

# PRESSÕES HIDRODINÂMICAS EM BARRAGENS ABÓBADA: RESULTADOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS

## HYDRODYNAMIC PRESSURES ON ARCH DAMS: NUMERICAL AND EXPERIMENTAL RESULTS

A. Alegre<sup>1</sup>, S. Oliveira<sup>2</sup>, M. Espada<sup>3</sup>, R. Câmara<sup>4</sup>, J. V. Lemos<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Bolseiro de Doutoramento, NMMR - DBB - ISEL, Lisboa, Portugal.

<sup>2</sup>Investigador Auxiliar, NMMR – DBB - LNEC, Lisboa, Portugal.

<sup>3</sup>Bolseira de Doutoramento, NMMR – DBB - LNEC, Lisboa, Portugal

<sup>4</sup>Investigador Coordenador, NMMR – DBB - LNEC, Lisboa, Portugal.

### RESUMO

*Com o objetivo de desenvolver novos modelos numéricos para análise do comportamento dinâmico de sistemas barragem-fundação-albufeira, apresenta-se uma formulação “coupled” de elementos finitos 3D, em deslocamentos e pressões, baseada numa abordagem de estado, e na utilização de coordenadas modais complexas. Com vista a verificar a fiabilidade do modelo desenvolvido, apresenta-se: i) uma comparação de resultados numéricos e experimentais das distribuições de pressões hidrodinâmicas em barragens com paramentos verticais e inclinados, bem como a análise das diferenças verificadas para a solução analítica de Westergaard (válida para paramentos verticais); e ii) a análise do comportamento dinâmico da barragem do Cabril (abóbada de dupla curvatura), efetuando a comparação entre resultados numéricos e de identificação modal, obtidos a partir dos dados experimentais recolhidos pelo sistema de monitorização de vibrações dinâmicas em contínuo instalado na obra. Comparam-se frequências naturais e modos de vibração.*

### ABSTRACT

*With the aim of developing new numerical models to analyse the dynamic behaviour of dam-reservoir-foundation systems, it is presented a 3D finite element coupled formulation, in displacements and pressures, based on a state space approach using complex modal coordinates of the whole system. To assess the reliability of the developed model it is presented: i) a comparison of numerical and experimental results concerning the distributions of hydrodynamic pressures on dams with vertical and sloped upstream faces, as well as an analysis of the verified differences for analytical solution of Westergaard (valid for vertical upstream faces); and ii) the analysis of the dynamic behaviour of Cabril dam (double curvature arch), by performing a comparison between numerical and modal identified results, which were obtained from the experimental data collected by the continuous monitoring system of dynamic vibrations installed at the dam site. Natural frequencies and vibration modes were compared.*

## 1. INTRODUÇÃO

Na modelação do comportamento dinâmico de barragens sob ações sísmicas, é usual a utilização de modelos clássicos de

massas de água associadas. Esta abordagem clássica baseia-se em modelos de elementos finitos (EF) 3D sem discretização da albufeira, em que as pressões hidrodinâmicas são calculadas com base na

solução teórica de Westergaard (Westergaard, 1933), válida para barragens com paramentos verticais e rígidos. No entanto, estes modelos não têm a capacidade para simular adequadamente todos os fenómenos associados à interação entre a barragem e a albufeira (Oliveira *et. al* 2012), a qual tem um efeito dominante no comportamento dinâmico deste tipo de obras. Nesse sentido, é essencial procurar novos modelos que permitam simular o comportamento hidrodinâmico da albufeira e a interação dinâmica água-estrutura (Frigerio & Mazzà 2013; Oliveira 2015), com vista a obter resultados da resposta dinâmica das barragens mais próximos dos que são efetivamente medidos *in situ*. Assim apresenta-se neste trabalho um modelo *coupled* de EF3D em deslocamentos e pressões.

## 2. MODELO COUPLED EM DESLOCAMENTOS E PRESSÕES

O modelo *coupled* (Fig. 1) baseia-se numa discretização 3D em EF de deslocamento para o sólido (barragem e fundação) e em EF de pressão para o fluido (albufeira), definindo-se uma formulação acoplada para simular o comportamento dinâmico do conjunto: a equação diferencial de Navier para o domínio sólido e a equação de propagação das ondas de pressão, para o domínio do fluido (Zienkiewicz *et. al* 2005). Para o presente modelo é assumida a hipótese de comportamento elástico-linear, sendo a fundação simulada como uma subestrutura, elástica e sem massa. Quanto à albufeira, assume-se a hipótese de fluido compressível e são definidas condições de fronteira específicas nas principais interfaces, nomeadamente no que se refere aos efeitos da propagação das ondas de pressão ao longo da albufeira e dos efeitos de reflexão/radiação nas fronteiras.

Com base no Problema de Valores de Fronteira (PVF) estabelecido, recorre-se ao Método dos Elementos Finitos (MEF) e obtém-se a forma discreta do problema, que descreve o comportamento dinâmico do conjunto discretizado em EF, em que o

vetor das incógnitas  $q$  engloba os deslocamentos na barragem e as pressões hidrodinâmicas na albufeira. No que diz respeito às matrizes globais de massa  $\underline{M}$ , rigidez  $\underline{K}$  e amortecimento  $\underline{C}$ , estas incluem componentes associadas ao sólido, ao fluido e ao efeito de interação dinâmica.

Para a resolução do problema implementa-se uma abordagem de estado inovadora (Oliveira *et. al* 2015; Alegre, 2015) com base na introdução de uma nova variável  $\tilde{y}$  no problema, a qual inclui as derivadas dos deslocamentos e das pressões, passando o problema discreto ( $N_{GL}$  equações diferenciais de 2ª ordem) a ser representado no espaço de estados na forma matricial indicada na figura ( $2N_{GL}$  equações diferenciais de 1ª ordem). O cálculo da resposta dinâmica em deslocamentos e pressões (e respetivas derivadas no tempo) é efetuado com base na diagonalização do problema utilizando coordenadas modais complexas, que garante elevada eficiência computacional na integração temporal da resposta.

## 3. ESTUDO DAS PRESSÕES HIDRODINÂMICAS EM BARRAGENS GRAVIDADE COM PARAMENTO VERTICAL E INCLINADO

Neste trabalho, com vista a verificar a fiabilidade do modelo desenvolvido, começou-se por efetuar um estudo das pressões hidrodinâmicas em barragens gravidade, efetuando uma comparação de resultados numéricos com resultados analíticos e experimentais para barragens rígidas (estrutura indeformável) com paramento de montante vertical e inclinado.

### 3.1. Resultados numéricos: modelo coupled

Para o presente estudo, foram desenvolvidos dois modelos numéricos de EF3D (Fig.2) de duas barragens gravidade (100 m de altura) com paramento vertical e paramento inclinado (30°), tendo sido consideradas as seguintes hipóteses: i) barragem rígida; ii) fluido compressível e condições de fronteira específicas (indicadas no capítulo 2); iii) ocorrência de

movimentos no fluido nas duas direções horizontais e na vertical (consideração do comportamento hidrodinâmico 3D da albufeira).

Para a determinação das distribuições de pressões hidrodinâmicas no paramento de montante, foram calculadas as histórias de pressões hidrodinâmicas  $P_{H,din}(t)$  em vários pontos do paramento, considerando a aplicação de um acelerograma sísmico  $a_s(t)$  de amplitude unitária constante na direção jusante-montante. Consequentemente, e por forma a obter a distribuição de pressões ao longo da altura do paramento de montante, determinou-se, para cada ponto, o valor da pressão em regime estacionário.

### 3.2. Solução analítica de Westergaard e resultados experimentais de Zangar

Para a comparação com os resultados do numéricos, utilizaram-se (Fig. 3): i) resultados obtidos com a solução analítica de Westergaard para paramentos verticais rígidos, que permite calcular o valor da pressão hidrodinâmica em qualquer ponto da albufeira (análise 2D no plano); e ii) resultados experimentais de Zangar (Zangar, 1952) correspondentes à distribuição das pressões hidrodinâmicas

em barragens gravidade com diferentes inclinações do paramento de montante, obtidos com base numa analogia elétrica.

### 3.3. Comparação de resultados

Na Fig. 4 apresenta-se a comparação entre a distribuição de pressões hidrodinâmicas para barragens gravidade com paramento vertical e com paramento inclinado (30°). Como se pode observar, foi possível obter um acordo bastante bom entre os resultados do modelo numérico (a vermelho) e os resultados experimentais de Zangar (a preto), para os dois exemplos de aplicação analisados, tanto em termos dos valores das pressões como na forma da curva. Por outro lado, para a barragem com paramento vertical, conseguiu-se uma sobreposição quase perfeita das curvas calculadas com o modelo *coupled* e com a solução de Westergaard (azul).

Em conclusão, pode-se afirmar que o modelo *coupled* apresentado permite simular adequadamente o comportamento hidrodinâmico da albufeira e calcular as distribuições de pressões hidrodinâmicas em barragens com geometrias mais simples, como é o caso das barragens gravidade.

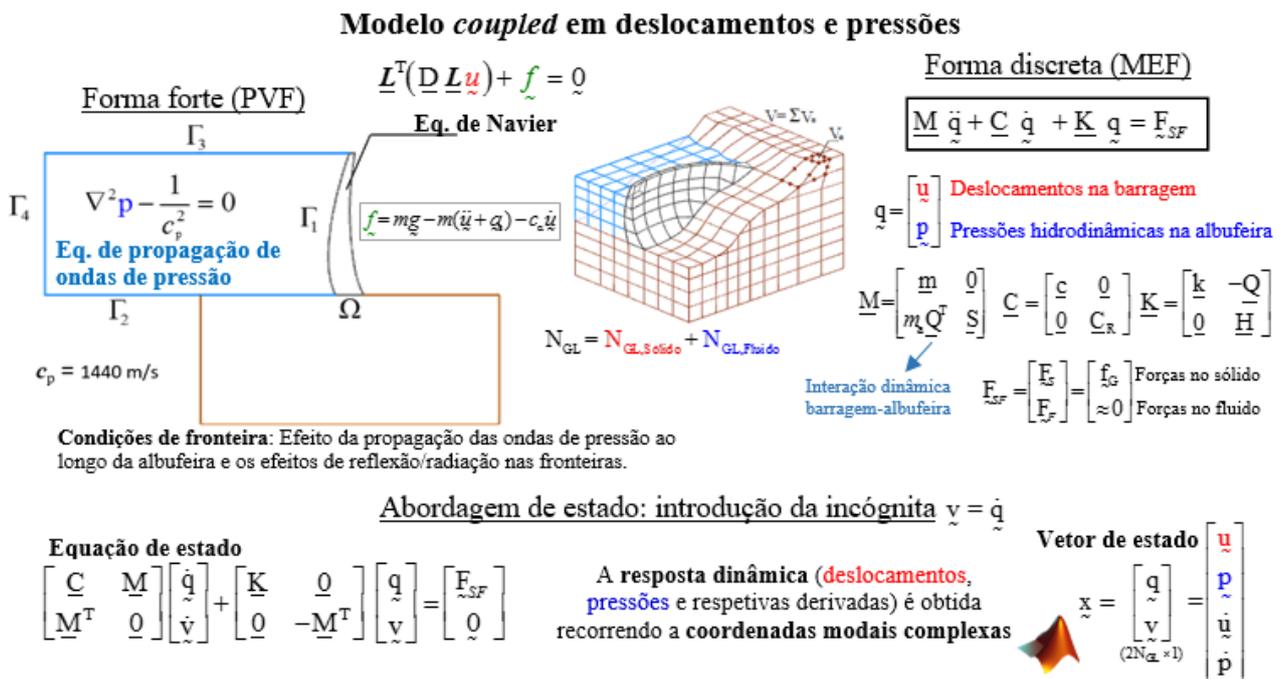


Fig. 1 – Modelo *coupled* em deslocamentos e pressões. Abordagem de estado implementada.

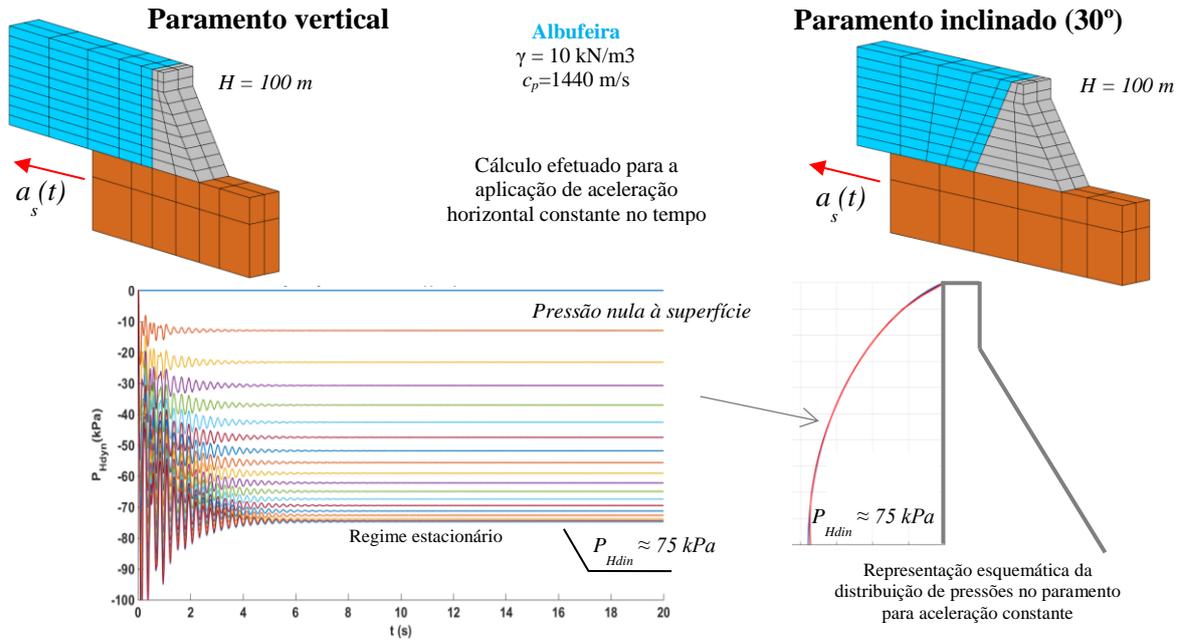


Fig. 2 – Exemplos de aplicação: barragem gravidade com paramento vertical e inclinado (30°). Ação dinâmica aplicada e história de pressões hidrodinâmicas calculada em pontos do paramento de montante.

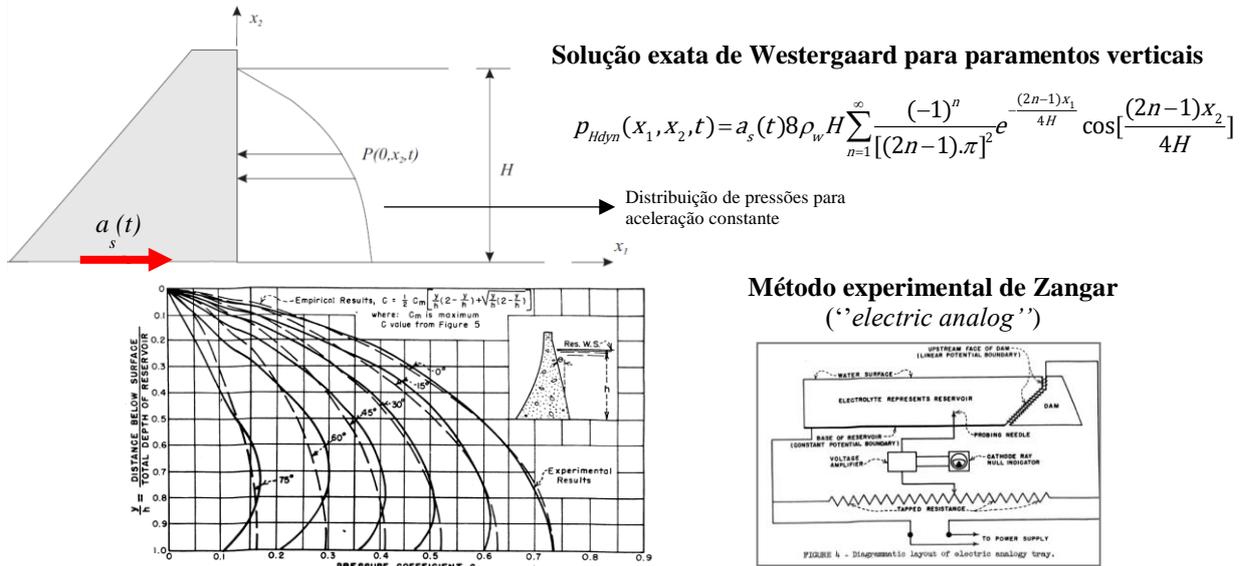


Fig. 3 – Solução analítica de Westergaard (Itasca, 2016) para barragens com paramento vertical e inclinado e representação das curvas experimentais (e empíricas) em barragens gravidade (Zangar, 1952).

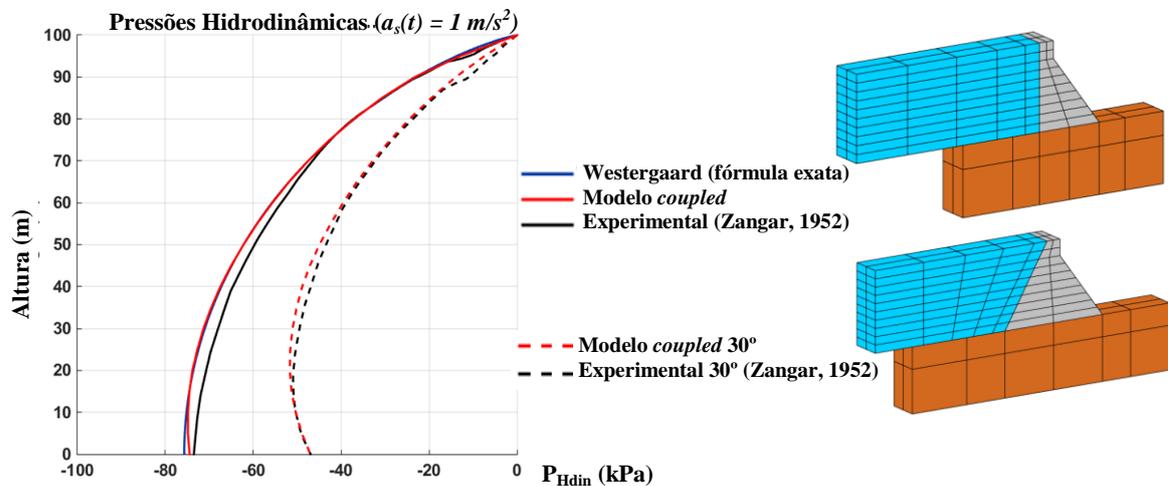


Fig. 4 – Distribuições de pressões hidrodinâmicas no paramento para aceleração constante unitária (paramento vertical e inclinado). Comparação entre resultados numéricos, analíticos e experimentais.

## 4. ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE UMA GRANDE BARRAGEM ABÓBADA

Testado o modelo *coupled* no cálculo das pressões hidrodinâmicas em barragens com geometrias mais simples, importa agora aplicar o referido modelo no estudo do comportamento dinâmico de obras com geometrias mais complexas, como é o caso das barragens abóbada (paramentos curvos). Neste trabalho, foi utilizado como exemplo de aplicação a barragem do Cabril.

### 4.1. Barragem do Cabril

A barragem do Cabril, localizada no Rio Zêzere, foi construída em 1954 com 132 m de altura e um desenvolvimento ao nível do coroamento de 290 m (Fig. 5), e é uma barragem abóbada de dupla curvatura (maior barragem abóbada portuguesa).

Para a modelação do comportamento dinâmico da barragem e do comportamento hidrodinâmico da albufeira, foi utilizado um modelo *coupled* de EF3D do conjunto barragem-fundação-albufeira, considerando a sobreposição de 320 modos de vibração nos cálculos dinâmicos e um módulo de elasticidade dinâmico  $E_{din} = 1,25 \times E_{est}$ .

No âmbito das atividades de investigação do Departamento de Barragens de Betão do LNEC, na área da modelação e monitorização do comportamento dinâmico de barragens, foi iniciado em 2002 um projeto pioneiro (Oliveira, 2002) com vista à instalação de um sistema de monitorização de vibrações dinâmicas em contínuo na barragem do Cabril o qual está operacional desde 2008. Este sistema é constituído por 16 acelerómetros uniaxiais e 3 acelerómetros triaxiais, os quais estão ligados por meio de uma rede de fibra ótica ao computador do servidor central. Este permite recolher/tratar os dados experimentais e, com base em *software* de identificação modal, calcular os principais parâmetros modais da obra, nomeadamente frequências naturais, configurações modais e amortecimentos modais. Estes resultados são de extrema importância tanto no âmbito do controlo da segurança sísmica das obras como na validação e calibração dos

modelos numéricos utilizados, tal como é objetivo no presente trabalho.

### 4.2. Análise do comportamento dinâmico do conjunto albufeira-barragem

#### 4.2.1. Pressões hidrodinâmicas em barragens abóbada (paramento curvo)

Apresenta-se neste ponto uma comparação entre a distribuição das pressões hidrodinâmicas no paramento de montante (Fig. 6) calculadas com o modelo *coupled* (resolução do problema no domínio do tempo para aceleração unitária na base, constante no tempo) e calculadas com um modelo clássico de massas de água associadas, a partir da hipótese de Westergaard (paramentos verticais rígidos), considerando a aplicação de uma história de acelerações de amplitude constante unitária ( $a_s(t) = 1 \text{ m/s}^2$ ). Analisando os resultados apresentados podem-se observar diferenças notórias entre os dois modelos ao nível da distribuição ao longo do paramento, sendo que, com o modelo *coupled* se obtém uma distribuição mais uniforme. Por outro lado, com o modelo clássico, sem considerar qualquer redução no valor da massa de água associada, os valores das pressões são claramente superiores às do novo modelo.

Atualmente, no cálculo dinâmico de barragens abóbada, vários autores propõem a utilização de modelos de massas de água associadas de Westergaard corrigidos com a aplicação de um fator de redução da ordem de 50 a 70% ao valor da massa associada (Houqun, 2014). Este fator é perfeitamente justificado neste trabalho com base nos presentes resultados, em que se mostra que as pressões hidrodinâmicas em paramentos curvos flexíveis são significativamente inferiores às do modelo de massas associadas de Westergaard.

#### 4.2.2. Modos de vibração do conjunto barragem-albufeira

Com o modelo *coupled* calculam-se os principais parâmetros modais a partir da resolução do problema de valores e vetores próprios definido com base na equação de estado apresentado. Relativamente aos modos de vibração (Fig. 7), considerando o

modelo com a albufeira discretizada em EF de pressão, é possível obter as configurações modais 3D na barragem e na albufeira verificando-se uma sintonia perfeita entre os movimentos dinâmicos do sólido e do fluido.

Por outro lado, tendo em conta que se utiliza uma abordagem de estado em coordenadas modais complexas, são calculados modos de vibração complexos, o que significa que, fisicamente, os modos vão ser não estacionários, tal como é usual medir *in-situ* (Felber, 1998; Oliveira et al., 2012). No caso da barragem do Cabril, tal como seria espectável, o primeiro e quarto modos são antissimétricos, enquanto o segundo e terceiro modos são simétricos.

### 4.3. Validação do modelo *coupled*

Considerando a importância da utilização de modelos numéricos devidamente calibrados e validados para a análise do comportamento dinâmico de barragens (Chopra & Wang 2012), apresenta-se neste trabalho uma comparação de resultados numéricos, calculados com o modelo *coupled*, e resultados experimentais, obtidos com o

software de identificação modal MODAL\_ID2.0 a partir dos dados recolhidos com o sistema de monitorização de vibrações instalado na barragem do Cabril. Nomeadamente, comparam-se as frequências naturais, para uma variação da cota de água entre os 266 e os 296 m, e a configuração dos modos de vibração para a situação de albufeira cheia (Fig. 8).

Com base na comparação apresentada, verifica-se que foi possível obter um excelente acordo entre os resultados calculados com o modelo e os resultados identificados, tanto no caso das frequências naturais como das configurações modais, principalmente para os três primeiros modos de vibração. Estes resultados são de facto notáveis e permitem assegurar a fiabilidade do modelo *coupled* apresentado para simular o comportamento dinâmico do conjunto barragem-fundação-albufeira, considerando os fenómenos de interação dinâmica água-estrutura. Convém ainda salientar que, em estudos anteriores realizados com modelos de massas de água associadas (Oliveira et al. 2012) não foi conseguido um acordo tão bom entre resultados numéricos e experimentais.

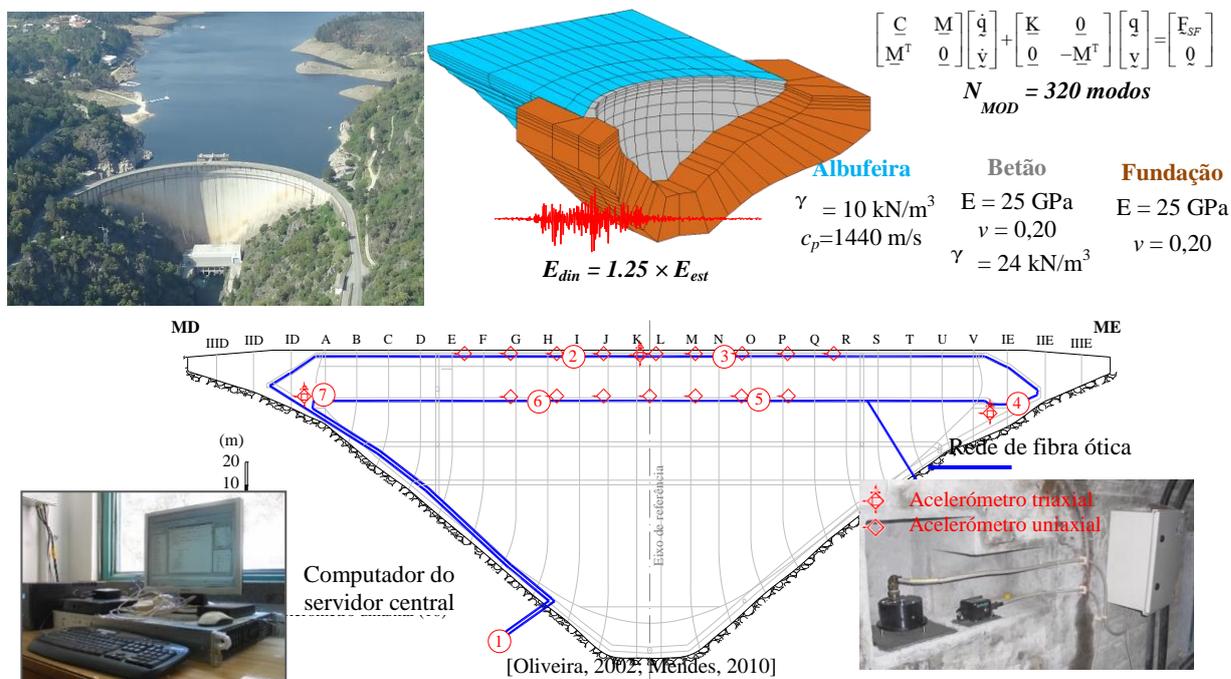


Fig. 5 – Barragem do Cabril: Modelo *coupled* de EF3D e Sistema de monitorização de vibrações dinâmicas em contínuo instalado na barragem do Cabril (representação esquemática).

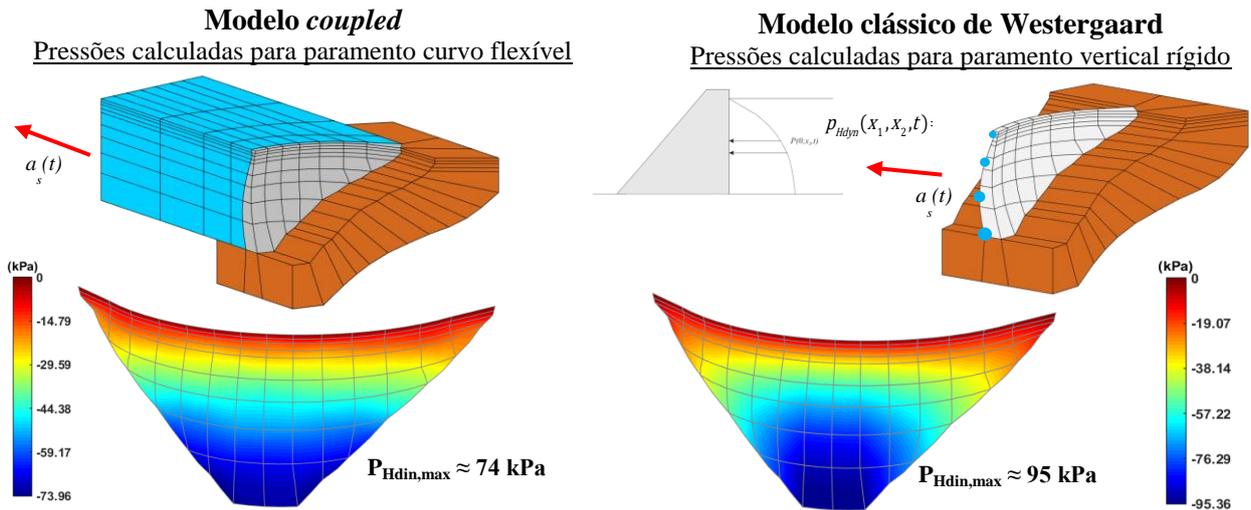


Fig. 6 – Distribuição de pressões hidrodinâmicas. Comparação de resultados com o modelo *coupled* (paramento curvo flexível) e com o modelo de massas de água associadas (paramento vertical rígido).

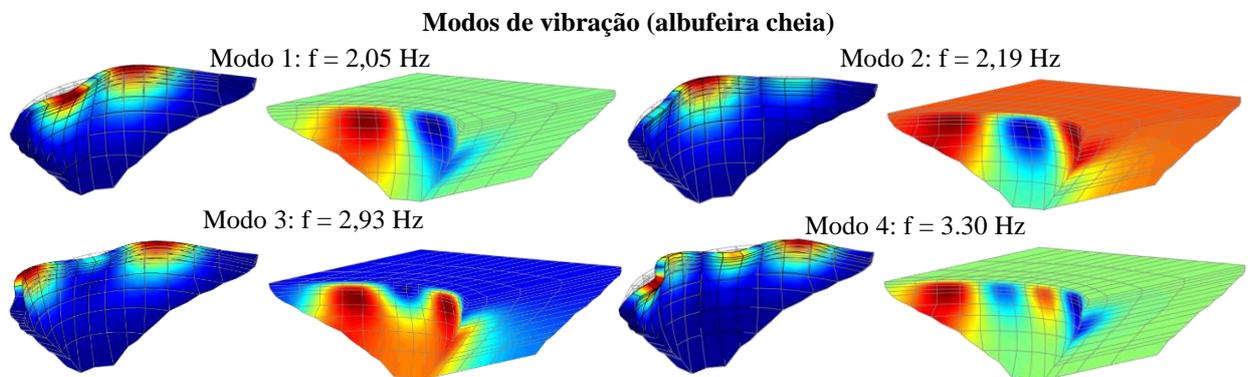


Fig. 7 – Modos de vibração do conjunto barragem-albufeira (albufeira cheia).

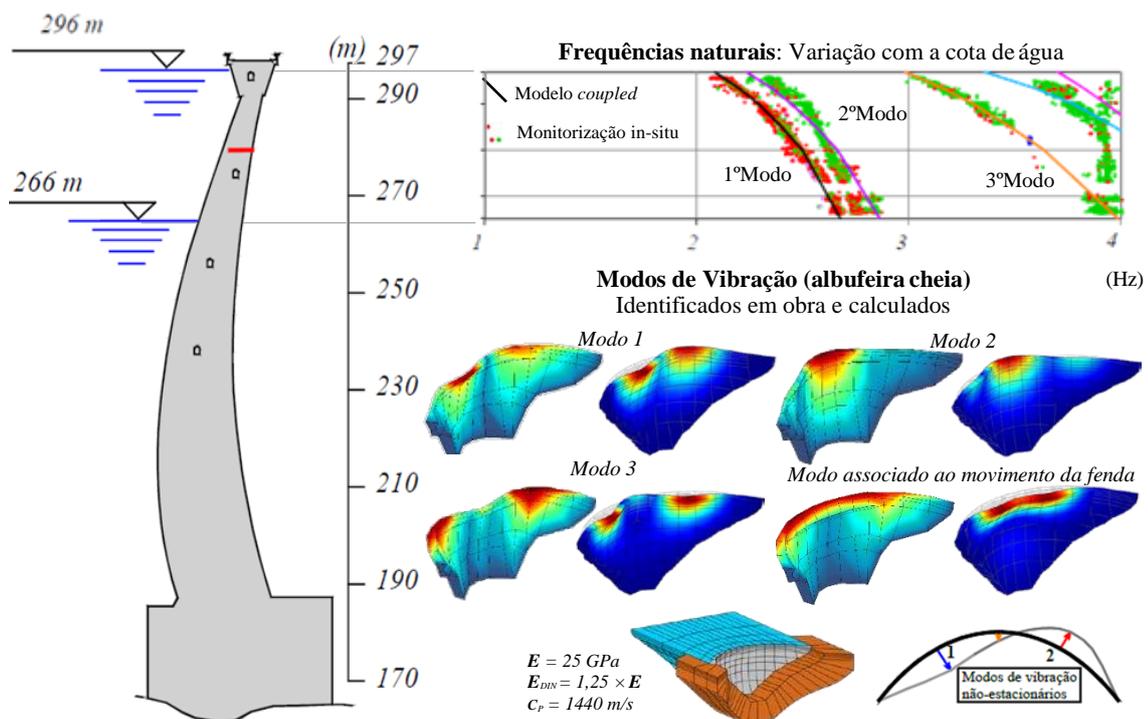


Fig. 8 – Validação do modelo *coupled*. Comparação de resultados numéricos e experimentais: frequências naturais e configurações dos modos de vibração.

## 5. CONCLUSÕES

O modelo *coupled*, em deslocamentos e pressões, proposto neste trabalho para análise dinâmica de sistemas barragem-fundação-albufeira, baseia-se na utilização de discretizações em EF3D, em que albufeira é discretizada em EF de pressão. Para o cálculo da resposta dinâmica, implementou-se uma abordagem de estado e uma técnica de integração no tempo com base em coordenadas modais complexas, o que permite uma elevada eficiência computacional.

O modelo foi verificado através da comparação com resultados analíticos e laboratoriais obtidos para casos simples de barragens gravidade com paramentos planos, em termos das distribuições de pressões hidrodinâmicas. O modelo foi ainda testado com base na comparação com resultados experimentais obtidos na barragem do Cabril, uma abóbada de dupla curvatura, nomeadamente em termos de frequências naturais e configurações modais, para diferentes cotas de água. Em face do bom acordo obtido nos referidos estudos comparativos, pode-se concluir que o presente modelo *coupled* é adequado para analisar o comportamento dinâmico de barragens abóbada. Por fim é de salientar que neste trabalho se mostra que as pressões hidrodinâmicas em barragens abóbada (paramentos curvos e deformáveis) são significativamente inferiores às previstas com modelo de Westergaard (paramentos verticais indeformáveis). Este resultado permite explicar o fator de redução de 50% a aplicar às massas de água de Westergaard que é recomendado, empiricamente, por vários autores, para a análise dinâmica de barragens abóbada.

## REFERÊNCIAS

- Alegre A. 2015. *Análise do Comportamento Sísmico da Barragem de Luzzone. Desenvolvimento de um programa de EF3D utilizando uma formulação em deslocamentos e pressões*. Tese de Mestrado. ISEL, Lisboa.
- Chopra, A.K.; Wang, J. 2012. *Comparison of Recorded and Computed Earthquake Response of Arch Dams*. 15th World Conference on Earthquake Eng. Lisboa.
- Itasca (2016). *FLAC Manual*. Itasca Consulting Group, Inc.
- Felber, 1998. *Ambient Vibration testing of Mauvoisin Dam*, Final Report, Phase 1 through 7, EMPA Report No. 158'992/1-7: Duebendorf, Switzerland.
- Frigerio, A.; Mazzà, G. 2013. *A Concrete Arch Dam under Seismic Loading Conditions*. Proceedings of the 2013 COMSOL Conference in Rotterdam.
- Houqun, C. (2014). *Seismic Safety Of High Concrete Dams*. In CHINCOLD, Seismic Safety Of Dams in China (pp. 1-54).
- Oliveira, S. 2002. *Sistemas de monitorização em contínuo para avaliação do comportamento dinâmico de barragens abóbada, Sub-programa D*. In: 'Estudo de processos de deterioração evolutiva em barragens de betão. Controlo da segurança ao longo do tempo'. Prog. de Re-equipamento Científico da FCT (REEQ/815/ECM/2005), LNEC-FEUP.
- Oliveira, S. 2015. *Monitoring of Dynamic Behaviour. Part I: Continuous monitoring systems and models for seismic dam behaviour simulation. Water structure dynamic interaction*. Dam World Conference 2015. Lisboa: LNEC.
- Oliveira, S.; Espada, M. & Câmara, R. 2012. *Long-term dynamic monitoring of arch dams. The case of Cabril dam, Portugal*. 15th World Conference on Earthquake Eng.Lisboa.
- Oliveira, S.; Alegre, A.; Silvestre, A.; Espada, M.; Câmara, R. (2015). *Seismic safety evaluation of Luzzone dam. Use of a 3DFEM state formulation in pressures and displacements*. 13th ICOLD Internacional Benchmark Workshop on Numerical Analysis of Dams, EPFL, Lausanne.
- Westergaard, H. M. 1933. *Water pressures on dams during earthquakes*. Transactions, ASCE; 98:18-433.
- Zienkiewicz O.C.; Taylor R.L.; Zhu, J.Z. 2005. *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals: Sixth ed.*, Elsevier Butterworth-Heinemann.
- Zangar, C. N. 1952. *Hydrodynamic pressures on dams due to horizontal earthquake effects*. Engineering Monographs of the United States Department, Interior Bureau of Reclamation.