

## OBSERVAÇÃO E ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DA TORRE DAS TOMADAS DE ÁGUA DA BARRAGEM DO CABRIL

Espada, M.<sup>1</sup>; Mendes, P.<sup>1</sup>; Oliveira, S.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa

<sup>2</sup> Núcleo de Modelação Matemática e Física, Departamento de Barragens de Betão, LNEC



### RESUMO

*A aplicação de modelos de identificação modal na análise de resultados de ensaios de vibração ambiental efectuados na barragem do Cabril (a maior barragem portuguesa - abóbada simples com 132 m de altura) mostrou a ocorrência de picos espectrais importantes, cuja frequência não correspondia às conhecidas frequências naturais da obra, tendo-se colocado a hipótese desses picos estarem relacionados com o comportamento dinâmico da torre das tomadas de água – estrutura reticulada, em betão armado, com altura idêntica à da barragem, imersa na albufeira, junto ao paramento de montante. O interesse do estudo da eventual interacção dinâmica entre a barragem e a torre das tomadas de água, conduziu ao desenvolvimento de um modelo 3D de elementos finitos para analisar o comportamento dinâmico da torre, o qual foi calibrado com base em resultados experimentais obtidos a partir: i) de ensaios de vibração ambiental efectuados no corpo da barragem e na torre, e; ii) de um sistema de observação em contínuo do comportamento dinâmico instalado recentemente no corpo da barragem. Após a calibração, o modelo numérico foi utilizado para estudar o comportamento dinâmico da torre sob acções sísmicas, tendo-se efectuando uma análise no domínio do tempo e uma análise por espectro de resposta.*

### 1- INTRODUÇÃO

O controlo de segurança de barragens de betão e das respectivas estruturas auxiliares, assume actualmente uma enorme importância em face das crescentes exigências de segurança e economia. Neste sentido, é importante complementar os actuais sistemas de observação com sistemas de recolha automática de dados, e respectivo *software*, de forma a potenciar a avaliação em contínuo das condições de segurança das obras sob acções estáticas e dinâmicas. Estes sistemas são essenciais

para detectar atempadamente eventuais processos de deterioração e para o desenvolvimento e calibração de modelos numéricos adequados para apoiar estudos de interpretação e previsão do comportamento das obras em serviço.

A observação e análise do comportamento dinâmico de barragens de betão e estruturas auxiliares, com base na utilização integrada de resultados numéricos (de modelos de elementos finitos ou elementos discretos) e de resultados experimentais obtidos através dos referidos sistemas de

Observação e análise do comportamento dinâmico da torre das tomadas de água da barragem do Cabril

observação em contínuo e/ou através de ensaios de vibração, é uma metodologia de grande interesse no âmbito do controlo de segurança de barragens, tendo em vista, em particular, o controlo de processos de deterioração e o controlo da segurança sob acções sísmicas (Fig. 1).

A utilização conjunta de resultados numéricos e observados, permite ajustar os parâmetros fundamentais dos modelos numéricos de forma a que a resposta dinâmica calculada numericamente (em termos de frequências naturais, amortecimentos e configurações modais) corresponda à identificada a partir das séries temporais de acelerações medidas em obra.

Na sequência deste processo de comparação entre resultados numéricos e observados, com vista à calibração dos modelos para análise do comportamento dinâmico, podem ser desenvolvidos estudos de simulação do comportamento das obras sob acções sísmicas (de acordo com a nova regulamentação as acções sísmicas a considerar são geralmente mais gravosas do que as consideradas na época em que muitas das actuais barragens foram projectadas), com vista à reavaliação da segurança, tendo em conta a nova regulamentação. Estes estudos de reavaliação da segurança sob acções sísmicas podem, em alguns casos, levar a adoptar medidas de modernização/reforço do sistema de observação instalado, nomeadamente complementando-o com dispositivos para medição em contínuo da resposta dinâmica das obras (Mendes, 2009).

Com este tipo de sistemas para observação do comportamento dinâmico de barragens em contínuo (utilizados também em pontes e edifícios de grande porte), é possível acompanhar a evolução de eventuais processos de deterioração que provoquem alterações estruturais significativas, que podem influenciar a resposta dinâmica observada ao nível das frequências naturais e configurações modais (Oliveira et al., 2003). Estes sistemas também são de grande interesse

para avaliar eventuais danos provocados por acções sísmicas; se, a resposta dinâmica identificada após um sismo for diferente da identificada anteriormente, isso indicia que o sismo poderá ter provocado alterações estruturais importantes.

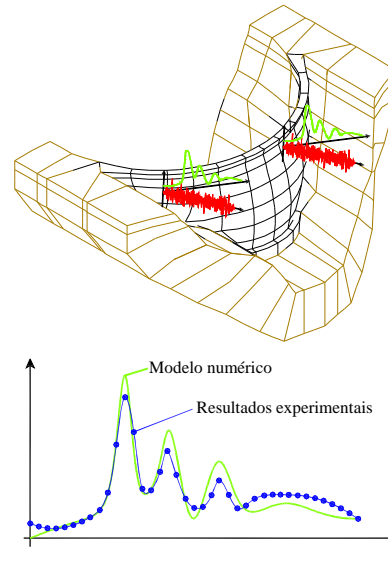


Fig. 1 – Utilização integrada de resultados de observação do comportamento dinâmico e de resultados numéricos.

## 2- BARRAGEM DO CABRIL

### 2.1 - Descrição da obra

A barragem do Cabril é uma grande barragem de betão com 132 m de altura constituída por uma abóbada de dupla curvatura (ver Fig. 2). Foi construída no rio Zêzere em 1954 e localiza-se no distrito de Castelo Branco.



Fig. 2 – Vista da barragem do Cabril e da albufeira.

O aproveitamento hidroeléctrico do Cabril é constituído por quatro elementos de grande importância, nomeadamente, a barragem, a central, a torre das tomadas de água e o sistema de evacuação de cheias.

A torre das tomadas de água é uma estrutura em betão armado com a mesma altura da barragem que se encontra ligada ao coroamento através de um passadiço em betão. A ligação entre o passadiço e a barragem é materializada por intermédio de um apoio vertical com uma junta que permite os deslocamentos relativos entre a barragem e o passadiço na direcção montante-jusante.

A torre permite o controlo das comportas das duas tomadas de água para os grupos de produção de energia eléctrica e da descarga de fundo (posicionada entre os grupos). A parte inferior da torre engloba as tomadas propriamente ditas com grades metálicas finas na entrada de água para os grupos e a descarga de fundo com uma grade de betão armado na entrada (ver Fig. 3). A parte superior da torre é uma estrutura reticulada, que suporta no seu topo, acima do nível da água, os órgãos de manobra das comportas e das grades finas (ver Fig. 4).

Verificou-se que o funcionamento dos grupos de produção para determinadas situações de vibração, excita de forma significativa a torre das tomadas de água (ressonância), o que não é conveniente para a integridade estrutural da torre. Este facto justifica em parte, o interesse do estudo do comportamento dinâmico da torre.

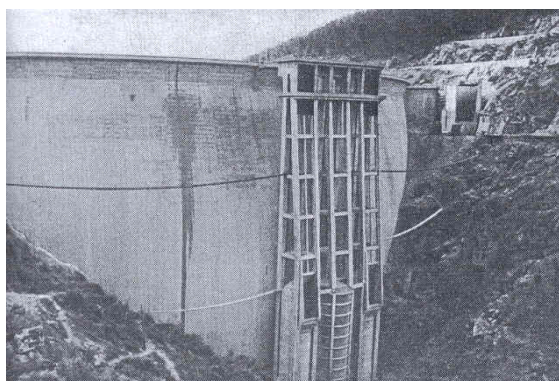


Fig. 3 – Vista do paramento de montante da barragem e da torre das tomadas de água (Xerez, 1954).



Fig. 4 – Vista lateral da barragem e da torre das tomadas de água com os órgãos de manobra das comportas.

## 2.2 - Observação e análise do comportamento dinâmico da barragem

Durante a vida útil da barragem do Cabril efectuaram-se vários ensaios de vibração forçada e de vibração ambiental.

No primeiro ensaio de vibração ambiental realizado na barragem em 20 de Fevereiro de 2002 (Oliveira et al., 2003; Mendes, 2005) com o apoio da EDP (entidade gestora do aproveitamento hidroeléctrico do Cabril), com a albufeira à cota 267 m, foram definidos como principais objectivos: i) a avaliação dos níveis de vibração na zona superior da obra com os grupos em funcionamento (para diferentes potências de produção) e com os grupos desligados e; ii) a identificação das frequências naturais e configurações modais dos primeiros modos de vibração.

Para o caso do ensaio de vibração ambiental realizado com os grupos desligados, a análise espectral das séries temporais medidas conduziu à identificação de dois picos em torno da frequência de 1,0 Hz que não estavam relacionados com as frequências naturais da barragem. De entre as várias hipóteses que foram avançadas no sentido de descobrir a origem desses picos espectrais, considerou-se que uma das mais plausíveis era a que sugeria que os referidos picos poderiam estar relacionados com o eventual movimento oscilatório da torre das tomadas de água que se poderia reflectir na resposta medida no corpo da barragem.

Observação e análise do comportamento dinâmico da torre das tomadas de água da barragem do Cabril

No entanto, estes ensaios que têm sido efectuados esporadicamente, não permitem obter toda a informação necessária para caracterizar adequadamente o comportamento dinâmico da barragem do Cabril, pois os parâmetros dinâmicos deste tipo de sistemas (barragem-fundação-albufera) variam ao longo do tempo, nomeadamente, devido às variações da cota de água, às variações térmicas anuais e devido a eventuais alterações estruturais associadas à evolução de processos de deterioração.

Nesta perspectiva, desde 2008 que está a ser desenvolvido no LNEC, com apoio financeiro da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) e da EDP, e no âmbito do Plano Nacional de Re-Equipamento Científico (PRNC, 2002), um sistema pioneiro que permite a monitorização em contínuo do comportamento dinâmico da barragem do Cabril (Mendes, 2009).

Com este sistema, que actualmente já se encontra em pleno funcionamento, obtêm-se registos de acelerações na barragem, em contínuo, os quais são armazenados em ficheiros horários com uma frequência de amostragem de 50 pontos por segundo.

Na análise de um desses registos, obtido em Dezembro de 2008, com os grupos desligados e a água à cota 270 m, identificaram-se, tal como no ensaio de Fevereiro de 2002, os picos que supostamente correspondem às primeiras frequências naturais da torre das tomadas de água. Na Fig. 5 mostra-se o espectro até 6,0 Hz onde são visíveis os picos (eventualmente associados às frequências da torre) para além dos picos que correspondem às frequências naturais da barragem. Como se observa na Fig. 5, os picos de maior amplitude que surgem a partir da frequência de 2,6 Hz são os correspondentes às frequências naturais da barragem, o que leva a considerar a hipótese de que os picos em torno de 1,0 Hz possam de facto, estar relacionados com os modos de vibração da torre das

tomadas de água, o que significaria que existe um efeito de interacção dinâmica entre o movimento oscilatório da torre e o corpo da barragem.

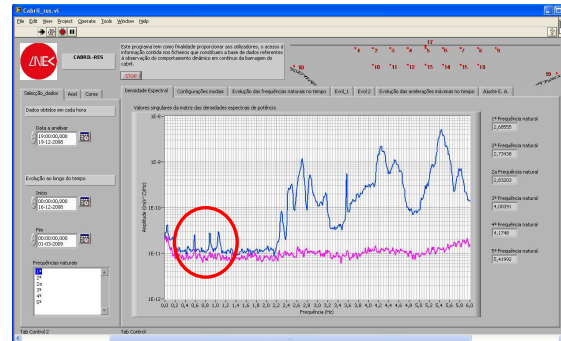


Fig. 5 – Espectro dos valores singulares da matriz das densidades espectrais de potência (Dezembro de 2008). Resultados do sistema de observação em contínuo do comportamento dinâmico da barragem do Cabril (Mendes, 2009).

### 3- OBSERVAÇÃO E ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DA TORRE DAS TOMADAS DE ÁGUA

Neste ponto efectua-se o estudo do comportamento dinâmico da torre das tomadas de água da barragem do Cabril, com vista a analisar a hipótese atrás referida da possibilidade de ocorrência de fenómenos de interacção dinâmica entre a torre e a própria barragem, revelada nos espectros de acelerações medidas no corpo da barragem, em termos dos picos detectados para frequências inferiores a 1,0 Hz (Espada, 2009).

Para tal, efectuou-se um ensaio de vibração ambiental com medição de acelerações no topo da torre na direcção montante-jusante e na direcção margem esquerda-direita. Com vista à preparação do ensaio e posterior análise, foi desenvolvido em SAP 2000 (Computers & Structures, 1998) um modelo numérico tridimensional de elementos finitos para simular o comportamento dinâmico da torre.

### 3.1 - Ensaio de ultra-sons

Na definição dos modelos numéricos um dos parâmetros fundamentais é o módulo de elasticidade do betão. Deste modo, procedeu-se à sua determinação experimental realizando um ensaio de ultra-sons “*in-situ*” num dos pilares da torre das tomadas de água (ver Fig. 6).

Após a realização de três medições, obteve-se o resultado de  $E = 34,2$  GPa.

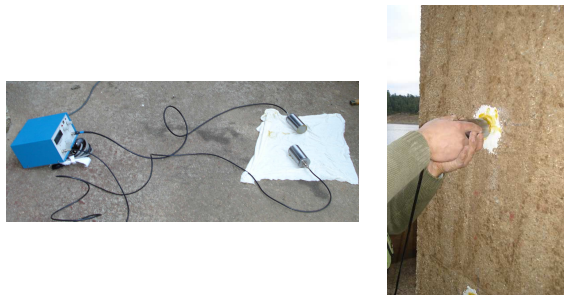


Fig. 6 – Ensaio de ultra-sons realizado na torre das tomadas de água.

### 3.2 - Análise 3D com o SAP 2000

Foi desenvolvido em SAP 2000 um modelo tridimensional constituído por 276 elementos finitos de barra 3D (“frame elements”) e 342 elementos de casca delgada (“shell elements”) correspondente a uma discretização com 1075 pontos nodais.

Considerou-se a hipótese de material isotrópico de comportamento elástico-linear com  $E = 34,2$  GPa,  $\nu = 0,20$  e um peso específico para o betão armado de  $25 \text{ kN/m}^3$ .

A ligação entre o passadiço e a barragem foi simulada através de apoios elásticos na direcção margem esquerda-direita e na direcção montante-jusante, cuja rigidez foi ajustada por forma a que os valores das frequências naturais coincidissem, na medida do possível, com os resultados identificados nos ensaios de vibração ambiental. Na direcção vertical consideraram-se apoios fixos.

Relativamente à ligação da torre ao solo considerou-se a hipótese de encastramento perfeito (fundação rígida).

Por simplificação, consideraram-se secções rectangulares para os pilares, e a parede localizada na parte inferior da torre definida em planta por contornos curvos, também foi simplificada, considerando-a definida por contornos rectos (ver Fig. 7).

A análise dinâmica da estrutura foi efectuada considerando apenas a massa do betão, tendo sido desprezada a influência da pressão hidrodinâmica da água sobre a torre.

Na Fig. 8 e na Fig. 9 apresentam-se as três primeiras configurações modais e as respectivas frequências naturais que se obtiveram com este modelo numérico.

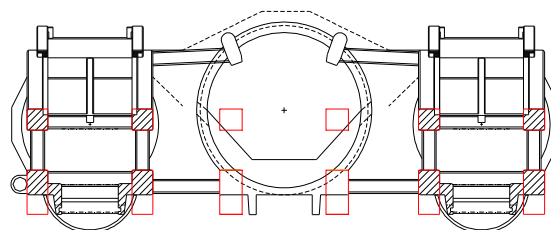
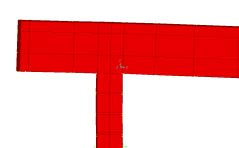
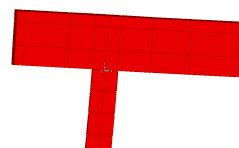
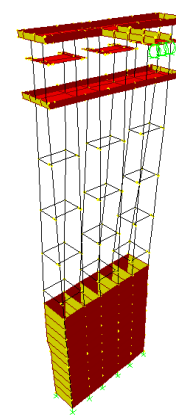
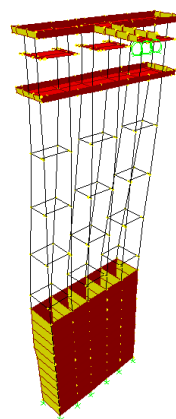


Fig. 7 – Torre das tomadas de água: vista em planta. Simplificações adoptadas na definição das secções dos pilares no modelo numérico (zona superior da torre).

1º Modo de vibração

2º Modo de vibração



$f_1 = 0,51$  Hz

$f_2 = 0,88$  Hz

Fig. 8 – 1º e 2º modo de vibração e respectivas frequências naturais obtidas com o modelo 3D em SAP 2000.

Observação e análise do comportamento dinâmico da torre das tomadas de água da barragem do Cabril

3º Modo de vibração

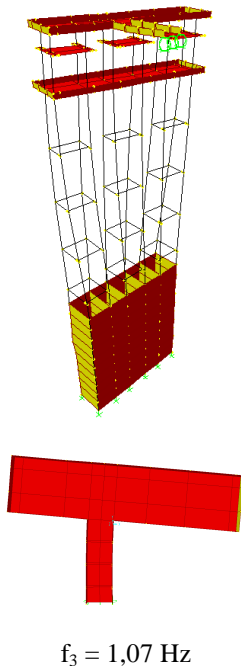


Fig. 9 – 3º modo de vibração e respectiva frequência natural obtida com o modelo 3D em SAP 2000.

O 1º modo de vibração de frequência natural de 0,51 Hz, corresponde a um movimento de translação (esta translação refere-se ao movimento em planta da laje de topo da torre) segundo a direcção margem esquerda-direita, sendo notório uma significativa parcela de torção.

O 2º modo de vibração de frequência 0,88 Hz, corresponde a uma translação segundo a direcção montante-jusante com ligeira torção.

Por fim, o 3º modo de vibração correspondente à frequência natural de 1,07 Hz é um modo claramente de torção.

### 3.3 - Ensaios de vibração ambiental

Com vista a caracterizar experimentalmente o comportamento dinâmico da torre das tomadas de água da barragem do Cabril e a estudar a possível interacção entre a torre e a própria barragem, foram realizados ensaios de vibração ambiental

com medição de acelerações no topo da torre.

Nos ensaios realizados foi utilizado um sistema de medição de vibrações constituído por: i) um sistema de aquisição de dados com 4 canais de medida, o qual se mostra na Fig. 10 (Modelo Basalt, Kinematics); ii) um transdutor de aceleração uniaxial do tipo force balance (Modelo Episensor ES-U2, Kinematics), tal como se mostra na Fig. 11; iii) um cabo para alimentação do acelerómetro e transmissão do sinal ao sistema de aquisição e; iv) um computador portátil para a configuração e controlo do sistema.



Fig. 10 – Sistema de aquisição de dados (Modelo Basalt, Kinematics).



Fig. 11 – Acelerómetro uniaxial (Modelo Episensor ES-U2, Kinematics).

Foram realizados dois ensaios de vibração ambiental na torre com medição de acelerações segundo a direcção montante-jusante e na direcção margem esquerda-margem direita.

Os registos das acelerações foram efectuados considerando uma frequência

de amostragem de 50 Hz e um tempo de aquisição de 10 minutos.

### 3.3.1 Ensaio com medição de acelerações na direcção montante-jusante

Neste primeiro ensaio foi colocado o acelerómetro uniaxial na extremidade esquerda da laje de topo da torre das tomadas de água, de forma a obter medições no sentido montante-jusante da barragem, como se mostra na Fig. 12.

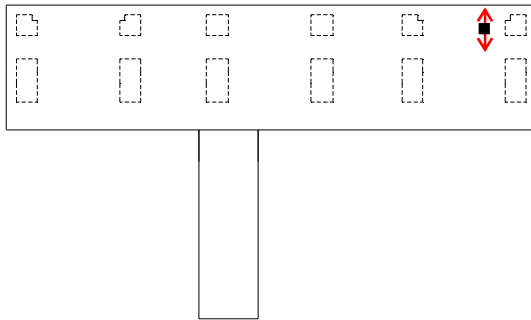


Fig. 12 – Esquema da colocação do acelerómetro uniaxial na direcção montante-jusante.

Na Fig. 13 apresenta-se o registo de acelerações obtido neste ensaio e na Fig. 14 mostra-se o respectivo espectro de amplitudes obtido a partir da decomposição em ondas sinusoidais do acelerograma medido, recorrendo à técnica das séries de Fourier (método básico no domínio da frequência).

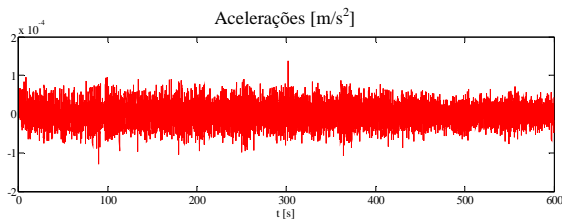


Fig. 13 – Registo de acelerações medidas na direcção montante-jusante.

Pela análise deste espectro verifica-se que se destacam, pela sua maior amplitude, as ondas correspondentes às frequências naturais de 0,50 Hz, 0,89 Hz e 1,12 Hz.

O pico de maior amplitude neste espectro corresponde, como seria de esperar, à frequência de 0,89 Hz (modo de translação na direcção das acelerações medidas, ou seja, na direcção montante-jusante). Contudo, são também notórios

neste espectro, um pico na frequência de 0,50 Hz e na frequência de 1,12 Hz, o que significa que outros modos deverão ter componentes na direcção montante-jusante, o que de facto acontece com o 1º e 3º modos calculados numericamente. O 1º modo, sendo de translação segundo a direcção margem esquerda-direita, apresenta também uma significativa parcela de torção (o apoio na ligação passadiço-barragem quebra a simetria estrutural); já o 3º modo é claramente um modo de torção.

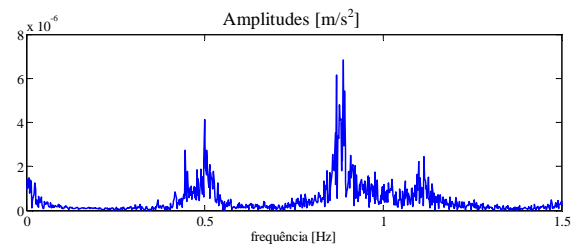


Fig. 14 – Espectro de amplitudes correspondente ao acelerograma medido na direcção montante-jusante.

### 3.3.2 Ensaio com medição de acelerações na direcção margem esquerda-direita

Neste ensaio o acelerómetro foi colocado no mesmo ponto (laje de topo da torre) na direcção margem esquerda-direita tal como se mostra na Fig. 15.

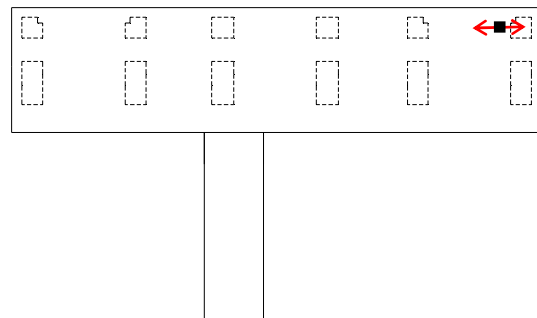


Fig. 15 – Esquema da colocação do acelerómetro uniaxial na direcção margem esquerda-direita.

Neste ensaio obteve-se o registo de acelerações que se apresenta na Fig. 16 e o respectivo espectro de amplitudes que se mostra na Fig. 17 (obtido a partir da aplicação do método básico no domínio da frequência).

Neste espectro destaca-se claramente um pico para a frequência de 0,51 Hz. Este

pico de maior amplitude corresponde à frequência do modo de vibração de translação segundo a direcção margem esquerda-direita (1º modo identificado com o modelo 3D em SAP 2000), o qual, como já se referiu, apresenta uma significativa componente de torção que se reflectiu no espectro das acelerações medidas na direcção montante-jusante.

É também de referir que nesta direcção a estrutura é mais flexível (dada a geometria dos pilares), pelo que seria de esperar, como se verifica, que a frequência deste modo de vibração fosse inferior à obtida para o modo na direcção montante-jusante.

Porém, evidencia-se também um pico de baixa amplitude na frequência de 0,89 Hz, o que significa que o 2º modo também não é um modo puramente de translação segundo a direcção montante-jusante, o que é confirmado numericamente.

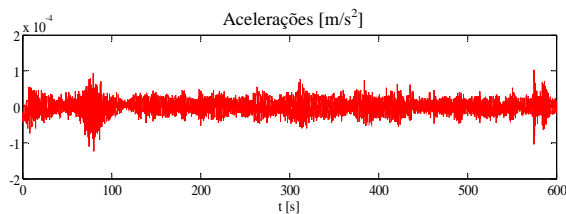


Fig. 16 – Registo de acelerações medidas na direcção margem esquerda-direita.

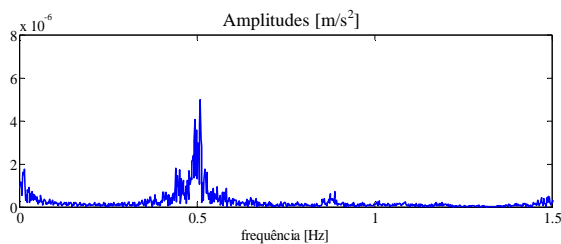


Fig. 17 – Espectro de amplitudes correspondente ao acelerograma medido na direcção margem esquerda-direita.

### 3.4 - Comparação entre os resultados experimentais e numéricos

Na Tabela 1 apresentam-se os valores das frequências naturais referentes aos três primeiros modos de vibração da torre, obtidos com o modelo 3D em SAP

2000 e nos ensaios de vibração ambiental realizados.

De acordo com os resultados dos ensaios de vibração ambiental na torre das tomadas de água constata-se que, os três primeiros modos de vibração têm frequências naturais que correspondem aproximadamente aos valores obtidos com o modelo 3D desenvolvido em SAP 2000.

Tabela 1 – Tabela resumo da comparação dos resultados numéricos e experimentais.

	$f_1$ (Hz)	$f_2$ (Hz)	$f_3$ (Hz)
Modelo 3D (SAP 2000)	0,51	0,88	1,07
Resultados experimentais	0,51	0,89	1,12

Neste ponto é de salientar que os valores médios das frequências naturais identificados com base nas medições efectuadas directamente na torre ( $f_1 = 0,51$  Hz,  $f_2 = 0,89$  Hz e  $f_3 = 1,12$  Hz), são idênticos aos valores das frequências dos primeiros picos registados nos espectros correspondentes às medições efectuadas no corpo da barragem. Portanto, isto significa que as vibrações da torre se reflectem nas vibrações da própria barragem, confirmando-se deste modo a anterior hipótese de interacção dinâmica entre a torre e a barragem.

Por fim, é de referir que a boa concordância entre os resultados experimentais e numéricos permite concluir que o modelo numérico 3D da torre desenvolvido em SAP 2000, está devidamente calibrado e, por isso, será um modelo adequado para efectuar estudos de previsão do comportamento dinâmico da torre sob acções dinâmicas, nomeadamente acções sísmicas tal como se mostra no ponto seguinte.



#### 4- COMPORTAMENTO SÍSMICO DA TORRE. ANÁLISE NO DOMÍNIO DO TEMPO E POR ESPECTRO DE RESPOSTA

O acelerograma sísmico considerado neste estudo, que se apresenta na Fig. 18, foi estimado com base num modelo de rotura de falha (Carvalho, 2007) para um local situado na zona centro de Portugal. Como se pode observar, trata-se de um acelerograma não estacionário de 10 s, definido com uma frequência de amostragem de 100 Hz, com uma aceleração de pico de  $1,36 \text{ m/s}^2$  (aproximadamente  $0,14 \text{ g}$ ), e em termos espectrais a zona de maiores amplitudes de resposta situa-se entre os 4 e 8 Hz, como se observa na Fig. 19.

O método do espectro de resposta permite estimar a resposta sísmica máxima de uma estrutura com comportamento em regime elástico linear. Este método de análise é frequentemente utilizado em alternativa a uma integração das equações no domínio do tempo quando se pretende projectar ou avaliar o comportamento estrutural para as acções sísmicas.

Os espectros de resposta fornecem informação de grande utilidade sob o ponto de vista do projecto de estruturas sísmo resistentes. A Regulamentação de engenharia sísmica é geralmente estruturada tendo por base a definição de regras para a utilização de espectros de resposta envolventes devidamente prescritos para cada zona do país de acordo com as suas características de sismicidade. Os espectros de resposta envolventes são estimados para representar não apenas um acelerograma sísmico, mas antes um conjunto de acelerogramas sísmicos que possam ocorrer com uma dada probabilidade de não serem excedidos num dado intervalo de tempo, como por exemplo, a vida útil da obra.

A partir do método do espectro de resposta efectua-se o cálculo sísmico da torre das tomadas de água para o modelo numérico calibrado, estimando a resposta máxima da estrutura quando solicitada por uma acção sísmica aplicada na base. Proceder-se também a uma análise

comparativa dos deslocamentos máximos obtidos através deste método com o resultado que se obtém a partir das formulações no domínio do tempo.

Os resultados são analisados em termos dos deslocamentos máximos de três pontos localizados na laje de topo da torre das tomadas de água.

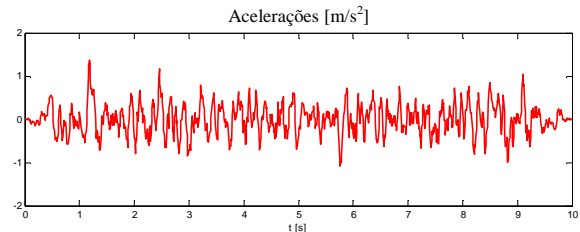


Fig. 18 – Acelerograma sísmico considerado no estudo do comportamento sísmico da torre.

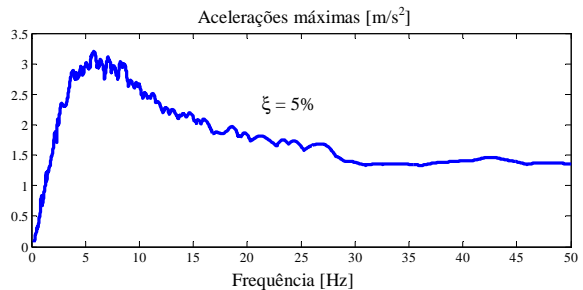


Fig. 19 – Espectro de resposta em acelerações absolutas ( $\xi = 5\%$ ) correspondente ao acelerograma sísmico considerado.

#### 4.1 - Cálculo sísmico com o modelo 3D utilizando um espectro de resposta envolvente

Para determinar os deslocamentos máximos efectuando um cálculo no domínio do tempo com o SAP 2000, é necessário começar por fornecer ao programa um ficheiro que contém o acelerograma em análise com os valores das acelerações (em  $\text{m/s}^2$ ) ao longo do tempo.

Após a definição da história de acelerações (considerando a hipótese de comportamento linear em todos os elementos durante a análise), é necessário definir os factores multiplicativos a adoptar para as três direcções (modelo tridimensional), tendo-se optado neste caso, por factores multiplicativos unitários (amplitudes das acelerações iguais em todas as direcções).

## Observação e análise do comportamento dinâmico da torre das tomadas de água da barragem do Cabril

Relativamente ao cálculo efectuado com o SAP 2000 utilizando o método do espectro de resposta, é necessário fornecer ao programa um ficheiro com o espectro de resposta envolvente (ver Fig. 20) em acelerações absolutas (em  $m/s^2$ ) em função do período T (em seg.), para um dado coeficiente de amortecimento relativo ( $\xi = 5\%$ , neste caso).

Seguidamente há que escolher a regra de combinação de máximos RQSQ (raiz quadrada da soma dos quadrados), ou CQC (combinação quadrática completa).

Consideraram-se factores multiplicativos unitários para os espectros de resposta nas três direcções.

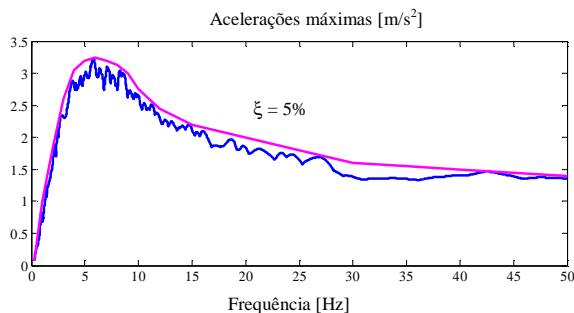


Fig. 20 – Espectro de resposta envolvente utilizado no estudo do comportamento sísmico da torre.

Os resultados obtidos na análise no domínio do tempo e por espectro de resposta (regras RQSQ e CQC) para os deslocamentos sísmicos máximos em três pontos na laje de topo da torre, utilizando o modelo 3D em SAP 2000 e considerando apenas 20 modos de vibração, apresentam-se na

Fig. 21. Os deslocamentos máximos (segundo a direcção y) no ponto 3 são inferiores aos deslocamentos na extremidade oposta da torre, devido ao apoio excêntrico na ligação passadiço-barragem.

Na direcção x os deslocamentos nos três pontos assinalados são praticamente idênticos, apresentando-se apenas o deslocamento segundo x no ponto 1.

Os deslocamentos máximos obtidos com o espectro de resposta envolvente considerado, são superiores aos valores determinados com base na análise no domínio do tempo. É natural que os resultados obtidos pelo método do espectro de resposta sejam mais conservativos, o que mostra a importância da utilização de espectros envolventes (como os espectros regulamentares) nos estudos de verificação da segurança de estruturas sob acções sísmicas.

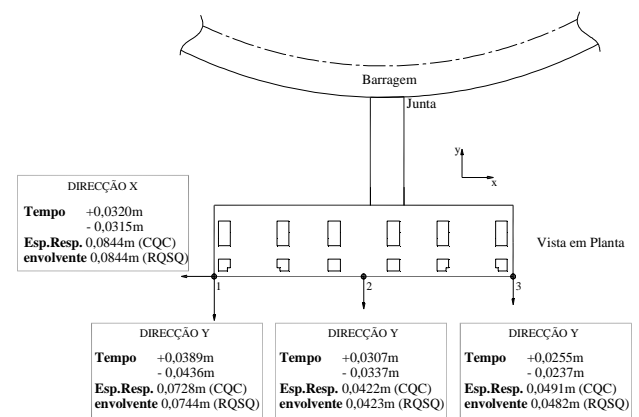


Fig. 21 – Deslocamentos sísmicos máximos em três pontos no topo da torre, utilizando o modelo 3D em SAP 2000. Comparação da análise no domínio do tempo e com base no espectro de resposta envolvente (RQSQ e CQC).

## 5- CONCLUSÕES

Neste trabalho salientou-se a importância da utilização conjunta dos resultados da observação (obtidos através do tratamento das séries temporais de acelerações medidas, com recurso ao método básico no domínio da frequência) e dos resultados de modelos numéricos de elementos finitos. Os resultados obtidos nos ensaios de vibração ambiental permitiram calibrar o modelo numérico da torre das tomadas de água da barragem do Cabril, o que contribuiu para aumentar a fiabilidade dos estudos numéricos de

verificação da segurança da torre sob acções sísmicas.

A análise espectral das vibrações observadas na barragem (resultados de ensaios de vibração ambiental efectuados no corpo da barragem e resultados provenientes do sistema de observação em contínuo (Mendes, 2009) recentemente instalado na barragem do Cabril), revelou a existência de uma interacção entre o comportamento dinâmico da torre e da barragem. De facto, nos espectros obtidos com base nas acelerações medidas no corpo da barragem, surgem picos cujas abcissas correspondem exactamente às frequências naturais da torre que foram identificadas nos ensaios de vibração ambiental realizados directamente na torre.

Relativamente ao estudo sísmico da torre, utilizando a técnica de análise no domínio do tempo (aplicação de um acelerograma sísmico na base) e por espectro de resposta, os resultados obtidos são ligeiramente diferentes, devido ao facto de se ter considerado um espectro de resposta envolvente.

O acompanhamento da evolução do comportamento dinâmico da torre através da análise dos resultados do sistema de observação em contínuo instalado, permite avaliar a evolução ao longo do tempo do seu estado de conservação. Eventuais alterações nos parâmetros modais identificados na torre podem indicar a ocorrência de fenómenos de deterioração da torre - tais alterações podem ocorrer gradualmente (devido a alterações no tempo das propriedades mecânicas dos materiais ou a acções cíclicas que provoquem fenómenos de fadiga), ou de forma abrupta devido a acções de acidente ou incidente como poderá ser o caso da ocorrência de um sismo de grande ou média intensidade.

## 6- AGRADECIMENTOS

Agradece-se à EDP o apoio para a realização do ensaio de vibração ambiental na torre das tomadas de água da barragem do Cabril e ainda à Kinematics e à sua representante em Portugal, a Quantific, a

possibilidade de ter usado, para teste, o seu novo equipamento de aquisição (Modelo Basalt).

## 7- REFERÊNCIAS

- Carvalho, A. 2007. Modelação estocástica da acção sísmica em Portugal continental, Tese de Doutoramento, Instituto Superior Técnico.
- Computers & Structures, Inc. 1998.SAP 2000 Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures, Berkeley, California, USA.
- Espada, M. 2009. Desenvolvimento de modelos para análise dinâmica de estruturas. Aplicação a barragens de betão e estruturas auxiliares, Tese de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa
- Mendes, P. 2005. Observação e análise do comportamento dinâmico de barragens de betão sob excitação ambiente, Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico.
- Mendes, P. 2009. Observação e análise do comportamento dinâmico de barragens de betão, Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Oliveira, S., Rodrigues, J., Mendes, P. e Campos Costa, A. 2003. Monitorização e modelação do comportamento dinâmico de barragens de betão, VII Congresso de Mecânica Aplicada e Computacional, Universidade de Évora.
- PNRC (LNEC-FEUP) 2002. Estudo de processos de deterioração evolutiva em barragens de betão. Controlo da segurança ao longo do tempo, Programa de Candidatura ao Programa Nacional de Re-equipamento Científico da FCT.
- Xerez, C. 1954. O aproveitamento do Cabril, Separata da “Técnica”.