

# Modelação numérica do comportamento dinâmico observado da barragem do Baixo Sabor

Numerical modeling of the dynamic monitoring behavior of the Baixo Sabor dam

Jorge Pereira Gomes  
Sérgio Pereira  
José Vieira de Lemos  
Filipe Magalhães  
Álvaro Cunha

## Resumo

A conjugação entre os modelos numéricos e os resultados observados do comportamento das obras é uma ferramenta fundamental no apoio ao controle de segurança de grandes obras. A barragem do Baixo Sabor possui um sistema de monitorização dinâmica em contínuo, e foram realizados dois ensaios de vibração forçada para duas cotas de albufeira. Neste contexto foram desenvolvidos modelos numéricos da barragem do Baixo Sabor incorporando o conjunto barragem-fundação-albufeira. Neste artigo, apresentam-se os resultados dos modelos numéricos desenvolvidos para vários níveis da albufeira comparando com os resultados experimentais.

## Abstract

The conjugation between the numerical models and the monitoring results of the behavior of the structures is an essential tool to support the safety control of large structures. The Baixo Sabor dam is equipped with a continuous dynamic monitoring system, and two forced vibration tests were carried out for two levels of the reservoir. In this context, numerical models with dam-foundation-reservoir were developed for the Baixo Sabor. In this article, the results of the numerical models developed for several levels of the reservoir are presented, comparing them with the experimental results.

Palavras-chave: Barragem de betão / Modelação numérica / Comportamento dinâmico

Keywords: Concrete dam / Numerical modeling / Dynamic behavior

## Jorge Pereira Gomes

Investigador Principal  
Laboratório Nacional de Engenharia Civil  
Lisboa, Portugal  
jgomes@lnec.pt

## Sérgio Pereira

Investigador Doutorado  
CONSTRUCT – ViBest  
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto  
Porto, Portugal  
sbp@fe.up.pt

## José Vieira de Lemos

Investigador-Coordenador  
Laboratório Nacional de Engenharia Civil  
Lisboa, Portugal  
vlemos@lnec.pt

## Filipe Magalhães

Professor Associado  
CONSTRUCT - ViBest  
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto  
Porto, Portugal  
filipema@fe.up.pt

## Álvaro Cunha

Professor Catedrático  
CONSTRUCT - ViBest  
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto  
Porto, Portugal  
acunha@fe.up.pt

## Aviso legal

Os conteúdos incluídos na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

## Legal notice

*The contents included in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.*

GOMES, J [et al.] – Modelação numérica do comportamento dinâmico observado da barragem do Baixo Sabor. **revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 22. ISSN 2183-8488. (julho 2023) 99-110.

## 1 Introdução

O acompanhamento do comportamento das estruturas cuja exploração envolva riscos significativos é fundamental, para se poderem detetar situações anómalas e intervir atempadamente na sua resolução de forma a evitar qualquer tipo de acidente estrutural. A avaliação periódica do comportamento dinâmico das estruturas é uma ferramenta importante porque permite detetar a partir da alteração do comportamento dinâmico, as correspondentes modificações estruturais ocorridas durante esse período. Estas alterações podem incidir unicamente na evolução das características mecânicas do material da obra (favorável ou desfavorável), na variabilidade das ações ou na existência de alterações estruturais importantes, designadamente relacionadas com a fendilhação. Para a implementação desta metodologia é útil determinar o comportamento dinâmico das obras para estados de referência e a partir dessa altura acompanhar a sua evolução.

Ao longo dos últimos anos, têm sido desenvolvidos no LNEC técnicas para a realização de ensaios de vibração forçada em barragens de betão para a caracterização do seu comportamento dinâmico. As metodologias de ensaio inserem-se num processo de evolução contínua, tendo sido implementadas ao longo do tempo melhorias consideráveis, nomeadamente no controle das ações dinâmicas aplicadas à barragem, na fiabilidade dos registos obtidos relativamente ao comportamento estrutural e no seu tratamento com vista à identificação dos parâmetros dinâmicos da estrutura. A determinação da resposta dinâmica das obras e o acompanhamento da evolução do seu comportamento durante as várias fases da vida é fundamental, estando inserido nas atividades do controle de segurança estrutural. A conjugação entre os métodos experimentais e numéricos é uma ferramenta indispensável no apoio da avaliação da segurança das obras.

Para o apoio na avaliação da segurança estrutural da barragem, foram desenvolvidos modelos numéricos com representação do sistema barragem-albufeira-fundação calibrados com os resultados experimentais. O modelo incorporou a discretização da albufeira de modo a ser possível simular o efeito da água sem recorrer a simplificações numéricas, como, por exemplo, a consideração do método das massas associadas de Westergaard, utilizado frequentemente na modelação do comportamento dinâmico de barragens de betão que sobrestima o efeito da água, sendo necessário corrigir esse valor por um coeficiente sem qualquer tipo de critério objetivo para a sua escolha. O modelo numérico desenvolvido elimina este fator subjetivo, uma vez que incorpora a discretização geométrica da albufeira, o comportamento da água e a interação água-barragem. Na albufeira foi utilizada a técnica de macro-elementos com discretização mista para a representação da albufeira, já validada através de comparações com soluções analíticas.

A barragem do Baixo Sabor possui um sistema de monitorização dinâmica em contínuo, e foram realizados dois ensaios de vibração forçada para duas cotas de albufeira.

Nesta comunicação, apresentam-se os resultados dos modelos numéricos desenvolvidos para vários níveis da albufeira comparando com os resultados experimentais, verificando-se uma excelente concordância.

## 2 Descrição da barragem do baixo sabor

O aproveitamento hidroelétrico do Baixo Sabor (AHBS), projetado pelo corpo técnico da EDP Produção, sendo o concessionário atual a Movhera- Hidroelétricas do Norte, S.A., e a Engie-Hidroelétricas do Douro, Lda, como empresa responsável pela operação e manutenção, integra a barragem do Baixo Sabor no seu escalão de montante. O AHBS fica situado no concelho de Torre de Moncorvo, distrito de Bragança, no troço inferior do rio Sabor, afluente da margem direita do rio Douro, entre as barragens do Pocinho e da Valeira. O aproveitamento é constituído por dois escalões, ficando o de montante situado a cerca de 12,6 km da confluência do rio Sabor com o rio Douro. Este escalão é constituído pela barragem, pelos circuitos hidráulicos e pela central subterrânea, na margem direita (Figura 1).

A barragem é uma abóbada de dupla curvatura, com uma altura máxima de 123 m acima do ponto mais baixo da fundação. A barragem está implantada numa secção em que o vale se apresenta mais simétrico e mais encaixado, em forma de V, possuindo a margem direita uma inclinação mais acentuada que a esquerda (Figura 2). O coroamento, à cota 236,0 m, tem uma espessura de 6,00 m e um desenvolvimento total de 505 m. A abóbada é formada por 32 blocos, separados por juntas de contração verticais. Na zona superior central da barragem está implantado um descarregador de cheias de superfície com 4 vãos, de 16,00 m de largura cada, equipados com comportas segmento. A albufeira criada pela barragem terá uma capacidade de cerca de 1095 hm<sup>3</sup> para o nível de pleno armazenamento (NPA), à cota 234,0 m, correspondendo a uma área inundada de cerca de 2819 ha.



Figura 1 Planta geral das obras do escalão de montante do AHBS

## 3 Monitorização dinâmica da barragem do Baixo Sabor

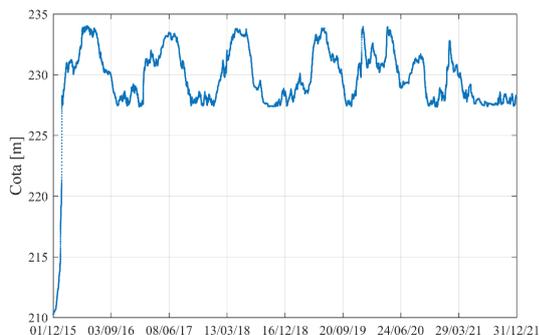
### 3.1 Descrição sumária

Para a determinação e acompanhamento da evolução do comportamento dinâmico da barragem, foram realizados 2 ensaios de vibração forçada para duas cotas de albufeira e foi instalado um sistema de monitorização dinâmica em contínuo.

Os ensaios de vibração forçada foram realizados em janeiro de 2015, para a cota da albufeira de 195 m e em maio de 2016 correspondente à albufeira cheia (234 m). O sistema de monitorização dinâmica em contínuo ficou operacional em dezembro de 2015 quando o nível da água se situava à cota 210 m (Figura 3).

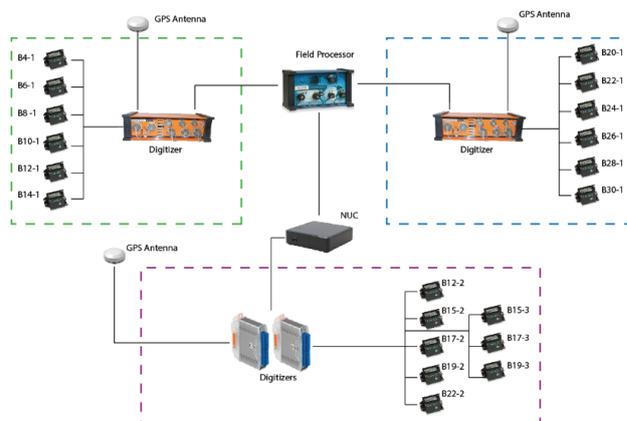


Figura 2 Vista de jusante da barragem do Baixo Sabor e corte vertical pela consola central



**Figura 3** Evolução temporal do nível da água na albufeira deste a instalação do sistema de monitorização dinâmica em contínuo até 31/12/2021

O sistema de monitorização dinâmica em contínuo implementado na barragem é constituído por três subsistemas ligados por fibra ótica, perfazendo um total de 20 acelerómetros uniaxiais instalados na direção radial (Figura 4). Cada subsistema possui um digitalizador que posteriormente envia a informação para computador compacto Intel® NUC (*Next Unit of Computing*). Para realizar a análise modal deve-se garantir uma boa sincronização dos dados registados por todos os digitalizadores, o que exigiu a instalação de uma antena GPS (*Global Positioning System*) em cada subsistema. Além disso, o computador NUC é ligado à rede de fibra ótica entre a barragem e a central permitindo o seu acesso remoto. Apresenta-se na Figura 5, um esquema com os principais elementos que compõem o sistema de monitorização dinâmica em contínuo. Todos os registos temporais são transmitidos automaticamente através de uma ligação VPN (*Virtual Private Network*) dedicada, para as instalações do LNEC e da FEUP onde posteriormente são processados e analisados.

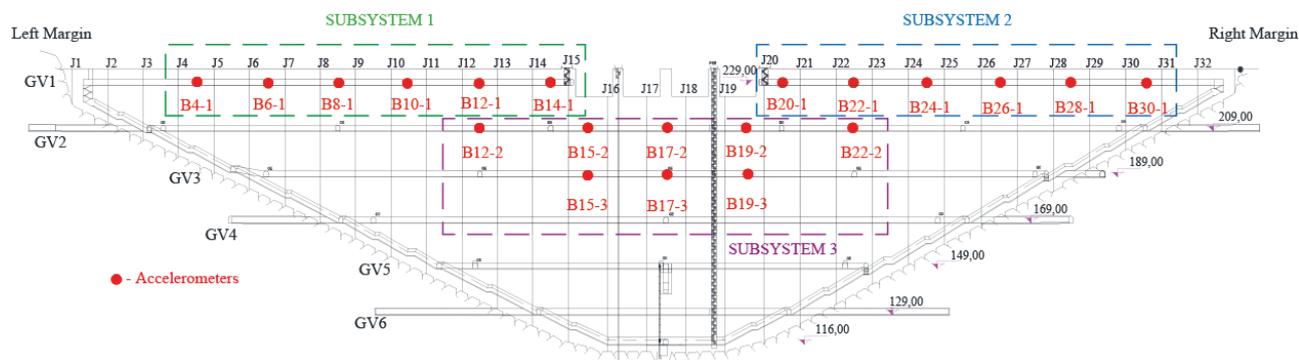


**Figura 5** Esquema geral da arquitetura do sistema de monitorização dinâmica em contínuo da barragem do Baixo Sabor

### 3.2 Resultados experimentais

Com base nos resultados dos ensaios de vibração forçada foram determinados os parâmetros modais da barragem, frequências naturais, configurações modais e amortecimento modal, a partir das funções de resposta. Esses parâmetros, estimados com base na metodologia de Múltiplos Graus de Liberdade (MDOF), são apresentados no Quadro 1. Na Figura 6, apresentam-se as configurações modais determinadas experimentalmente dos seis primeiros modos de vibração.

Com base nas séries temporais dos sensores do sistema de monitorização, com uma duração de 30 minutos, é efetuada uma



**Figura 4** Localização dos pontos de observação do sistema de monitorização dinâmica em contínuo instalado na barragem do Baixo Sabor

Quadro 1 Parâmetros modais obtidos nos ensaios de vibração forçada

Modo	Primeiro teste para o nível da albufera à cota 195,5 m		Segundo teste para o nível da albufera à cota 234,0 m		Configuração
	Freq, (Hz)	Amortecimento modal (%)	Freq, (Hz)	Amortecimento modal (%)	
1	2,75	1,0	2,44	1,2	Simétrico
2	2,95	1,1	2,57	1,0	Anti-simétrico
3	3,87	1,1	3,34	1,2	Simétrico
4	4,46	0,6	3,93	0,4	Anti-simétrico
5	5,26	0,6	4,78	1,2	Simétrico
6	5,88	1,0	5,37	1,2	Anti-simétrico
7	6,22	1,4	5,75	1,9	Anti-simétrico
8	6,69	0,6	6,06	0,6	Simétrico
9	7,81	0,9	6,50	0,6	Anti-simétrico
10	8,42	1,8	6,76	1,2	Anti-simétrico

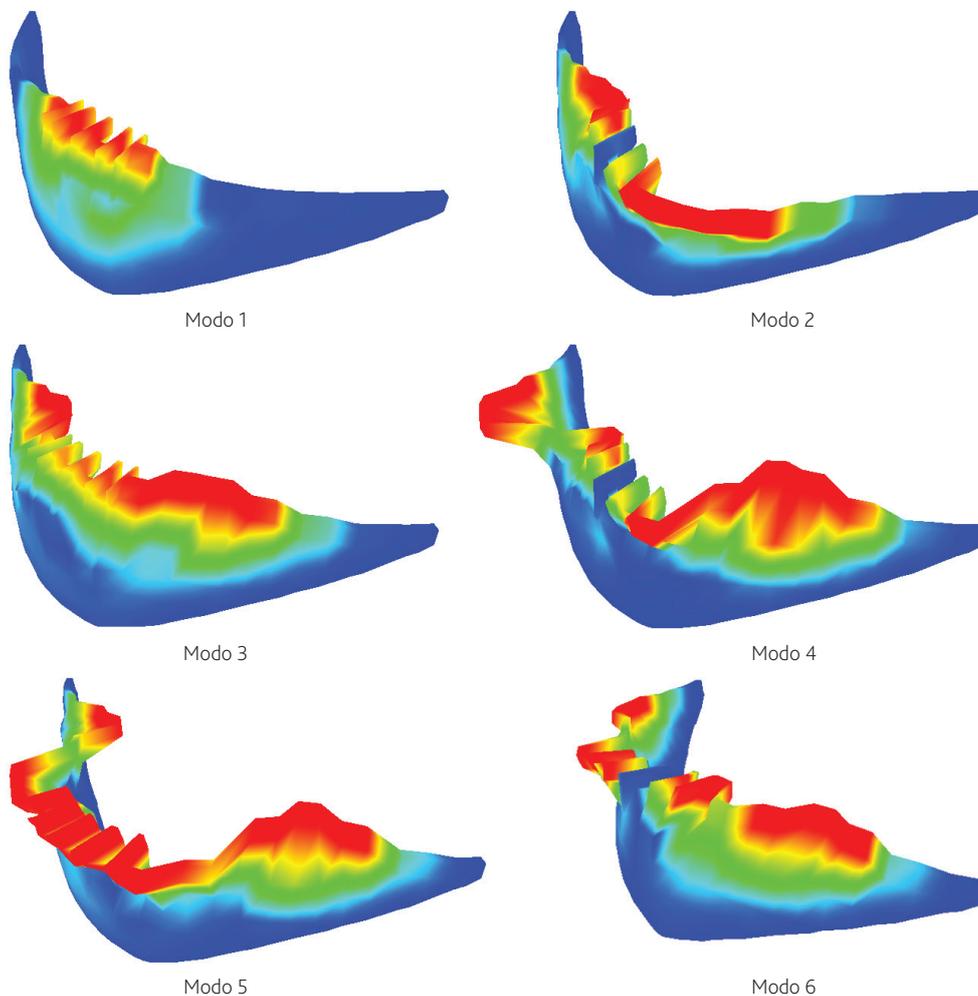
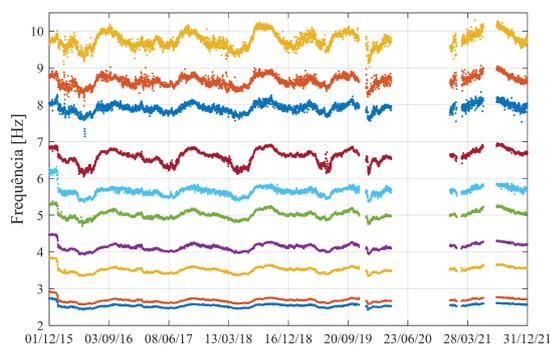


Figura 6 Configuração dos primeiros seis modos de vibração da barragem do Baixo Sabor estimados experimentalmente

identificação rigorosa das frequências naturais realizada através do método SSI-Cov combinado com um algoritmo desenvolvido no ViBest/FEUP para automatização do processo de identificação [1]. A aplicação deste método de identificação modal a todos os "setups" colhidos desde a entrada em funcionamento do sistema permitiu a caracterização da evolução temporal das frequências naturais dos primeiros 10 modos de vibração da estrutura, estando os primeiros 6 (identificados com maior rigor) em correspondência com as configurações representadas na Figura 6.

A Figura 7 apresenta, para o período total de monitorização, a média de resultados associados a 12 horas (dois pontos por cada dia).



**Figura 7** Evolução temporal das frequências naturais (médias de 12 horas – 2 valores por dia) associadas aos modos de vibração mais relevantes no período de 01/12/2015 a 31/12/2021

## 4. Modelo numérico

### 4.1 Considerações iniciais

A modelação numérica foi realizada com o programa 3DEC [2], baseado nos métodos dos elementos discretos e dos elementos finitos, que permite analisar o comportamento mecânico de meios e estruturas com superfícies de descontinuidade. No modelo elaborado foram representadas as descontinuidades relativas às juntas de contração da barragem, a fundação e a albufeira.

O modelo incorporou a discretização da albufeira de modo a ser possível simular o efeito da água sem recorrer a simplificações numéricas, como, por exemplo, a consideração do método das massas associadas de Westergaard [3], utilizado frequentemente na modelação do comportamento dinâmico de barragens de betão. É reconhecido que em barragens abóbada as massas associadas de Westergaard sobrestimam o valor de massa que deve ser adicionada aos pontos nodais do paramento de montante da barragem [4][5]. Devido a este facto é normalmente necessário escalar as massas associadas com um valor que pode variar entre 0,5 e 1,0, não existindo nenhum critério objetivo para a sua escolha. O modelo numérico desenvolvido elimina este fator subjetivo, uma vez que incorpora a discretização geométrica da albufeira e o comportamento da água.

Admitiu-se um comportamento elástico linear do betão da barragem, tendo em conta que o nível de vibrações medido pelo sistema de observação é muito reduzido, não induzindo por isso tensões

elevadas para as quais fosse necessário admitir comportamento não linear do material. No entanto, o modelo constitutivo das juntas de contração possibilita a consideração de comportamento estrutural não linear, em caso de abertura das juntas.

### 4.2 Modelação da interação hidrodinâmica com o programa 3DEC

A representação explícita da albufeira implica a consideração, na malha de cálculo, de elementos que simulem adequadamente o comportamento dinâmico do fluido e a sua interação com a barragem e o maciço rochoso de fundação, assim como a utilização de condições de fronteira dinâmicas apropriadas.

Os blocos deformáveis habituais no 3DEC são discretizados em tetraedros do 1.º grau, utilizados na representação do maciço rochoso, e em elementos finitos de 20 nós, na discretização da abóbada. Estes elementos standard não permitem simular o comportamento de um fluido, assimilado a um material elástico com módulo de distorção nulo, uma vez que se geram modos de deformação espúrios, sem significado físico. Para evitar este problema, o 3DEC dispõe de uma técnica numérica, que Cundall designou como discretização mista (mixed discretization), que consiste, no essencial, em substituir a deformação volumica num elemento pela média das deformações volumicas num conjunto de elementos adjacentes, que assim se admite terem a mesma deformação volumica e, conseqüentemente, a mesma pressão [6]. No 3DEC existem dois tipos de mixed discretization, uma com base em macro-elementos paralelepípedicos e uma outra que pode ser simulada para uma malha arbitrária de tetraedros. No presente caso foi adotada a primeira opção, sendo a albufeira dividida numa malha de blocos (ou macro-elementos) de 8 nós, solidarizados para simularem um meio contínuo. Para se obter um paralelepípedo de resposta simétrica são sobrepostas duas discretizações (layers) de 5 tetraedros cada, sendo feita a média das suas rigidezes e tensões. A técnica de discretização mista é aplicada separadamente a cada um dos layers, consistindo em tomar uma deformação volumica igual à média dos 5 tetraedros.

A utilização de macro-elementos com discretização mista para a representação da albufeira foi testada, por comparação com a solução analítica desenvolvida por Westergaard, que simula rigorosamente a interação hidrodinâmica para o caso de uma barragem rígida de paramento vertical, sujeita a uma aceleração uniforme. Estes testes demonstraram que a formulação permite obter, com uma boa aproximação, o conhecido diagrama parabólico de pressões exercidas pelo fluido na barragem.

A interface barragem-albufeira é representada por uma junta elástica, com uma rigidez tangencial nula, de modo a apenas considerar tensões normais no paramento. De igual modo, foi introduzida uma interface do mesmo tipo na base da albufeira. A rigidez tangencial nula da junta permite ao fluido deslizar sobre o maciço sem gerar tensões de corte. No extremo da albufeira são introduzidas condições de fronteira para simular a radiação da energia para a parte do reservatório não incluído no modelo, sendo adotada uma formulação de fronteiras viscosas, habitualmente utilizada no 3DEC para este efeito.

A modelação da albufeira através desta nova abordagem já foi utilizada para a interpretação dos resultados dos ensaios de vibração realizados nas barragens do Baixo Sabor [7][8], e de Foz Tua [9], em que se obtiveram resultados muito satisfatórios.

### 4.3 Geometria do modelo

Na modelação da barragem foram consideradas as juntas de contração originando 32 blocos, que interagem entre si nas zonas de interface (Figura 8). Foram também considerados os pilares do descarregador de superfície, a estrutura saliente de jusante deste descarregador e as comportas. Os blocos da barragem foram discretizados em 1236 elementos tridimensionais, do tipo cubo, isoparamétricos do 2.º grau, com 20 pontos nodais. As comportas foram simuladas por elementos finitos colocados no paramento de montante, com 3,0 m de espessura, e uma junta perimetral de ligação ao betão da barragem.

A albufeira foi simulada com macro-elementos com discretização mista, conforme referido no ponto anterior, e a fundação discretizada

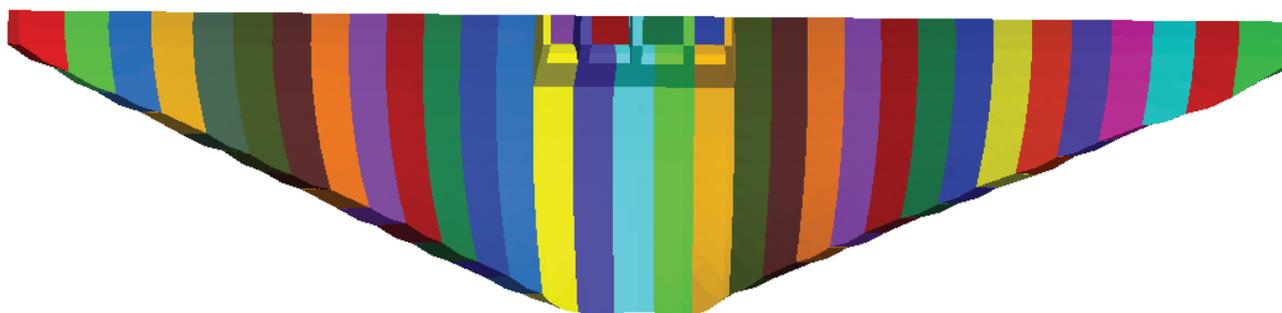
em elementos tridimensionais, do tipo cubo, isoparamétricos do 2.º grau, com 20 pontos nodais. Na Figura 9, apresenta-se uma vista dos dois modelos numéricos completos desenvolvidos para as cotas de albufeira dos dois ensaios de vibração forçada.

As malhas da fundação e da albufeira, para várias cotas de água, foram geradas automaticamente com uma ferramenta informática desenvolvida para o efeito, a partir das superfícies do paramento de montante da barragem e de inserção na fundação, respetivamente.

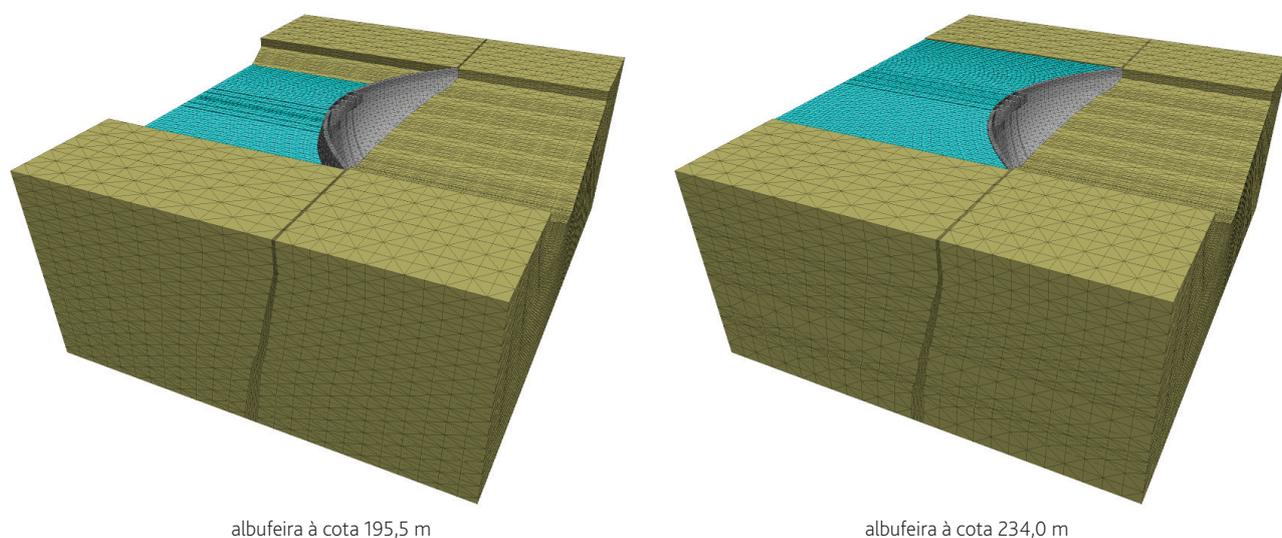
### 4.4 Propriedades dos materiais

Os modelos numéricos foram calibrados com os resultados experimentais dos ensaios de vibração forçada. As propriedades mecânicas dos materiais considerados nos modelos numéricos são apresentadas no Quadro 2.

O valor do módulo de elasticidade adotado para o betão da barragem teve por base os resultados obtidos nos ensaios nas células de fluência instaladas no corpo da barragem e dos diversos ensaios de caracterização do betão que foram realizados [10]. A função de



**Figura 8** Vista de jusante do modelo numérico da barragem do Baixo Sabor, com representação dos blocos limitados pelas juntas de contração



**Figura 9** Perspetivas dos modelos numéricos do conjunto barragem-fundação-albufeira da barragem do Baixo Sabor relativos às cotas de albufeira dos ensaios de vibração forçada

**Quadro 2** Propriedades mecânicas adotadas nos materiais dos modelos numéricos [8]

Material	Módulo de elasticidade dinâmico	Módulo de compressibilidade volumétrica	Módulo de distorção	Coefficiente de Poisson	Massa volúmica
Betão da barragem (albufeira à cota 195,5 m)	41,0 GPa	22,8 GPa	17,1 GPa	0,20	2400 kg/m <sup>3</sup>
Betão da barragem (albufeira à cota 234,0 m)	42,0 GPa	23,3 GPa	17,5 GPa	0,20	2400 kg/m <sup>3</sup>
Comportas	7,0 GPa	3,9 GPa	2,9 GPa	0,20	240 kg/m <sup>3</sup>
Fundação	35,0 GPa	19,4 GPa	14,6 GPa	0,20	2500 kg/m <sup>3</sup>
Albufeira	0,0	2,0 GPa	0,0	0,50	1000 kg/m <sup>3</sup>

**Quadro 3** Propriedades mecânicas adotadas nos materiais dos modelos numéricos [8]

Juntas		Rigidez normal	Rigidez tangencial
Material 1	Material 2		
<b>Modelo para a situação de albufeira vazia (195,5 m)</b>			
Betão	Betão		
Abaixo da cota 195,0 m		25,0 GPa/m	10,4 GPa/m
Acima da cota 195,0 m – Zona central		10,0 GPa/m	4,2 GPa/m
Acima da cota 195,0 m – Zonas laterais		2,5 GPa/m	1,0 GPa/m
Betão	Comportas	1,0 GPa/m	0,4 GPa/m
Betão	Fundação	50,0 GPa/m	20,8 GPa/m
Betão	Albufeira	2,0 GPa/m	0,0
Fundação	Albufeira	2,0 GPa/m	0,0
<b>Modelo para a situação de albufeira cheia (234,0 m)</b>			
Betão	Betão	50,0 GPa/m	20,8 GPa/m
Betão	Comportas	10,0 GPa/m	4,2 GPa/m
Betão	Fundação	50,0 GPa/m	20,8 GPa/m
Betão	Albufeira	2,0 GPa/m	0,0
Fundação	Albufeira	2,0 GPa/m	0,0

fluência obtida com base nos resultados experimentais foi:

$$J_{BaP}(t, t_0) = \frac{1}{E_0} + \frac{\varphi_1}{E_0} (t_0^{-m} + \alpha) (t - t_0)^n =$$

$$= \frac{1}{50,1} + \frac{2,2}{50,1} (t_0^{-0,35} + 0,05) (t - t_0)^{0,12} \quad (\text{GPa}^{-1})$$

Considerando para  $t_0$  o início de 2012, e para  $t$  as datas aproximadas de realização dos ensaios em 2015/01/01 e 2016/05/01, obtiveram-se os respetivos valores do módulo de elasticidade de 40,8 GPa e 41,6 GPa, tendo-se considerado 41,0 GPa e 42,0 GPa para as duas situações de ensaio (Quadro 2).

Para as juntas foi considerado um comportamento elástico linear caracterizado por uma rigidez normal e tangencial, cujos valores são apresentados no Quadro 3.

Deve referir-se que no modelo numérico desenvolvido para interpretar os resultados do ensaio de vibração forçada para a situação de albufeira à cota 234,0 m, o valor da rigidez normal adotado para as juntas de contração (50 GPa/m) foi superior ao valor admitido no modelo usado para interpretar os resultados do ensaio de vibração forçada para a situação de albufeira à cota 195,5 m (25 GPa/m). Esta diferença é justificada pelo facto das juntas de contração se encontrarem mais fechadas para a situação de albufeira cheia. No modelo numérico usado no presente estudo foi adotado o

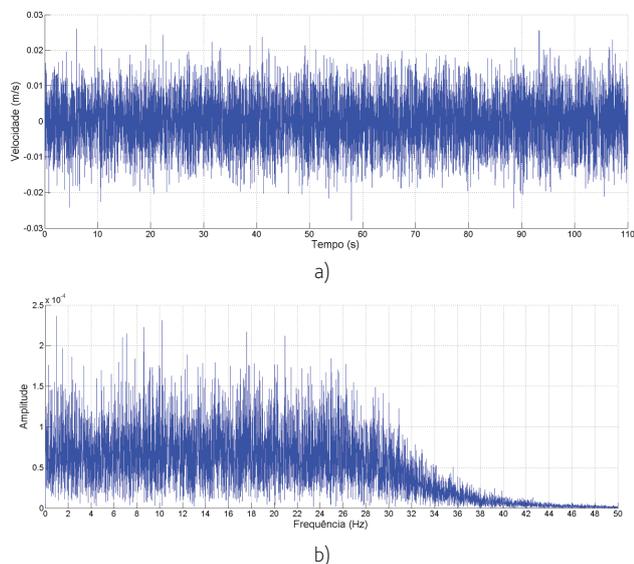
valor de 50 GPa/m para a rigidez normal das juntas de contração da barragem para todas as cotas da albufera.

O amortecimento da barragem foi representado somente pela componente proporcional à massa do amortecimento de Rayleigh, com um valor de 1,0% para a frequência de 2,56 Hz e 1,1% para a frequência de 2,95 Hz (frequências do segundo modo de vibração correspondente à amplitude máxima), para os modelos de albufera vazia e cheia, respetivamente. A hipótese de amortecimento proporcional à massa conduz, em regime elástico, a um amortecimento estrutural inversamente proporcional à frequência de cada modo. A consideração da componente proporcional à rigidez do amortecimento de Rayleigh, que permitiria dissipar a energia nas altas frequências, não é viável para uma malha desta dimensão, pois implicaria um aumento excessivo dos tempos de cálculo [11]. Trata-se de uma simplificação do lado da segurança, uma vez que se admite menor dissipação de energia nos modos mais elevados, os quais contribuem menos para a resposta estrutural.

#### 4.5 Procedimento de cálculo

Devido ao facto de não ser possível determinar diretamente as frequências próprias com este modelo, foi aplicada na fundação uma história de velocidades correspondentes a um ruído branco com conteúdos em frequência entre 0 e 30 Hz (Figura 10).

Foi considerada uma série temporal com cerca de 110 s, registando a resposta da barragem em pontos representativos do seu comportamento. A partir destas séries temporais foram aplicadas metodologias de identificação modal que permitiram a determinação das frequências próprias e das configurações modais. Os pontos foram escolhidos por forma a caracterizar com grande fiabilidade o comportamento dinâmico global da barragem, desprezando nesta interpretação as configurações modais mais localizadas.



**Figura 10** Características do ruído branco aplicado na fundação do modelo numérico: a) série temporal, b) conteúdo em frequência do sinal (FFT)

## 5 Resultados da exploração do modelo numérico

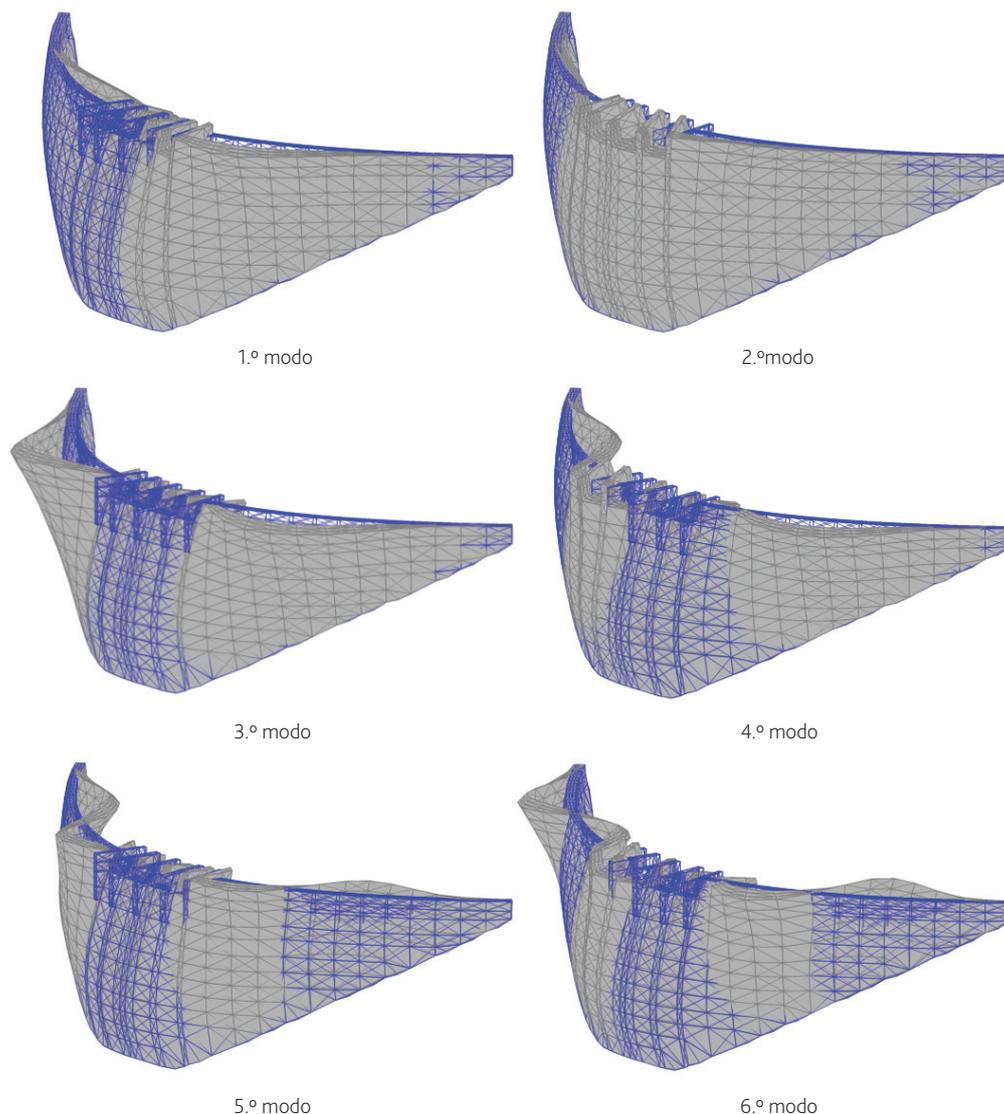
No Quadro 4, apresentam-se as frequências próprias determinadas experimentalmente a partir dos resultados dos ensaios de vibração forçada, as frequências próprias calculadas com os modelos numéricos e as diferenças entre as duas metodologias. A verificação da correspondência entre os modos experimentais e os numéricos pode ser efetuada, numa primeira fase, através da comparação visual das configurações modais, o que permite obter, de forma direta, uma ideia qualitativa da correlação entre as formas dos modos de vibração. No entanto, as configurações modais são, em geral, bastante complexas, pelo que é aconselhável o uso da matriz de coeficientes  $MAC_{ij}$  (Modal Assurance Criterion) [12] que permite avaliar quantitativamente o grau de correlação entre os modos de vibração  $i$ , calculados numericamente, e os modos de vibração  $j$ , identificados experimentalmente. O valor do MAC varia entre 0, não existe correspondência, e 1, correspondência total. No entanto, considera-se que para valores acima de 0,75 as configurações modais numéricas e experimentais são idênticas.

Na Figura 11 apresentam-se as configurações modais para a albufera à cota 234,0 m (as configurações são semelhantes para as duas situações de cota de albufera). Verificou-se uma excelente concordância entre os valores experimentais e numéricos, com uma diferença máxima de 1,33%, podendo concluir-se que os modelos numéricos desenvolvidos reproduzem as condições da obra na altura em que foram executados os ensaios. Com base no modelo numérico calibrado para a cota 234,0 m, foram efetuados cálculos para cotas mais baixas.

Por forma a comparar os resultados da monitorização contínua com os obtidos pelos modelos numéricos, foram realizadas discretizações para diferentes cotas da albufera. A incorporação da discretização da albufera no modelo numérico origina algumas dificuldades, principalmente na interação da água com o paramento de montante da barragem. Esta interação é sensível à variação da dimensão dos elementos em contacto, pelo que deve existir um cuidado especial na escolha das cotas de albufera a considerar no modelo numérico. Foram admitidas as cotas de albufera correspondentes à discretização dos elementos da barragem, por forma a garantir uma boa fiabilidade nos resultados.

No Quadro 5 apresentam-se os valores das frequências próprias determinadas para diferentes cotas da albufera, de acordo com os critérios definidos anteriormente. As propriedades adotadas nos vários modelos correspondem aos valores calibrados para a situação de albufera à cota 234,0 m.

Na Figura 12 apresentam-se os valores das primeiras seis frequências próprias, determinadas para diferentes cotas da albufera, a partir do modelo numérico (NUM), do ensaio de vibração forçada (EVF) e da curva média obtida a partir da monitorização em contínuo (SMC). A curva média SMC foi determinada a partir dos coeficientes da regressão linear múltipla aplicados aos respetivos parâmetros, tendo sido considerado o valor de 14°C para os parâmetros relativos à temperatura, que corresponde à situação do ensaio de vibração forçada para a albufera cheia. Para a cota 234,0 m verifica-se uma excelente concordância entre as 3 metodologias, para praticamente

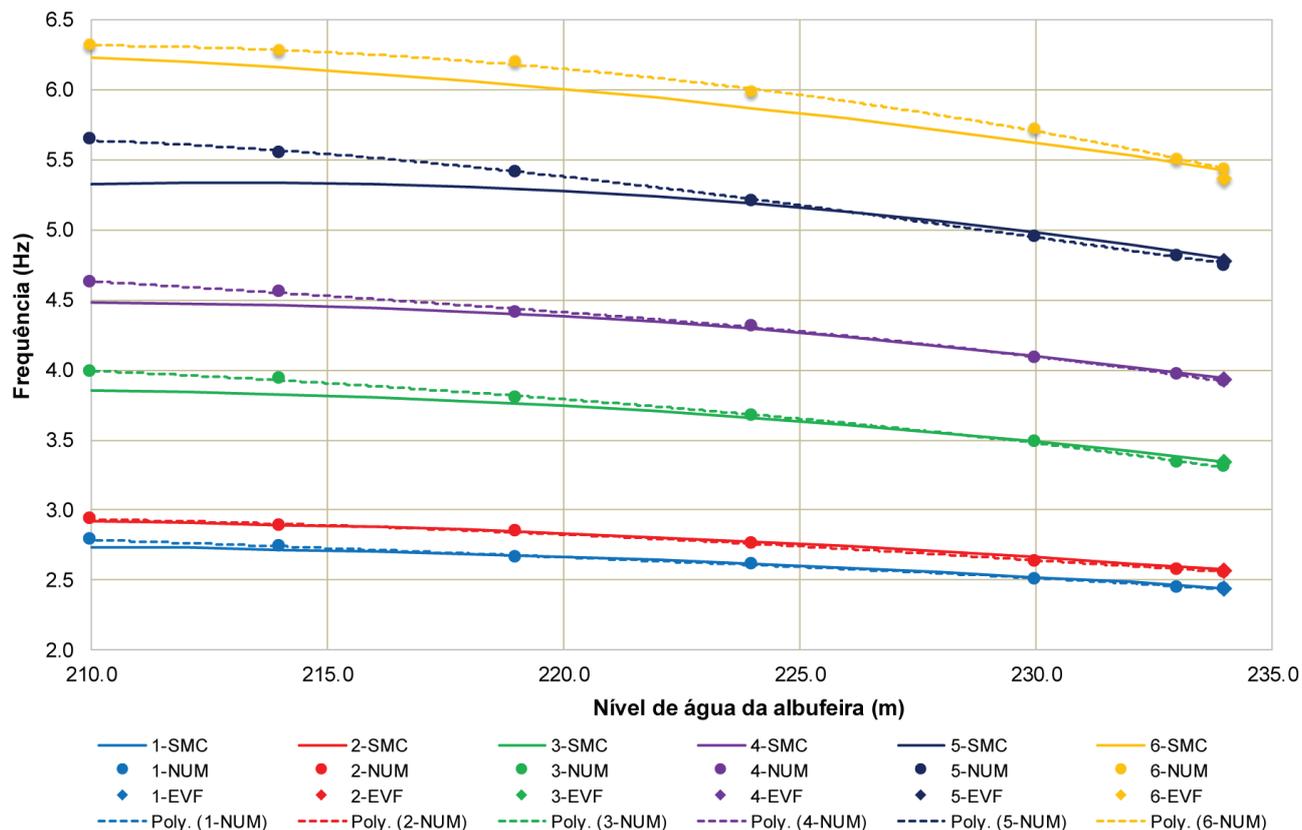


**Figura 11** Configurações modais determinadas com o modelo numérico para a albufeira à cota 234,0 m

todas as frequências, com exceção da última, em que o ensaio de vibração forçada apresenta uma pequena diferença de 1,3%, valor perfeitamente aceitável.

Como foi referido, foram adotadas as mesmas propriedades mecânicas dos materiais e das juntas para todas as cotas da albufeira. O módulo de elasticidade do betão não é afetado pela cota de albufeira, pelo que é plausível que se mantenha constante, no entanto, relativamente à rigidez das juntas de contração, não é possível dizer o mesmo. Para as duas primeiras frequências os resultados apresentam uma excelente concordância para todas as cotas de albufeira. A evolução da terceira e quarta frequência apresentam uma excelente concordância até à cota de albufeira 220 m, abaixo desta os valores numéricos são superiores. Para a quinta frequência existe uma boa concordância até à cota de

albufeira 225 m, abaixo desta os valores numéricos são superiores. Em relação à sexta frequência verifica-se quase sempre que o modelo numérico apresenta valores superiores aos correspondentes ao SMC. Consta-se que, conforme a cota da albufeira diminui, o modelo numérico apresenta resultados superiores aos do SMC, começando este efeito a manifestar-se mais cedo nos modos superiores. Esta situação pode indicar que, para cotas mais baixas, os modelos numéricos têm uma rigidez superior à real, indiciando por isso a necessidade de uma diminuição da rigidez das juntas, devido à redução do estado de tensão nos arcos com a diminuição do nível de albufeira. Por outro lado, os resultados do SMC estão condicionados pelo nível de albufeira durante o período de observação (Figura 3). Observa-se que para níveis de albufeira entre cerca de 227 m e 234 m existem muitos dados, o que torna os resultados mais robustos. No entanto, para cotas entre 210 m e cerca de 227 m só



**Figura 12** Frequências próprias determinadas com o modelo numérico (NUM), obtidas no ensaio de vibração forçada (EVF) e curva média obtida na monitorização em contínuo (SMC), para diferentes cotas de albufeira

existem valores correspondentes ao primeiro enchimento, que foi rápido entre estas cotas, o que originou relativamente poucos dados para cada cota de água. Assim, para estes níveis pode haver alguma incerteza associada à determinação dos valores das frequências, especialmente em relação aos modos superiores, em que por natureza essa incerteza já é maior.

## 6 Conclusões

A avaliação do comportamento dinâmico das estruturas é uma ferramenta importante porque permite detetar, a partir da alteração do comportamento dinâmico da obra, modificações estruturais ocorridas durante esse período. A realização dos ensaios de vibração forçada em barragens de betão para a determinação do comportamento dinâmico continua a ser uma das técnicas mais fiáveis nesta área. Complementando estes resultados, com a instalação de sistemas de monitorização dinâmica em contínuo, origina uma metodologia experimental robusta no acompanhamento do comportamento estrutural.

Para a interpretação dos resultados da monitorização contínua foi utilizado um modelo numérico, com representação do maciço rochoso de fundação, calibrado com os resultados do ensaio de

vibração forçada realizado para a cota 234,0 m [8]. Neste modelo a albufeira é discretizada com elementos finitos, o que permite simular com maior precisão o efeito da interação da água com a barragem e a fundação. Relativamente ao método das massas associadas de Westergaard, muito usado na prática, o modelo adotado permite, por um lado, eliminar a subjetividade da consideração do fator corretivo relativo às massas associadas e, por outro lado, simular melhor o comportamento dinâmico do conjunto da barragem-albufeira-fundação. A partir deste modelo foram realizadas várias discretizações da albufeira, correspondentes a diferentes cotas de água. Devido à dificuldade em estabelecer padrões de variação das propriedades mecânicas dos materiais e das juntas, foram adotados sempre os mesmos valores para todas as cotas da albufeira. Os valores das frequências próprias determinados numericamente e experimentalmente apresentam, em geral, uma boa concordância. Para algumas cotas de albufeira intermédias o modelo numérico apresenta valores de frequências próprias mais elevados que os valores observados. Esta situação pode dever-se ao efeito das juntas de contração, que para cotas inferiores da albufeira se encontram mais abertas e, conseqüentemente, apresentam uma rigidez inferior, e à incerteza associada na determinação das frequências correspondentes ao SMC devido à existência de poucos dados para cotas de albufeira mais baixas.

O modelo numérico poderá ser posteriormente utilizado na determinação da resposta da estrutura para outras ações dinâmicas, designadamente para ações sísmicas. No entanto, como a intensidade da força aplicada durante o ensaio de vibração forçada não provoca comportamentos não lineares na estrutura, quando o modelo matemático calibrado durante o ensaio for utilizado na avaliação da resposta da estrutura a ações que provoquem níveis de tensão elevados, os seus parâmetros estruturais deverão ser convenientemente adaptados.

## Agradecimentos

Agradece-se à Movhera/ENGIE a autorização concedida para a apresentação de alguns resultados relativos ao estudo e acompanhamento do comportamento dinâmico da barragem do Baixo Sabor.

Este trabalho foi parcialmente financiado pelo projeto UIDB/04708/2020 da Unidade de Investigação CONSTRUCT – Instituto de I&D em Estruturas e Construções – financiada por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC)

## Referências

- [1] Magalhães, F., et al. – *DynaMo – Software for vibration based structural health monitoring. in Bridge Maintenance, Safety, Management, Resilience and Sustainability* – Proceedings of the Sixth International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management. 2012.
- [2] ITASCA, 2016 – *3DEC. 3-Dimensional Distinct Element Code. Version 5.2. User's Manual*, Itasca Consulting Group, Minneapolis, USA, 2016.
- [3] Westergaard, H.M. – *Water pressures on dams during earthquakes*. Trans. ASCE, vol. 98, paper nº 1835, 1933.
- [4] Priscu, R.; Popovici, A.; Stematiu, D.; Stere, C. – *Earthquake engineering for large dams*. John Wiley & Sons, 1985.
- [5] Chinese National committee for Large Dams (CHINCOLD) – *Seismic safety of dams in China*. 2014.
- [6] Marti, J.; Cundall, P. – *Mixed discretization procedure for accurate modelling of plastic collapse*. Int. Journal Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, vol. 6, pp. 129-139, 1982.
- [7] Gomes, J.P.; Lemos, J.V. – *Estudo do comportamento dinâmico da barragem do Baixo Sabor utilizando ensaios de vibração forçada*. 11º Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica, Lisboa, 2019.
- [8] Gomes, J.P.; Lemos, J.V. – *Characterization of the dynamic behaviour of a concrete arch dam by means of forced vibration tests and numerical models*. Earthquake Engineering & Structural Dynamics. Volume 49, Issue 7, pág. 679-694, junho, 2020. (<https://doi.org/10.1002/eqe.3259>).
- [9] Gomes, J.P.; Lemos, J.V. – *Avaliação do comportamento dinâmico da barragem de Foz Tua com base em métodos experimentais e numéricos*. Congresso Nacional Reabilitar e& Betão Estrutural 2020, Lisboa.
- [10] LNEC – *Barragem de montante do aproveitamento hidroelétrico do Baixo Sabor - Instalação de células de fluência e ensaios nas primeiras idades*. Relatório 311/2014 – DBB/NO.
- [11] Lemos, J.V. – *Block modelling of rock masses. Concepts and application to dam foundations*, European Journal of Environmental and Civil Engineering, Vol. 12, No. 7-8, pp.915-949, 2008. (doi: 10.1080/19648189.2008.9693054).
- [12] ALLEMANG, Randall J. – *The Modal Assurance Criterion – Twenty years of use and abuse*. Sound and Vibration, pp. 14-21, August 2003.