

ENSAIOS DE VIBRAÇÃO FORÇADA PARA A CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE BARRAGENS DE BETÃO. APLICAÇÃO À BARRAGEM DE CAHORA BASSA



Jorge Pereira Gomes

Investigador Auxiliar
Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Lisboa, Portugal
jgomes@lnec.pt



Ezequiel Carvalho

Direção de Engenharia e Manutenção
Hidroeléctrica de Cahora Bassa
Songo, Moçambique
ezequiel.carvalho@hcb.co.mz

SUMÁRIO

A determinação do comportamento dinâmico das obras e o acompanhamento da sua evolução durante as várias fases da vida é muito importante, e está inserido nas atividades do controle de segurança estrutural. A realização dos ensaios de vibração forçada em barragens para a determinação do comportamento dinâmico continua a ser uma das técnicas mais fiáveis nesta área. Nesta comunicação descreve-se a metodologia de ensaio, incluindo os desenvolvimentos recentemente efetuados, e como exemplo de aplicação, apresentam-se os resultados relativos a um ensaio realizado para caracterização do comportamento dinâmico da barragem de Cahora Bassa, incluindo o modelo matemático desenvolvido para a sua interpretação.

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

1. INTRODUÇÃO

O acompanhamento do comportamento real das estruturas é fundamental, não só para validar os modelos numéricos desenvolvidos mas também para poder detetar situações anómalas e intervir atempadamente na sua resolução de forma a evitar qualquer tipo de acidente estrutural. A avaliação periódica do comportamento dinâmico das estruturas é uma ferramenta importante porque permite detetar a partir da alteração do comportamento dinâmico da obra as correspondentes modificações estruturais ocorridas durante esse período. Estas alterações podem incidir unicamente na evolução das características mecânicas do material da obra (favorável ou desfavorável), na variabilidade das ações, ou na existência de alterações estruturais importantes (fissuração importante). Para a implementação desta metodologia é útil determinar o comportamento dinâmico das obras para um determinado estado e a partir dessa altura acompanhar a sua evolução. Este acompanhamento é importante e está inserido nas atividades do controle de segurança estrutural da obra.

Ao longo dos últimos anos, têm sido desenvolvidos no LNEC, técnicas para a realização de ensaios de vibração forçada em barragens de betão para a caracterização do seu comportamento dinâmico. As metodologias de ensaio inserem-se num processo de evolução contínua, tendo sido implementadas ao longo do tempo melhorias consideráveis, nomeadamente, no controle das ações dinâmicas aplicadas à barragem, na fiabilidade dos registos obtidos relativamente ao comportamento estrutural e no seu tratamento com vista à identificação dos parâmetros dinâmicos da estrutura. O ensaio de vibração forçada consiste na aplicação a uma estrutura de uma força com uma variação no tempo sinusoidal perfeitamente conhecida, materializada através de um vibrador. Nesta comunicação descreve-se a metodologia de ensaio, incluindo os desenvolvimentos recentes efetuados, e como exemplo de aplicação, apresentam-se os resultados relativos a um ensaio realizado para caracterização do comportamento dinâmico da barragem de Cahora Bassa, incluindo o modelo matemático desenvolvido para a sua interpretação.

2. CARACTERÍSTICAS DOS ENSAIOS DE VIBRAÇÃO FORÇADA

2.1 Generalidades

O ensaio de vibração forçada consiste na aplicação a uma estrutura de uma força com uma variação no tempo sinusoidal perfeitamente conhecida. Esta ação vai provocar nas estruturas, em regra, um movimento vibratório forçado com a mesma frequência de variação no tempo da força aplicada (embora desfasada) e com amplitudes que, para além da intensidade da força, dependem da sua frequência de aplicação e das frequências naturais da estrutura.

Tirando partido do facto de se verificar um significativo aumento da amplitude da resposta da estrutura 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, das suas ligações ao exterior e das solicitações das ações permanentes. 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 matemático, poderá permitir a localização das zonas da estrutura onde se verifiquem os processos de deterioração dos materiais.

O acompanhamento deste tipo de ensaio, através de um modelo matemático de análise do comportamento estrutural da barragem, auxilia a interpretação do ensaio e permite a validação do próprio modelo matemático (em particular, a identificação dos diferentes parâmetros estruturais).

Este modelo matemático poderá ser posteriormente utilizado na determinação da resposta da estrutura para outras ações dinâmicas, designadamente, para ações sísmicas. No entanto, com a intensidade da força aplicada durante o ensaio de vibração forçada não pode provocar danos na estrutura, quando o modelo matemático calibrado durante o ensaio for utilizado na avaliação da resposta da estrutura a ações que provoquem níveis de tensão elevados, os seus parâmetros estruturais deverão ser convenientemente adaptados.

Nesta comunicação, é apresentada a componente experimental deste processo, descrevendo-se em seguida a metodologia atualmente utilizada, por varrimento discreto em frequência, que está devidamente estabilizada através dos inúmeros ensaios já realizados com resultados muito satisfatórios. Apresenta-se também uma nova metodologia que é proposta para a realização dos ensaios de vibração forçada que consiste na aplicação da ação dinâmica através de um varrimento contínuo em frequência (sine sweep). Esta nova metodologia está na fase de desenvolvimento final e será testada num ensaio a realizar ainda este ano numa grande barragem portuguesa, em que serão utilizados os dois processos para comparação de resultados e sua posterior validação.

2.2 Varrimento discreto em frequência

A metodologia desenvolvida no LNEC, e a qual tem vindo a ser constantemente melhorada, com a implementação de meios automáticos de controle e aplicação da força, de medição da resposta e posterior tratamento, baseia-se num varrimento discreto em frequência (normalmente é utilizada uma discretização de 0,1 Hz). A excitação da estrutura é materializada por um vibrador de massa excêntrica, que vai aplicando uma força sinusoidal perfeitamente conhecida em termos de frequência e amplitude. Para cada valor de frequência imposta é medida a resposta da estrutura em pontos representativos do seu comportamento, sendo posteriormente determinado o valor da amplitude máxima e fase para cada frequência imposta. Com estes valores são obtidas as funções de 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 (Figura 1).

A determinação dos valores experimentais da resposta da estrutura passa pelo cálculo da amplitude máxima da grandeza física medida (aceleração, velocidade ou deslocamento), para a frequência imposta. Como o ensaio é efetuado por varrimento discreto de frequência vai existir um registo por cada valor de frequência imposta, aplicando técnicas de tratamento digital do sinal para eliminar os conteúdos em frequência indesejados, consegue-se determinar o valor da amplitude da resposta.

Um dos grandes problemas na identificação da resposta dinâmica das estruturas está relacionado com o nível dos valores medidos para que seja possível, isolar dos registos, a componente relativa à resposta dinâmica da estrutura. O ensaio de vibração forçada tem uma grande vantagem relativamente a outras técnicas, porque ao aplicar uma excitação à estrutura, por um lado, aumenta os valores medidos relativamente à resposta dinâmica (garantindo uma maior fiabilidade dos resultados) e por outro lado, consegue sobrepor-se a outras fontes de ruído “obrigando” a estrutura a responder unicamente para a excitação imposta.

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.

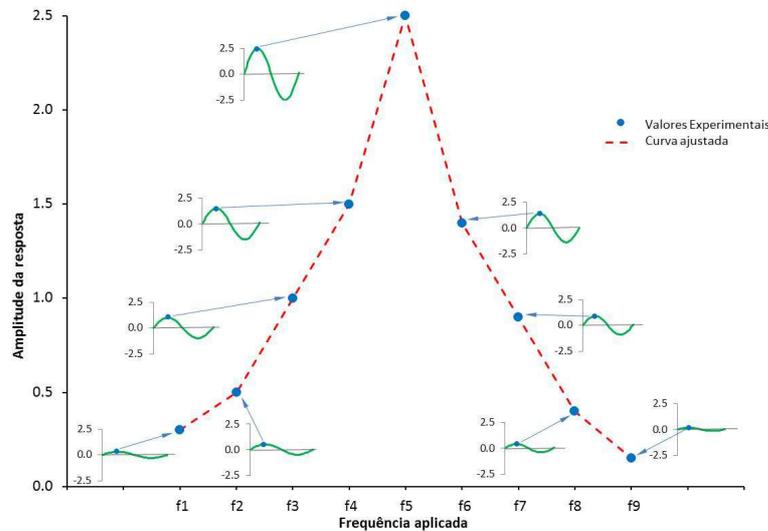


Figura 1 – Função de transferência em frequência da resposta de um ponto da estrutura obtida num ensaio de vibração forçada por varrimento discreto de frequência (uma frequência própria da estrutura estará na vizinhança de f5)

2.3 Varrimento contínuo em frequência

A metodologia descrita no ponto anterior, apesar de extremamente eficiente, é um pouco demorada devido ao facto de ser necessário efetuar uma discretização em frequência no intervalo considerado fundamental, que pode ser de duas dezenas de hertz, por forma a obter uma boa caracterização do comportamento dinâmico da estrutura. Devido essencialmente a este fator, está nesta altura em fase de desenvolvimento final uma metodologia baseada na aplicação da ação através de um varrimento contínuo em frequência (sine sweep). Esta metodologia baseia-se em aplicar à estrutura uma ação dinâmica sinusoidal variando a frequência continuamente entre dois valores previamente definidos (frequência inicial e final, Figura 2). A validação destes procedimentos será efetuada através da comparação de resultados obtidos pelas duas metodologias. Um fator extremamente importante e condicionador dos resultados será a velocidade de variação da frequência imposta à estrutura durante o ensaio. O ensaio deve ser lento para que toda a estrutura responda na mesma frequência. Durante a campanha experimental será também avaliado o efeito que a velocidade de variação da frequência tem na resposta dinâmica da barragem.

A determinação da resposta dinâmica da estrutura será efetuada através do cálculo da FRF (*Frequency Response Function*), entre as séries registadas nos sensores instalados ao longo do corpo da barragem e o registo da força gerada pelo vibrador e aplicada na estrutura. As frequências próprias da estrutura situar-se-ão na proximidade dos valores máximos da FRF ocorridos no intervalo de frequência que a estrutura foi excitada que correspondam a modos de vibração da barragem. Da mesma forma que para a metodologia

anterior, são determinados os valores modais caracterizadores do comportamento dinâmico da estrutura a partir dos valores discretos da resposta obtidos experimentalmente.

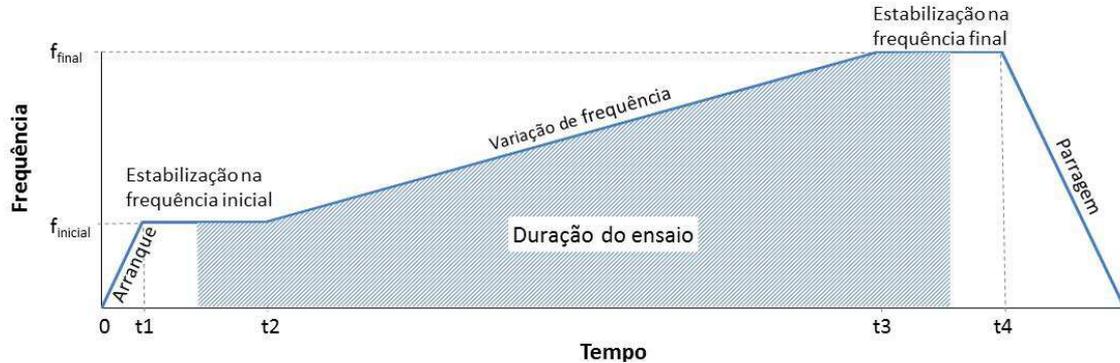


Figura 2 – Metodologia do ensaio de vibração forçada por varrimento contínuo de frequência (sine sweep)

2.4 Identificação dos parâmetros modais

A partir dos valores das funções de transferência determinados (ou FRF), é necessário calcular os parâmetros modais relativos ao comportamento dinâmico da estrutura. Embora possa ser perceptível, por simples visualização detetar aproximadamente as frequências próprias da estrutura que correspondem à vizinhança dos valores máximos da FRF, é necessário proceder ao seu cálculo uma vez que esta função foi obtida de uma forma discreta.

Considerando um sistema linear invariante no tempo, admitindo a hipótese do amortecimento modal ser do tipo proporcional viscoso, em função das componentes de vibração não amortecidas, a FRF pode ser representada da seguinte forma:

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

em que $H_{ij}(w)$ representa a relação no domínio da frequência w entre a resposta em deslocamento do sistema no grau de liberdade i e a força aplicada no grau de liberdade j , determinada para os N modos de vibração caracterizados pelas frequências próprias w_k e os respetivos amortecimentos modais ξ_k .

Numa primeira fase pode-se utilizar métodos de 1 grau de liberdade (SDOF, *Single Displacement of Freedom*) para estimar os valores modais. Existe uma infinidade de técnicas que usam este método mas que pouco diferem entre si (métodos: da amplitude de pico, da resposta em quadratura, do “circle fit”, de Dobson, de Mau, etc.). A hipótese comum a todas as técnicas é de que na vizinhança de uma ressonância a resposta dinâmica da estrutura é dominada pela contribuição do modo ressonante, pelo que se existirem modos relativamente próximos estas técnicas podem induzir resultados erróneos.

Em problemas de engenharia civil é vulgar encontrar estruturas com frequências próprias próximas, ou com coeficientes de amortecimento modal relativamente elevados, o que gera uma interferência modal que se traduz numa contribuição significativa dos modos não-ressonantes para a resposta na vizinhança de uma frequência própria, o que invalida a utilização de métodos de 1 grau de liberdade (SDOF).

Nestas situações é necessário recorrer a métodos mais potentes que realizem o ajuste da FRF completa, procedendo à determinação em simultâneo dos parâmetros modais relativos a todos os modos de vibração intervenientes, que são usualmente designados por métodos de N graus de liberdade (MDOF, *Multiple Displacement of Freedom*), utilizados na determinação dos parâmetros modais com base nos resultados do ensaio de vibração forçada. As técnicas utilizadas na determinação dos parâmetros modais quer sejam relativas a SDOF ou MDOF baseiam-se normalmente na minimização de um erro quadrático através dos mínimos quadrados. A consideração de MDOF implica a consideração da expressão completa da FRF originando que a determinação dos parâmetros modais implica a resolução de um sistema de equações não-lineares, efetuadas através de um processo iterativo, ou em apenas uma etapa, quando se proceda à linearização dessas equações.

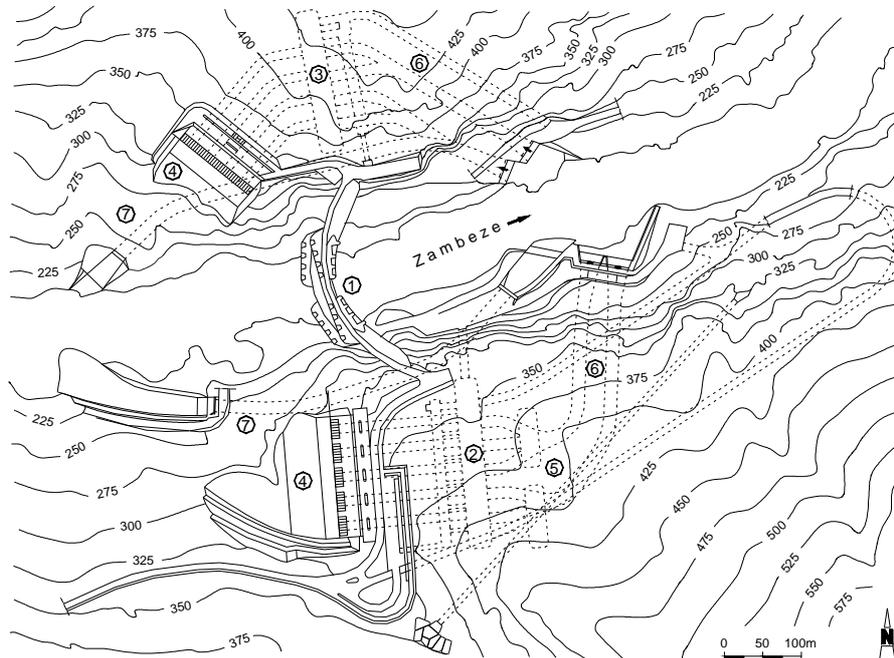
3. EXEMPLO DE APLICAÇÃO

3.1 Estruturas do aproveitamento

O aproveitamento hidroeléctrico de Cahora Bassa localiza-se no rio Zambeze, nas proximidades do Songo, província de Tete, em Moçambique (Figura 3), sendo essencialmente constituído pela barragem em betão, que cria uma albufeira com cerca de 66000 hm³, e pela central subterrânea sul. A barragem é uma abóbada de dupla curvatura com uma altura máxima, medida a partir do nível inferior das fundações, de 166 m. O coroamento tem um desenvolvimento de 303 m, a relação corda/altura é de 1,54 e a espessura varia, na consola central, desde 4 m no coroamento até 23 m na base. O coroamento e o nível de pleno armazenamento (NPA) situam-se às cotas 331 m e 326 m, respetivamente.

A barragem é dotada de um descarregador central de superfície, do tipo “volet”, com uma capacidade de vazão de 600 m³/s, e de 8 descarregadores de meio fundo, identificados com os números 1, 3, 5 e 7 do lado da margem esquerda, e com os números 2, 4, 6 e 8 do lado da margem direita, em ambos os casos numerados no sentido do eixo para as margens, cada um com um caudal máximo de 1 600 m³/s, perfazendo uma capacidade de descarga total de 13 400 m³/s (Figura 4).

A barragem foi construída entre Setembro de 1972 e Março de 1975. O primeiro enchimento da albufeira iniciou-se em 7 de Dezembro de 1974, ainda antes do corpo da barragem estar totalmente betonado.



- | | |
|--|---|
| 1 – Barragem | 5 – Chaminés de equilíbrio |
| 2 – Central sul | 6 – Galerias de restituição |
| 3 – Central norte (a construir em 2ª fase) | 7 – Galerias de derivação provisória do rio |
| 4 – Tomadas de água | |

Figura 3 – Planta do aproveitamento de Cahora Bassa



Figura 4 – Barragem de Cahora Bassa. Vista de jusante em Julho de 2008

3.2 Descrição dos ensaios realizados

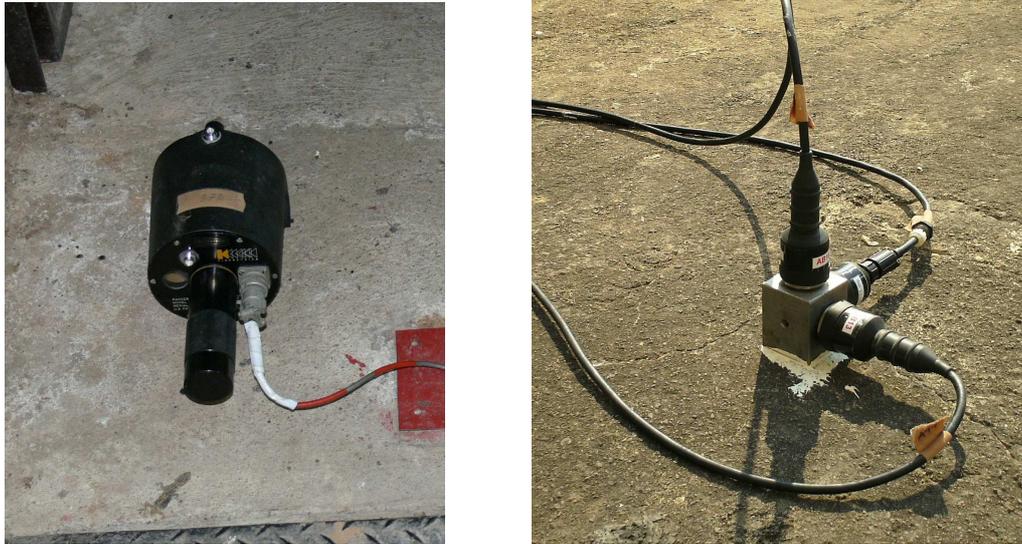
No ensaio de vibração forçada realizado na barragem de Cahora Bassa em Julho de 2008 [1], utilizou-se um vibrador de massa excêntrica para impor forças horizontais harmónicas com diferentes amplitudes e frequências (Figura 5). Foi utilizado um vibrador de massa excêntrica de um só braço, desenvolvido no LNEC ([2], [3]), em que a frequência de rotação pode variar numa gama de 1 a 30 Hz, dependendo da configuração de massas utilizada, aplicando forças harmónicas cuja amplitude máxima admissível, condicionada pela resistência da estrutura do vibrador, é de cerca de 160 kN.

A resposta dinâmica da estrutura para as várias frequências de excitação impostas foi medida por intermédio de transdutores de velocidade (Kinematics, modelo SS-1) e acelerómetros (PCB modelo 481, Figura 6) colocados em vários pontos da estrutura (Figura 7). O ensaio foi realizado por varrimento discreto, em que se aplicaram frequências de excitação entre 1,5 e 9,8 Hz (aproximadamente de 0,1 em 0,1 Hz), e a resposta da barragem foi medida em termos de componentes radiais, tangenciais e verticais das velocidades e acelerações nos vários pontos de medição. Para garantir uma melhor excitação da barragem, e consequentemente resultados mais fiáveis, foram usadas várias configurações de massa colocadas no vibrador, utilizando-se massas grandes para frequências de excitação mais baixas e massas pequenas que permitem aplicar frequências mais elevadas.

Após a identificação das frequências próprias dos primeiros modos de vibração da barragem, a respetiva configuração foi determinada medindo a amplitude e orientação do movimento nos vários pontos da estrutura quando o vibrador funcionava em cada uma dessas frequências.



Figura 5 – Vista do vibrador de massa excêntrica colocado no local do ensaio



a)

b)

Figura 6 – Pormenor de colocação: a) um medidor de velocidade e b) dos acelerómetros

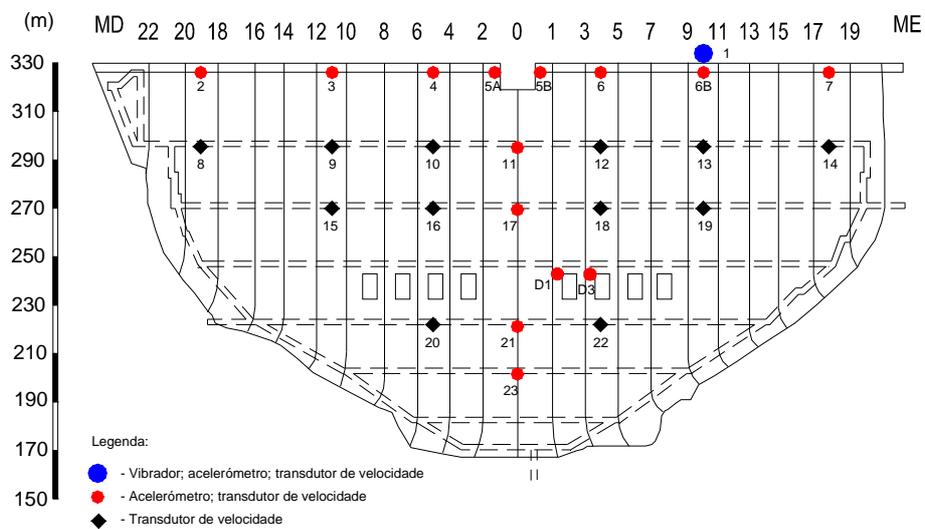


Figura 7 – Plano de colocação da aparelhagem utilizada durante o ensaio de vibração forçada

3.3 Modelo matemático

Para interpretar os resultados dos ensaios realizados, foi desenvolvido e utilizado, com o programa 3DEC [4], um modelo numérico de elementos finitos com representação da barragem [5]. O modelo foi discretizado em 257 elementos tridimensionais, tipo cubo,

isoparamétricos do 2º grau, com 20 pontos nodais, formando uma malha com um total de 4377 pontos nodais (Figura 8).

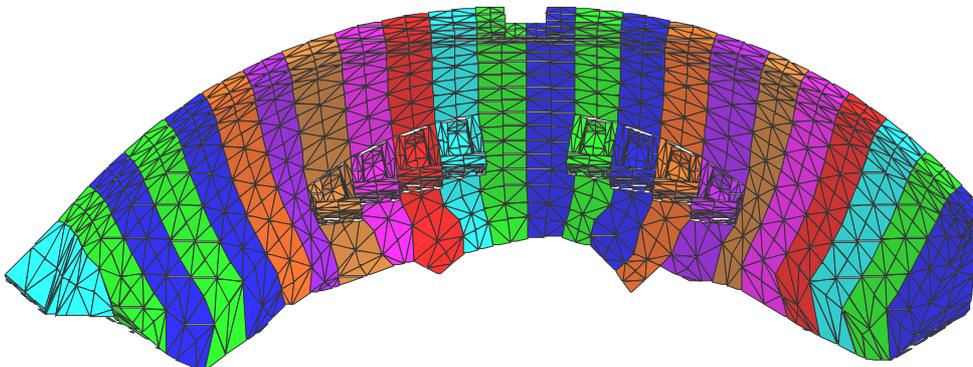


Figura 8 – Modelo matemático.

Dado que a condição de fronteira na superfície de inserção da barragem pouco afeta os modos de vibração e respetivas frequências, considerou-se, para interpretação do ensaio, o encastramento da barragem na zona da inserção. O tempo de cálculo deste modelo é substancialmente menor do que um modelo que englobasse a fundação, e sem qualquer tipo de perda de fiabilidade em termos da exatidão deste tipo de resultados. Tendo em conta que o nível da ação imposta pelo vibrador no decorrer do ensaio é relativamente reduzido, é de esperar uma resposta em regime elástico linear da barragem.

O modelo matemático foi calibrado com os resultados do ensaio, considerando para o material da barragem um módulo de elasticidade dinâmico de 50 GPa, um coeficiente de Poisson de 0,2 e massas volúmicas do betão de 2 400 kg/m³ e da água de 1 000 kg/m³.

3.4 Comparação com o modelo matemático

Apresenta-se na Figura 9, a comparação das configurações modais dos dois primeiros modos de vibração, verificando-se uma razoável aproximação. No Quadro 1, são comparadas as frequências próprias determinadas pelos dois métodos.

Após a calibração do modelo matemático com base nos resultados do ensaio provenientes dos primeiros modos de vibração, foi simulada a execução do ensaio tendo-se obtido a resposta da estrutura em termos de deslocamento para as forças impostas pelo vibrador. Na Figura 10, apresenta-se a comparação de resultados em termos das funções de transferência de força para deslocamento em alguns pontos de medição. De uma forma geral, verifica-se uma razoável aproximação para as frequências mais baixas. Para as frequências mais altas nota-se que o modelo matemático apresenta valores de deslocamento superiores aos registados no ensaio. Este facto era expectável, porque foi adotado unicamente a parcela proporcional à massa do amortecimento de Rayleigh.

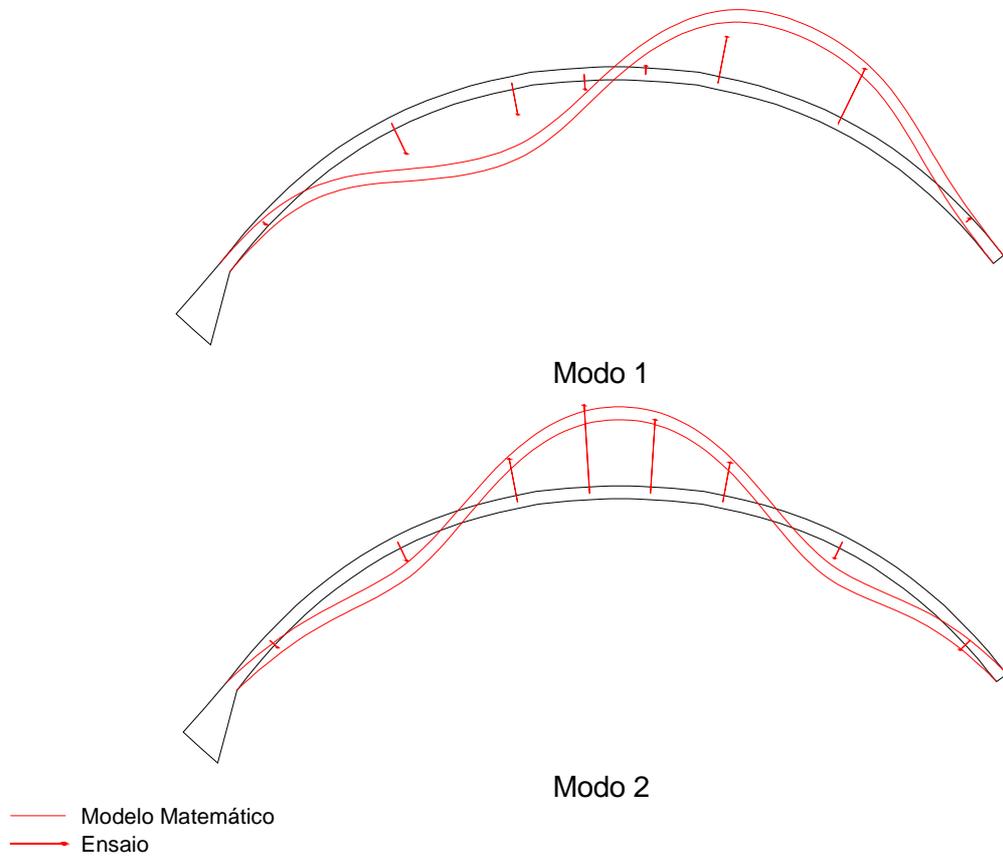


Figura 9 – Comparação das configurações dos dois primeiros modos de vibração.

Quadro 1 - Frequências próprias dos primeiros modos de vibração, obtidas experimentalmente e numericamente

Modo de vibração	Frequência (Hz)	
	Ensaio	Mod. Matemático
1	1,75	1,76
2	2,15	2,06
3	2,70	3,25
4	3,25	3,27
5	--	3,98
6	--	4,19

Ponto 3

Ponto 4

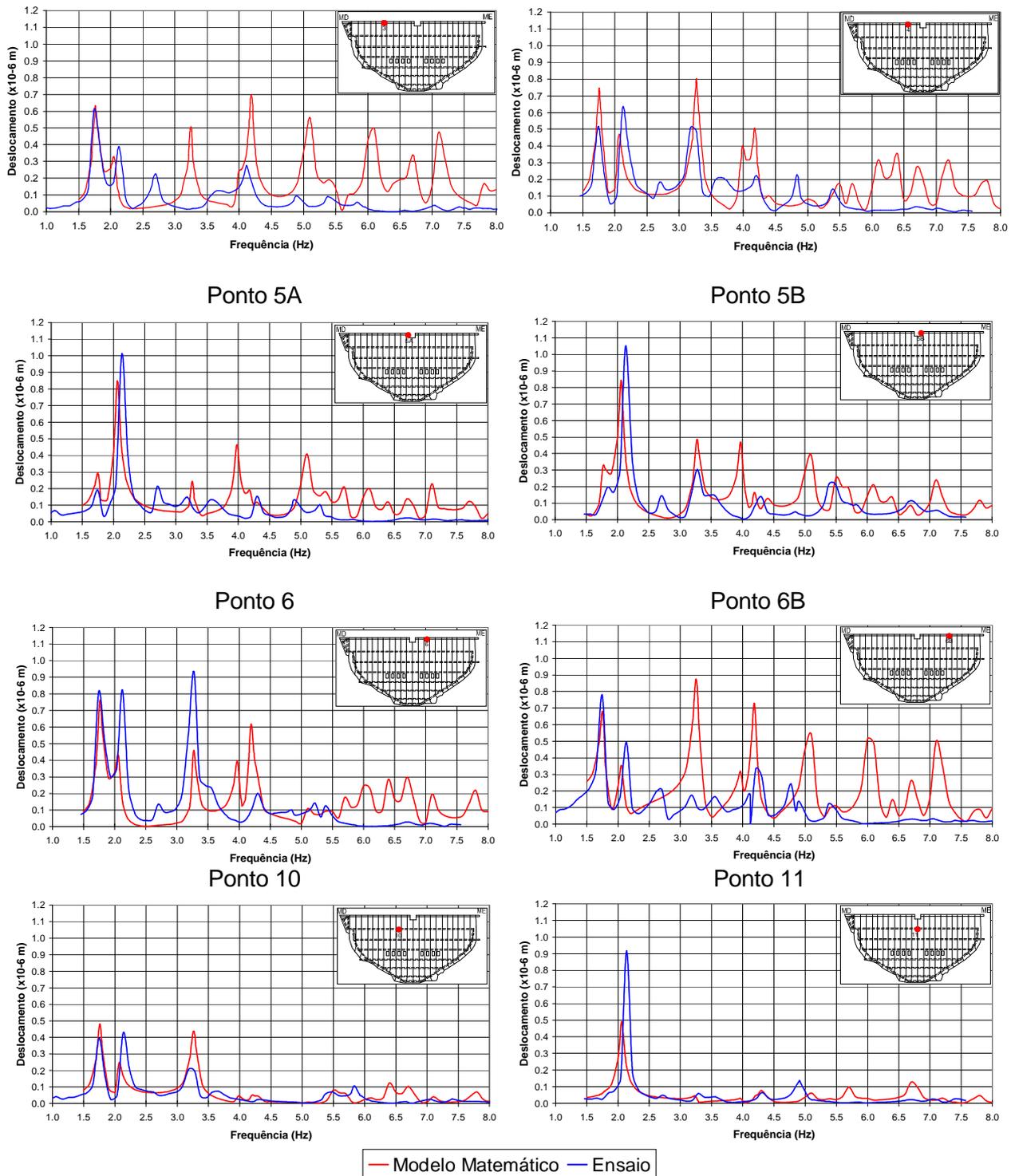


Figura 10 – Funções de transferência de força para deslocamento radial nos pontos 3, 4, 5A, 5B, 6, 6B 10 e 11. Comparação dos valores experimentais com os obtidos através do modelo matemático.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A avaliação periódica do comportamento dinâmico das estruturas é uma ferramenta importante porque permite detetar a partir da alteração do comportamento dinâmico da obra as correspondentes modificações estruturais ocorridas durante esse período. A realização dos ensaios de vibração forçada em barragens para a determinação do comportamento dinâmico continua a ser uma das técnicas mais fiáveis nesta área.

Nesta comunicação, apresentam-se duas metodologias para a realização de ensaios de vibração forçada, com o objetivo da determinação do comportamento dinâmico real das estruturas. Uma primeira metodologia, já devidamente estabilizada e plenamente fiável, que se baseia na determinação do comportamento dinâmico da estrutura por varrimento discreto de frequência, e uma segunda, que está em fase final de desenvolvimento e será aplicada brevemente numa grande barragem portuguesa, aplicando um varrimento contínuo de frequência (*sine sweep*). Esta nova metodologia vai permitir, por um lado, incrementar a robustez deste tipo de ensaios, e por outro lado, avaliar o efeito que a velocidade de variação da frequência tem na resposta dinâmica da barragem

Como exemplo de aplicação apresentam-se os resultados de um ensaio de vibração forçada realizado na barragem de Cahora Bassa em julho de 2008, utilizando a metodologia de varrimento discreto de frequência. Os resultados experimentais serviram para calibrar um modelo numérico de elementos finitos desenvolvido no 3DEC, que posteriormente, com alguns ajustes, foi utilizado para efetuar a análise sísmica da barragem.

A realização futura de outro ensaio de vibração forçada nesta barragem (em condições semelhantes de nível de água na albufeira e de temperatura) permitirá determinar a evolução do estado geral da barragem.

REFERÊNCIAS

- [1] LNEC. – *Aproveitamento hidroeléctrico de Cahora Bassa ensaio de vibração forçada realizado na barragem em julho de 2008*. Relatório nº 136/2009, LNEC, 2009.
- [2] LNEC - *Vibrador mecânico. Projecto, construção e montagem*. Relatório, LNEC, 1965.
- [3] LNEC - *Sistema electrónico de variação de frequência para um vibrador de ensaios dinâmicos*. Relatório130/95, LNEC, 1995.
- [4] Itasca - *3DEC, 3-Dimensional Distinct Element Code, Version 4.0, User's Manual*. Itasca Consulting Group. Minneapolis, 2006.
- [5] Lemos, J.V. – “Discrete element analysis of dam foundations”, *em Distinct Element Modelling in Geomechanics* (eds. Sharma, Saxena & Woods), Balkema, p. 89-115, 1999.