

Modelos de interação dinâmica água-estrutura na análise sísmica de barragens abóbada em regime elástico-linear. Aplicação à barragem de Luzzone

Water-structure dynamic interaction models for the seismic analysis of arch dams considering a linear-elastic approach. Application to Luzzone dam

S. Oliveira
A. Alegre
M. Espada
R. Câmara

Resumo

No âmbito deste trabalho foi desenvolvido um programa de elementos finitos tridimensionais, DamDySSA1.0, em MATLAB que permite realizar cálculos numéricos para a análise sísmica em regime elástico-linear de sistemas barragem-fundação-albufeira, utilizando uma formulação em pressões e deslocamentos e recorrendo a uma abordagem de estado. O modelo numérico de elementos finitos considera a albufeira discretizada em elementos de pressão, com vista a simular a interação dinâmica água-estrutura.

Apresentam-se resultados da análise do comportamento dinâmico e de verificação da segurança sísmica da barragem de Luzzone, na Suíça (225 m de altura).

Abstract

In this work a 3D finite element program, DamDySSA1.0, was developed in MATLAB to carry out numerical calculations for the seismic analysis of dam-foundation-reservoir systems (elastic-linear hypothesis), using a formulation in pressures and displacements and a state space approach. The finite element numerical model considers the reservoir discretized in pressure finite elements to simulate the water-structure dynamic interaction.

The results for the dynamic behavior analysis and seismic safety verification are presented for the case of Luzzone Dam, in Switzerland (225 m high).

Palavras-chave: Barragens abóbada / Interação dinâmica / Formulação em pressões e deslocamentos / Análise sísmica / Verificação da segurança

Keywords: Arch dams / Dynamic interaction / Formulation in pressures and displacements / Seismic analysis / Safety verification

S. Oliveira

Investigador Auxiliar
LNEC
Lisboa, Portugal
soliveira@lnec.pt

A. Alegre

Mestre
ISEL
Lisboa, Portugal
andrefalegre92@gmail.com

M. Espada

Bolseira de Investigação
LNEC
Lisboa, Portugal
mespada@lnec.pt

R. Câmara

Investigador-Coordenador
LNEC
Lisboa, Portugal
romano@lnec.pt

Aviso legal

As opiniões manifestadas na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Legal notice

The views expressed in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.

OLIVEIRA, S. [et al.] – Modelos de interação dinâmica água-estrutura na análise sísmica de barragens abóbada em regime elástico-linear. Aplicação à barragem de Luzzone. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 2. ISSN 2183-8488. (novembro 2016) 103-116.

1 Introdução

As grandes barragens são obras de engenharia de elevada importância social, económica e ambiental, podendo ser utilizadas para múltiplos fins. Nesse sentido, e tendo em conta o elevado risco potencial associado, é essencial garantir o controlo da segurança das obras em todas as fases da sua vida, nomeadamente para ações dinâmicas importantes, como os sismos.

O controlo da segurança sísmica de grandes barragens abóbada deve ser efetuado com base em modelos numéricos fiáveis para representação da resposta dinâmica do sistema barragem-fundação-albufeira e, sempre que possível, recorrendo a dados experimentais de sistemas de monitorização do comportamento dinâmico das obras, com vista a verificar a fiabilidade dos modelos e a efetuar a sua calibração.

Neste trabalho utiliza-se um modelo para estudo da interação dinâmica do conjunto barragem-fundação-albufeira, em que a albufeira é discretizada em elementos finitos (EF) de pressão, que se baseia numa formulação em pressões (na albufeira) e deslocamentos (na barragem), constituindo uma evolução relativamente ao modelo clássico com a consideração de massas de água associadas (hipótese de Westergaard). O programa DamDySSA1.0 e o referido modelo numérico foram validados por comparação de resultados numéricos e experimentais, para o caso da barragem do Cabril.

O caso de estudo apresentado neste trabalho é a barragem de Luzzone. Determinaram-se os principais parâmetros modais (frequências naturais e configurações modais) e realizaram-se cálculos sísmicos para as combinações com o Sismo Base de Projeto (SBP) e o Sismo Máximo de Projeto (SMP). As ações estáticas consideradas foram o peso próprio, a pressão hidrostática e dos sedimentos e as variações de temperatura na situação de inverno e de verão. A verificação da segurança sísmica foi efetuada para um cenário corrente (possibilidade de ocorrência de roturas pontuais no betão) e para cenários de rotura (deslizamento e derrubamento de blocos de controlo que se possam formar no topo da consola central).

2 Modelação do comportamento dinâmico de sistemas barragem-fundação-albufeira

2.1 Barragem de Luzzone. Modelo de EF

A barragem de Luzzone, na Suíça (Figura 1), é uma barragem abóbada com dupla curvatura em betão, com 225 m de altura e 510 m de desenvolvimento no coroamento, e é da classe I (existência de importantes centros populacionais a jusante). Os arcos apresentam espessura crescente na direção dos encontros, sendo a espessura de 4,55 m no topo da barragem e de 36 m na base. A barragem foi construída em 1963 com 208 m de altura e, em 97/98, foi efetuado um alteamento de 17 m, com um fecho de secção na zona do encontro esquerdo, usando um tipo de betão diferente (módulo de elasticidade inferior). A fundação é um maciço xistoso homogéneo (Classe A) e a albufeira tem uma capacidade de 108 milhões de m³ e uma área superficial de 1,27 km².

O modelo numérico de elementos finitos utilizado é constituído por 2500 elementos tipo cubo de 20 pontos nodais, isoparamétricos do 2º grau (316 da barragem, 1104 da fundação e 1080 da albufera) e por 12 293 pontos nodais.

2.2 Modelo para estudo da interação dinâmica

O modelo do sistema barragem-fundação-albufera (Figuras 1 e 2) considera a hipótese de materiais isotrópicos e comportamento elástico-linear (no betão e nas superfícies de descontinuidade). A fundação é simulada como uma subestrutura elástica e sem massa

(matriz de rigidez condensada ao nível dos graus de liberdade da inserção da barragem). A albufera é discretizada em EF de pressão, tendo em conta a propagação das ondas de pressão na água, e permite considerar a interação dinâmica água-estrutura e os efeitos da radiação, definindo as principais interfaces: água-água, água-ar, água-betão e água-fundação. Relativamente ao amortecimento do conjunto, admite-se a hipótese de amortecimento de Rayleigh generalizado e amortecimento de radiação na albufera (interface água-água): desta forma, na análise modal surgem modos complexos (ou não estacionários) do problema de valores e vetores próprios envolvendo as matrizes de estado utilizadas.

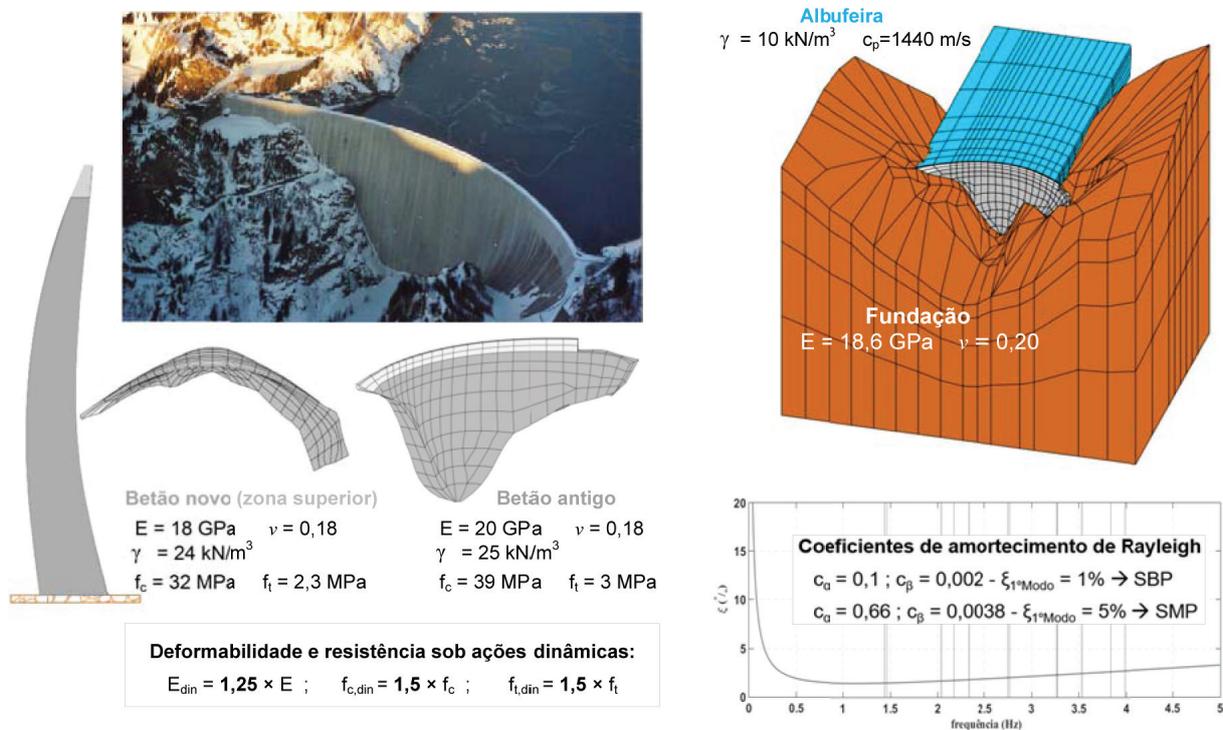


Figura 1 Barragem de Luzzone (225 m de altura). Vista geral e modelo com albufera discretizada em EF de pressão. Propriedades dos materiais

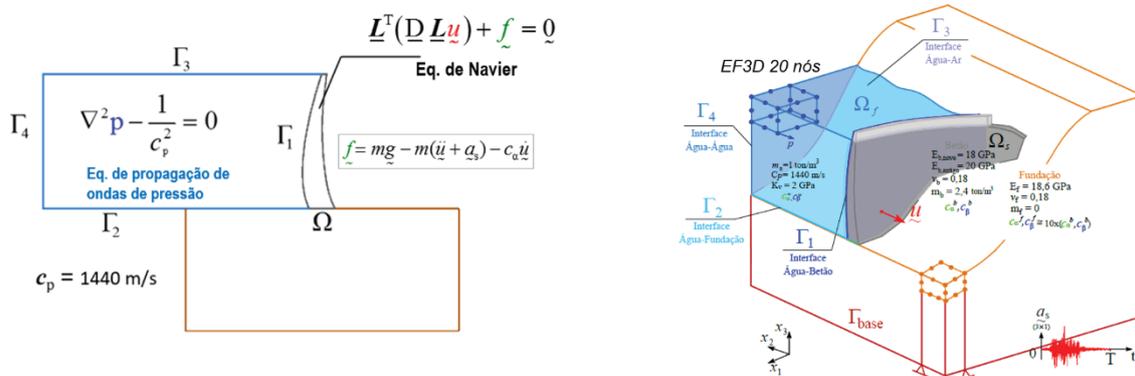


Figura 2 Modelo adotado para estudo da interação dinâmica água-estrutura (formulação em pressões e deslocamentos) e tipo de elementos finitos utilizados na discretização

Este tipo de modelo em pressões e deslocamentos (modelo MPD) foi implementado computacionalmente no programa DamDySSA1.0 (Figura 2), considerando que a equação de Navier é usada para simular o comportamento do sólido (barragem e fundação) e a equação de propagação das ondas de pressão para modelar o comportamento do fluido (albufeira).

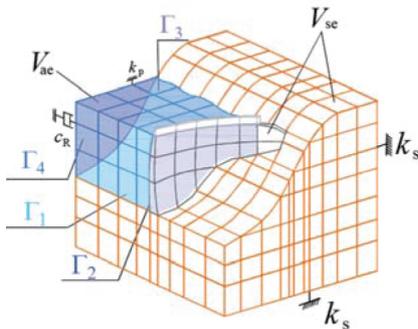
(as incógnitas são os deslocamentos e as pressões, e as respetivas derivadas), para a atuação de acelerogramas sísmicos na fundação (Figura 3). A resolução numérica do problema de valores de fronteira (PVF) recorre ao Método dos Elementos Finitos, com a integração temporal da resposta a ser efetuada em coordenadas modais com base em fórmulas recursivas, aplicadas ao sistema de equações diferenciais (no espaço de estados), diagonalizado com modos complexos. Esta formulação garante elevada eficiência na sua implementação computacional, pois utilizam-se duas matrizes de estado \underline{A} e \underline{B} , o que torna possível recorrer a um número de modos reduzido no cálculo dinâmico (análise modal reduzida).

2.3 Formulação em pressões e deslocamentos. Abordagem de estado

O programa DamDySSA1.0 baseia-se numa formulação em pressões e deslocamentos [1] usando uma abordagem de estado

Formulação em pressões e deslocamentos. Discretização em EF3D

Discretização do sistema em EF3D



Formulação clássica em deslocamentos

$$\underline{m} \ddot{\underline{u}} + \underline{c} \dot{\underline{u}} + \underline{k} \underline{u} = \underline{f}_G$$

Formulação em pressões e deslocamentos

$$\underline{M} \ddot{\underline{q}} + \underline{C} \dot{\underline{q}} + \underline{K} \underline{q} = \underline{F}_{SF} \quad \underline{q} = \begin{bmatrix} \underline{u} \\ \underline{p} \end{bmatrix}$$

Deslocamentos na barragem
Pressões hidrodinâmicas na albufeira

$$\underline{M} = \begin{bmatrix} \underline{m} & \underline{0} \\ \underline{m}_a \underline{Q}^T & \underline{S} \end{bmatrix} \quad \underline{C} = \begin{bmatrix} \underline{c} & \underline{0} \\ \underline{0} & \underline{C}_R \end{bmatrix} \quad \underline{K} = \begin{bmatrix} \underline{k} & -\underline{Q} \\ \underline{0} & \underline{H} \end{bmatrix} \quad \underline{F}_{SF} = \begin{bmatrix} \underline{F}_S \\ \underline{F}_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{f}_G \\ \approx \underline{0} \end{bmatrix}$$

Forças no sólido
Forças no fluido

↪ Interação dinâmica barragem-albufeira ↪ Amortecimento de radiação

Abordagem de estado: introdução da incógnita $\underline{y} = \dot{\underline{q}}$

$$\begin{bmatrix} \underline{C} & \underline{M} \\ \underline{M}^T & \underline{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\underline{q}} \\ \dot{\underline{y}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{K} & \underline{0} \\ \underline{0} & -\underline{M}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{q} \\ \underline{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{F}_{SF} \\ \underline{0} \end{bmatrix}$$

Sistema de $2N_{GL}$ equações dif. de 1ª ordem

A resposta dinâmica em pressões e deslocamentos (e respetivas derivadas no tempo \underline{y}) é obtida por integração no tempo da equação anterior, após diagonalização recorrendo a coordenadas modais complexas [4]

$$\begin{bmatrix} \underline{q} \\ \underline{y} \end{bmatrix}_{(2N_{GL} \times 1)} = \begin{bmatrix} \underline{u} \\ \underline{p} \\ \dot{\underline{u}} \\ \dot{\underline{p}} \end{bmatrix}$$

Figura 3 Modelação em pressões e deslocamentos (MPD). Discretização em elementos finitos e resolução do problema recorrendo a uma abordagem de estado e a coordenadas modais complexas (DamDySSA1.0)

3 Validação do programa DamDySSA1.0

A validação do programa DamDySSA1.0 foi efetuada através da comparação de resultados numéricos (modelo MPD) e resultados obtidos com base em registos experimentais (programa MODAL_ID2.0), nomeadamente frequências naturais e configurações modais, para o caso da barragem do Cabril [2] (Figura 4).

Analisando os resultados obtidos, verifica-se que, tanto para os

valores das frequências como para as configurações dos modos de vibração, foi possível obter um excelente acordo entre resultados numéricos e identificados experimentalmente (nomeadamente para os 3 primeiros modos). Estes resultados, obtidos para o caso da barragem do Cabril, mostram que o modelo MPD (e o programa DamDySSA1.0) é adequado para o estudo do comportamento dinâmico de sistemas barragem-fundação-albufeira pelo que é utilizado neste trabalho para análise do comportamento barragem



A barragem do Cabril é a mais alta barragem abóbada portuguesa (132 m de altura), e tem instalado um sistema de monitorização do comportamento dinâmico em contínuo, constituído por 16 acelerómetros uniaxiais (9 na galeria do coroamento e 7 na galeria abaixo da zona da fenda) e 3 acelerómetros triaxiais (2 na zona da fundação e outro no topo da consola central da barragem), que permite, com recurso ao programa Modal_ID2.0, identificar as frequências naturais e as configurações dos principais modos de vibração da barragem.

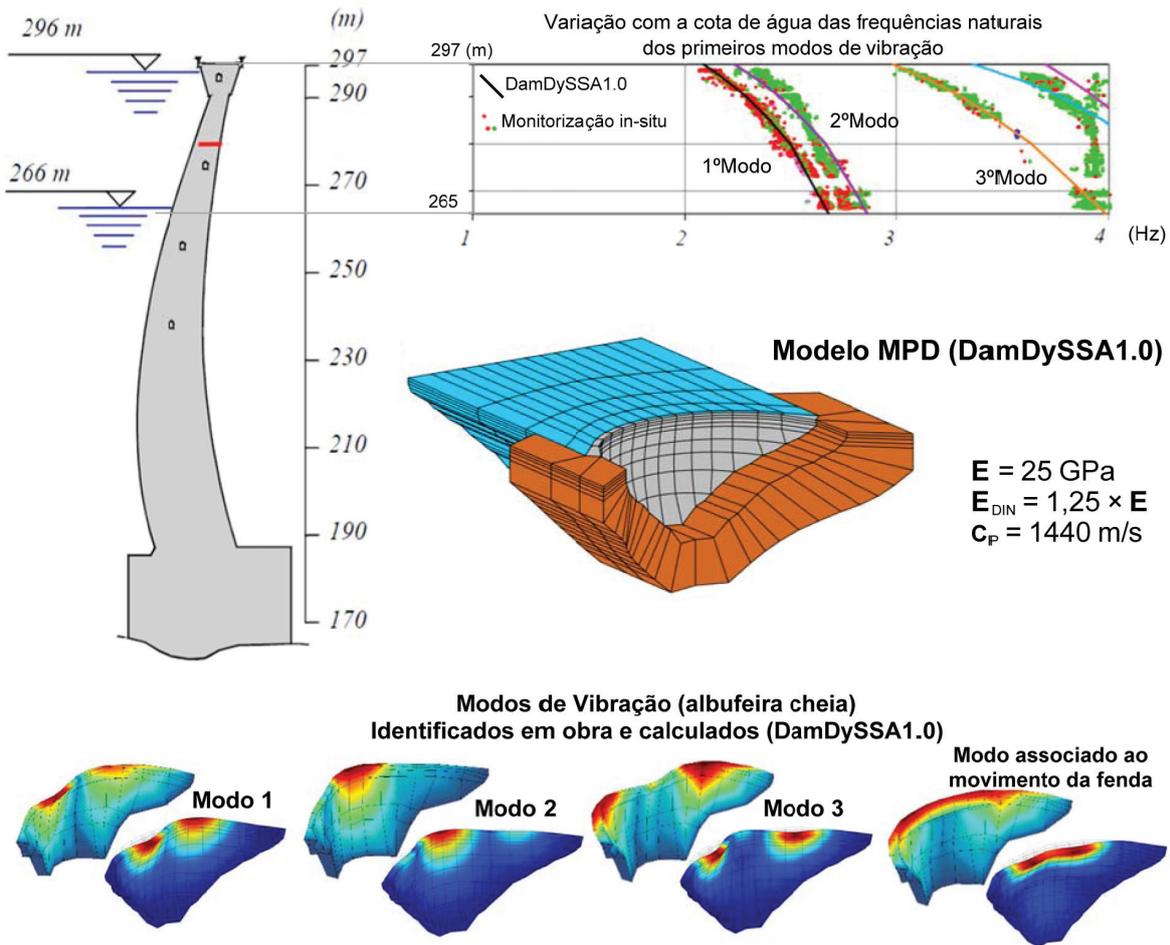


Figura 4 Barragem do Cabril: variação das frequências naturais com a cota de água. Resultados experimentais e calculados. Validação do programa DamDySSA1.0

de Luzzone sob ações sísmicas. De referir ainda que tão bom acordo entre resultados numéricos e experimentais não havia sido conseguido em estudos realizados com modelos considerando a hipótese de massas de água associadas de Westergaard.

4 Análise sísmica da barragem de Luzzone

No estudo da barragem de Luzzone [3] utilizou-se o referido modelo MPD, com a albufera discretizada em EF de pressão, e a formulação em deslocamentos e pressões para calcular os principais parâmetros modais (frequências naturais e modos de vibração) e analisar a resposta sísmica do sistema barragem-fundação-albufera, considerando as combinações dinâmicas envolvendo a ação sísmica (SBP e SMP) durante a época de inverno e de verão [4].

4.1 Ações estáticas

A análise do comportamento da barragem de Luzzone sob ações estáticas é efetuada para as combinações de ações de serviço nas épocas de inverno e de verão, incluindo: peso próprio (PP), pressão hidrostática (PH) e pressão dos sedimentos (PSed), e variações de temperatura de inverno (ΔT_{Inv}) e de verão (ΔT_{Ver}).

Relativamente à modelação da ação do PP, considera-se, de forma aproximada, que este solicita a estrutura instantaneamente, após a obra estar concluída; a PH é simulada como uma força de superfície no paramento de montante ($Y_o = 10 \text{ kN/m}^3$), considerando a albufera cheia (1609 m); a PSed ($Y_{sed} = 3,92 \text{ kN/m}^3$) calcula-se de forma idêntica à PH, existindo uma camada de sedimentos com 56 m de espessura no fundo da albufera; a ação da variação de temperatura está associada aos gradientes térmicos anuais, considerando como campo térmico de referência o existente no corpo da obra à data de selagem das juntas de contração. Neste caso, uma vez que a selagem

foi efetuada durante o inverno, o respetivo gradiente térmico (ΔT_{Inv}) vai ser nulo, enquanto o de verão (ΔT_{Ver}) é calculado considerando o campo térmico na época de verão.

Na Figura 5 apresentam-se os resultados da análise estática: i) o deslocamento máximo é de 134,2 mm para a CE_{INV} e de 125 mm para a CE_{VER} , e ocorrem no topo da consola central; ii) as trações máximas (5,36 MPa) surgem no paramento de montante, junto à base, para a combinação de inverno, enquanto as maiores compressões ocorrem no paramento de jusante, na inserção, para a combinação de verão (-12,7 MPa).

Analisando os resultados apresentados, pode-se verificar que o gradiente térmico de verão provoca deslocamentos na direção ascendente e de montante. Por outro lado, é possível concluir que a combinação estática de inverno pode ser mais desfavorável no âmbito da verificação da segurança, pois apresenta, de forma geral, valores superiores de trações e valores inferiores das compressões (neste caso, é expectável a ocorrência de fissuração local na zona inferior do paramento de montante).

4.2 Análise modal

A determinação dos principais parâmetros modais do sistema barragem-fundação-albufera baseia-se na resolução do problema de valores e vetores próprios: i) $[k - \lambda m] \phi = 0$, no caso de um modelo usando a hipótese de massas de água associadas de Westergaard, considerando a aplicação de um coeficiente de redução da massa de água de 50% (modelo MAA50%) e uma formulação clássica em deslocamentos; e ii) $[B + \lambda_e A] f_e = 0$ no caso do modelo MPD, usando uma formulação em pressões e deslocamentos e uma abordagem de estado. As frequências naturais calculam-se a partir dos valores próprios e as configurações modais com base nos vetores próprios.

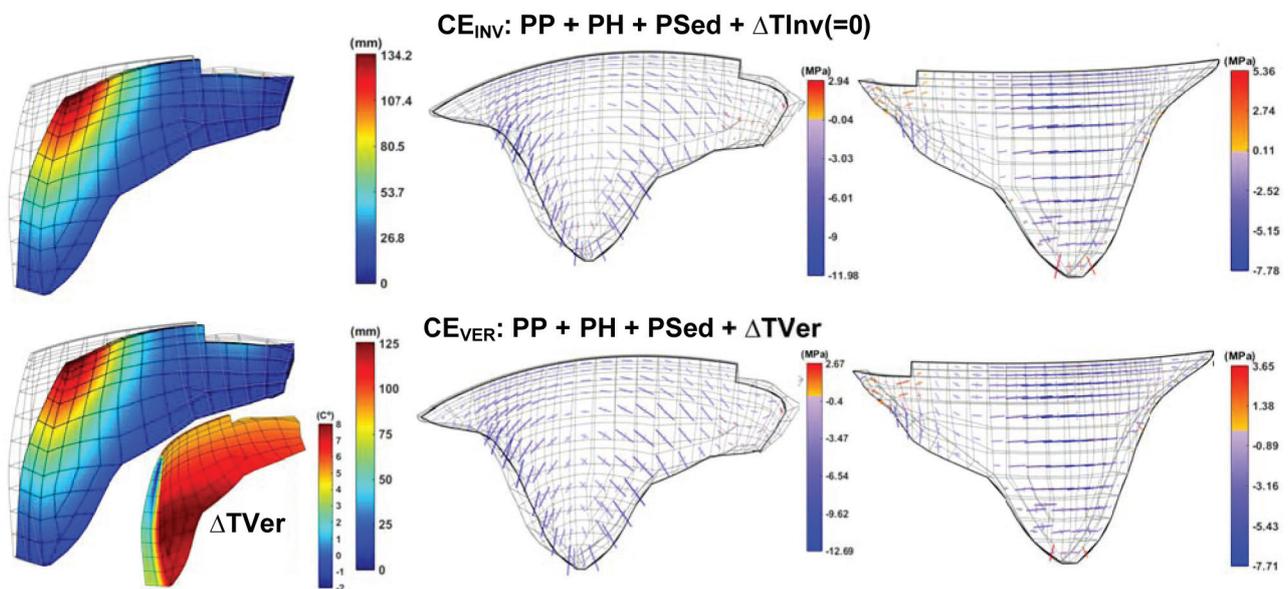


Figura 5 Análise da resposta estática. Campos de deslocamentos e tensões para a combinação de inverno CE_{INV} e de verão CE_{VER} (e gradiente térmico de verão)

Na Figura 6 apresenta-se o gráfico das linhas de influência das frequências naturais (que representam a variação da frequência do modo de vibração n em função do nível da albufeira) calculadas com o modelo MAA50%, e os valores das frequências naturais determinadas com o modelo MPD, para os casos de albufeira cheia e vazia. Verifica-se que existe uma boa aproximação entre os dois modelos para os valores das frequências dos primeiros dois modos (albufeira cheia), tendo sido necessário, contudo, considerar $E_{din} = 1,5 \times E$ para o modelo MAA50%, por forma a conseguir este acordo entre valores (no caso do MPD utilizou-se $E_{din} = 1,25 \times E$, tal como recomendado na modelação do comportamento dinâmico da barragem [3]). Por outro lado, para os restantes valores das frequências, verifica-se que o modelo MAA50% conduz a valores superiores, o que pode indicar a consideração de um excesso de massa de água no cálculo.

No que diz respeito aos modos de vibração, apresentam-se, também na Figura 6, as configurações modais 3D e os gráficos do movimento oscilatório modal de determinados pontos nodais no coroamento da barragem, para a albufeira cheia. Devido ao fecho de secção, que confere uma determinada assimetria à barragem, os modos de vibração calculados não podem ser claramente classificados como simétricos ou antissimétricos, ao contrário do que é usual [2]. Além disso, analisando os gráficos das ondas, verifica-se que os modos de vibração determinados com o MPD são complexos, ou seja, não estacionários (sem nodos fixos). Relativamente ao modelo MAA50%, os modos de vibração são não complexos, ou seja, estacionários (nodos fixos).

4.3 Definição da ação sísmica

De acordo com o Mapa de Intensidade Sísmica da Suíça, para sismos com um período de retorno $T = 10\,000$ anos ($P_{ocorrência} = 10^{-4}$ num ano), a barragem de Luzzone está localizada numa zona para a qual a intensidade é de 7.7 na escala MSK (Medvedev-Sponheuer-Karnik), a partir da qual se calcula a aceleração de pico horizontal (0,16 g) e a aceleração de pico vertical (2/3 da horizontal: 0,106 g) [3]. Conhecendo a aceleração de pico para o local da obra e sabendo que o maciço da fundação é da classe A, calcula-se o espectro de resposta regulamentar para o local da barragem (Figura 7a).

A partir do referido espectro de resposta, foi gerado o Sismo Máximo de Projeto (SMP – $\xi_{1,º\text{Modo}} = 5\%$) considerando intervalos de tempo $\Delta t = 0,01$ s e uma duração total de cerca de 30 s. O SMP é constituído por três acelerogramas sísmicos estocasticamente independentes, a aplicar na direção montante-jusante ($a_{pico} = 0,16$ g), margem esquerda-margem direita ($a_{pico} = 0,16$ g) e na direção vertical ($a_{pico} = 0,106$ g). De referir ainda que o Sismo Base de Projeto (SBP – $\xi_{1,º\text{Modo}} = 1\%$) utilizado na presente análise foi determinado por aplicação de um fator de 0,1 ao SMP.

Na Figura 7b) pode-se observar: i) o acelerograma sísmico na direção montante-jusante e respetivo espectro de amplitudes, permitindo analisar o conteúdo em frequência dos acelerogramas e as amplitudes nas frequências dos primeiros modos; e ii) a envolvente de acelerações (máximas e mínimas) ao longo da altura da barragem, analisando a amplificação das acelerações entre a inserção e o coroamento da barragem. Para o SMP calculou-se

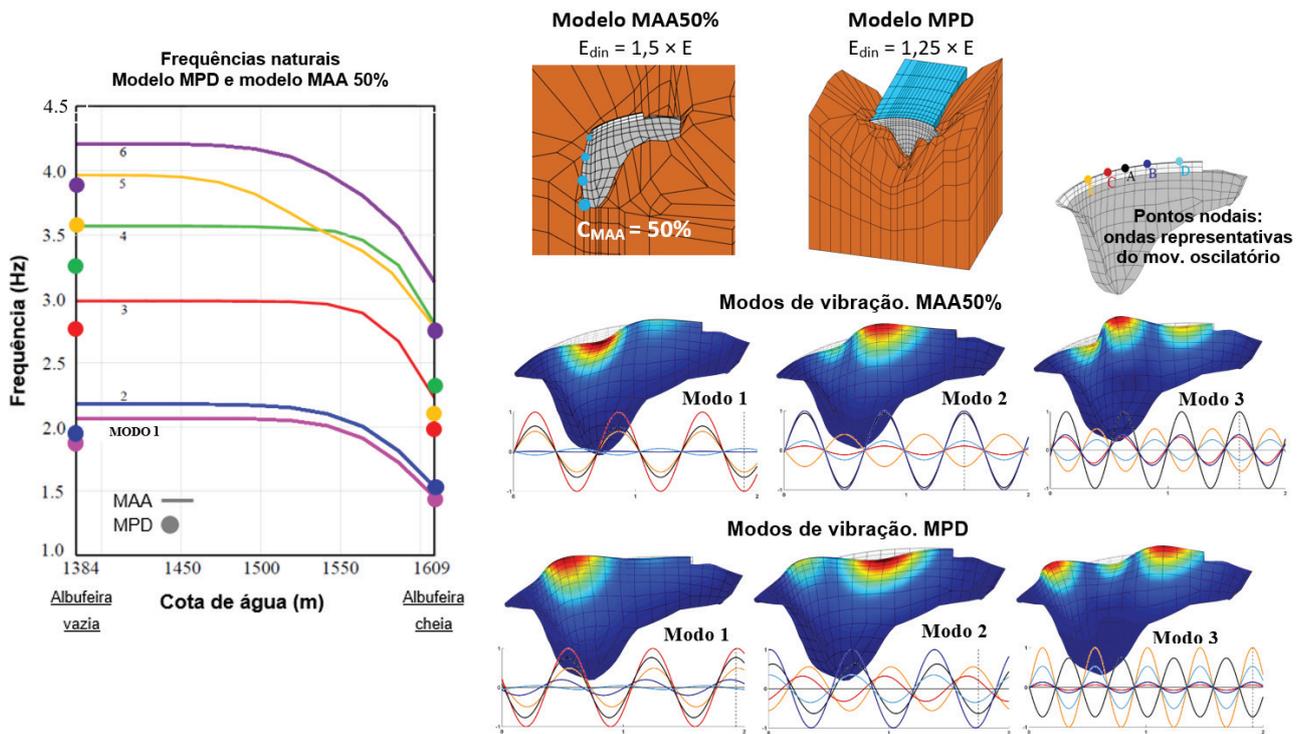


Figura 6 Linhas de influência das frequências naturais da barragem de Luzzone: cálculo com o modelo MAA50% e comparação das frequências calculadas com o MPD. Modos de vibração (modelos MPD e MAA50%) para a albufeira cheia

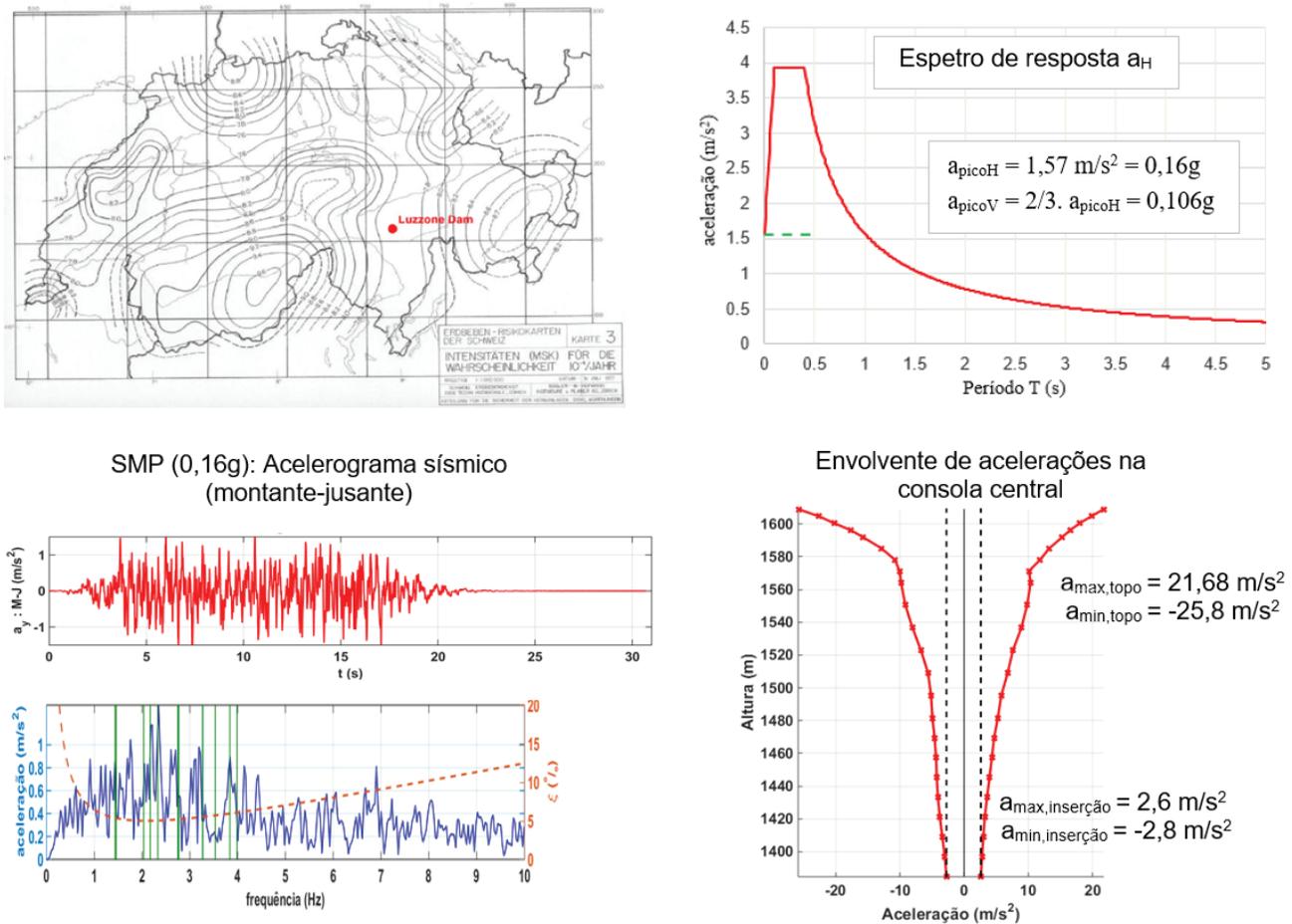


Figura 7 a) Mapa de intensidade sísmica da Suíça (escala MSK) para sismos com período de retorno de 10 000 anos e espectro de resposta regular para o local da barragem; b) SMP ($\xi_{1, \text{Modo}} = 5\%$): acelerograma sísmico gerado (direção montante-jusante) e respetivo espectro de amplitudes, e envolvente de acelerações ao longo da altura da barragem

um fator de amplificação de cerca de 8,5 vezes, enquanto para o SBP, apesar de os valores máximos das acelerações serem muito inferiores, o fator de amplificação é de cerca de 25 vezes, em função do menor amortecimento considerado nos cálculos envolvendo o SBP.

4.4 Análise da resposta sísmica

Na análise do comportamento sísmico da barragem de Luzzone [4] consideram-se as combinações dinâmicas envolvendo a ação sísmica (SBP e SMP) na época de inverno e de verão. Neste trabalho apresentam-se os resultados para a solicitação do sismo durante a época de inverno, que será a mais desfavorável na perspetiva da verificação da segurança a efetuar. Foram calculados os campos de deslocamentos e tensões nos instantes t_m e t_j (instantes em que ocorrem os deslocamentos máximos para montante e para jusante), as envolventes de tensões segundo a consola e segundo o arco na consola central da barragem, e as histórias de tensões principais máximas e mínimas em pontos nodais nos paramentos de montante e jusante.

Analisando a ação isolada do sismo (Figura 8), verifica-se que o SBP provoca deslocamentos e tensões máximas pouco significativos quando comparados com os valores da combinação estática. Já para o SMP surgem deslocamentos máximos da ordem dos 130 mm e tensões elevadas de compressão e de tração (valores da ordem de grandeza dos calculados para as combinações estáticas). Na figura 8 destaca-se ainda a representação dos campos de pressões hidrodinâmicas na albufeira, que é possível calcular utilizando o modelo MPD com a albufeira discretizada.

Relativamente à combinação envolvendo o SMP, na época de inverno (Figuras 9 e 10), verifica-se que o sismo provoca uma amplitude de deslocamentos elevada em torno da posição de equilíbrio estático, sendo os deslocamentos máximos da ordem dos 270 mm para jusante. Analisando as tensões calculadas destacam-se as compressões elevadas, nomeadamente na zona superior da barragem segundo o arco (valores mínimos globais da ordem dos -16 MPa), e as trações, principalmente na zona central, junto à inserção, segundo a consola (valores máximos da ordem dos 7 MPa), que são superiores à tensão resistente do betão (fissuração local expectável).

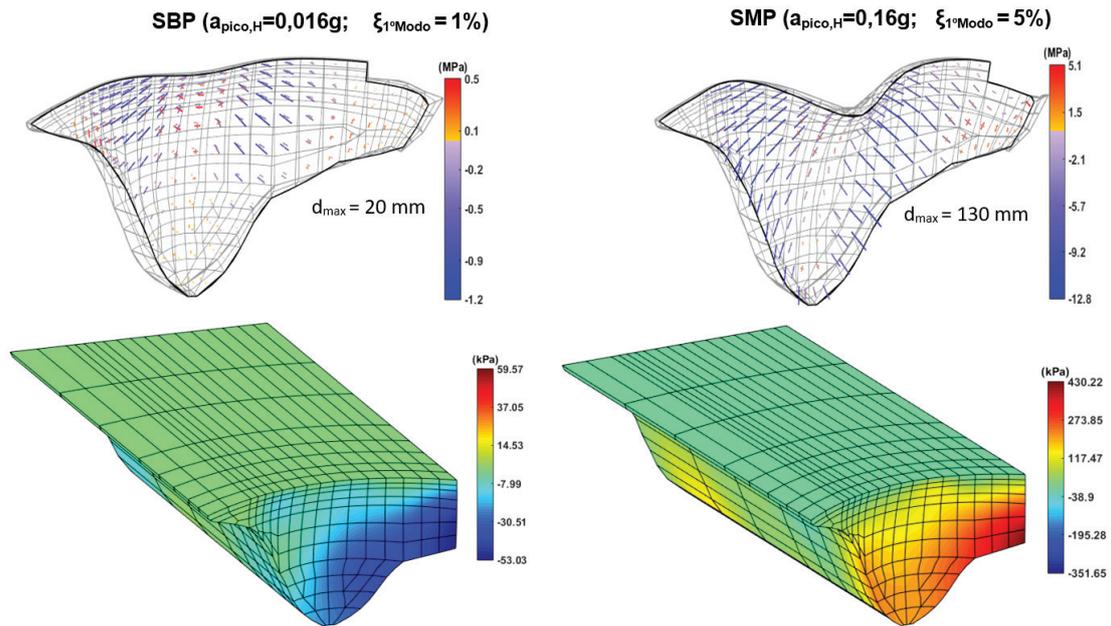


Figura 8 SBP e SMP: deformadas, campos de tensões e pressões hidrodinâmicas

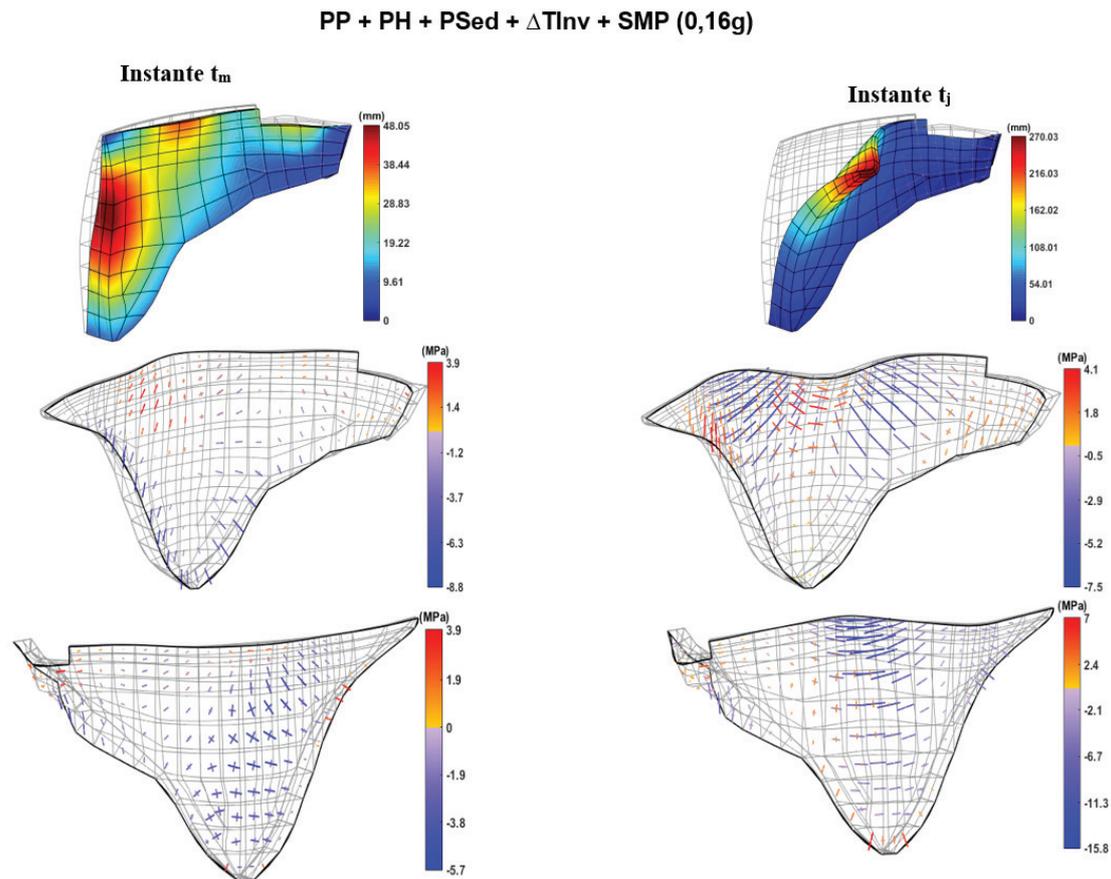


Figura 9 Combinação sísmica (inverno): campos de deslocamentos e de tensões

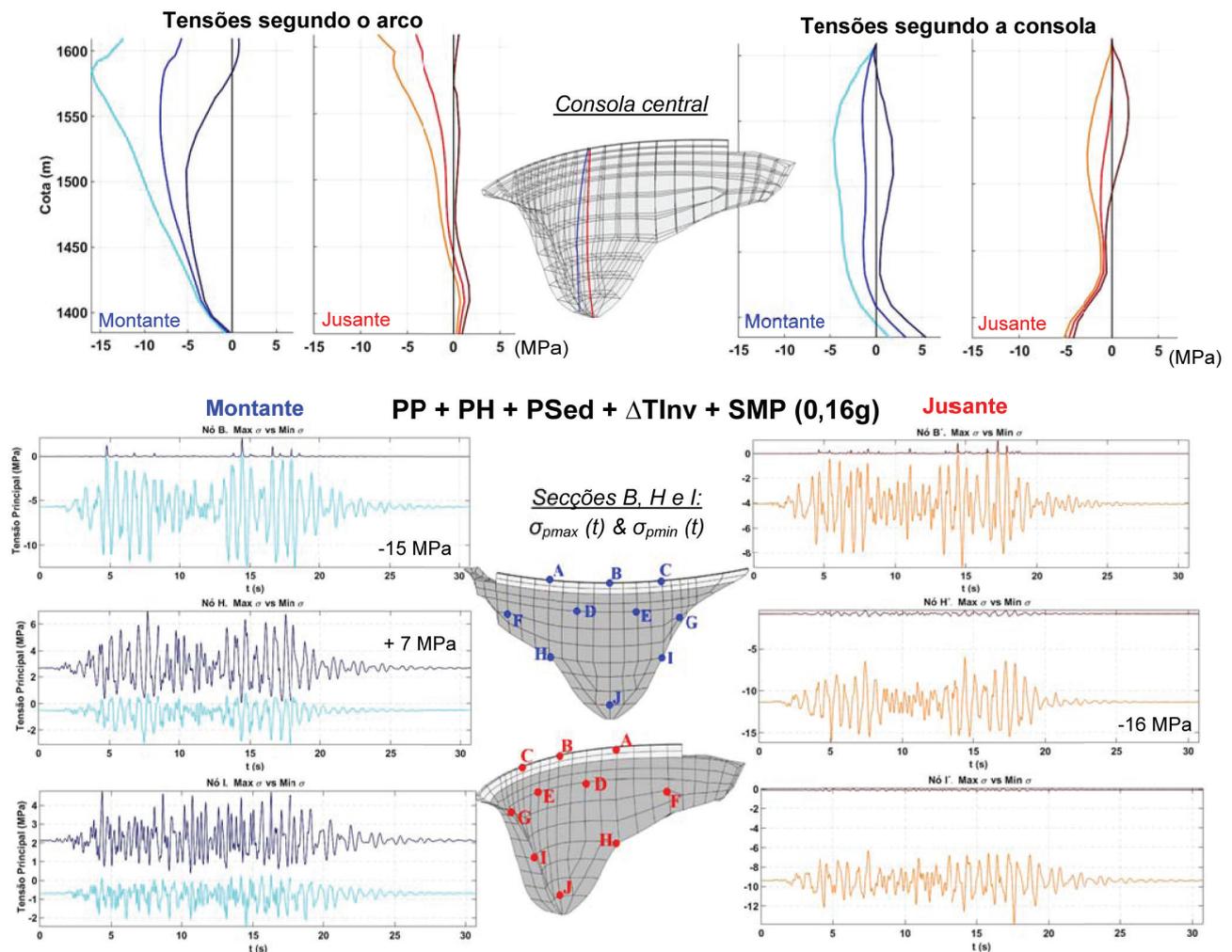


Figura 10 Combinação sísmica (inverno). Envolventes de tensões (segundo o arco e segundo a consola) na consola central. Histórias de tensões principais nos nós B, H e I

5 Verificação da segurança sísmica

A segurança estrutural da barragem de Luzzone sob ações sísmicas é avaliada através da verificação da segurança relativamente à ocorrência de roturas pontuais no betão e da verificação da estabilidade de blocos ao deslizamento e ao derrubamento [4].

5.1 Cenário corrente: roturas pontuais no betão

Esta verificação da segurança é efetuada por comparação do estado de tensão calculado com a capacidade resistente do betão, determinando-se o coeficiente de segurança k de acordo com o critério de rotura de Mohr-Coulomb e de Rankine. A análise e representação gráfica das roturas pontuais é conseguida com base na determinação do índice de rotura i_R , em cada ponto do corpo da barragem e para cada instante do período de atuação do sismo ($i_R = 100/k$, sendo k o coeficiente de segurança à rotura – Figura 11). De acordo com o regulamento (Normas de Projeto de Barragens),

a segurança é verificada para valores de $k > 2,5$, ou seja, $i_R < 40\%$ (cores verdes). Valores de $i_R > 40\%$ são representados com cores a laranja e vermelho (situação de rotura: $i_R = 100\%$). Analisando a Figura 11, pode-se concluir que: i) para a CE_{inv} , verifica-se a segurança em toda a barragem, com exceção da zona inferior do paramento de montante (note-se que a sobreposição do SBP tem um efeito pouco expressivo); ii) para a combinação envolvendo o SMP no inverno, verifica-se a segurança para roturas pontuais no betão, tendo em conta que a maioria da barragem apresenta $i_R < 40\%$, sendo aceitável a existência de algumas zonas superficiais em que tal não se verifica; iii) analisando o estudo do efeito da majoração da ação sísmica ($\lambda = 2, 3$ e 4), é possível observar um grande aumento da área com $i_R > 40\%$, nomeadamente ao longo da espessura do betão e nos paramentos. Para o fator de majoração $\lambda = 4$, admite-se que ocorre o colapso e não se verifica a segurança, considerando que as zonas a vermelho atravessam toda a espessura da barragem ao longo de praticamente toda altura.

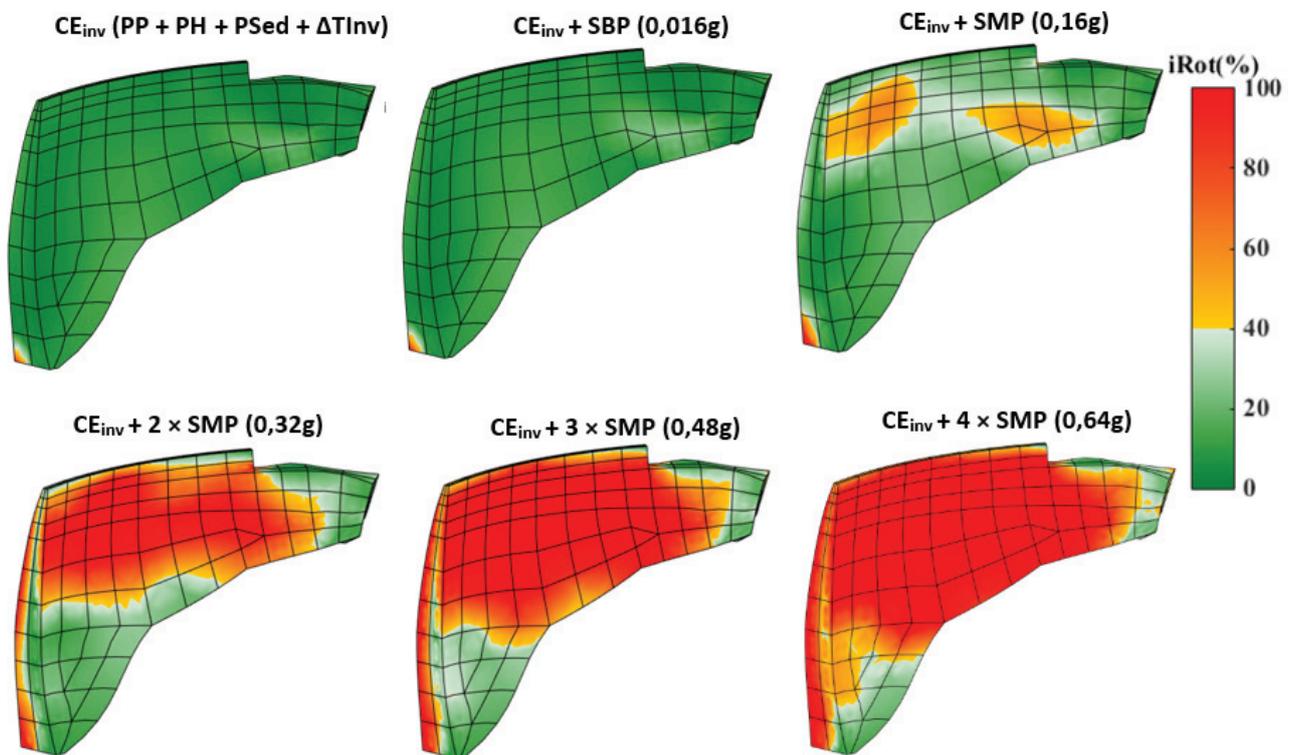
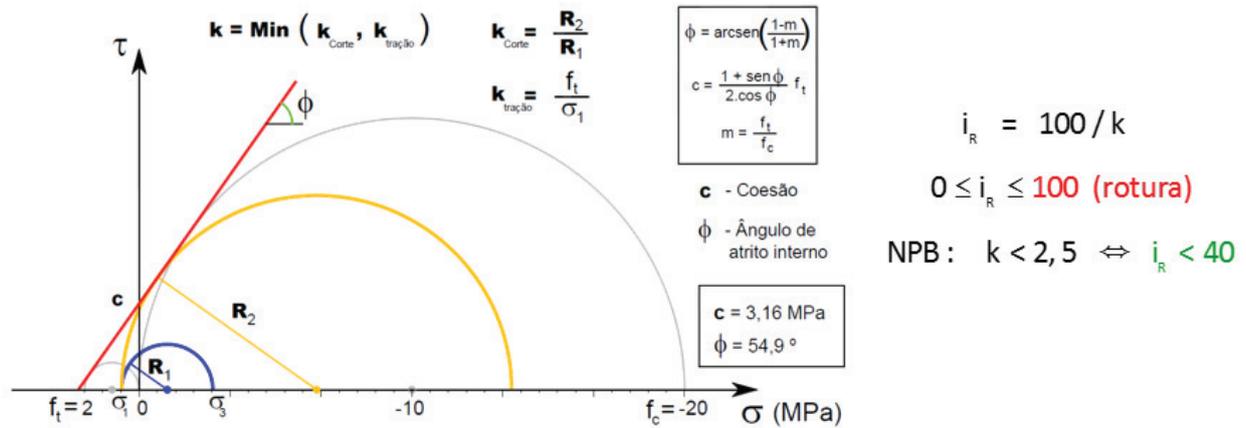


Figura 11 Verificação da segurança relativamente à ocorrência de roturas pontuais

5.2 Cenário de rotura: análise da estabilidade de blocos de controlo

Para a barragem de Luzzone, o estudo da estabilidade de blocos é efetuado para blocos de controlo que se possam formar no topo da consola central, considerando que as juntas verticais laterais abrem totalmente, e que se forma uma fenda na base do bloco a 4 cotas distintas, dando origem a 4 blocos de controlo com alturas diferentes. O cálculo é efetuado com o objetivo de determinar os coeficientes de segurança (CS) ao deslizamento (comparando forças resistentes e atuantes) e ao derrubamento (comparação

de momentos estabilizantes e derrubantes) ao longo do período de atuação do sismo, que devem ser superiores ao valor mínimo regulamentar de 1,2. São consideradas como ações: o peso próprio, a subpressão na base do bloco, a pressão hidrostática e a pressão hidrodinâmica, e as forças sísmicas devido ao SMP (Figura 12).

Neste trabalho (Figura 12) apresentam-se os valores mínimos dos CS calculados para os blocos de controlo e as histórias dos CS para o bloco mais desfavorável (bloco 1). Relativamente ao deslizamento, verifica-se que os valores do CS_{desl} são sempre superiores a 1,2, mesmo para o bloco de controlo 1, pelo que se verifica a segurança. No que se refere ao derrubamento, os momentos estabilizantes são,

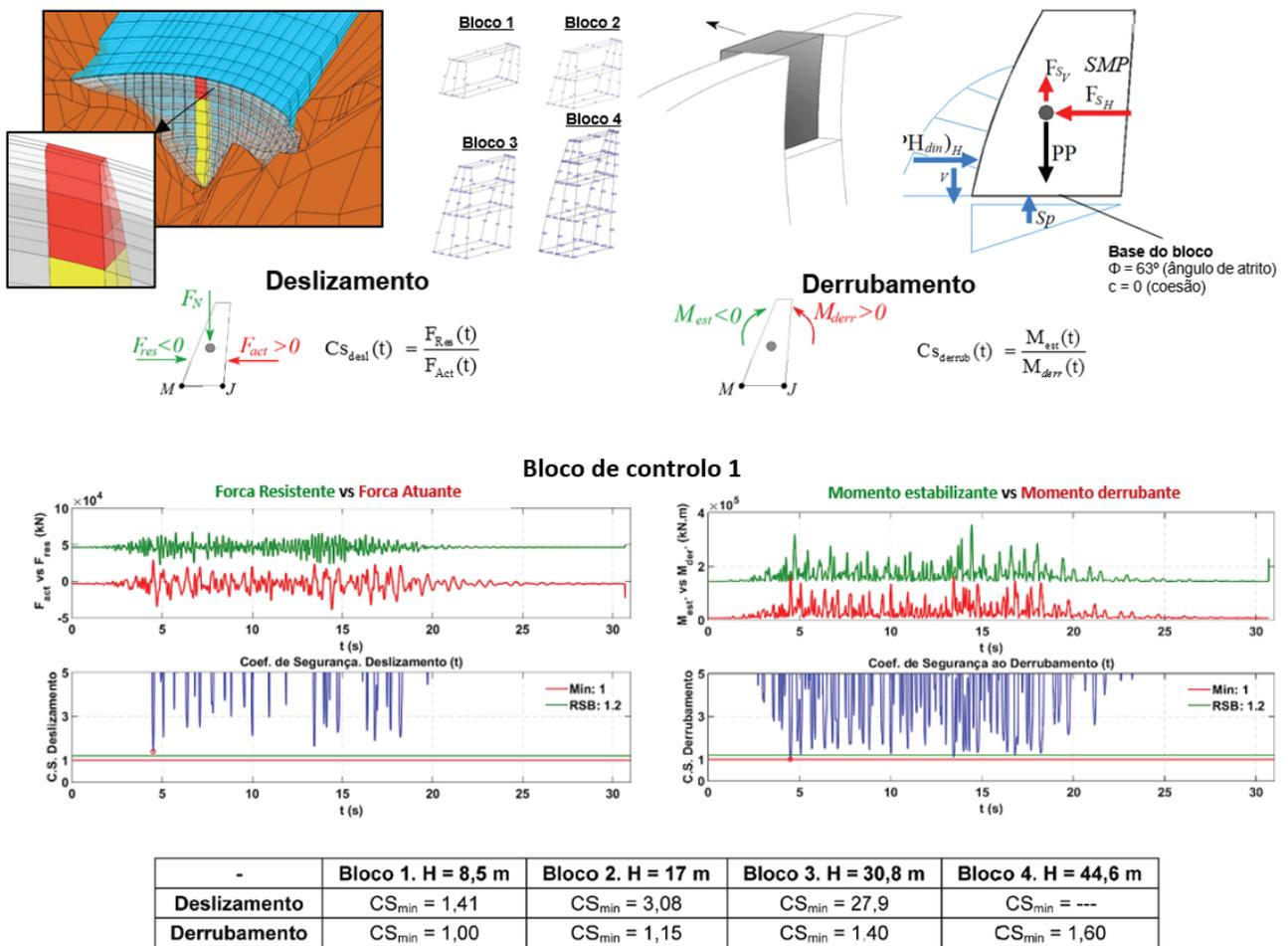


Figura 12 Verificação da segurança: deslizamento e derrubamento de blocos de controlo

de forma geral, superiores aos derrubantes. Ainda assim, para os blocos 1 e 2 existem alguns instantes em que o CS_{derrub} é inferior ao valor mínimo regulamentar. No entanto, como estes representam intervalos de tempo de muito curta duração (0,01 s), considera-se esta situação aceitável, pelo que se verifica a segurança ao derrubamento.

6 Conclusões

O programa DamDySSA1.0, baseado no modelo MPD (formulação em pressões e deslocamentos) e numa abordagem de estado em coordenadas modais complexas, permite efetuar cálculos dinâmicos no domínio do tempo, de sistemas barragem-fundação-albufeira, com uma elevada eficiência computacional. O modelo MPD permite ter em consideração os fenómenos de interação dinâmica

barragem-albufeira e permite simular a propagação das ondas de pressão na albufeira.

A validação programa DamDySSA1.0 foi conseguida através da comparação de resultados numéricos e experimentais, (frequências naturais e configurações modais) obtidos para o caso da barragem do Cabril, para várias cotas de água. Mostrou-se que com o modelo MPD é possível obter um melhor acordo entre os parâmetros modais calculados e identificados em obra, do que o alcançado em estudos anteriores com o modelo clássico de massas de água associadas.

No que diz respeito à análise da segurança da barragem de Luzzone sob ações sísmicas, concluiu-se que, para a atuação SMP (0,16g) são verificadas as exigências de segurança regulamentares relativamente à possibilidade de ocorrência de roturas pontuais no betão e para o cenário de queda de blocos, por deslizamento e/ou derrubamento.

Referências

- [1] Zienkiewicz, O. C.; Taylor, R. L.; Zhu, J. Z. (2005) – *The Finite Element Method: Its Basics and Fundamentals*. (6th ed.). Oxford: ELSEVIER (1st ed., 1867 McGraw-Hill).
- [2] 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 Engineering. Lisboa.
- [3] Gunn, R.; Tzenkov, A. (2015) – Seismic Safety Evaluation of a Concrete Dam Based on Guidelines. 13th Benchmark Workshop on the Numerical Analysis of Dams. September 09-11, 2015, EPFL, Lausanne, Switzerland. ICOLD.
- [4] Oliveira, S.; Alegre, A.; Silvestre, A.; Espada, M.; Câmara, R. (2015) – Seismic safety evaluation of Luzzone dam. Use of a 3DFE state formulation in pressures and displacements. 13th ICOLD International Benchmark Workshop on Numerical Analysis of Dams, EPFL, Lausanne.

