



## **CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE BARRAGENS DE BETÃO UTILIZANDO ENSAIOS DE VIBRAÇÃO FORÇADA**

**Jorge Pereira Gomes**

Investigador Auxiliar  
LNEC  
Lisboa

**José Vieira de Lemos**

Investigador-Coordenador  
LNEC  
Lisboa

### **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, incluindo os desenvolvimentos recentemente efetuados, 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 para apoio na preparação do ensaio e interpretação dos resultados experimentais.

### **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, including recent developments, is presented. The experimental results of a forced vibration test performed at Baixo Sabor dam are presented, including the mathematical model developed for their interpretation.

**PALAVRAS-CHAVE:** Barragens de betão, comportamento dinâmico, ensaios de vibração forçada.

## **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 discreto em frequência

A metodologia desenvolvida no LNEC, e a qual tem vindo a ser constantemente melhorada, com a implementação de meios automáticos de controle e aplicação da força, de medição da resposta e posterior tratamento, baseia-se num varrimento discreto em frequência (normalmente é utilizada uma discretização de 0,1 Hz). A excitação da estrutura é materializada por um vibrador de massa excêntrica, que vai aplicando uma força sinusoidal perfeitamente conhecida em termos de frequência e amplitude. Para cada valor de frequência imposta é medida a resposta da estrutura em pontos representativos do seu comportamento, sendo posteriormente determinado o valor da amplitude máxima e fase para cada frequência imposta. Com estes valores são obtidas as funções de resposta em frequência da estrutura. As frequências próprias da estrutura são assim fáceis de determinar, uma vez que a amplitude da resposta aumenta na sua vizinhança (Figura 1). A determinação dos valores experimentais da resposta da estrutura passa pelo cálculo da amplitude máxima da grandeza física medida (aceleração, velocidade ou deslocamento), para a frequência imposta. Como o ensaio é efetuado por varrimento discreto de frequência vai existir um registo por cada valor de frequência imposta, aplicando técnicas de tratamento digital do sinal para eliminar os conteúdos em frequência indesejados, consegue-se determinar o valor da amplitude da resposta.

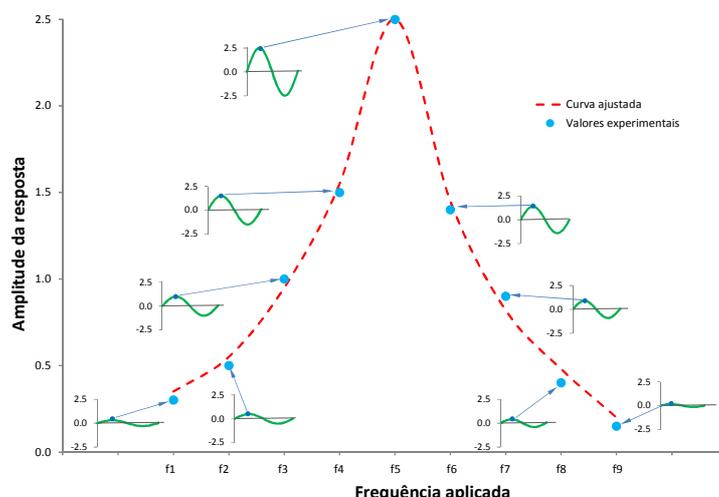


Figura 1: Função resposta em frequência de um ponto da estrutura obtida num ensaio de vibração forçada por varrimento discreto de frequência (uma frequência própria da estrutura estará na vizinhança de f5).

## 2.3. Varrimento contínuo em frequência

A metodologia descrita anteriormente, 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 2). 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 dinâmica 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.

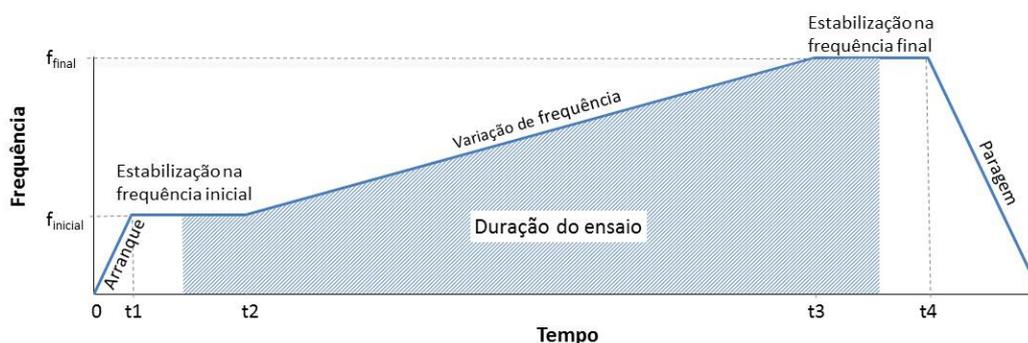


Figura 2: Metodologia do ensaio de vibração forçada por varrimento contínuo de frequência (sine sweep).

## 2.4. 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  $\xi_k$ . 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 integra o 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 [1]. 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 3).

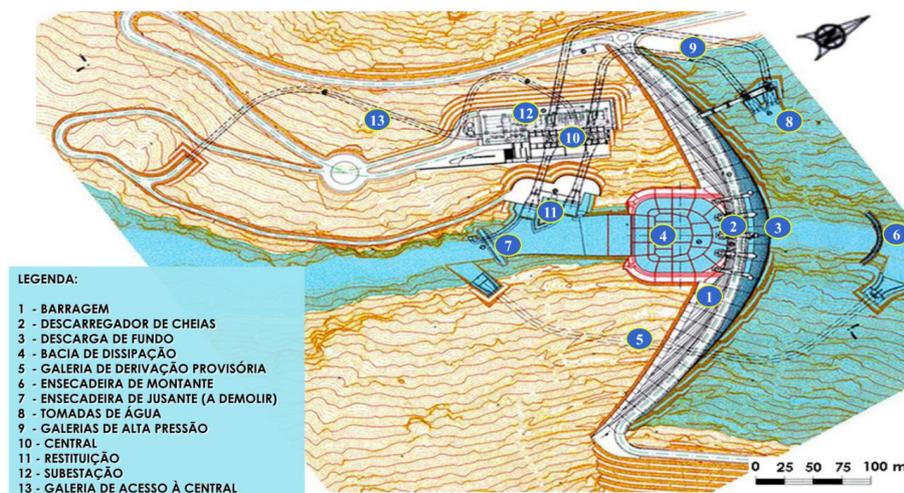


Figura 3: Planta geral das obras do escalão de montante do AHBS

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 4). 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 hm<sup>3</sup> para o nível de pleno armazenamento (NPA), à cota 234,00 m, correspondendo a uma área inundada de cerca de 2819 ha.



Figura 4: Vista de jusante da barragem do Baixo Sabor e corte vertical pela consola central

### 3.2. Descrição dos ensaios realizados

No ensaio de vibração forçada realizado na barragem do Baixo Sabor, em janeiro de 2015, com o nível médio de albufeira à cota 195,5 m, cerca de 38,5 m abaixo do NPA (correspondendo a cerca de 70% da altura de água), utilizou-se um vibrador de massa excêntrica para impor forças horizontais harmónicas com diferentes amplitudes e frequências (Figura 5a). Foi utilizado um vibrador de massa excêntrica de um só braço, 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 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 5b) e acelerómetros (PCB modelo 481, Figura 5c) colocados em vários pontos da estrutura (Figura 6). O ensaio foi realizado por varrimento discreto e contínuo, em que se aplicaram frequências de excitação entre 2,0 e 9,8 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.

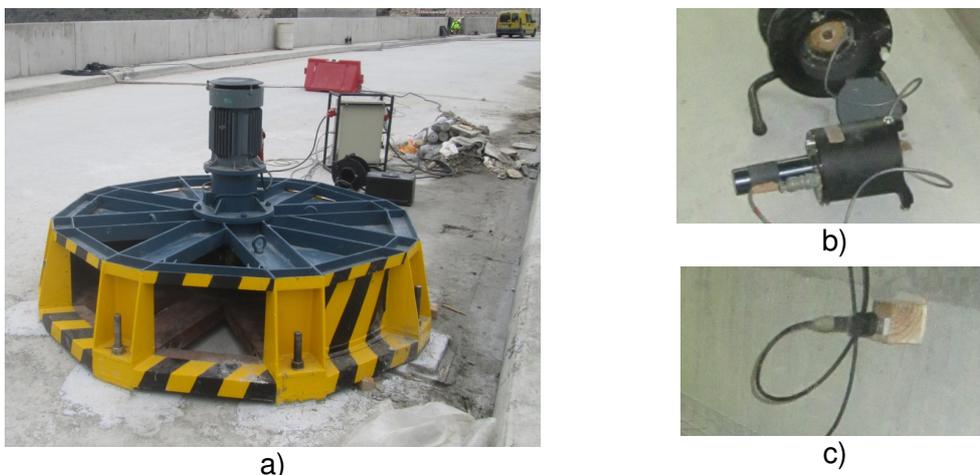


Figura 5: Pormenor de colocação do: a) vibrador de massa excêntrica, b) transdutor de velocidade e c) acelerómetro.

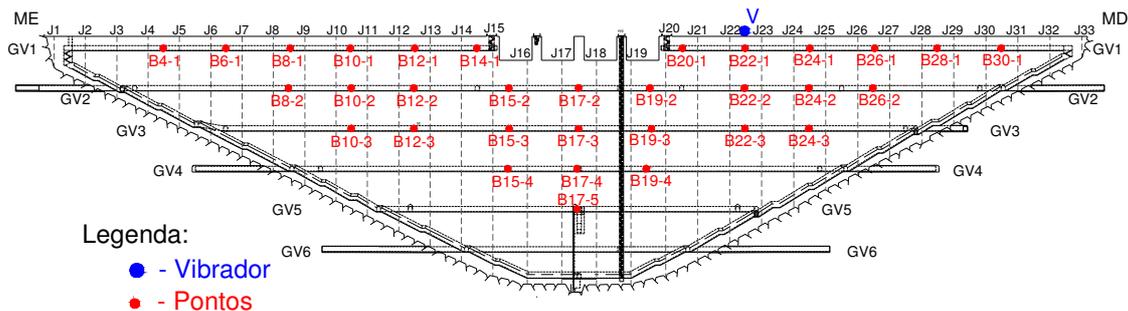


Figura 6: Plano de colocação da aparelhagem utilizada durante o ensaio de vibração forçada

### 3.3. Resultados experimentais

Foram utilizadas duas metodologias de ensaio: varrimento discreto de frequência e varrimento contínuo de frequência. Na Figura 7 é apresentada uma comparação entre as duas metodologias de ensaios em termos das funções de resposta de força para deslocamento de alguns pontos. Verifica-se uma excelente concordância nos resultados das duas metodologias de ensaio, podendo concluir-se que o varrimento contínuo de frequência é uma metodologia fiável e que poderá ser utilizada futuramente.

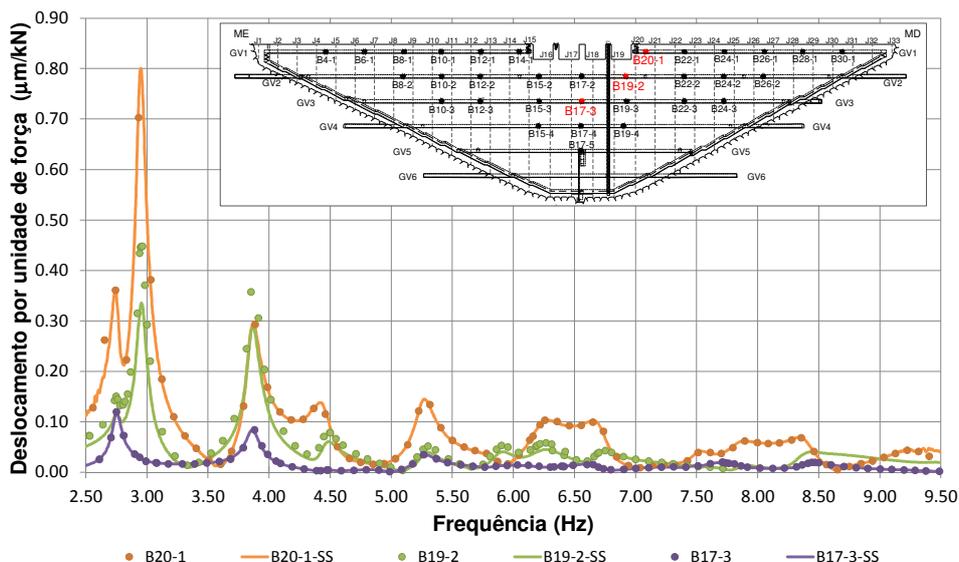


Figura 7: Funções de resposta de força para deslocamento. Comparação entre os ensaios por varrimento discreto e contínuo (*SineSweep SS*) de frequência

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.

Tabela 1 - Parâmetros modais determinados experimentalmente

| Modo | Freq. (Hz) | Amortecimento modal (%) | Configuração modal |
|------|------------|-------------------------|--------------------|
| 1    | 2,75       | 1,0                     | ≈ Simétrico        |
| 2    | 2,95       | 1,0                     | ≈ Anti-simétrico   |
| 3    | 3,87       | 1,1                     | ≈ Simétrico        |
| 4    | 4,46       | 0,6                     | ≈ Anti-simétrico   |
| 5    | 5,26       | 0,6                     | ≈ Simétrico        |
| 6    | 5,88       | 1,0                     | ≈ Anti-simétrico   |
| 7    | 6,22       | 1,4                     | ≈ Anti-simétrico   |
| 8    | 6,69       | 0,6                     | ≈ Simétrico        |
| 9    | 7,81       | 0,9                     | ≈ Anti-simétrico   |
| 10   | 8,42       | 1,8                     | ≈ Anti-simétrico   |

### 3.4. Modelo matemático

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 [5]. 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, bem com a estrutura saliente de jusante. Os blocos da barragem foram discretizados em 1067 elementos tridimensionais, do tipo cubo, isoparamétricos do 2º grau, com 20 pontos nodais, formando uma malha com um total de 14710 pontos nodais.

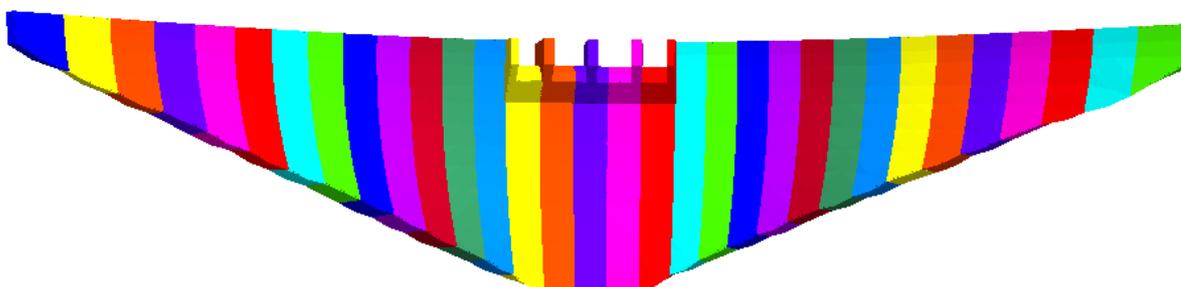


Figura 8: Vista de jusante do modelo numérico da barragem do Baixo Sabor; representação dos blocos limitados pelas juntas de contração.

Dado que a condição de fronteira na superfície de inserção da barragem pouco afeta os modos de vibração e respectivas frequências, considerou-se, para interpretação do ensaio, o encastramento da barragem na zona da inserção. O tempo de cálculo deste modelo é substancialmente menor do que um modelo que englobasse a fundação, e sem qualquer tipo de perda de fiabilidade em termos da exatidão deste tipo de resultados. Tendo em conta que o nível da ação imposta pelo vibrador no decorrer do ensaio é relativamente reduzido, é de esperar uma resposta em regime elástico linear da barragem. No modelo numérico o efeito hidrodinâmico da água da albufeira foi considerado de forma simplificada através da consideração do método das massas associadas de Westergaard [6] nos pontos nodais do modelo situados no paramento de montante, gerando-se forças de inércia devido ao efeito hidrodinâmico somente na direção normal ao paramento. 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 [7][8]. No entanto, devido à pouca altura de água na albufeira, não houve a necessidade de escalar as massas associadas, tendo sido considerada a sua totalidade. O modelo numérico foi calibrado com os resultados experimentais, tendo sido efetuado em duas fases: primeiro relativamente

às propriedades mecânicas (Tabela 2), para ajustar as frequências próprias, e posteriormente em relação ao amortecimento modal, para ajustar as amplitudes das funções de resposta em frequência.

Tabela 2 - Propriedades mecânicas adotadas no modelo numérico

| Material da barragem            |                        | Juntas de contração |            |
|---------------------------------|------------------------|---------------------|------------|
| Módulo de elasticidade dinâmico | 35,0 GPa               | Rigidez normal      | 25,0 GPa/m |
| Coefficiente de Poisson         | 0,20                   | Rigidez tangencial  | 10,0 GPa/m |
| Massa volúmica                  | 2400 kg/m <sup>3</sup> |                     |            |

O amortecimento da barragem foi representado somente pela componente proporcional à massa do amortecimento de Rayleigh, com um valor de 1,1% para 2,95 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*) [9] 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 cálculo da matriz  $MAC_{ij}$  é efetuado através da seguinte expressão:

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

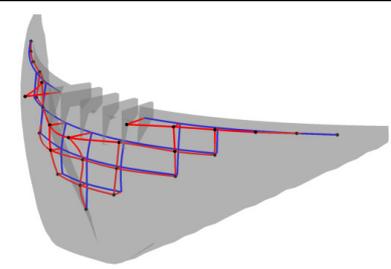
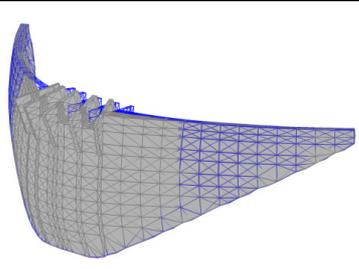
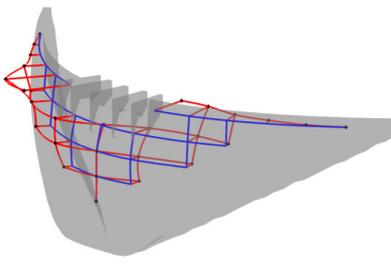
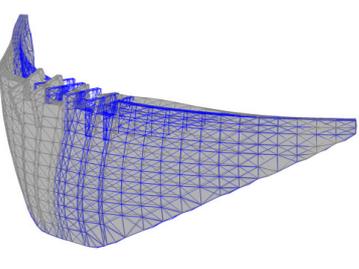
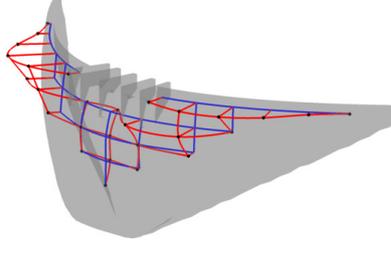
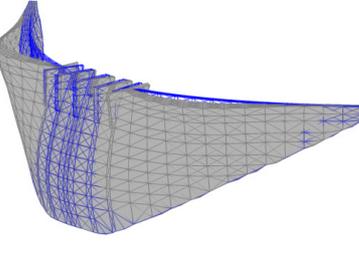
em que  $\phi_i^{num}$  e  $\phi_j^{exp}$  são os vetores de componentes modais identificados numérica e experimentalmente para os  $n^{num}$  e  $n^{exp}$  modos respetivamente. Os coeficientes da matriz assumem valores entre 0 e 1. Para valores próximos da unidade a correspondência entre modos é considerada boa, enquanto que para valores nulos os modos são considerados não relacionados. Na Tabela 3 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. A configuração modal correspondente ao modo numérico 5 ( $f = 5,15$  Hz) não foi detetada experimentalmente. Esta situação deve-se ao facto de não ter sido possível instrumentar a barragem na zona central correspondente a todo o desenvolvimento dos descarregadores. Assim, os modos em que a configuração modal corresponde essencialmente ao movimento da zona central dos descarregadores serão de difícil determinação experimental. Esta situação é confirmada pelos valores mais baixos dos coeficientes da matriz MAC relativos aos modos experimentais 1 e 4 (0,77 e 0,79 respetivamente), uma vez que estas configurações correspondem a movimentos essencialmente da zona central dos descarregadores, como se pode verificar nas figuras apresentadas.

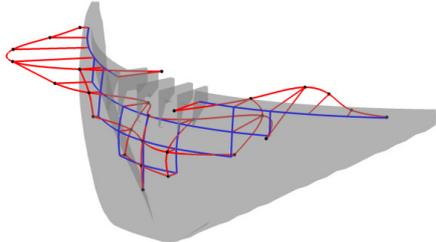
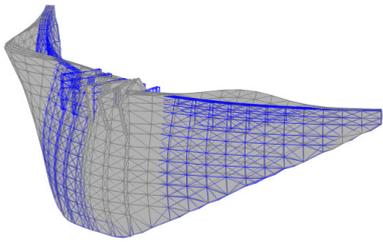
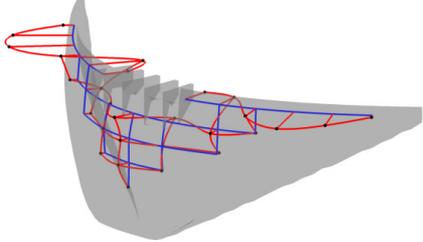
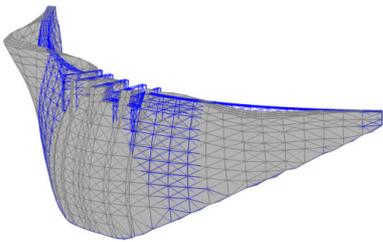
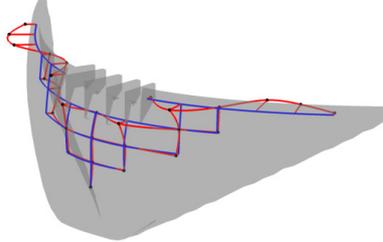
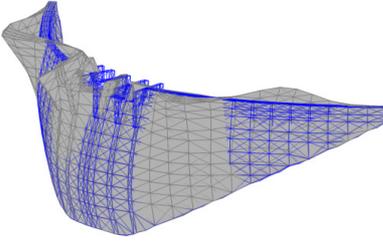
Tabela 3 - Matriz MAC relativa às configurações modais determinadas experimental e numericamente

| Modo Numérico (Hz) | Modos experimentais (Hz) |      |      |      |      |      |
|--------------------|--------------------------|------|------|------|------|------|
|                    | 2,75                     | 2,95 | 3,87 | 4,46 | 5,26 | 5,88 |
| 2,75               | 0,77                     | 0,00 | 0,05 | 0,02 | 0,07 | 0,03 |
| 2,96               | 0,03                     | 0,95 | 0,02 | 0,14 | 0,00 | 0,05 |
| 3,96               | 0,09                     | 0,02 | 0,90 | 0,00 | 0,01 | 0,01 |
| 4,46               | 0,10                     | 0,05 | 0,02 | 0,79 | 0,01 | 0,04 |
| 5,15               | 0,01                     | 0,00 | 0,03 | 0,00 | 0,21 | 0,00 |
| 5,39               | 0,07                     | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,88 | 0,02 |
| 6,07               | 0,06                     | 0,04 | 0,01 | 0,00 | 0,03 | 0,86 |

Na Tabela 4 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 - 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   |
| 2,75                       |  | 2,75            |  |
| 2,95                       |  | 2,96            |  |
| 3,87                       |  | 3,96            |  |

| Ensaio de vibração forçada |  | Modelo numérico |   |
|----------------------------|--|-----------------|---|
| Freq. (Hz)                 | Configuração modal   | Freq. (Hz)      | Configuração modal  |
| 4,46                       |   | 4,46            |   |
| 5,26                       |   | 5,39            |   |
| 5,88                       |  | 6,07            |  |

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 9. Para os primeiros modos (2,75 e 2,95 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 ( $\xi=1,1\%$ ). 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 9,5 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.

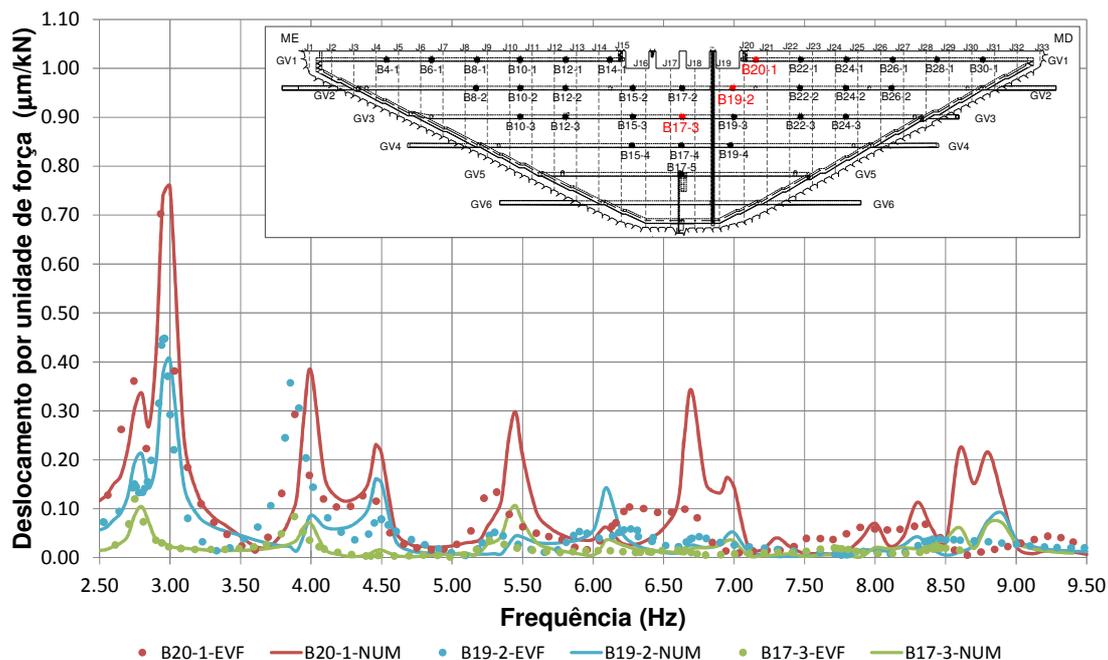


Figura 9: Comparação das funções de resposta em frequência obtidas a partir dos resultados do ensaio de vibração forçada (EVF) e do modelo numérico (NUM).

#### 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.

O ensaio de vibração forçada na barragem do Baixo Sabor foi realizado de acordo com a metodologia corrente, já devidamente consolidada, por varrimento discreto de frequência. Este tipo de metodologia tem o inconveniente de ser demorada, mesmo para uma discretização em frequência de cerca de 0,1 Hz. Devido a estes factos foi desenvolvida e aplicada uma nova metodologia, por varrimento contínuo de frequência. Esta nova metodologia tem a vantagem de reduzir substancialmente a duração do ensaio e de ser possível obter uma discretização em frequência muito mais apertada. No presente caso obteve-se uma discretização em frequência de cerca de 0,0008 Hz. Os resultados experimentais obtidos permitiram validar a nova metodologia, que será utilizada em ensaios futuros.

A calibração dos resultados obtidos com o modelo numérico com os resultados do ensaio de vibração forçada permitiu confirmar que o módulo de elasticidade dinâmico médio do betão da barragem é de cerca de 35 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.

## 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.

## 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 4.0, User's Manual. Itasca Consulting Group. Minneapolis, 2006.
- [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] Westergaard, H.M. - Water pressures on dams during earthquakes. Trans. ASCE, vol. 98, paper nº 1835, 1933.
- [7] Chinese National Committee for Large Dams (CHINCOLD) – Seismic safety of dams in China. 2014.
- [8] Priscu, R.; Popovici, A.; Stematiu, D.; Stere, C. – Earthquake engineering for large dams, John Wiley & Sons, 1985.
- [9] ALLEMANG, Randall J. – The Modal Assurance Criterion – Twenty years of use and abuse. Sound and Vibration, pp. 14-21, August 2003.