sistemas de monitorização de vibrações do tipo SSHM são recolhidos dados referentes à resposta dinâmica das obras que permitem: i) caracterizar do comportamento dinâmico global do sistema barragem-fundação albufeira para diferentes cotas de água; ii) analisar a evolução dos principais parâmetros modais ao longo do tempo, nomeadamente frequências naturais dos primeiros modos de vibração; iii) estudar a resposta dinâmica sob ações sísmicas reais; iv) investigar os efeitos estruturais dos processos de deterioração evolutiva dos materiais (p.ex. associados à progressão no tempo de processos expansivos) com vista a avaliar continuamente a integridade estrutural; v) fornecer informações úteis às partes interessadas e aos técnicos/engenheiros responsáveis pelo controlo da segurança e monitorização da integridade estrutural, para cumprir as necessidades de manutenção regular e/ou para apoiar a tomada de decisões face a situações excecionais.

2 SISTEMAS DO TIPO SSHM PARA MONITORIZAÇÃO DE VIBRAÇÕES EM CONTÍNUO EM GRANDES BARRAGENS

A aplicação de metodologias SSHM para controlo de segurança de barragens sofreu um importante crescimento na última década, devido às vantagens da monitorização de vibrações contínuo [2] e devido às crescentes exigências de segurança da sociedade, acompanhada pelos donos de obra e engenheiros responsáveis. Portanto, a instalação de sistemas para medição vibrações em contínuo tem sido proposta para a maioria das novas grandes barragens, para avaliar o seu comportamento desde a fase de primeiro enchimento, e para barragens mais antigas, algumas construídas há várias décadas e com problemas de deterioração (por exemplo, problemas de deterioração evolutiva associados a reações expansivas).

A instalação de um sistema SSHM em grandes barragens de betão visa medir continuamente as acelerações em vários pontos no corpo da barragem (é conveniente efetuar medições num elevado número de pontos, da ordem das duas ou três dezenas, bem distribuídos pelo corpo da obra, sobretudo na zona central superior), em vários pontos ao longo da interface barragem-fundação e, se possível, em vários pontos no interior do maciço rochoso de fundação [4, 5]. O objetivo é ter dados que permitam uma avaliação contínua da resposta dinâmica das obras sob vibrações operacionais/ambientais e sob ações sísmicas. Os sistemas SSHM devem ser preparados para efetuar medições com alta gama dinâmica, por forma a que seja possível medir com precisão a resposta da barragem para movimentos oscilatórios de amplitude reduzida, ou seja, devidos a excitação ambiental/operacional e sismos de baixa intensidade, e para movimentos oscilatórios de maior amplitude, devidos, por exemplo, a sismos de grande intensidade. Os sistemas SSHM devem adotar equipamentos de última geração para medição, aquisição e transmissão automática de dados e devem ser integrar software (Fig. 1), adaptado e otimizado para cada barragem, para processar e analisar automaticamente as vibrações medidas, nomeadamente software para identificação modal

e com capacidade para distinguir vibrações sísmicas das vibrações resultantes da operação dos órgãos de descarga e de produção de energia. Além disso, é necessário incluir nos sistemas SSHM resultados de modelos de elementos finitos (MEF) de referência, para permitir a comparação entre a resposta medida e calculada, a fim de obter elementos para apoio a estudos de avaliação da integridade estrutural e de verificação da segurança, e elementos para apoiar estudos de calibração/validação de novos modelos em desenvolvimento.

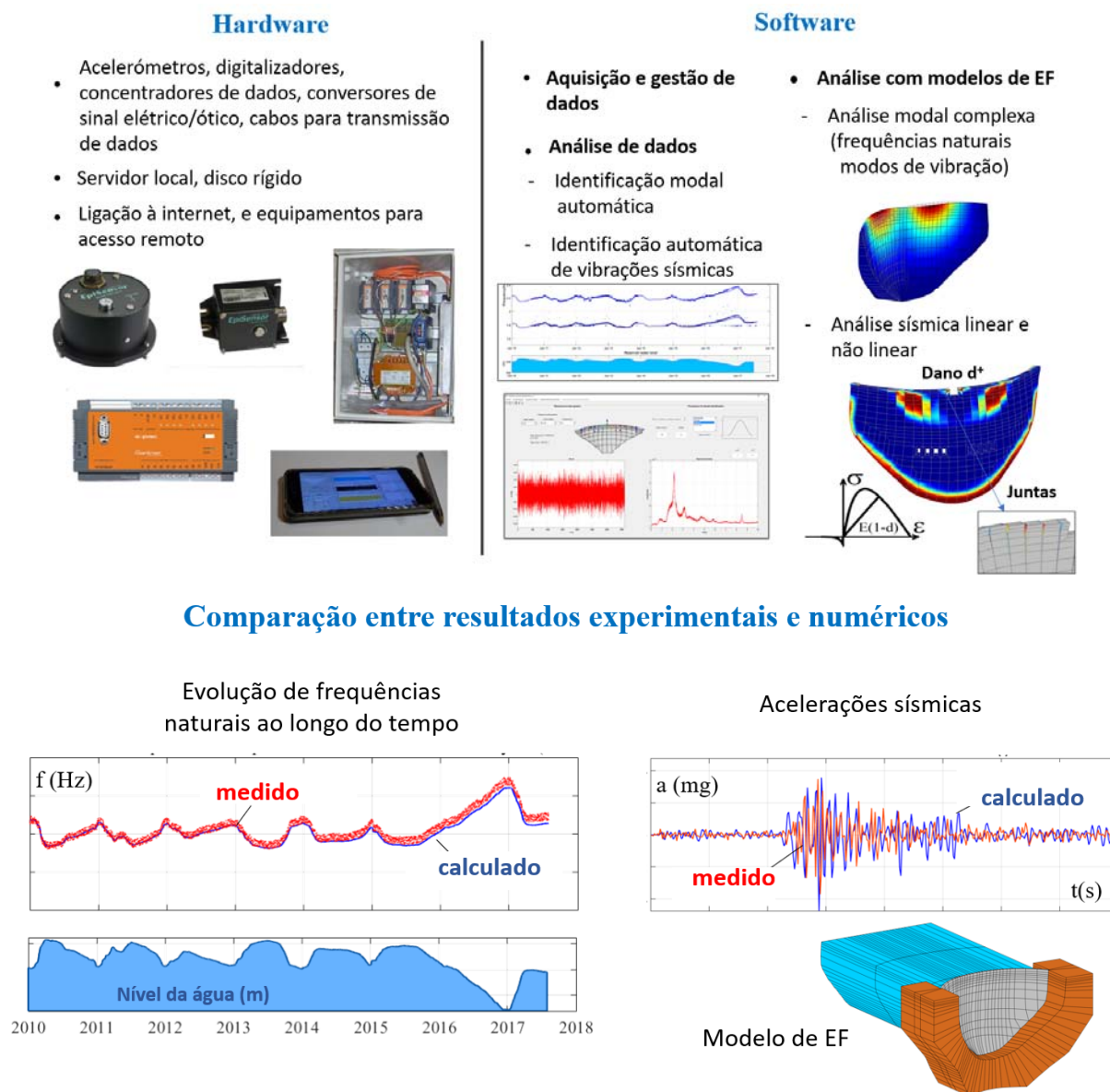


Figura 1. Principais componentes de um sistema do tipo SSHM para grandes barragens. Representações gráficas adotadas para comparação entre resultados experimentais e numéricos

3 SISTEMA SSHM INSTALADO NA BARRAGEM DE CAHORA BASSA

3.1 Características da barragem

A barragem de Cahora Bassa (Fig.2), está localizada em Moçambique, perto da vila do Songo, e foi construída no final de 1974 no rio Zambeze. É uma barragem abóbada de dupla curvatura com 170 m de altura, assente numa fundação granítica de muito boa qualidade. O coroamento, à cota 331 m, tem um comprimento da ordem de 300 m. A secção central tem 23 m de largura na base e 4 m de largura ao nível do coroamento. Na década de 1980 foi detetada a ocorrência de um processo expansivo no betão. Atualmente é visível fendilhação em “craquelet”, em várias zonas da obra, nomeadamente no piso do coroamento, o que é comum em barragens com problemas de expansões.

3.2 Sistema SSHM

Em 2010 foi instalado na barragem um sistema SSHM (Fig. 2), com o objetivo de caracterizar o comportamento dinâmico da obra sob vibrações ambientais/operacionais e durante eventos sísmicos. O sistema foi projetado para registar continuamente histórias de aceleração usando acelerómetros de grande sensibilidade, a uma taxa de amostragem de 50 Hz e armazenando continuamente as acelerações numa banda de $\pm 1g$. Assim, o esquema de monitorização instalado inclui 10 acelerómetros uniaxiais (EpiSensor ES-U2), localizados na galeria superior abaixo do coroamento, para medir acelerações na direção radial, e 3 sensores triaxiais (EpiSensor ES-T), um posicionado junto à base (interface barragem-fundação) e dois nas margens direita e esquerda. Todos os sensores (19 canais) são ligados a uma unidade Granite de 24 canais da Kinometrics para aquisição/digitalização de dados, em 24 bits. No total, 19 acelerogramas são registados continuamente, a cada hora, e então enviados e armazenados no servidor de computador localizado nos escritórios do centro de controle da barragem.

Um software específico foi desenvolvido para analisar os dados recolhidos com sistemas de monitorização contínua, incluindo o instalado na barragem de Cahora Bassa. Este software compreende várias ferramentas, nomeadamente para: i) identificação modal interativa (com interface de utilizador) e automática, utilizando o método *Frequency Domain Decomposition* (FDD-SVD) [6,7], e uma nova técnica para seleção automática de picos baseada num procedimento de linha de limiar e numa técnica de *clustering* otimizada para distinguir as diferentes frequências modais; e ii) para distinguir automaticamente vibrações sísmicas, com base em análises de máximos, possibilitando o envio de e-mails de alerta aos Donos de Obra e/ou engenheiros responsáveis pelo controlo da segurança. Com base nos resultados experimentais obtidos com este software, é possível avaliar a evolução do comportamento dinâmico de barragens ao longo do tempo e realizar estudos comparativos com a resposta prevista através de modelos de EF.

Barragem de Cahora Bassa. Sistema SSHM instalado em 2010



Software

1. **Análise dos dados da monitorização**
 - 1.1 Identificação automática de vibrações sísmicas
 - 1.2 Identificação Modal (FDD-SVD)
2. **Análise com Elementos Finitos**
 - 2.1 Análise modal complexa
 - 2.2 Análise sísmica linear
 - 2.3 Análise sísmica não-linear

Hardware (Equipamento instalado)

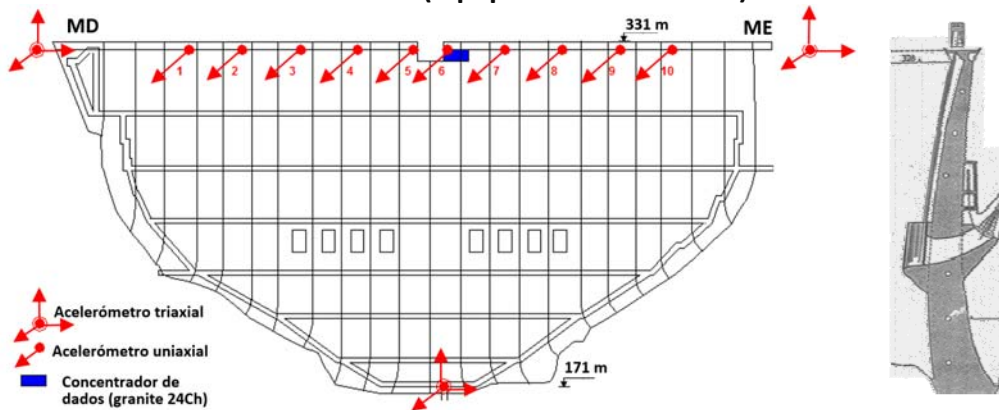


Figura 2. Barragem de Cahora Bassa. Sistema SSHM instalado em 2010.

4 MODELAÇÃO NUMÉRICA DA RESPOSTA DINÂMICA

O comportamento dinâmico do sistema barragem-fundação-albufera 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 - albufera), utilizando o programa DamDYSSA4.0. Trata-se de um programa de EF3D desenvolvido para análise dinâmica linear e não linear de barragens de betão. O sistema barragem-fundação-albufera é simulado usando um modelo *coupled* [2] com fundação sem massa, com base numa formulação em deslocamentos e pressões para simular a propagação das ondas de pressão ao longo da albufera [1,2]. A análise modal complexa é efetuada com base numa formulação de estado, o que permite considerar amortecimento não proporcional. A análise sísmica é efetuada com um algoritmo de integração numérica no domínio do tempo baseado no método de Newmark, sendo os acelerogramas sísmicos aplicados na base (uniformemente distribuídos ao longo da interface barragem-rocha). Na análise sísmica não linear utiliza-se o método de *stress-transfer* sendo o comportamento do betão até a rotura simulado 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-Coulomb, nas juntas de contração verticais, na superfície de inserção da barragem e em eventuais fendas.

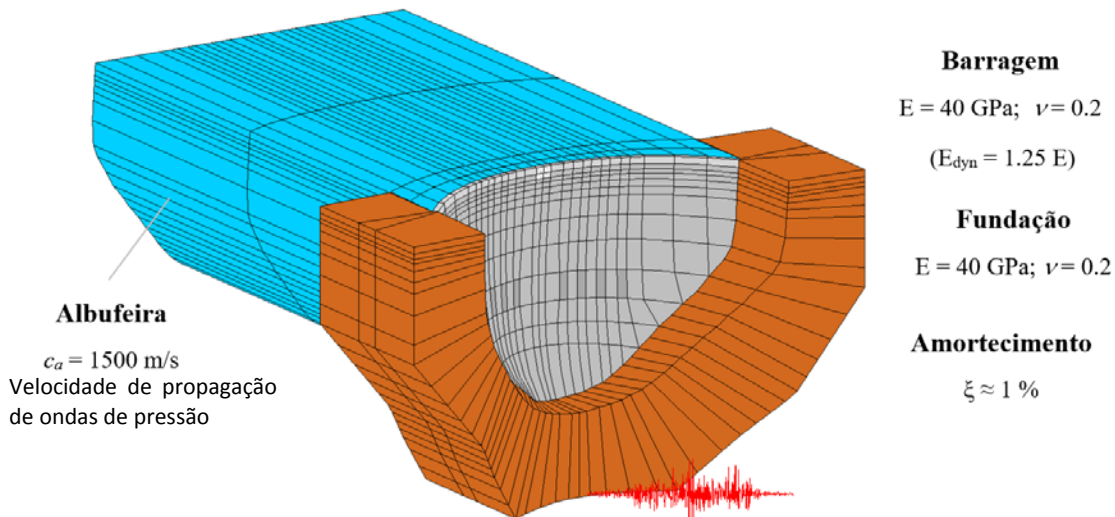
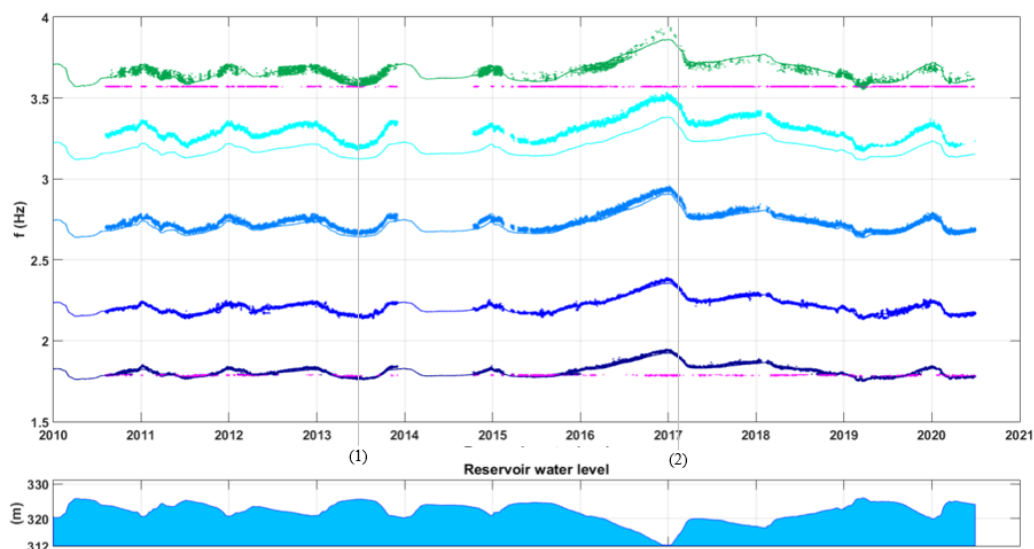


Figura 3. Modelo *coupled* adotado para simular a resposta dinâmica da barragem do Cahora Bassa

5 EVOLUÇÃO DAS FREQUÊNCIAS NATURAIS AO LONGO DO TEMPO

Nesto ponto apresentam-se resultados referentes à observação e análise do comportamento dinâmico da barragem de Cahora Bassa sob excitação ambiente/operacional, entre 2010 e 2020. Na Fig.4 apresenta-se a evolução das frequências naturais identificadas automaticamente para os cinco primeiros modos de vibração. Os valores da frequência do 1º modo variam entre 1,95 Hz e 1,78 Hz. Para o 2º modo, os valores de frequência variam de 2,4 Hz a 2,16 Hz. Como esperado, a influência do nível da água na resposta dinâmica da barragem é significativa, como se pode ver na Fig.4 pela correlação entre as variações nas frequências naturais e as variações do nível de água na albufeira. As simulações numéricas foram realizadas utilizando o modelo de elementos finitos tridimensional (MEF3D) atrás referido sistema barragem-fundação-albufeira, considerando um módulo de elasticidade $E = 40 \text{ GPa}$ e um coeficiente de Poisson $\nu = 0,2$ para a barragem e fundação, e uma velocidade de propagação de ondas de pressão na água $c_a = 1500 \text{ m/s}$. Para cálculos dinâmicos foi utilizada a relação $E_{\text{dyn}} = 1,25 \times E_{\text{estático}}$. Na Fig. 4 apresenta-se uma comparação entre as frequências naturais identificadas ao longo do tempo e as curvas de frequência obtidas numericamente com o MED3D (considerando as variações reais do nível de água) bem como as configurações modais calculadas para a água à cota 319 m. Como se pode ver na Fig.4 os modos 1 e 5 são antissimétricos, enquanto os modos 2, 3 e 4 são simétricos. A análise comparativa mostra uma excelente concordância entre as frequências naturais identificadas e calculadas para os primeiros cinco modos de vibração, com diferenças de menos de 0,1 Hz observadas para o 3º e 4º modo. Na Fig.5 mostra-se como o uso combinado de resultados da monitorização de vibrações em contínuo e de resultados de simulações com MEF 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 (2010-2020) 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 progressiva associada ao processo expansivo.



Resultados da análise modal com EF considerando a água à cota 326 m

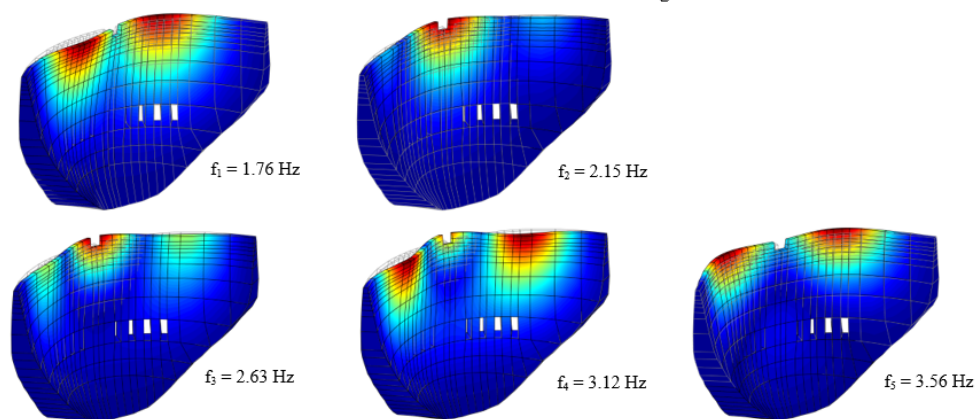


Figura 4. Evolução das frequências naturais identificadas ao longo do tempo (2010-2020): comparação entre frequências naturais identificadas e calculadas (MEF), para os primeiros 5 modos de vibração.

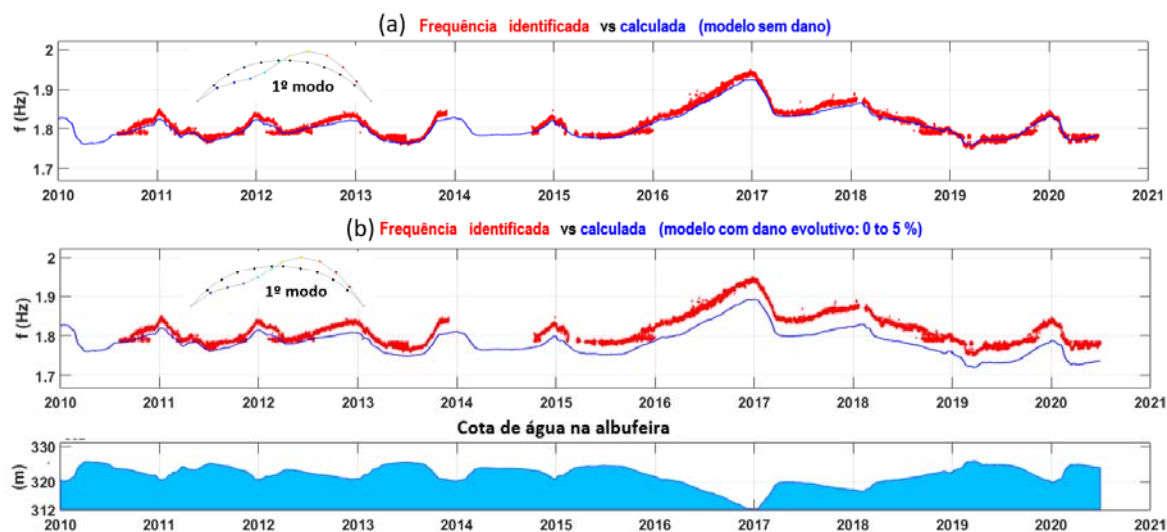
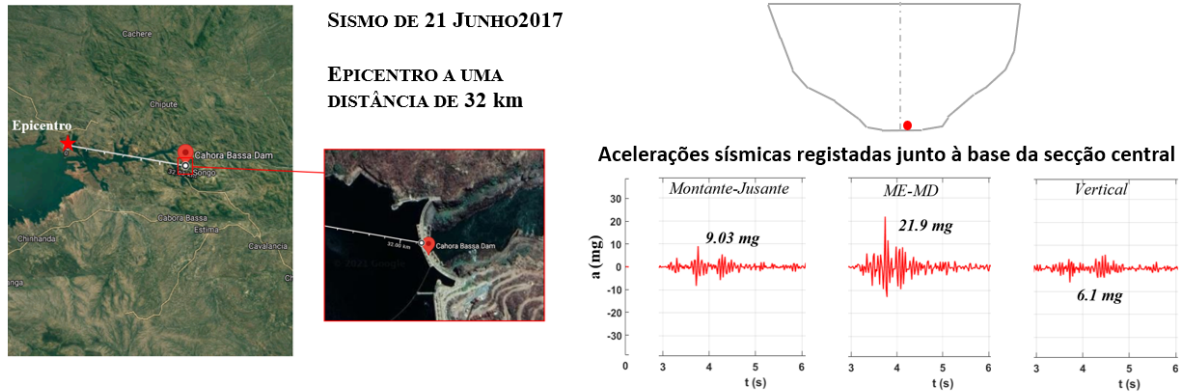


Figura 5. Detecção de dano com base na medição e análise de vibrações. Evolução da frequência natural do 1º modo de vibração identificada ao longo do tempo (2010 to 2020) e comparação com a frequência calculada numericamente (MEF) usando: (a) um modelo sem dano; e (b) um modelo com dano evolutivo (0 to 5 %).

6 RESPOSTA SÍSMICA MEDIDA EM OBRA

Neste ponto analisa-se a resposta sísmica da obra para o sismo que ocorreu em 21/jun/2017 com epicentro a cerca de 32 km da barragem (Fig.6). Na Fig. 6 é possível ver o bom acordo que foi obtido



Acelerações sísmicas no topo da secção central. Comparação entre acelerações medidas e calculadas

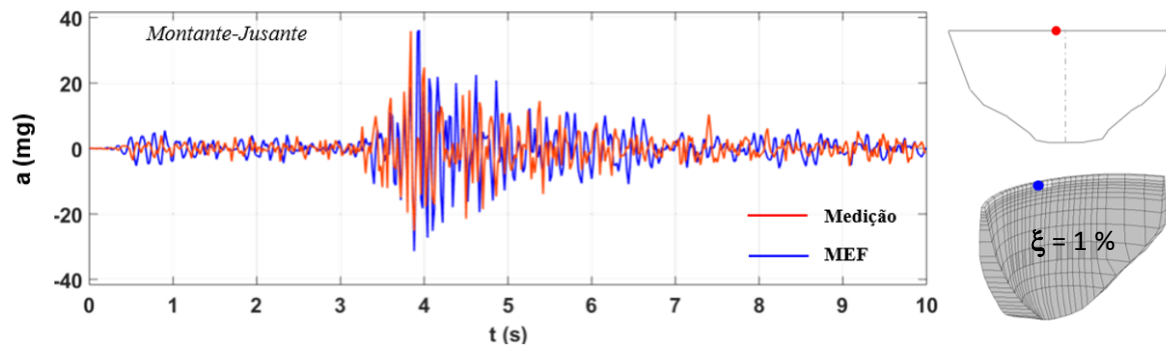


Figura 6. Comparação da resposta sísmica medida e calculada com o DamDySSA4.0 (sismo 21/jun/2017)

entre aceleração radial medida no topo da consola central e a correspondente aceleração calculada com o MEF, considerando como *input* as acelerações medidas no fundo do vale (na base da secção central), distribuídas uniformemente na fundação. Esta análise mostra a capacidade do sistema SSHM instalado na barragem do Cahora Bassa para medir vibrações induzidas por eventos sísmicos e mostra o interesse deste tipo de registos medidos *in-situ* para validar e calibrar os modelos numéricos a adotar em estudos de verificação da segurança sísmica.

7 RESPOSTA NÃO-LINEAR SOB ACÇÕES SÍSMICAS DE GRANDE INTENSIDADE. UTILIZAÇÃO DO MÉTODO ETA (“ENDURANCE TIME ANALYSIS”)

Neste ponto apresentam-se resultados de uma análise sísmica não linear (Fig.7) considerando o método “Endurance Time Analysis”, ETA [8, 9]. Neste caso, o denominado *endurance limit* foi de 0.5g (5s), dado que só para este nível de excitação começam a surgir danos à tração significativos numa área extensa do paramento de jusante, que se propagam ao longo da espessura em algumas consolas. Os danos à compressão só ocorrem a partir da aceleração de 0.6g, aumentando progressivamente até $a_p=1g$, quando as roturas se propagam de montante a jusante na zona central

superior. Em síntese, os resultados obtidos nesta análise com o método ETA permitem concluir que a barragem de Cahora Bassa apresenta um desempenho muito satisfatório para um nível de excitação sísmica até 5 vezes superior ao do Sismo Máximo de Projeto (SMP) prescrito para a barragem de Cahora Bassa, ao qual corresponde uma aceleração de pico de 0,1g.

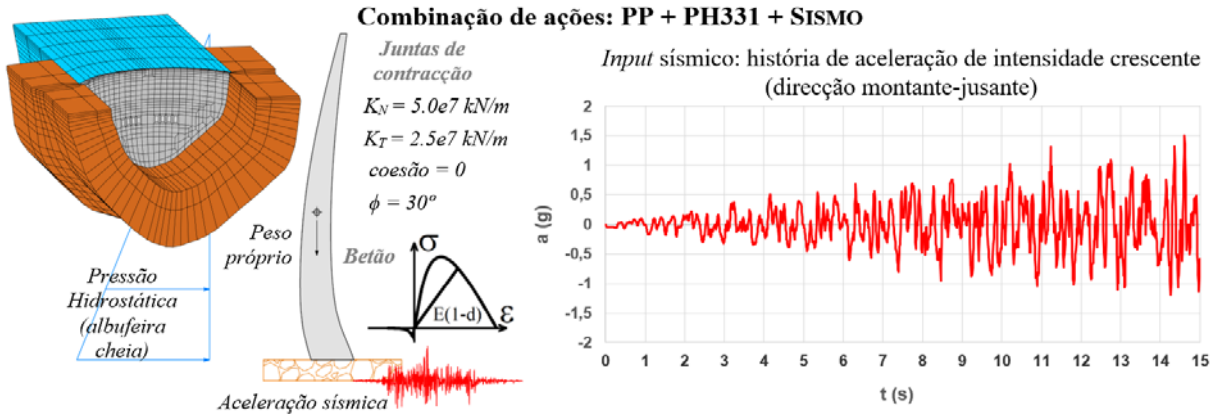


Figura 7. Modelo EF3D do sistema barragem-fundação-albufeira usado na análise sísmica não linear da barragem de Cahora Bassa. Propriedades das juntas de contração, lei constitutiva de dano e input sísmico utilizado para análise do comportamento sísmico até à rotura pelo método ETA (*Endurance Time Analysis*).

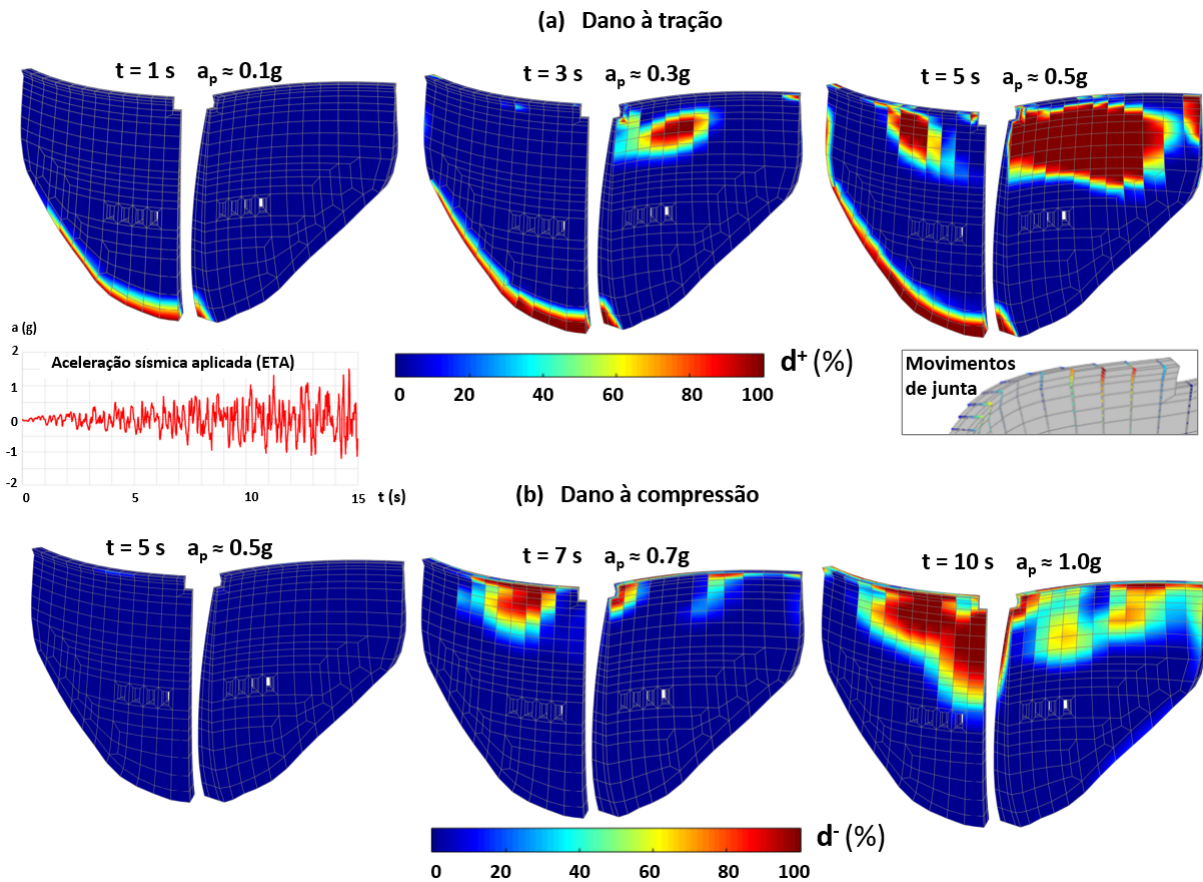


Figura 8. Resposta sísmica não linear da barragem de Cahora Bassa pelo método ETA. Evolução da distribuição do dano à tração(a) e à compressão(b) para a combinação PP+PH331+SISMO, com aceleração crescente.

8 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi analisado o comportamento dinâmico da barragem de Cahora Bassa tendo por base os resultados da monitorização de vibrações efetuada ao longo dos últimos 10 anos com o sistema SSHM instalado na barragem de Cahora Bassa em 2010. Os registos de acelerações medidos foram utilizados para estudar o comportamento dinâmico da barragem sob vibrações ambientais /operacionais e sob ações sísmicas. 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 tendo-se obtido 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 análise da evolução das frequências naturais da barragem de Cahora Bassa, comparando resultados experimentais e numéricos (modelo coupled de EF3D com e sem dano), foi possível concluir que os fenómenos de deterioração existentes não têm progredido significativamente e não afetam a integridade estrutural da obra. Por fim apresentaram-se resultados de uma análise sísmica não linear com o método “Endurance Time Analysis” tendo-se concluído que a barragem de Cahora Bassa apresenta um bom desempenho para níveis de excitação sísmica 5 vezes superiores à definida para o SMP ($a_p=0,1g$).

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Hidroelétrica de Cahora Bassa (HCB), e à Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) o financiamento da bolsa de doutoramento SFRH/BD/116417/2016.

REFERÊNCIAS

- [1] Oliveira, S.; Alegre, A. (2019). Seismic and Structural Health Monitoring Systems for Large Concrete Dams. 12th Int. Workshop on Structural Health Monitoring. Stanford, California USA
- [2] Oliveira, S.; Alegre, A. (2018). Vibrations in large dams. Monitoring and modelling. 26th Congress and 86th Annual Meeting. 1st-7th July, Vienna, Austria.
- [3] 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.
- [4] Mendes, P. (2010). Observação e análise do comportamento dinâmico de barragens de betão. PhD Thesis, Univ. do Porto (FEUP/LNEC)
- [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. Conf. on Dam Engineering, LNEC, Lisbon.
- [6] Peeters, B., 2000 – System identification and damage detection in civil engineering. S.l.: Tese de doutoramento, Univ. Católica de Lovaina, Bélgica, 2000.
- [7] Brincker, R., Ventura, C. (2015). Introduction to Operational Modal Analysis. John Wiley & Sons.
- [8] Estekanchi, H. E., Vafai, A., & Sadeghazar, M. (2004). Endurance Time Method for Seismic Analysis and Design of Structures. Scientia Iranica, 11(4), 361–370.
- [9] Hariri-Ardebili, M. A., & Mirzabozorg, H. (2012). Seismic performance evaluation and analysis of major arch dams considering material and joint nonlinearity effects. ISRN Civil Engineering, 2012, 1–10. <https://doi.org/10.5402/2012/681350>