

# CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DA BARRAGEM DO ALTO CEIRA II ATRAVÉS DA REALIZAÇÃO DE ENSAIOS DE VIBRAÇÃO FORÇADA E DE RUÍDO AMBIENTE

## CHARACTERIZATION OF DYNAMIC BEHAVIOR OF ALTO CEIRA II DAM BY PERFORMING FORCED VIBRATION AND AMBIENT NOISE TESTS

*Jorge Pereira Gomes*

*Departamento de Barragens de Betão, Laboratório Nacional de Engenharia Civil*

*Nuno Monteiro Azevedo*

*Departamento de Barragens de Betão, Laboratório Nacional de Engenharia Civil*

*Sérgio Oliveira*

*Departamento de Barragens de Betão, Laboratório Nacional de Engenharia Civil*



### RESUMO

Na presente comunicação é apresentado o estudo de caracterização dinâmica da barragem do Alto Ceira II recorrendo a métodos experimentais e numéricos. Foi efetuada a caracterização deste comportamento para as situações de albufeira vazia e cheia através da realização de ensaios de vibração forçada e da medição de ruído ambiente. A interpretação dos resultados das campanhas de ensaio e a estimação das características mecânicas médias do betão da barragem foi efetuada com o recurso a um modelo numérico calibrado com os resultados experimentais.

Palavras-chave: Comportamento dinâmico de barragens / Ensaios de vibração forçada / Medição da resposta para o ruído ambiente / Modelos numéricos

## ABSTRACT

In this paper the study of the dynamic characterization of Alto Ceira II dam, by means of experimental and numerical methods, is presented. The characterization of the dam dynamic behaviour for empty and full reservoir was made by performing forced vibration and ambient vibration tests. A numerical model has been developed and calibrated with the experimental results, in order to do the interpretation of these results.

Keywords: Dynamic behaviour of dams / Forced vibration test / Ambient noise response measure / Numerical models

## 1. INTRODUÇÃO

O presente estudo foi realizado com o objetivo de caracterizar o comportamento dinâmico da barragem do Alto Ceira II para as situações de albufeira vazia e cheia através de ensaios de vibração forçada e da medição da resposta para o ruído ambiente. A interpretação dos resultados das campanhas de ensaio e a estimativa das características mecânicas médias do betão da barragem foi efetuada com recurso a um modelo numérico.

As campanhas de ensaio foram realizadas em junho de 2013, para a situação de albufeira vazia, e em março de 2014, para a situação de albufeira cheia (albufeira à cota 662,3 m, 3,1 m abaixo do NPA). O ensaio correspondente à albufeira cheia foi efetuado para uma cota inferior à do pleno armazenamento (3,1 m abaixo do NPA), devido a constrangimentos operacionais.

Os ensaios de vibração forçada consistem 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. O comportamento das estruturas também pode ser avaliado por meio da medição da resposta para ações ambientais, através da identificação dos principais parâmetros modais, em particular das frequências naturais dos primeiros modos de vibração, sob excitação de baixa amplitude, na perspetiva de comparar com os resultados obtidos nos ensaios de vibração forçada e, desta forma, obter mais elementos experimentais que permitam melhorar a qualidade da análise espectral das várias séries temporais

recolhidas (sob excitação forçada e ambiental). A análise numérica foi realizada com o programa de elementos finitos Parmac3D (Azevedo e Lemos, 1999), baseado num algoritmo de solução explícito com a possibilidade de utilização de elementos tridimensionais do tipo cubo de 20 nós e de elementos de junta.

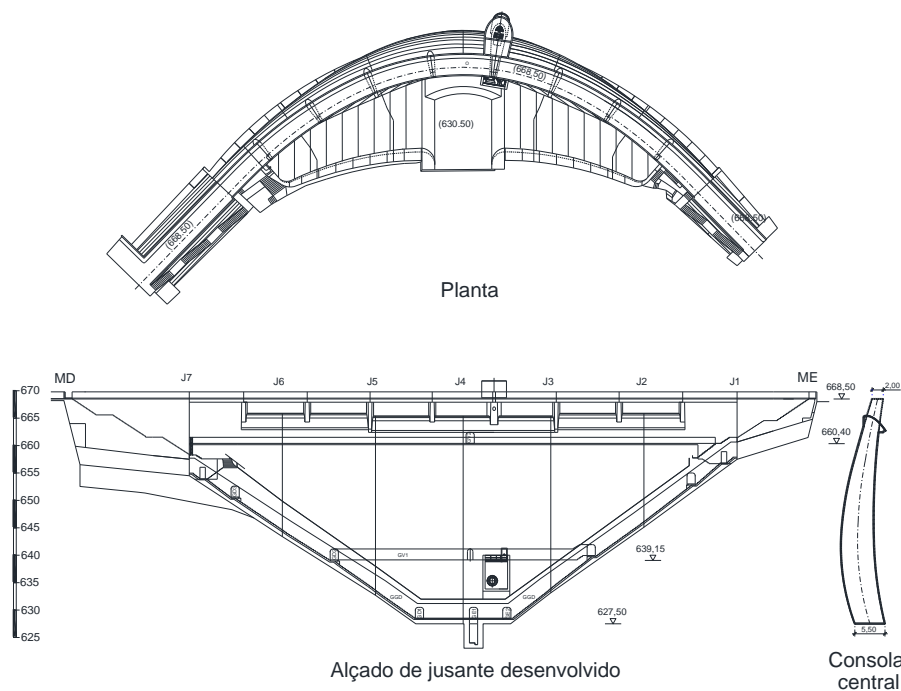
## 2. BREVE DESCRIÇÃO DA OBRA

A barragem do Alto Ceira II (Fig. 1a) está inserida no aproveitamento hidroelétrico de Santa Luzia, localizado no concelho de Pampilhosa da Serra, no distrito de Coimbra. Este aproveitamento integrava a antiga barragem do Alto Ceira (agora parcialmente demolida), que foi substituída, devido à sua deterioração estrutural anómala ao longo dos últimos anos, por esta nova estrutura localizada 200 m a jusante (Fig. 1b).

A nova barragem é uma estrutura de betão constituída por uma abóbada de dupla curvatura com uma altura máxima acima das fundações de 41,0 m e encontros artificiais (Fig. 2). O coroamento da barragem, situado à cota 668,5 m, tem um desenvolvimento de 100 m e uma espessura de 4 m, e é constituído parcialmente por um tabuleiro sobre os 7 vãos do descarregador de cheias não controlado existentes nos blocos centrais. A albufeira criada pela barragem tem uma capacidade de cerca de 1,3 hm<sup>3</sup> para o nível de pleno armazenamento (NPA à cota 665,90 m) e de cerca de 1,5 hm<sup>3</sup> para o nível de máxima cheia (NMC à cota 667,00 m).



**Fig. 1 - Vistas: a) jusante da barragem do Alto Ceira II b) conjunta das duas barragens do Alto Ceira**



**Fig. 2 - Barragem do Alto Ceira II. Planta, alçado de jusante desenvolvido e corte vertical pela consola central**

### 3. ENSAIOS DE VIBRAÇÃO FORÇADA

#### 3.1. Considerações gerais

Os ensaios de vibração forçada consistem 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.

Tirando partido do facto de se verificar um significativo aumento da amplitude da resposta estrutural quando a frequência da ação se encontra na vizinhança das frequências naturais da estrutura, a medição da resposta sob a ação de uma força com uma variação sinusoidal no tempo, aplicada com diversas frequências, permite identificar as frequências naturais da estrutura (aquelas para as quais se verificarão os picos de amplitude), bem como o respetivo amortecimento.

As frequências naturais de cada estrutura dependem das suas propriedades geométricas e mecânicas e das suas ligações ao exterior, bem como das ações restantes. Assim, é

possível determinar a evolução no tempo da sua deformabilidade média e, eventualmente, detetar e quantificar a evolução de um processo de deterioração dos materiais, através da realização de ensaios de vibração forçada em épocas sucessivas da vida útil das obras em que as restantes características estruturais se mantenham aproximadamente constantes (no caso de barragens de betão, em épocas em que as ações da água e térmicas sejam semelhantes).

Para além disso, 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 numérico, poderá permitir a localização das zonas da estrutura onde se verifiquem os processos de deterioração dos materiais.

### **3.2. Metodologia de ensaio**

A metodologia desenvolvida no LNEC, que 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 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 transferência de resposta da estrutura para cada frequência imposta. As frequências próprias da estrutura são assim fáceis de determinar, uma vez que a amplitude da resposta aumenta na sua vizinhança (Fig. 3).

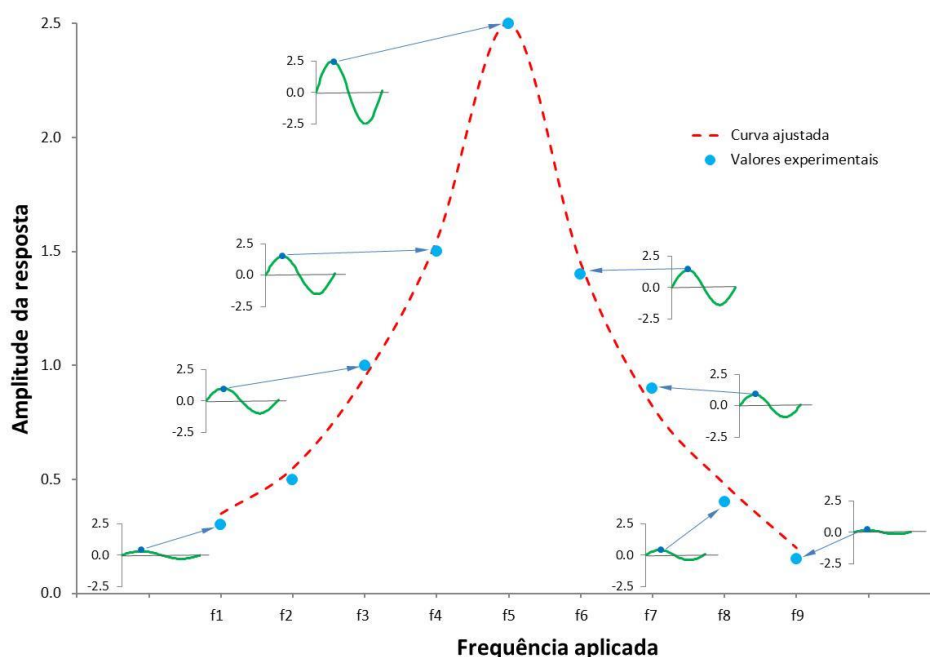
A determinação dos valores experimentais da resposta da estrutura passa pelo cálculo da amplitude máxima da grandeza física medida (aceleração, velocidade ou deslocamento), para a frequência imposta. Como o ensaio é efetuado por varrimento discreto em frequência vai existir um registo por cada valor 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.

Um dos 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 fazendo com que a estrutura responda essencialmente para a excitação sinusoidal imposta.

Após a obtenção experimental dos valores discretos da resposta, são determinados os valores modais caracterizadores do comportamento dinâmico da estrutura (frequências próprias, amortecimento estrutural e fatores de participação modal), admitindo o comportamento linear do material para estruturas sujeitas a ações dinâmicas.

Esta metodologia de varrimento discreto de frequência é robusta e tem demonstrado uma boa qualidade nos resultados obtidos para os vários ensaios já realizados.

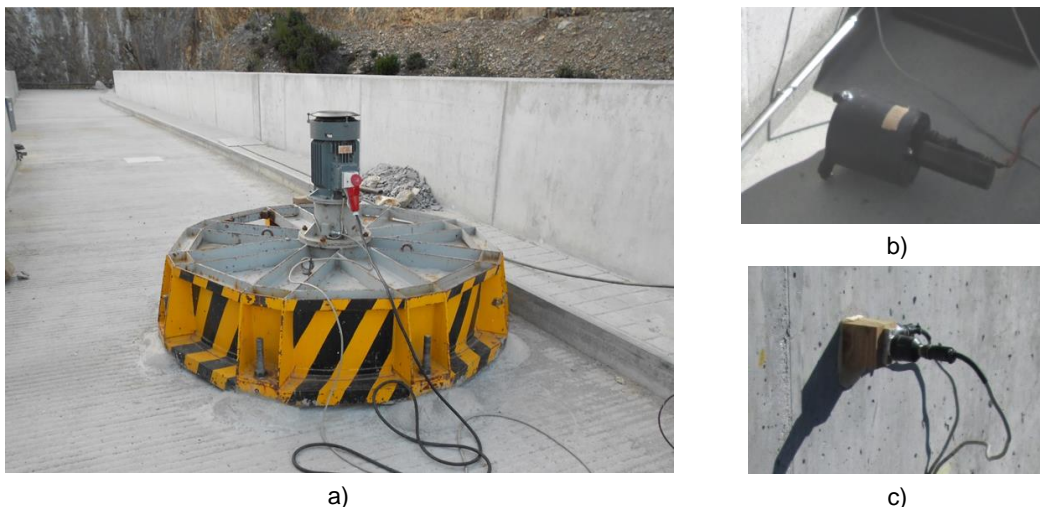


**Fig. 3 - Função de transferência em frequência da resposta de um ponto da estrutura obtida num ensaio de vibração forçada por varrimento discreto de frequência (uma frequência própria da estrutura estará na vizinhança do valor da frequência f5)**

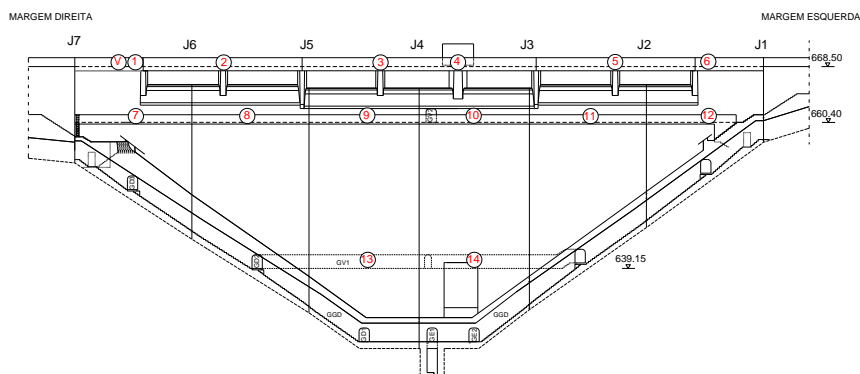
### 3.3. Ensaios realizados

Nos ensaios de vibração forçada realizados na barragem do Alto Ceira II, em junho de 2013 e março de 2014, utilizou-se um vibrador de massa excêntrica para impor forças horizontais harmónicas com diferentes amplitudes e frequências (Fig. 4a). Foi utilizado um vibrador de

massa excêntrica de um só braço, desenvolvido no LNEC (LNEC, 1965, 1995 e 2013), 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, Fig. 4b) e acelerómetros (PCB modelo 481, Fig. 4c) colocados em vários pontos da estrutura (Fig. 5). 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 conseqüentemente 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 para frequências mais elevadas.



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



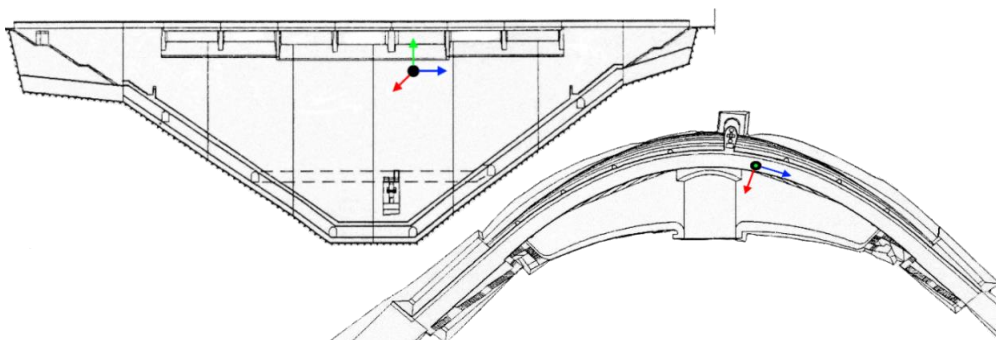
**Fig. 5 - Plano de colocação da aparelhagem utilizada durante o ensaio de vibração forçada**

#### 4. ENSAIOS DE VIBRAÇÃO AMBIENTE

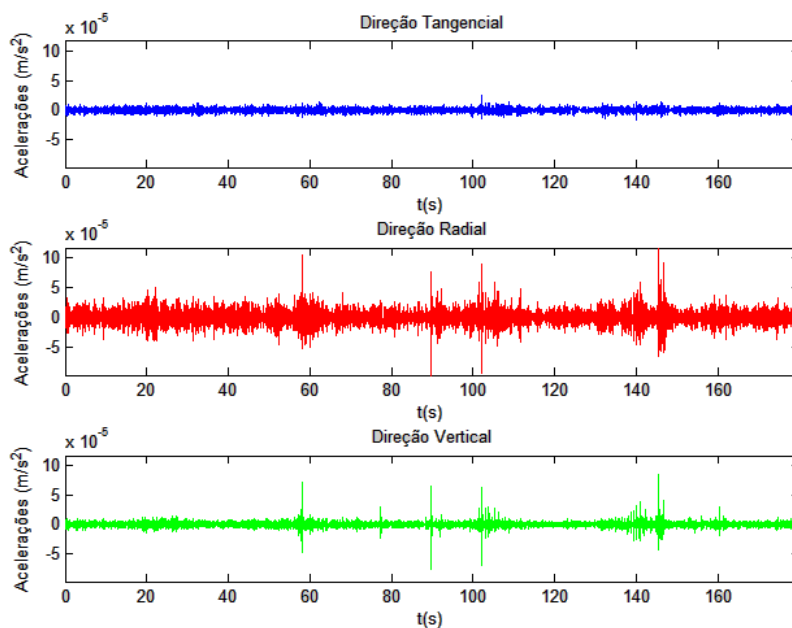
O objetivo dos ensaios de vibração ambiente foi a identificação dos principais parâmetros modais, em particular das frequências naturais dos primeiros modos de vibração, sob excitação de baixa amplitude, na perspectiva de comparar com os resultados obtidos nos ensaios de vibração forçada e, desta forma, obter mais elementos experimentais que permitam melhorar a qualidade da análise espectral das várias séries temporais recolhidas (sob excitação forçada e ambiente).

Nos ensaios com albufeira vazia (19 de junho de 2013) foi utilizado um acelerómetro triaxial (Nanometrics) colocado na posição indicada na Fig. 6. O acelerómetro foi colocado, como se indica, para medir acelerações nas direções radial e tangencial e na direção vertical (obtem-se três registos de acelerações, cada um referente a uma direção).

Apresentam-se resultados da análise das histórias de acelerações obtidas num segmento de tempo com 180 segundos de duração, com uma frequência de amostragem de 50 Hz. A frequência de amostragem original foi de 250 Hz, tendo-se efetuado uma decimação para 50 Hz e aplicado um filtro passa alto com o intuito de eliminar o conteúdo em frequência abaixo de 1 Hz (Fig. 6).



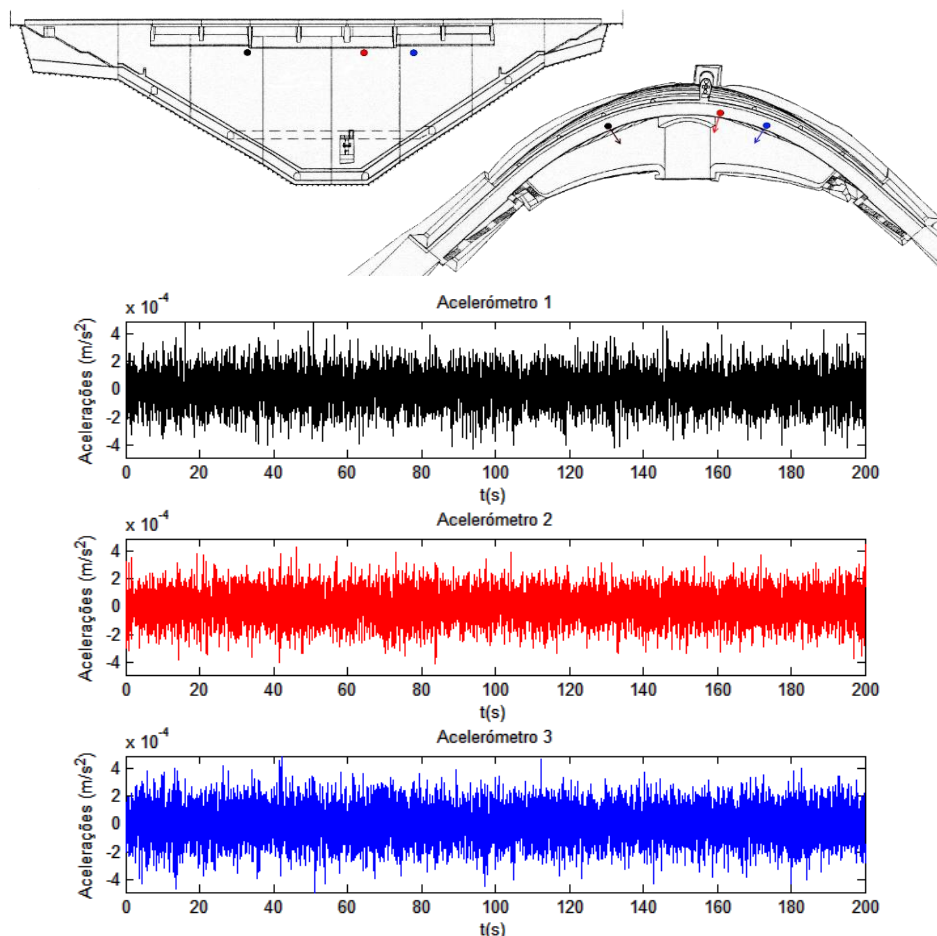




**Fig. 6 - Posição do acelerómetro triaxial (Nanometrics) e respetivas séries temporais recolhidas no ensaio de vibração ambiente para a situação de albufeira vazia (Ensaio 1), para as direções tangencial, radial e vertical**

No ensaio de vibração ambiente efetuado para a situação de albufeira cheia (12 de março de 2014) foram utilizados cinco acelerómetros uniaxiais da Kinematics (não estava disponível o acelerómetro triaxial utilizado no ensaio com albufeira vazia), colocados para medir acelerações na direção radial em cinco pontos no passadiço sob o lábio do descarregador de superfície. Devido ao facto de estarem ainda a decorrer trabalhos de acabamentos da construção, as medições efetuadas foram frequentemente afetadas, em alguns acelerómetros, pela passagem de trabalhadores junto aos acelerómetros e junto aos cabos de dados. Por esta razão analisaram-se apenas os resultados de três acelerómetros que funcionaram adequadamente no período escolhido para análise.

Apresenta-se a análise de três registos de acelerações (nos três acelerómetros indicados na Fig. 7) com a duração de 200 s com uma frequência de amostragem de 50 Hz, após decimação (frequência de amostragem original de 250 Hz).



**Fig. 7 - Posição dos acelerómetros uniaxiais (Kinematics) e respectivas séries temporais recolhidas no ensaio de vibração ambiente para a situação de albufera cheia (Ensaio 2)**

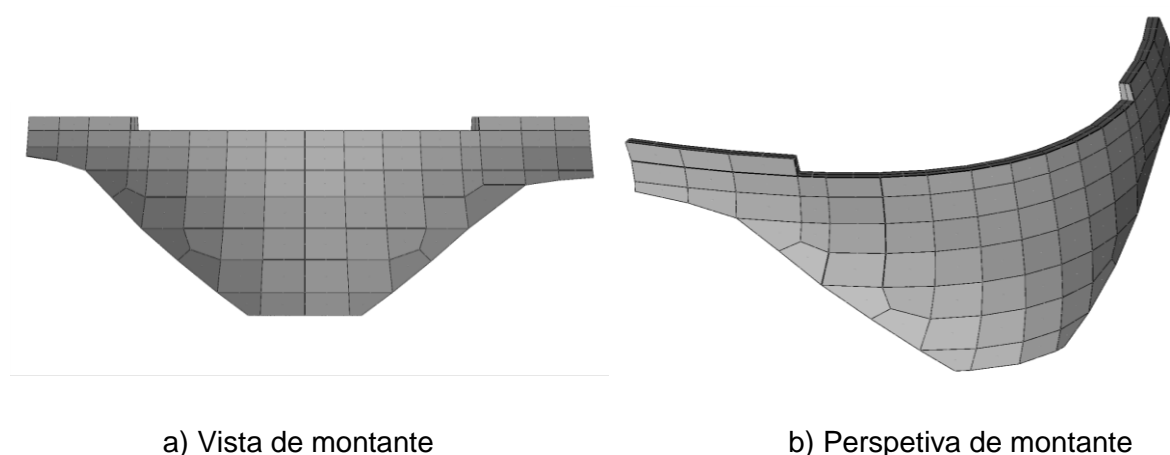
A partir das referidas histórias de acelerações, foi calculada a matriz Densidade Espectral de Potência (DEP) considerando a média de janelas temporais de aproximadamente 50 s, com sobreposição de 50%. Com base na análise da referida matriz DEP podem-se estimar as frequências próprias a partir da análise dos picos mais significativos.

## 5. MODELO NUMÉRICO

A análise numérica foi realizada com o programa de elementos finitos *Parmac3D* (Azevedo e Lemos, 1999) baseado num algoritmo de solução explícito com a possibilidade de utilização de elementos tridimensionais do tipo cubo de 20 nós e de elementos de. As pressões hidrodinâmicas são consideradas de forma simplificada com base na técnica de massas de água associadas de Westergaard (Westergaard, 1933).

Para o corpo da barragem optou-se por um modelo monolítico, sem representação das juntas de contração, e para o material admitiu-se um comportamento elástico linear tendo em conta que o nível de ação imposta pelo vibrador no decorrer do ensaio de vibração forçada é relativamente reduzido. Por forma a reduzir os custos computacionais, considerou-se a barragem encastrada na superfície de inserção.

Na discretização do corpo da barragem adotaram-se 2 elementos do tipo cubo de 20 nós em espessura, obtendo-se uma malha com um total de 160 elementos finitos correspondentes a 1593 pontos nodais. Na Fig. 8 apresentam-se vistas do modelo numérico desenvolvido.



**Fig. 8 - Malha de elementos finitos do modelo numérico do corpo da barragem**

As propriedades consideradas no modelo numérico da barragem foram calibradas com os resultados dos ensaios de vibração forçada realizados, tendo-se adotado 30,0 GPa para o módulo de elasticidade, 0,20 para o coeficiente de Poisson e um fator de redução de 0,65 para as massas de água associadas de Westergaard (Priscu et al, 1985, CHINCOLD, 2014).

O amortecimento da barragem foi representado somente pela componente proporcional à massa do amortecimento de Rayleigh, tendo sido realizados duas simulações numéricas para valores de 2,5% e 5,5% de amortecimento, relativos à frequência própria do primeiro modo para cada situação de cota de água. 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.

## 6. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

Na Tabela 1 apresentam-se as frequências próprias determinadas experimentalmente a partir dos resultados dos ensaios de vibração forçada e das medições das respostas com ruído ambiente e as frequências próprias obtidas com o modelo numérico desenvolvido para o efeito. Relativamente às medições com ruído ambiente só foi possível determinar duas frequências próprias devido ao tipo e número de sensores utilizados.

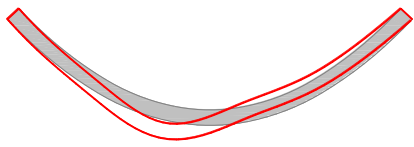
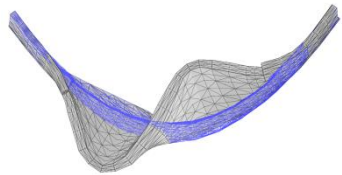
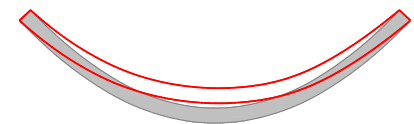
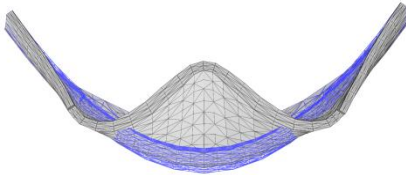
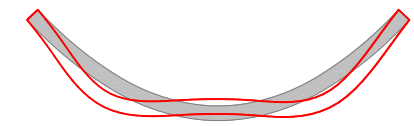
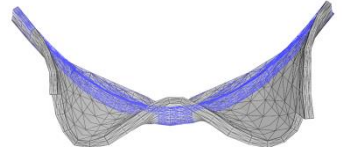
**Tabela 1 – Comparação das frequências próprias determinadas experimentalmente e através do modelo numérico (Hz)**

Modo	Albufeira vazia			Albufeira à cota 662,30 m		
	Vibração forçada	Ruído Ambiente	Modelo Numérico	Vibração forçada	Ruído Ambiente	Modelo Numérico
1	9,49	9,56	9,57	8,52	8,36	8,53
2	10,66	10,56	10,89	9,15	8,89	9,04
3	13,35	-	12,98	12,51	-	12,04
4	-	-	14,91	12,70	-	14,16

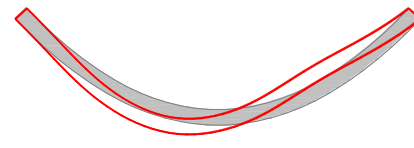
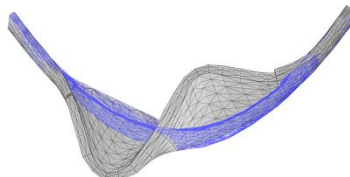
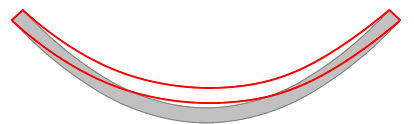
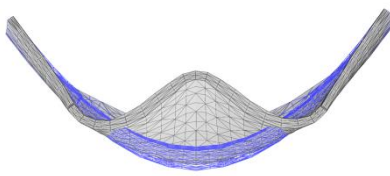
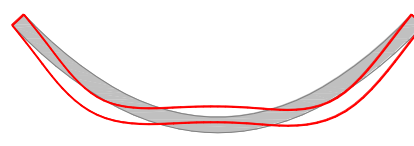
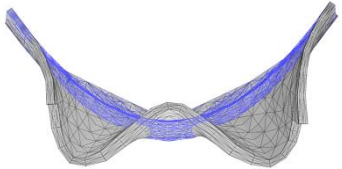
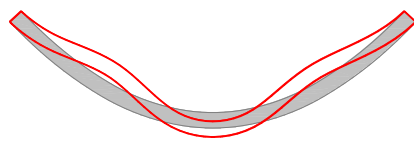
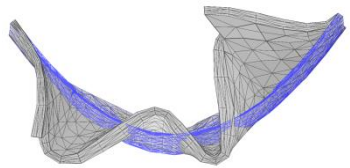
Os valores obtidos pelas três metodologias, para as duas primeiras frequências próprias apresentam uma boa concordância. No que diz respeito aos modos superiores (3º e 4º) verifica-se uma maior diferença.

Nas Tabelas 2 e 3 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, relativamente às duas situações de cota de água na albufeira. As configurações modais obtidas pelos dois métodos apresentam, na sua generalidade, uma boa concordância. O segundo modo de vibração, para as duas situações, corresponde a configurações simétricas, que foram identificadas experimental e numericamente, mas apresentam algumas diferenças. A configuração modal experimental corresponde a um primeiro modo simétrico, enquanto que a configuração determinada numericamente apresenta dois nodos (pontos de deslocamento nulo) localizados sensivelmente nos limites do descarregador de cheias. Esta diferença poderá ser devida ao facto do modelo numérico considerar simplificada a geometria do descarregador de cheias nos blocos centrais, implicando, por isso, a consideração de menor massa na zona central.

**Tabela 2 – Comparação dos parâmetros modais determinadas a partir do ensaio de vibração forçada e do modelo numérico para a situação de albufera vazia**

Modo	Ensaio vibração forçada		Modelo numérico	
	Freq. (Hz)	Configuração modal	Freq. (Hz)	Configuração modal
1	9,49		9,57	
2	10,66		10,89	
3	13,35		12,98	

**Tabela 3 – Comparação dos parâmetros modais determinadas a partir do ensaio de vibração forçada e do modelo numérico para situação de albufera à cota 662,30 m**

Modo	Ensaio vibração forçada		Modelo numérico	
	Freq. (Hz)	Configuração modal	Freq. (Hz)	Configuração modal
1	8,52		8,53	
2	9,15		9,04	
3	12,51		12,04	
4	12,70		14,16	

Em relação às medições com ruído ambiente, não foi possível identificar as configurações modais devido ao pequeno número de sensores utilizados, nem determinar as funções de transferência de força para deslocamento, uma vez que não é possível quantificar a excitação aplicada à barragem (ruído ambiente).

## 7. CONCLUSÕES

Foi efetuada a caracterização do comportamento dinâmico da barragem do Alto Ceira II para as situações de albufeira vazia e cheia, através da realização de ensaios de vibração forçada e medição da resposta para ruído ambiente. A interpretação dos resultados das campanhas de ensaio foi efetuada com o recurso a um modelo numérico de elementos finitos.

O acompanhamento destes tipos de ensaio, através de um modelo numérico de análise do comportamento estrutural da barragem, auxilia a interpretação dos resultados dos ensaios e permite a validação do próprio modelo (em particular, a identificação dos diferentes parâmetros estruturais).

A calibração do modelo numérico com os resultados dos ensaios de vibração forçada permitiu concluir que o módulo de elasticidade dinâmico médio do betão da barragem é de cerca de 30 GPa, o que está de acordo com os resultados dos ensaios de caracterização da deformabilidade do betão. Os resultados obtidos através dos ensaios de vibração forçada e de modelação numérica, em termos de frequências próprias e configurações modais, apresentam uma boa concordância. Em relação aos ensaios de vibração ambiente, constatou-se alguma dificuldade na determinação das frequências próprias, não tendo sido possível avaliar as configurações modais devido ao número reduzido de sensores utilizados. As dificuldades encontradas podem ser justificadas pela elevada rigidez deste tipo de estrutura, aliada à reduzida excitação provocada pelo ruído ambiente.

O modelo numérico poderá ser posteriormente utilizado na determinação da resposta da estrutura para outras ações dinâmicas, designadamente para ações sísmicas. No entanto, se o modelo numérico 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.

A realização futura de outros ensaios de vibração forçada nesta barragem (em condições semelhantes de nível de água na albufeira e de temperatura) permitirá determinar a evolução do estado da barragem em relação à situação atual.

## 8. AGRADECIMENTOS

Agradece-se à EDP a autorização concedida para a divulgação dos resultados apresentados no presente trabalho.

## 9. REFERÊNCIAS

- Azevedo, N.M.; Lemos, V., 1999. Modelação numérica de estruturas maciças pelo método dos elementos finitos – Formulação e implementação computacional, LNEC, Relatório LNEC nº 14/99, pp. 1-10.
- CHINCOLD (Chinese National Committee for Large Dams), 2014. Seismic safety of dams in China.
- LNEC, 1965. Vibrador mecânico. Projecto, construção e montagem. Relatório, LNEC..
- LNEC, 1995.- Sistema electrónico de variação de frequência para um vibrador de ensaios dinâmicos. Relatório130/95, LNEC.
- LNEC, 2013. Vibrador para ensaios de vibração forçada do DBB. Reversão do sistema de comando. Relatório 441/2013, LNEC.
- Priscu, R.; Popovici, A.; Stematiu, D.; Stere, C., 1985. Earthquake engineering for large dams, John Wiley & Sons.
- Westergaard, H.M., 1933. Water pressures on dams during earthquakes. Trans. ASCE, vol. 98, paper nº 1835.