

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DA BARRAGEM DO BAIXO SABOR UTILIZANDO ENSAIOS DE VIBRAÇÃO FORÇADA

DYNAMIC BEHAVIOR STUDY OF THE BAIXO SABOR DAM BASED ON FORCED VIBRATION TESTS

Jorge Pereira Gomes, José Vieira de Lemos

Investigadores Auxiliar e Coordenador do Laboratório Nacional de Engenharia Civil

SUMÁRIO

A determinação da resposta dinâmica das obras e o acompanhamento da evolução do seu comportamento durante as várias fases da vida é muito importante, estando inserido nas atividades do controle de segurança estrutural. A realização de ensaios de vibração forçada em barragens de betão para a determinação do comportamento dinâmico continua a ser uma das técnicas mais fiáveis nesta área. Nesta comunicação descreve-se a metodologia de ensaio, e apresentam-se os resultados relativos a um caso de estudo, referente à caracterização do comportamento dinâmico da barragem do Baixo Sabor. Foi desenvolvido um modelo numérico, com representação do sistema barragem-albufeira-fundação, para apoio na preparação do ensaio e interpretação dos resultados experimentais.

Palavras-chave: Barragens de betão, comportamento dinâmico, ensaios de vibração forçada, modelo numérico.

ABSTRACT

The determination of the structural dynamic behaviour and their evolution during the different stages of their life is an important component of the activities of structural safety control. The forced vibration tests performed on dams for characterizing their dynamic behaviour remains one of the most reliable techniques in this area. In this paper the testing methodology is presented. The experimental results of a forced vibration test performed at Baixo Sabor dam are presented, including the mathematical model developed, with the representation of the system dam-reservoir-foundation, for their interpretation.

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. Por outro lado, na preparação dos ensaios e na interpretação dos seus resultados tem-se recorrido à modelação numérica, o que tem permitido melhorar a representação do comportamento das estruturas e a validação dos próprios modelos.

2. CARACTERÍSTICAS DOS ENSAIOS DE VIBRAÇÃO FORÇADA

2.1. Generalidades

O ensaio de vibração forçada consiste na aplicação a uma estrutura de uma força com uma variação no tempo sinusoidal perfeitamente conhecida. Esta ação vai provocar nas estruturas, em regra, um movimento vibratório forçado com a mesma frequência de variação no tempo da força aplicada (embora desfasada) e com amplitudes que, para além da intensidade da força, dependem da sua frequência de aplicação e das frequências naturais da estrutura. Um dos grandes problemas na identificação da resposta dinâmica das estruturas está relacionado com o nível dos valores medidos para que seja possível, isolar dos registos, a componente relativa à resposta dinâmica da estrutura. O ensaio de vibração forçada tem uma grande vantagem relativamente a outras técnicas, porque ao aplicar uma excitação à estrutura, por um lado, aumenta os valores medidos relativamente à resposta dinâmica (garantindo uma maior fiabilidade dos resultados) e por outro lado, consegue sobrepor-se a outras fontes de ruído “obrigando” a estrutura a responder unicamente para a excitação imposta. As frequências naturais estão associadas a movimentos vibratórios das estruturas bem definidos, pelo que uma boa caracterização do movimento das estruturas durante a realização de um ensaio de vibração forçada, através de uma adequada disposição de aparelhos de medida, conjugada com a utilização de um modelo matemático, poderá

permitir a localização das zonas da estrutura onde se verifiquem os processos de deterioração dos materiais.

O acompanhamento deste tipo de ensaio, através de um modelo matemático de análise do comportamento estrutural da barragem, auxilia a interpretação do ensaio e permite a validação do próprio modelo matemático (em particular, a identificação dos diferentes parâmetros estruturais). Este modelo matemático poderá ser posteriormente utilizado na determinação da resposta da estrutura para outras ações dinâmicas, designadamente, para ações sísmicas. No entanto, com a intensidade da força aplicada durante o ensaio de vibração forçada não pode provocar danos 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.

2.2. Varrimento contínuo em frequência

Recentemente foi aplicada esta metodologia de varrimento contínuo em frequência em substituição da tradicional de varrimento discreto de frequência com resultados excelentes. O varrimento discreto de frequência, apesar de extremamente eficiente, é um pouco demorada devido ao facto de ser necessário efetuar uma discretização em frequência no intervalo considerado fundamental, que pode ser de duas dezenas de hertz, por forma a obter uma boa caracterização do comportamento dinâmico da estrutura. Devido essencialmente a este fator, foi desenvolvida uma metodologia baseada na aplicação da ação através de um varrimento contínuo em frequência (*sine sweep*). Esta metodologia baseia-se em aplicar à estrutura uma ação dinâmica sinusoidal variando a frequência continuamente entre dois valores previamente definidos (frequência inicial e final, Figura 1). A validação destes procedimentos foi efetuada através da comparação de resultados obtidos pelas duas metodologias. Um fator extremamente importante e condicionador dos resultados será a velocidade de variação da frequência imposta à estrutura durante o ensaio. O ensaio deve ser lento para que toda a estrutura responda na mesma frequência. A determinação da resposta dinâ-

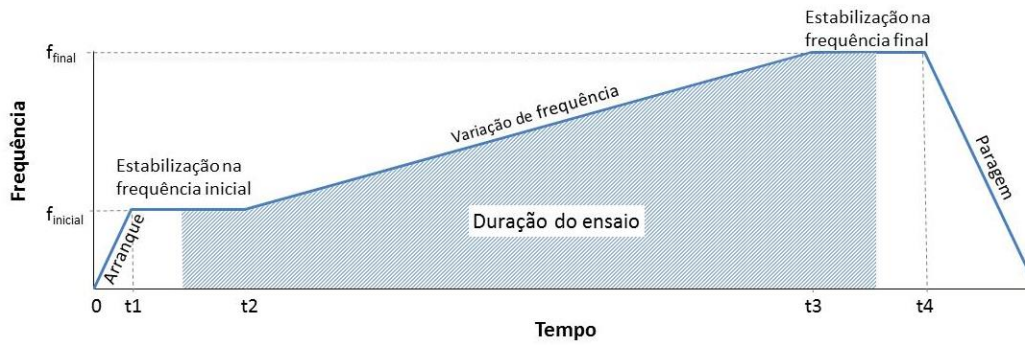


Fig. 1 - Metodologia do ensaio de vibração forçada por varrimento contínuo de frequência (sine sweep).

mica da estrutura é efetuada através do cálculo da FRF (*Frequency Response Function*), entre as séries registadas nos sensores instalados ao longo do corpo da barragem e o registo da força gerada pelo vibrador e aplicada na estrutura. As frequências próprias da estrutura situar-se-ão na proximidade dos valores máximos da FRF ocorridos no intervalo de frequência que a estrutura foi excitada que correspondam a modos de vibração da barragem. Da mesma forma que para a metodologia anterior, são determinados os valores modais caracterizadores do comportamento dinâmico da estrutura a partir dos valores discretos da resposta obtidos experimentalmente.

2.3. Identificação dos parâmetros modais

A partir dos valores das funções resposta em frequência (FRF) determinados, é necessário calcular os parâmetros modais relativos ao comportamento dinâmico da estrutura. Embora possa ser perceptível, por simples visualização detetar aproximadamente as frequências próprias da estrutura que correspondem à vizinhança dos valores máximos da FRF, é necessário proceder ao seu cálculo uma vez que esta função foi obtida de uma forma discreta. Considerando um sistema linear invariante no tempo, admitindo a hipótese do amortecimento modal ser do tipo proporcional viscoso, em função das componentes de vibração não amortecidas, a FRF pode ser representada da seguinte forma:

$$H_{ij}(w) = \sum_{k=1}^N \frac{(\phi_i)_k (\phi_j)_k}{(w_k^2 - w^2) + i(2\xi_k w_k w)} \quad (1)$$

em que $H_{ij}(w)$ representa a relação no domínio da frequência w entre a resposta em

deslocamento do sistema no grau de liberdade i e a força aplicada no grau de liberdade j , determinada para os N modos de vibração caracterizados pelas frequências próprias w_k e os respetivos amortecimentos modais ξ_k . As técnicas utilizadas na determinação dos parâmetros modais para N graus de liberdade (MDOF, *Multiple Degree of Freedom*) baseiam-se normalmente na minimização de um erro quadrático através dos mínimos quadrados. A consideração de MDOF implica a consideração da expressão completa da FRF originando que a determinação dos parâmetros modais implica a resolução de um sistema de equações não-lineares, efetuadas através de um processo iterativo, ou em apenas uma etapa, quando se proceda à linearização dessas equações.

3. CASO DE ESTUDO

3.1. Descrição da barragem do Baixo Sabor

A barragem do Baixo Sabor, projetada pelo corpo técnico da EDP Produção, integra o integral do escalão de montante do aproveitamento hidroelétrico do Baixo Sabor (AHBS), que 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 2).

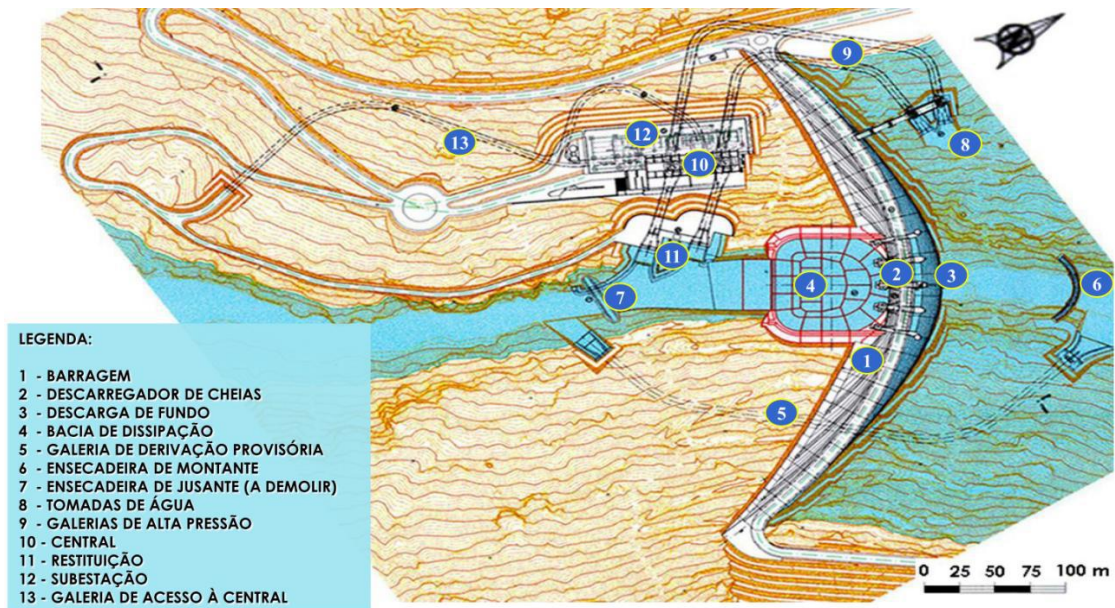


Fig. 2 - Planta geral das obras do escalão de montante do AHBS

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 3). O coroamento, à cota 236,00 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 hm³ para o nível de pleno armazenamento (NPA), à cota 234,00 m, correspondendo a uma área inunda-

da de cerca de 2819 ha.

3.2. Descrição dos ensaios realizados

De acordo com o plano de observação da barragem do Baixo Sabor ([1]), com vista à caracterização do seu comportamento dinâmico, realizou-se, em maio de 2016, um ensaio de vibração forçada para a situação de albufeira cheia, a que correspondeu o nível médio de albufeira à cota 234,0 m (NPA). Foi utilizado um vibrador de massa excêntrica de um só braço para impor forças horizontais harmónicas com diferentes amplitudes e frequências (Figura 4a)), desenvolvido no LNEC ([2], [3]), em que a frequência de rotação pode variar numa gama de 1 a 30 Hz, dependendo da configuração de massas utilizada, aplicando



Fig. 3 - Vista de jusante da barragem do Baixo Sabor e corte vertical pela consola central

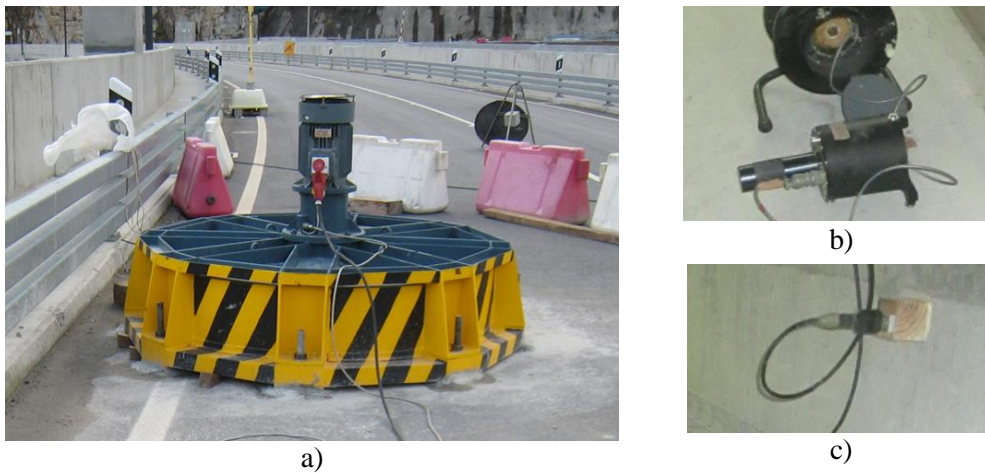


Fig. 4 - Pormenor de colocação do: a) vibrador de massa excêntrica, b) transdutor de velocidade e c) acelerómetro.

forças harmónicas cuja amplitude máxima admissível, condicionada pela resistência da estrutura do vibrador, é de cerca de 160 kN. A resposta dinâmica da estrutura para as várias frequências de excitação impostas foi medida por intermédio de transdutores de velocidade (Kinematics, modelo SS-1, Figura 4b) e acelerómetros (PCB modelo 481, Figura 4c) colocados em vários pontos da estrutura (Figura 5). O ensaio foi realizado por varrimento discreto e contínuo, em que se aplicaram frequências de excitação entre 1,5 e 9,6 Hz. O ensaio por varrimento discreto de frequência foi realizado com um passo de aproximadamente 0,1 Hz. Para garantir uma melhor excitação da barragem, e consequentemente resultados mais fiáveis, foram usadas várias configurações de massa colocadas no vibrador, utilizando-se massas grandes para frequências de excitação mais baixas e massas pequenas que permitem aplicar frequências mais elevadas.

3.3. Resultados experimentais

Com base nas funções de resposta determinadas a partir dos resultados experimentais,

em que se verificou uma concordância excelente entre as duas metodologias, foram determinados os parâmetros modais da barragem, nomeadamente as frequências próprias, as configurações modais e o amortecimento modal. Os parâmetros modais estimados com base numa metodologia MDOF, são apresentados na Tabela 1.

3.4. Modelo matemático

3.4.1. Generalidades

Para interpretar os resultados dos ensaios realizados foi desenvolvido e utilizado, com o programa 3DEC [4], um modelo numérico de elementos finitos com representação da barragem, albufeira e fundação elástica [5].

Em cálculos dinâmicos com o programa 3DEC, a interação barragem-albufeira tem sido habitualmente representada pela técnica das massas associadas de Westergaard, aplicadas no paramento de montante da abóbada. Em alternativa, a representação direta da albufeira implica a inclusão no modelo de uma malha de elementos finitos

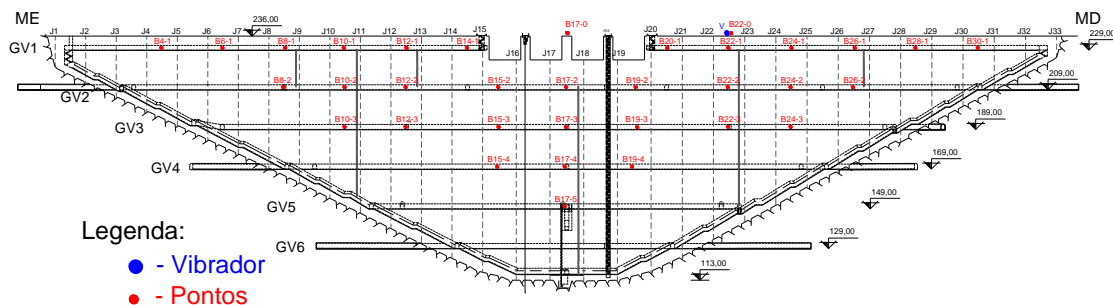


Fig. 5 - Plano de colocação da aparelhagem utilizada durante o ensaio de vibração forçada

Tabela 1 - Parâmetros modais determinados experimentalmente

Modo	Freq. (Hz)	Amortecimento modal (%)	Configuração modal
1	2,44	1,23	≈ Simétrico
2	2,57	1,02	≈ Anti-simétrico
3	3,34	1,18	≈ Simétrico
4	3,93	0,40	≈ Anti-simétrico
5	4,78	1,20	≈ Simétrico
6	5,37	1,15	≈ Anti-simétrico
7	5,75	1,91	≈ Anti-simétrico
8	6,06	0,55	≈ Anti-simétrico
9	6,50	0,61	≈ Simétrico
10	6,76	1,16	≈ Simétrico
11	7,61	1,33	≈ Anti-simétrico
12	8,29	1,88	≈ Simétrico

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 1º grau, utilizados na representação do maciço rochoso, ou então em elementos finitos de 20 nós, na malha 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 volúmica num elemento pela média das deformações volúmicas num conjunto de elementos adjacentes, que assim se admite terem a mesma deformação volúmica e, conseqüentemente, a mesma pressão. No 3DEC existem dois tipos de *mixed discretization*, uma com base em macro-elementos paralelepípedicos, e uma outra que pode ser aplicada para uma malha arbitrária de tetraedros. No presente estudo 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. Nesta formulação, para se obter um paralelepípedo de resposta simétrica, são sobrepostas duas

discretizações (*layers*) de 5 tetraedros cada, sendo feita a média da sua rigidez e tensões. A técnica de discretização mista é aplicada separadamente a cada um dos *layers*, consistindo em tomar uma deformação volúmica 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 Westgaard, 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 (LNEC; 2008c).

No presente tipo de modelo, a interface barragem-albufeira é representada por uma junta elástica, com uma rigidez tangencial nula, de modo a apenas aplicar tensões normais no paramento. De igual modo, foi introduzida uma interface do mesmo tipo na base da albufeira, sendo adotada a hipótese que o maciço sob a albufeira se mantém fixo. 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.

3.4.2. *Descrição do modelo*

Para interpretar os resultados dos ensaios realizados foi desenvolvido e utilizado, com o programa 3DEC [4], um modelo numérico de elementos finitos com representação da barragem, albufeira e fundação elástica [5]. Na modelação da barragem foram consideradas as juntas de contração originando 32 blocos, que interagem entre si nas zonas de interface (Figura 6). Foram também considerados os pilares do descarregador de superfície, bem com a estrutura saliente de jusante. Os blocos da barragem foram discretizados em 1236 elementos tridimensionais, do tipo cubo, isoparamétricos do 2º 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.

No presente tipo de modelo, a interface barragem-albufeira é representada por uma junta elástica, com uma rigidez tangencial nula, de modo a apenas aplicar tensões normais no paramento. De igual modo, foi

introduzida uma interface do mesmo tipo na base da albufeira, sendo adotada a hipótese que o maciço sob a albufeira se mantém fixo. 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.

O modelo numérico foi calibrado com os resultados experimentais, tendo sido efetuado em duas fases: primeiro relativamente às propriedades mecânicas (Tabelas 2 e 3), para ajustar as frequências próprias, e posteriormente em relação ao amortecimento modal, para ajustar as amplitudes das funções de resposta em frequência.

O amortecimento da barragem foi representado somente pela componente proporcional à massa do amortecimento de Rayleigh,

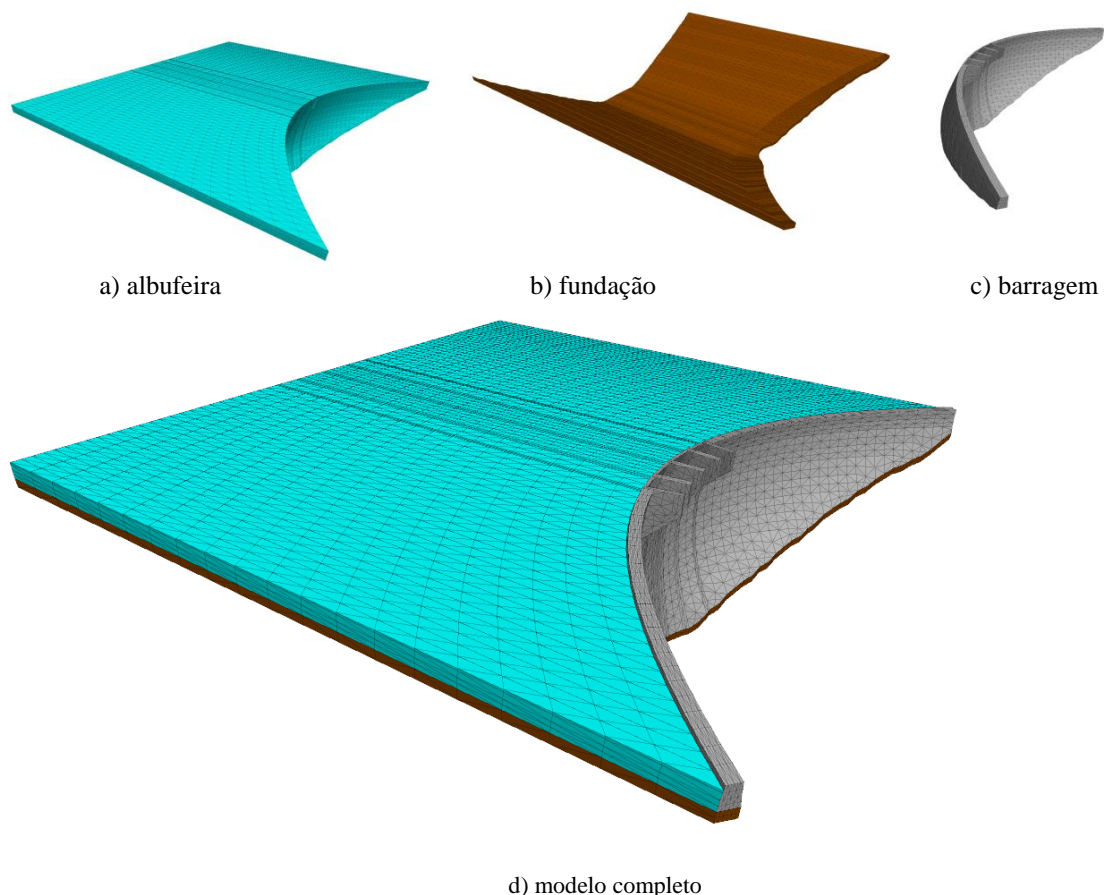


Fig. 6 - Vista de jusante do modelo numérico do conjunto barragem-fundação-albufeira do Baixo Sabor

Tabela 2 - Propriedades mecânicas adotadas no material do modelo numérico

Material	Módulo de elasticidade dinâmico	Módulo de compressibilidade volumétrica	Módulo de distorção	Coefficiente de Poisson	Massa volúmica
Betão da barragem	36,0 GPa	20,0 GPa	15,0 GPa	0,20	2400 kg/m ³
Comportas	7,0 GPa	3,9 GPa	2,9 GPa	0,20	240 kg/m ³
Albufeira	0,0	2,0 GPa	0,0	0,50	1000 kg/m ³

Tabela 3 - Propriedades mecânicas adotadas nas juntas do modelo numérico

Juntas		Rigidez normal	Rigidez tangencial
Material 1	Material 2		
Betão	Betão	50,0 GPa/m	20,8 GPa/m
Betão	Comportas	10,0 GPa/m	4,2 GPa/m
Betão	Fundação	12,5 GPa/m	5,2 GPa/m
Betão	Albufeira	2,0 GPa/m	0,0
Fundação	Albufeira	2,0 GPa/m	0,0

com um valor de 1,0% para 2,58 Hz (frequência do segundo modo de vibração correspondente à amplitude máxima). 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 [5]. Trata-se de uma simplificação em que se admite menor dissipação de energia nos modos mais elevados, os quais, contudo contribuem menos para a resposta estrutural.

3.5. Comparação dos resultados experimentais e numéricos

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*) [6] que permite avaliar quantitativamente o grau de correlação entre o modos de vibração i ,

calculados numericamente, e os modos de vibração j , identificados experimentalmente. O cálculo da matriz MAC_{ij} é efetuado através da seguinte expressão:

$$MAC_{ij} = \frac{(\phi_i^{num} \times \phi_j^{num})^2}{(\phi_i^{num} \times \phi_i^{num})(\phi_j^{exp} \times \phi_j^{exp})}; \quad (1)$$

$$i=1,2,\dots,n^{num}; j=1,2,\dots,n^{exp}$$

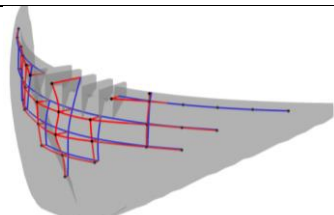
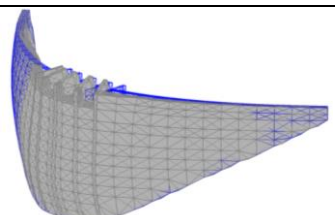
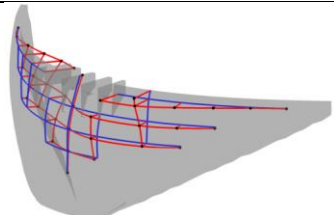
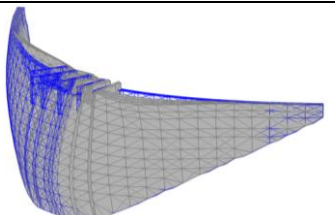
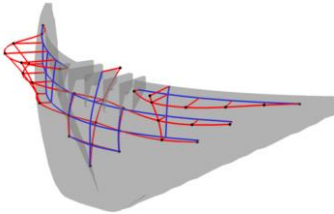
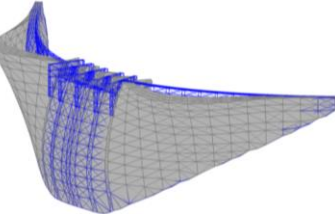
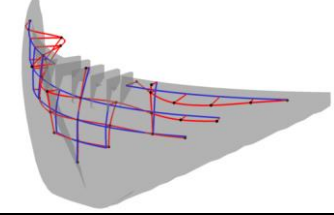
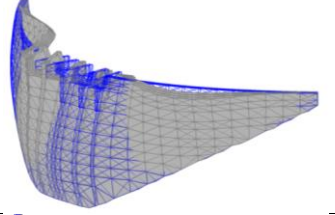
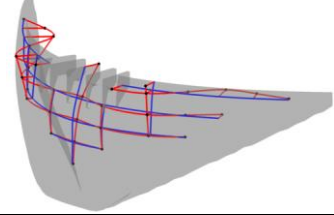
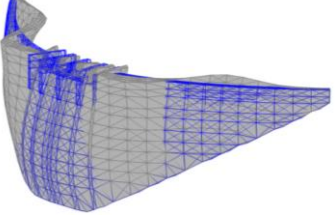
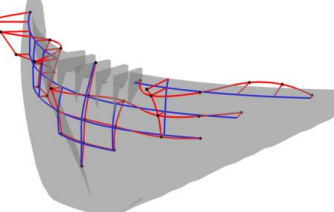
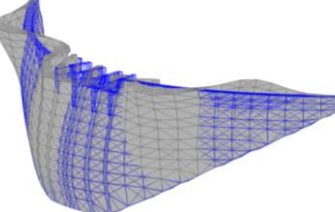
em que ϕ_i^{num} e ϕ_j^{exp} são os vetores de componentes modais identificados numérica e experimentalmente para os n^{num} e n^{exp} modos respetivamente. Os coeficientes da matriz assumem valores entre 0 e 1. Para valores próximos da unidade a correspondência entre modos é considerada boa, enquanto que para valores nulos os modos são considerados não relacionados. Na Tabela 4 apresenta-se a matriz dos coeficientes. Os valores representados a vermelho correspondem a valores de MAC elevados, que indiciam uma boa correspondência entre os modos determinados experimental e numericamente. Verifica-se uma excelente concordância para os 6 primeiros modos experimentais.

Na Tabela 5 apresenta-se a comparação entre os resultados do ensaio de vibração forçada e os resultados do modelo numérico em termos de frequências próprias e configurações modais. As configurações modais obtidas pelos dois métodos apresentam, na sua generalidade, uma excelente concordância.

Tabela 4 - Matriz MAC relativa às configurações modais determinadas experimental e numericamente

Modo Numérico (Hz)	Modos experimentais (Hz)					
	2,44	2,57	3,34	3,93	4,78	5,37
2,44 Hz	0,96	0,00	0,00	0,01	0,02	0,01
2,58 Hz	0,02	0,98	0,00	0,03	0,01	0,04
3,35 Hz	0,01	0,02	0,96	0,01	0,00	0,02
3,82 Hz	0,02	0,07	0,00	0,92	0,01	0,03
4,59 Hz	0,02	0,00	0,07	0,01	0,92	0,03
5,20 Hz	0,01	0,07	0,01	0,01	0,11	0,91

Tabela 5 - Comparação das frequências próprias e das configurações modais determinadas a partir do ensaio de vibração forçada e do modelo numérico

Ensaio de vibração forçada		Modelo numérico	
Freq. (Hz)	Configuração modal	Freq. (Hz)	Configuração modal
2,44		2,44	
2,57		2,58	
3,34		3,35	
3,93		3,82	
4,78		4,59	
5,37		5,20	

A comparação das funções de resposta em frequência, obtidas a partir dos resultados do ensaio de vibração forçada e do modelo numérico é apresentada para alguns pontos na Figura 7. Para os primeiros modos (2,44 e 2,57 Hz) verifica-se uma excelente concordância em termos de amplitude da resposta em deslocamento, o que confirma a adequação do valor do coeficiente de amortecimento adotado no modelo matemático para esta faixa de frequência ($\xi=1,0\%$). Este valor está de acordo com os resultados de identificação modal determinados a partir do ensaio de vibração forçada, em que se obteve um valor médio de cerca de 1% (Tabela 1). Para as restantes frequências (3,5 a 5,2 Hz), observam-se algumas diferenças nas amplitudes, verificando-se, de uma forma geral, que o modelo numérico prevê valores de deslocamento superiores. Tal como já foi referido anteriormente, ao adotar-se, por razões computacionais, somente a componente do amortecimento de Rayleigh proporcional à massa, a energia de vibração associada às altas frequências é pouco dissipada, originando valores maiores de resposta.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A avaliação periódica 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.

Para a interpretação deste ensaio foi desenvolvido um novo modelo numérico, mais sofisticado, em que se efetuou a discretização da albufeira com elementos finitos, permitindo assim incorporar no modelo o efeito da interação da água com a barragem e a fundação. Esta considerável melhoria permitiu eliminar a subjetividade da consideração do fator corretivo relativo às massas associadas de Westergaard e, por outro lado, simular melhor o comportamento dinâmico da barragem na sua generalidade. A calibração dos resultados obtidos com o modelo numérico com os resultados do ensaio de vibração forçada permitiu concluir que o módulo de elasticidade dinâmico médio do betão da barragem é de cerca de 36 GPa, o que está de acordo com os resultados dos ensaios de caracterização da deformabilidade do betão. Os resultados obtidos nos ensaios de vibração forçada e na modelação numérica, em termos de frequências próprias e configurações modais, apresentam uma excelente concordância.

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 danos 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.

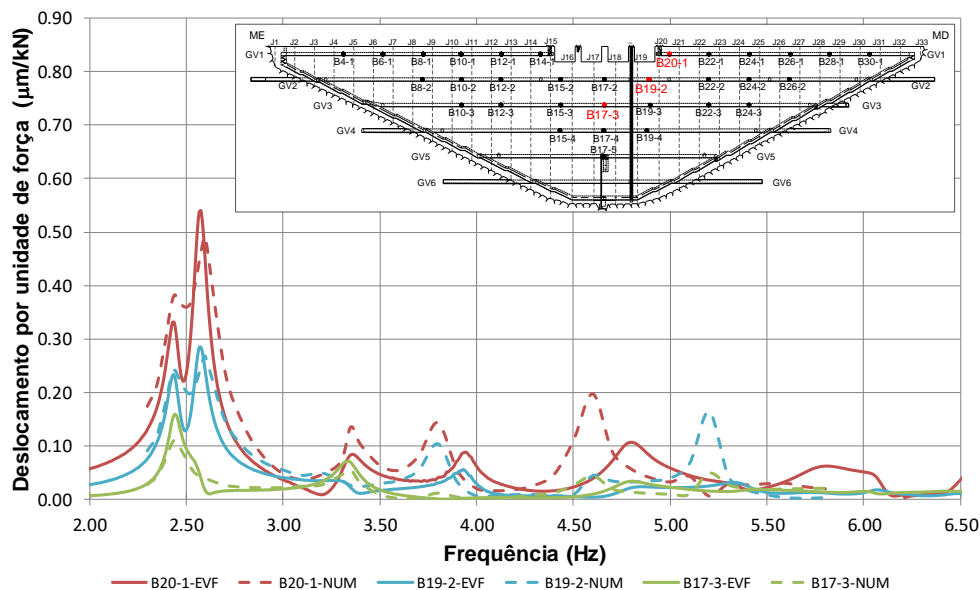


Fig. 7 - Comparação das funções de resposta em frequência obtidas a partir dos resultados do ensaio de vibração forçada (EVF) e do modelo numérico (NUM).

5. AGRADECIMENTOS

Agradece-se à EDP a autorização concedida para a apresentação de alguns resultados do estudo de caracterização dinâmica da barragem do Baixo Sabor.

Este trabalho foi parcialmente financiado pelo Projeto PTDC/ECM-EST/0805/2014|16761 - DAM_AGE - Técnicas Avançadas de Monitorização Dinâmica da Condição Estrutural de Barragens de Betão, financiado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER), através do COMPETE2020 – Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (POCI) e por fundos nacionais através da Fundação para a Ciência e a Tecnologia I.P..

6. REFERÊNCIAS

- [1] EDP – Aproveitamento hidroeléctrico do Baixo Sabor. Plano de Observação. Setembro de 2007
- [2] LNEC - Vibrador mecânico. Projecto, construção e montagem. Relatório, LNEC, 1965.
- [3] LNEC - Sistema electrónico de variação de frequência para um vibrador de ensaios dinâmicos. Relatório130/95, LNEC, 1995.
- [4] Itasca - 3DEC, 3-Dimensional Distinct Element Code, Version 5.2, User's Manual. Itasca Consulting Group. Minneapolis, 2017.
- [5] Lemos, J.V. – “Discrete element analysis of dam foundations”, em Distinct Element Modelling in Geomechanics (eds. Sharma, Saxena & Woods), Balkema, p. 89-115, 1999.
- [6] ALLEMANG, Randall J. – The Modal Assurance Criterion – Twenty years of use and abuse. Sound and Vibration, pp. 14-21, August 2003.