

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DA BARRAGEM DO CABRIL SOB EXCITAÇÃO AMBIENTE: INFLUÊNCIA DA TORRE DAS TOMADAS DE ÁGUA. ESTUDO SÍSMICO DA TORRE



M. ESPADA
Engenheira Civil
Instituto Superior de
Engenharia de
Lisboa
Lisboa - Portugal



P. MENDES
Assistente
Instituto Superior de
Engenharia de
Lisboa
Lisboa - Portugal



S. OLIVEIRA
Inv. Auxiliar
Laboratório
Nacional de
Engenharia Civil
Lisboa - Portugal

SUMÁRIO

A aplicação de modelos de identificação modal no domínio da frequência à análise dos resultados de ensaios de vibração ambiental efectuados no corpo da barragem do Cabril mostrou que, para além dos esperados picos espectrais correspondentes aos modos de vibração da barragem também surgem nos espectros da resposta medida outros picos importantes cuja frequência não corresponde a nenhuma das conhecidas frequências naturais da obra. Colocou-se então a hipótese desses picos espectrais estarem relacionados com o comportamento dinâmico da torre das tomadas de água que é uma estrutura auxiliar, porticada, em betão armado, com altura idêntica à da barragem (132 m). Trata-se de uma estrutura que se encontra imersa na albufeira junto ao paramento de montante da obra, e que suporta os órgãos de manobra das comportas das tomadas de água dos dois grupos de produção de energia e da descarga de fundo.

Assim, com vista a analisar a referida hipótese de ocorrência de fenómenos de interação dinâmica entre a torre e a própria barragem, foi desenvolvido neste trabalho um modelo de elementos finitos 3D 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.

Neste artigo apresenta-se também um estudo de previsão do comportamento dinâmico da torre sob acções sísmicas, efectuando a análise no domínio do tempo e pelo método do 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 (envolvendo equipamentos adequados para automatização das medições e *software* para análise dos dados) de forma a tornar possível 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 em contínuo e/ou através de ensaios de vibração, é uma metodologia de grande interesse no âmbito do controlo de segurança destas obras (ver Figura 1), na medida em que permite calibrar e verificar a fiabilidade dos modelos numéricos que se devem utilizar no estudo de eventuais processos de deterioração e na análise sísmica de sistemas barragem-fundação-albufeira. A observação do comportamento dinâmico de barragens em contínuo [1] é fundamental para esclarecer algumas das principais dúvidas que ainda subsistem ao nível da modelação numérica de sistemas barragem-fundação-albufeira, nomeadamente no que se refere à consideração da pressão hidrodinâmica (massas de água associadas; elementos finitos de água com formulação em deslocamentos ou em pressões) e à

consideração do amortecimento (o amortecimento pode ser devido, por exemplo, à dissipação de energia que ocorre no material sob acções cíclicas, a movimentos de junta e a efeitos de radiação de ondas de pressão na albufeira; será adequada a hipótese usualmente adoptada em engenharia civil de amortecimento proporcional à massa e à rigidez? ; como varia o amortecimento em função da amplitude das acções?).

A utilização conjunta de resultados numéricos e observados, permitirá escolher os modelos mais adequados e ajustar os respectivos parâmetros, 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. A utilização de modelos numéricos devidamente calibrados é fundamental nos estudos de simulação do comportamento de barragens sob acções sísmicas – actualmente têm sido desenvolvidos em Portugal diversos estudos sobre o comportamento sísmico de barragens quer no âmbito do projecto de novas obras quer no âmbito de estudos de reavaliação da segurança das barragens em serviço, pois, de acordo com a nova regulamentação, as acções sísmicas a considerar actualmente são geralmente mais gravosas do que as consideradas na legislação anterior. No projecto das novas obras e nos projectos de revisão das condições de segurança das obras antigas estão já a ser propostos sistemas de observação em que se prevê a colocação de dispositivos que visam a medição em contínuo da resposta dinâmica das obras [1, 2], utilizando equipamentos cuja gama dinâmica permite medir a resposta das obras sob excitação ambiente, excitação operacional e sob a acção de sismos com diferentes intensidades.

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, como se referiu, 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 [1, 2, 3]. 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.

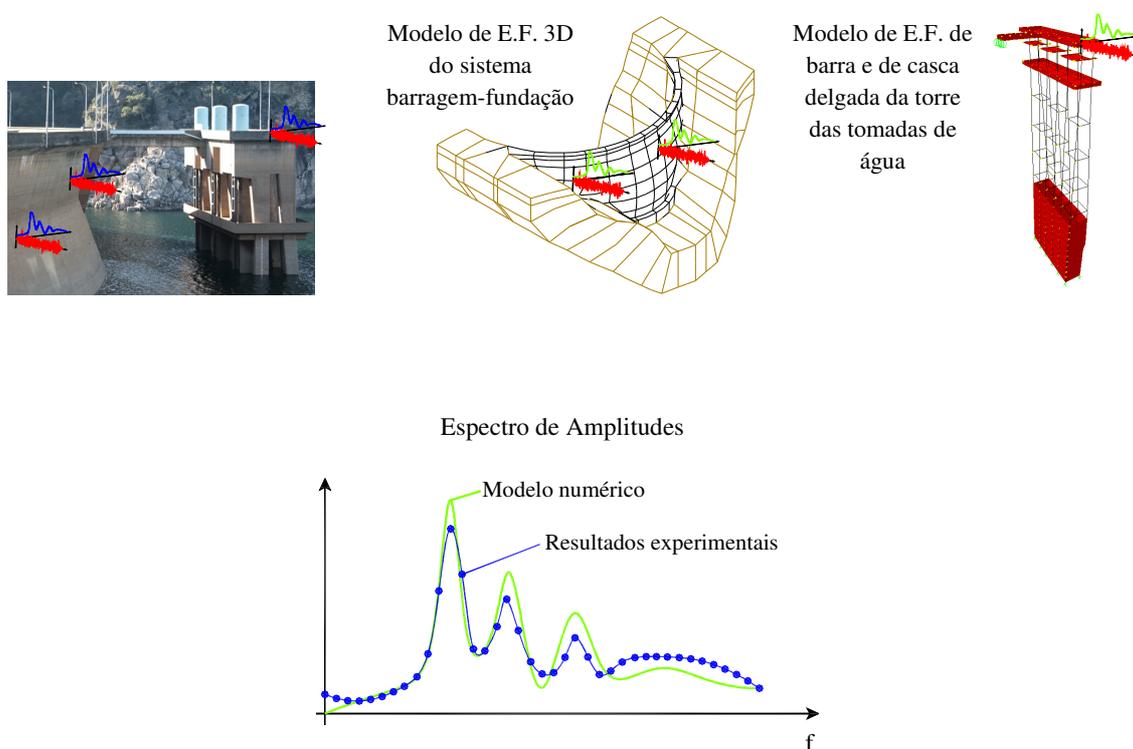


Figura 1: Utilização integrada de resultados da observação do comportamento dinâmico e de resultados numéricos.

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 Figura 2 a). Foi construída no rio Zêzere em 1954 e localiza-se no distrito de Castelo Branco. Está fundada num maciço granítico e tem a particularidade de apresentar uma zona de maior espessura ao nível do coroamento (ver Figura 2 b). Inicialmente esta zona de maior espessura não estava prevista no projecto tendo a sua introdução originado o aparecimento de tracções verticais a jusante que levaram ao aparecimento de uma significativa fissuração horizontal no paramento de jusante, situada numa faixa entre os 15 e os 30 m abaixo do coroamento.

O aproveitamento hidroeléctrico do Cabril envolve 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 cuja ligação à 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.

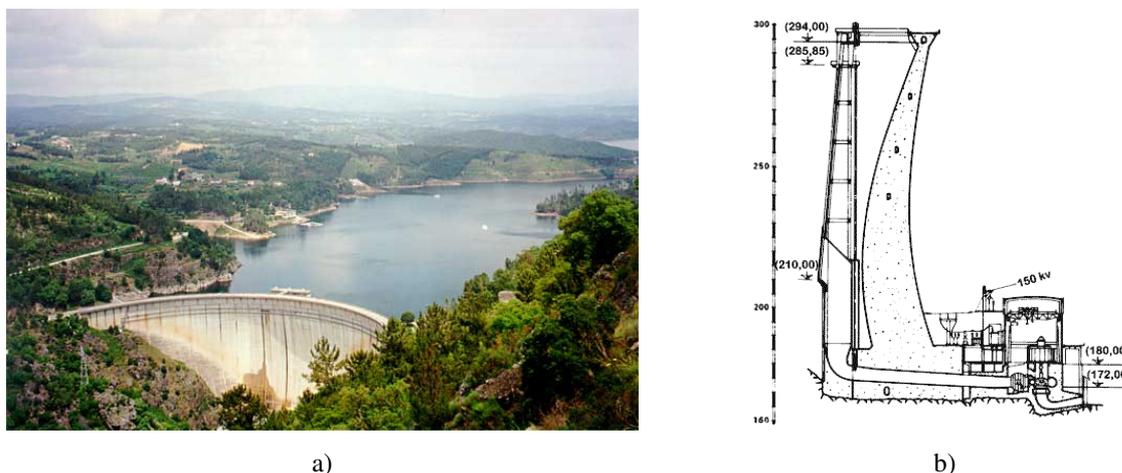


Figura 2: a) Vista da barragem do Cabril e da albufeira; b) Perfil da barragem com a torre das tomadas de água.

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 Figura 3 a). A parte superior da torre é uma estrutura reticulada de betão armado, que suporta no seu topo, acima do nível da água, os órgãos de manobra das comportas e das grades finas (ver Figura 3 b).

Verificou-se que para determinadas situações de exploração o funcionamento dos grupos de produção, situados no pé de jusante da barragem, provoca vibração que excita a torre de forma significativa, tendo sido tomadas medidas para evitar a ocorrência de fenómenos de ressonância com o objectivo de proteger a integridade estrutural da torre. Tais medidas apoiaram-se em resultados da observação do comportamento dinâmico da torre e em resultados de modelos numéricos como se apresenta seguidamente.

Por outro lado têm sido realizados no LNEC vários estudos numéricos e experimentais sobre o comportamento da barragem do Cabril no sentido de contribuir para um melhor conhecimento da fissuração observada nesta obra. Tendo em vista o controlo da fissuração e o controlo da segurança da obra sob acções sísmicas, foi recentemente instalado um sistema para monitorizar em contínuo o comportamento dinâmico da barragem, o qual inclui 9 acelerómetros uniaxiais na galeria do coroamento, 7 na galeria sob a zona fissurada, 1 triaxial no topo da consola central e 2 triaxiais na rocha, sob os encontros [2].

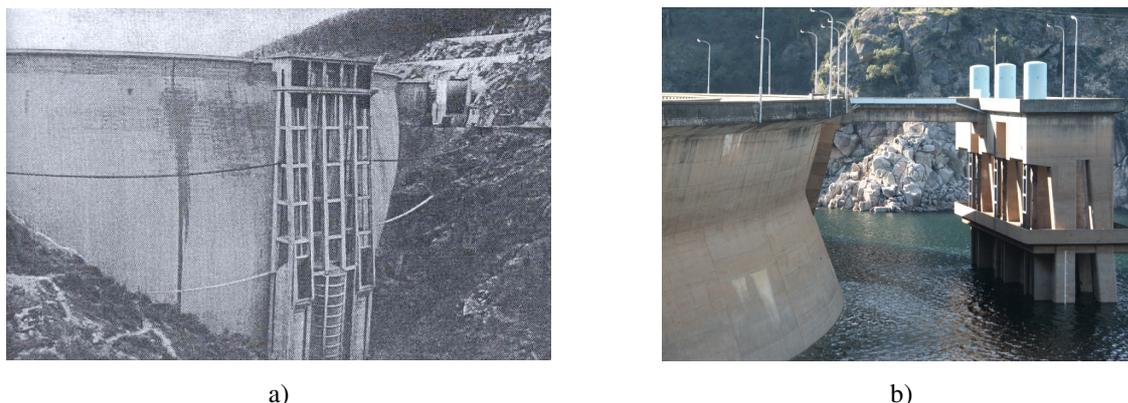


Figura 3: a) Vista do paramento de montante da barragem e da torre das tomadas de água [4];
b) Vista lateral da barragem e da torre das tomadas de água com os órgãos de manobra das comportas.

2.2. Observação e análise do comportamento dinâmico da barragem do Cabril

Durante a vida útil da barragem do Cabril efectuaram-se vários ensaios de vibração forçada e de vibração ambiental [3]. Na primeira campanha de ensaios de vibração ambiental realizada na barragem em 20 de Fevereiro de 2002 [3, 5] com o apoio da EDP (dono de obra), 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.

A análise espectral das medições efectuadas nessa campanha com os grupos desligados (séries temporais de acelerações radiais medidas em vários pontos da galeria do coroamento), conduziu à identificação de dois picos nas frequências de $\sim 0,90$ Hz e $\sim 1,10$ Hz os quais, de acordo com os modelos numéricos, 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.

No entanto, dado que estas campanhas eram efectuadas esporadicamente, os dados disponíveis não permitiram obter a informação necessária para caracterizar adequadamente o comportamento dinâmico da obra, que, como se sabe, pode variar ao longo do tempo devido, nomeadamente, às variações da cota de água, às variações térmicas anuais, às diferentes condições de excitação, e devido a eventuais alterações estruturais associadas à evolução de processos de deterioração. Nesta perspectiva, o LNEC desenvolveu e instalou em obra o já referido sistema de monitorização dinâmica [1, 2] que permite a medição em contínuo das acelerações em vários pontos da obra, as quais são armazenadas sob a forma de registos temporais, em ficheiros horários, com uma frequência de amostragem de 50 pontos por segundo.

Na análise de um registo de acelerações, obtido numa campanha realizada em Dezembro de 2008, com os grupos desligados e a água à cota 270 m, identificaram-se, tal como na campanha de Fevereiro de 2002, os já referidos picos espectrais que, supostamente, correspondem às primeiras frequências naturais da torre das tomadas de água e ainda um pico na frequência de 0,50 Hz como se pode ver no espectro da Figura 4. Neste espectro, os picos de maior amplitude que surgem a partir da frequência de 2,60 Hz são os correspondentes às frequências naturais da barragem, o que leva a considerar a hipótese de que os três primeiros picos espectrais possam, de facto, estar relacionados com os modos de vibração da torre, o que significaria que existe um efeito de interacção dinâmica entre o movimento oscilatório da torre e o corpo da barragem.

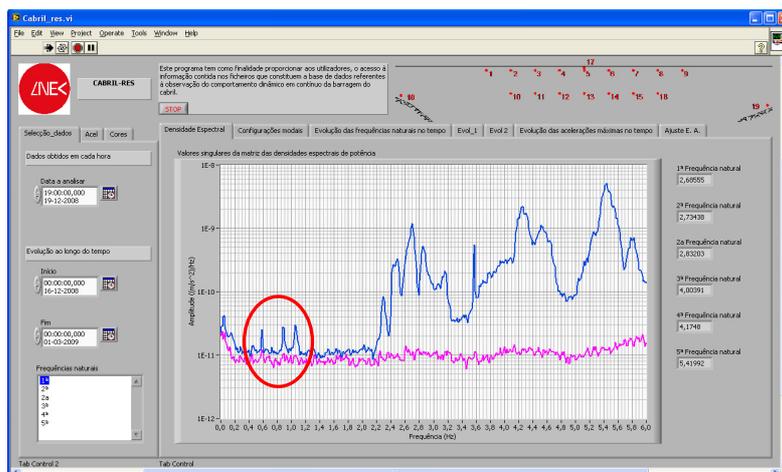


Figura 4: Espectro dos valores singulares da matriz das densidades espectrais de potência (Dezembro de 2008). Resultados do sistema de observação em contínuo do comportamento dinâmico da barragem do Cabril [2].

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

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 três picos detectados para frequências inferiores a 1,20 Hz [6].

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 um modelo numérico tridimensional de elementos finitos para simular o comportamento dinâmico da torre.

Foi igualmente desenvolvido um programa em MatLab de elementos finitos de placa de 8 nós que será utilizado para efectuar uma análise sísmica da torre das tomadas de água.

O programa permite efectuar a análise dinâmica de estruturas 2D (sob acções sísmicas ou acções dinâmicas de qualquer outro tipo) no domínio do tempo (acções definidas por histórias de forças aplicadas nos vários graus de liberdade G.L. da estrutura ou histórias de acelerações impostas na base) e pelo método do espectro de resposta (acções definidas por intermédio do respectivo espectro de resposta em acelerações absolutas).

3.1. Ensaio de ultra-sons

Na definição dos modelos numéricos um dos parâmetros fundamentais é o módulo de elasticidade do betão, que, neste caso, foi determinado experimentalmente com um ensaio de ultra-sons “in-situ” num dos pilares da torre das tomadas de água (ver Figura 5). Após a realização de três medições, obteve-se o resultado de $E = 34,2$ GPa.



Figura 5: Ensaio de ultra-sons realizado num dos pilares da torre das tomadas de água da barragem do Cabril.

3.2. Modelação 3D da torre com o SAP 2000

Foi desenvolvido em SAP 2000 um modelo tridimensional da torre 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 $E = 34,2 \text{ GPa}$, $\nu = 0,20$ e um peso específico para o betão armado de 25 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).

Foram consideradas algumas simplificações ao nível das secções dos pilares e na parede localizada na parte inferior da torre.

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 Figura 6 apresentam-se as três primeiras configurações modais e as respectivas frequências naturais que se obtiveram com este modelo numérico.

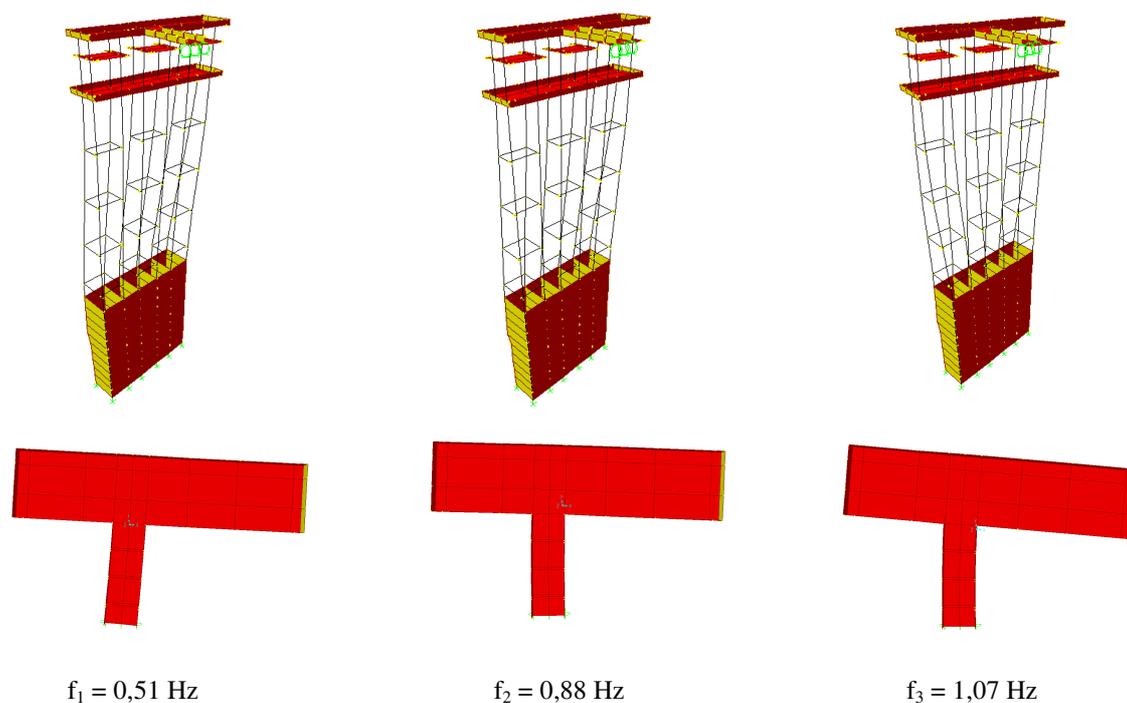


Figura 6: Configurações modais dos três primeiros modos de vibração e respectivas frequências naturais obtidas com o modelo 3D em SAP 2000.

O 1º modo de vibração obtido com este modelo, de frequência 0,51 Hz, corresponde a um modo 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 parcela de torção; já o 2º modo de vibração, de frequência 0,88 Hz, corresponde a uma translação segundo a direcção montante-jusante com ligeira torção e, por fim, o 3º modo de vibração, de frequência de 1,07 Hz, é um modo claramente de torção.

3.3. Ensaio de vibração ambiental na torre das tomadas de água

Em Abril de 2009 realizou-se uma campanha de medição de vibrações na torre, na qual foi utilizado um sistema constituído por: i) um módulo de aquisição de dados com 4 canais de medida, o qual se mostra na Figura 7 a) (Modelo Basalt, Kinematics); ii) um transdutor de aceleração uniaxial do tipo force balance (Modelo Episensor ES-U2, Kinematics), tal como se mostra na Figura 7 b); 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.



a)



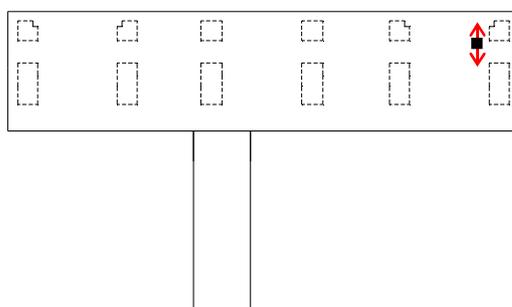
b)

Figura 7: a) Sistema de aquisição de dados (Modelo Basalt, Kinematics); b) Acelerómetro uniaxial (Modelo Episensor ES-U2, Kinematics).

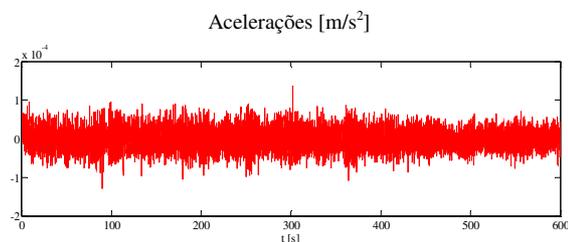
Foram realizados dois ensaios de vibração ambiental na torre com medição de acelerações segundo a direcção montante-jusante e na direcção margem esquerda-margem direita. Os registos das acelerações foram efectuados considerando uma frequência de amostragem de 50 Hz e um tempo de aquisição de 10 minutos.

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 Figura 8 a). Na Figura 8 b) apresenta-se o registo de acelerações obtido neste ensaio e na Figura 9 mostra-se o respectivo espectro de amplitudes obtido pela técnica da transformada de Fourier (decomposição do acelerograma em ondas), utilizando médias espectrais calculadas com base em janelas temporais de 100 s, sobrepostas a 2/3.



a)



b)

Figura 8: a) Esquema da colocação do acelerómetro uniaxial na direcção montante-jusante; b) 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.

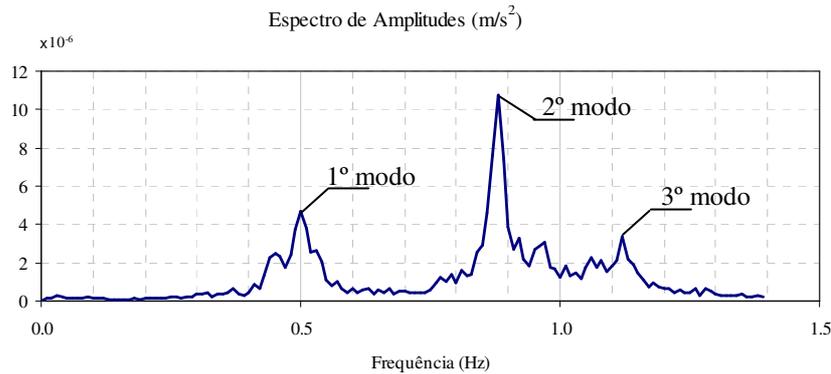


Figura 9: Espectro de amplitudes correspondente ao acelerograma medido na direcção montante-jusante.

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 Figura 10 a). Obteve-se o registo de acelerações que se apresenta na Figura 10 b) e o respectivo espectro de amplitudes que se mostra na Figura 11 (obtido como no caso anterior).

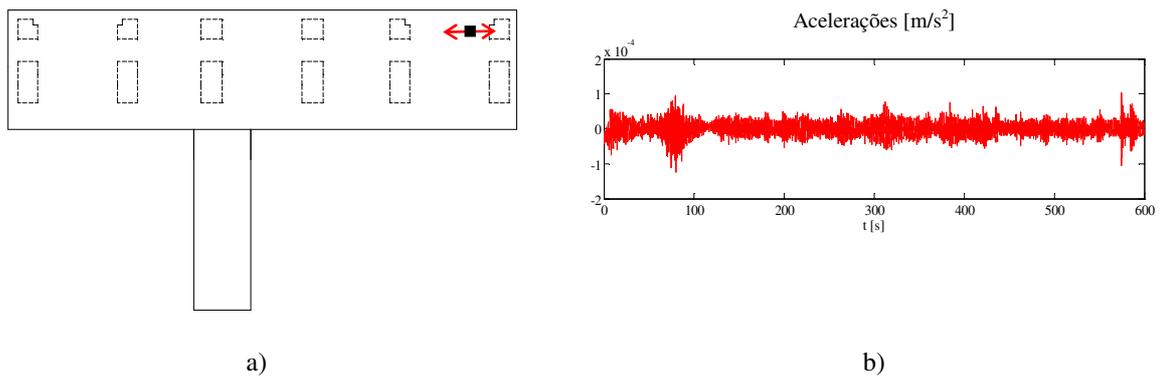


Figura 10: a) Esquema da colocação do acelerómetro uniaxial na direcção margem esquerda-direita; b) Registo de acelerações medidas na direcção margem esquerda-direita.

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.

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.

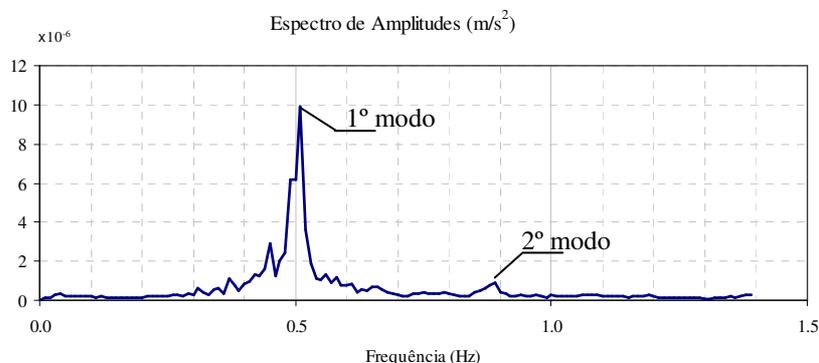


Figura 11: Espectro de amplitudes correspondente ao acelerograma medido na direcção margem esquerda-direita.

3.4. Comparação entre 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.

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.

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

4. CÁLCULO SÍSMICO COM O PROGRAMA EM MATLAB

Como já se referiu atrás, foi desenvolvido em MatLab [6] um programa para efectuar uma análise sísmica da torre das tomadas de água com base num modelo bidimensional de elementos finitos de placa de 8 nós com 2 G.L. por nó (secção de análise na direcção montante-jusante). Este modelo 2D foi calibrado com base nos ensaios de vibração ambiental realizados na torre e também com base nos resultados numéricos obtidos com o modelo 3D em SAP 2000.

O acelerograma sísmico considerado neste estudo, que se apresenta na Figura 12 a), foi estimado com base num modelo de rotura de falha [7] 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 mostra na Figura 12 a).

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 com o referido modelo bidimensional, 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 do deslocamento máximo de um ponto localizado no topo da torre na direcção montante-jusante como se observa na Figura 12 b).

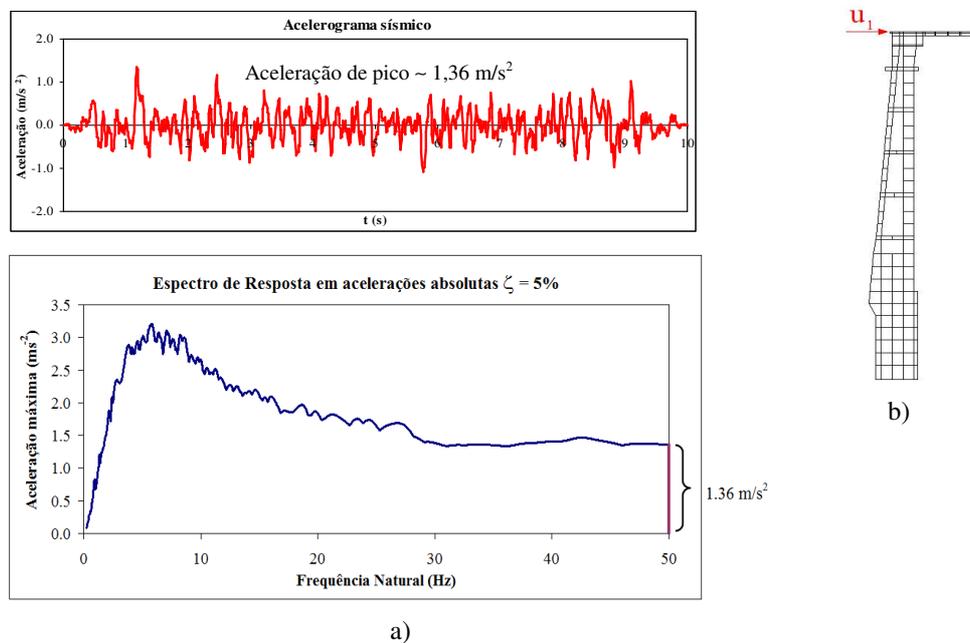


Figura 12: a) Acelerograma sísmico considerado e correspondente espectro de resposta em acelerações absolutas ($\zeta = 5\%$); b) Ponto no topo da torre na direcção montante-jusante em que será efectuada o cálculo sísmico.

No programa introduzem-se os dados relativos ao espectro de resposta em acelerações absolutas apresentado na figura anterior e os espectros de resposta em velocidades e deslocamentos relativos são gerados a partir deste (dividindo por ω e por ω^2 , respectivamente), designando-se assim por pseudo-espectros.

Para efectuar uma análise sísmica por espectro de resposta, primeiro é necessário determinar as coordenadas modais máximas relativas aos modos de vibração que contribuem significativamente para a resposta da estrutura. Na Figura 13 apresenta-se uma comparação entre os valores das coordenadas modais (calculadas com base numa análise no domínio do tempo) referentes aos quatro primeiros modos de vibração, e os valores máximos dessas mesmas coordenadas modais calculadas pelo método do espectro de resposta. Como se pode verificar, na Figura 13 as coordenadas modais são representadas nos planos $u_1 - u_2^*$ e $u_3 - u_4^*$ através de pontos nesses planos. Os valores calculados no tempo correspondentes aos pontos (a verde) e os valores máximos calculados por espectro de resposta são utilizados para traçar as elipses (representadas a vermelho), as quais correspondem a uma envolvente que equivale à utilização da regra de combinação RQSQ (raiz quadrada da soma dos quadrados), como é referido em [8], de acordo com uma contribuição original do Eng.º Ricardo Teixeira Duarte.

Na Figura 13 pode-se verificar que as referidas elipses, cujos semi-eixos correspondem aos valores máximos das coordenadas modais calculadas pelo método do espectro de resposta, envolvem quase perfeitamente os pontos representados das coordenadas modais, calculadas com base na análise no domínio do tempo (para o acelerograma sísmico da Figura 12). É ainda de referir que cada ponto (a verde) na Figura 13 corresponde a um instante de tempo, ao qual está associada uma dada deformada estrutural, como se mostra na figura para três instantes distintos. Nesta figura, pode-se ainda constatar, pela análise das duas elipses, que o 3º e o 4º modos não têm uma contribuição muito significativa para a resposta total da estrutura (a segunda elipse – 3º e 4º modos – é claramente menor que a primeira), contrariamente ao 1º e 2º modos que revelam ser significativamente mais importantes, em particular o 1º modo (o semi-eixo longitudinal da primeira elipse é significativamente maior que o seu semi-eixo vertical). Por fim é de notar que, apesar das elipses envolverem a maioria dos pontos representativos das coordenadas modais para cada instante de tempo, alguns pontos estão ligeiramente fora das elipses (mas sempre no interior do rectângulo que contém a elipse), o que significa que a regra RQSQ neste caso, não envolve completamente todas as situações.

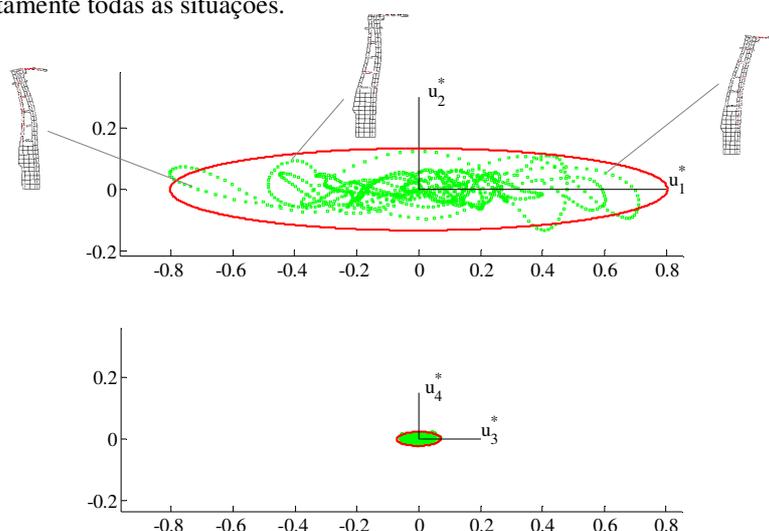


Figura 13: Representação das coordenadas modais para os quatro primeiros modos de vibração (nos planos $u_1^* - u_2^*$ e $u_3^* - u_4^*$). Representação das elipses envolventes determinadas pelo método do espectro de resposta e representação das coordenadas modais ao longo do tempo.

Na Tabela 2 apresentam-se os resultados obtidos para o deslocamento máximo no topo da torre das tomadas de água (grau de liberdade 1) calculado no domínio do tempo e pelo método do espectro de resposta a partir das regras de combinação de modos RQSQ e CQC (combinação quadrática completa).

Tabela 2 – Análise comparativa do deslocamento máximo no topo da torre obtido através de um cálculo no domínio do tempo e pelo método do espectro de resposta (RQSQ e CQC).

	Domínio do tempo	RQSQ	CQC
Modelo 2D (MatLab)	+ 0,0371 m - 0,0328 m	0,0348 m	0,0348 m

Importa salientar que os resultados foram obtidos a partir do espectro de resposta que corresponde exactamente ao acelerograma sísmico que se mostra na Figura 12. Todavia, os espectros regulamentares usualmente adoptados em projecto, são representativos de um vasto conjunto de acelerogramas, constituindo portanto, uma envolvente espectral que tem em conta o período de retorno da acção sísmica, as incertezas na definição das acções, coeficientes de segurança, efeitos não lineares no comportamento das estruturas, etc. Deste modo, o valor máximo absoluto obtido no domínio do tempo utilizando um único acelerograma sísmico, neste caso,

+0,0371 m, pode não traduzir adequadamente a resposta máxima da estrutura. Neste caso a regra RQSQ é equivalente à regra CQC, tal como se constata pela análise dos valores obtidos para os deslocamentos máximos calculados por estas duas regras de combinação de máximos modais. Como se mostra na tabela, o valor de pico do deslocamento u_1 (topo da torre, segundo a direcção montante-jusante) obtido no domínio do tempo, $u_{1,máx} = +0,0371$ m, é bastante próximo dos valores máximos obtidos pelo método do espectro de resposta ($u_{1,máx} = +0,0348$ m com a regra RQSQ e $u_{1,máx} = +0,0348$ m com a regra 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 [3] e de resultados provenientes do sistema de observação em contínuo recentemente instalado na barragem do Cabril [1, 2]), 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 bastante semelhantes, embora tenha sido utilizado apenas o espectro de resposta correspondente ao acelerograma em análise.

O acompanhamento da evolução do comportamento dinâmico da torre através da análise dos resultados do sistema de observação em contínuo instalado no corpo da barragem, permite avaliar a evolução ao longo do tempo do estado de conservação da barragem e da torre. Eventuais alterações nas frequências dos picos espectrais correspondentes aos modos de vibração da torre podem indiciar 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. REFERÊNCIAS

- [1] Oliveira, S. (2002) "Continuous monitoring system for the dynamic performance assessment of arch dams. Sub-programme D", in Programa de candidatura "Study of evolutive deterioration processes in concrete dams. Safety control over time.". Projecto de re-equipamento científico (LNEC-FEUP) financiado pela FCT (REEQ/815/ECM/2005).
- [2] Mendes, P. (2009) Observação e análise do comportamento dinâmico de barragens de betão, *Tese de Doutoramento*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- [3] 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.
- [4] Xerez, C. (1954) O aproveitamento do Cabril, Separata da "Técnica".
- [5] Mendes, P. (2005) Observação e análise do comportamento dinâmico de barragens de betão sob excitação ambiente, *Tese de Mestrado*, Instituto Superior Técnico.
- [6] 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.
- [7] Carvalho, A. (2007) Modelação estocástica da acção sísmica em Portugal continental, *Tese de Doutoramento*, Instituto Superior Técnico.
- [8] Câmara, R. (1989) Modelos para estudo do comportamento dinâmico de barragens de betão pelo método dos elementos finitos. *Tese para Especialista*, LNEC, Lisboa.