



## **Análise de barragens abóbada sob ações sísmicas de grande intensidade. Movimentos de juntas e roturas no betão**

**André Alegre**

*Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa, Portugal, [andrefalegre92@gmail.com](mailto:andrefalegre92@gmail.com)*

**Sérgio Oliveira**

*Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa, Portugal, [soliveira@lnec.pt](mailto:soliveira@lnec.pt)*

**Jorge Proença**

*Instituto Superior Técnico (IST-ULisboa), Lisboa, Portugal, [jorge.m.proenca@tecnico.ulisboa.pt](mailto:jorge.m.proenca@tecnico.ulisboa.pt)*

**Paulo Mendes**

*Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL-IPL), Lisboa, Portugal, [pmendes@dec.isel.ipl.pt](mailto:pmendes@dec.isel.ipl.pt)*

### **Resumo**

Neste trabalho apresenta-se um estudo sobre o comportamento sísmico não-linear de uma grande barragem abóbada. Mostram-se os principais resultados obtidos para uma combinação de ações incluindo o peso próprio, a pressão hidrostática (albufeira cheia), e a ação sísmica, definida por um acelerograma com aceleração de pico de 0,6g aplicado na direção montante-jusante. O objetivo é analisar a influência do comportamento não-linear das juntas de contração na resposta estrutural sob sismos de grande intensidade, e avaliar a ocorrência de danos no betão.

Os cálculos numéricos são realizados com o programa de elementos finitos 3D *DamDySSA4.0*, desenvolvido no LNEC para análise dinâmica de barragens de betão, e que inclui um módulo para análise sísmica não-linear. O comportamento dinâmico do sistema barragem-fundação-albufeira é simulado com um modelo acoplado em deslocamentos e pressões, que permite considerar a interação dinâmica água-estrutura e a hipótese de amortecimento generalizado (não-proporcional). O comportamento da fundação é simulado de forma eficiente recorrendo a uma técnica de subestruturação. A resposta sísmica não-linear é calculada por integração numérica ao longo do tempo, com base no método de Newmark e usando um método iterativo de redistribuição de tensões, tendo em conta: i) o comportamento não-linear do betão, com base num modelo de dano isotrópico com enfraquecimento e duas variáveis de dano independentes ( $d^+$  e  $d^-$ ); e ii) os movimentos de abertura/fecho e deslizamento de juntas e fendas, usando um modelo baseado no critério de Mohr-Coulomb e em leis deslocamento-tensão adequadas.

Com este trabalho mostram-se as potencialidades do programa *DamDySSA4.0* para efetuar estudos de previsão do comportamento sísmico não-linear de barragens de betão e para apoiar estudos de verificação da segurança sísmica.

**Palavras-chave:** Barragens abóbada; Análise sísmica não-linear; Modelo de dano para o betão; Movimentos de juntas; Sistema barragem-fundação-albufeira

## 1 INTRODUÇÃO

As grandes barragens de betão são infraestruturas que desempenham um papel chave na gestão dos recursos hídricos, contribuindo de forma decisiva para abastecimento de água, produção de energia, irrigação, e controlo de cheias. Sendo estruturas de elevado risco potencial, deve ser garantida a sua segurança para cenários correntes e excecionais, sob ações estáticas e ações dinâmicas, e em particular ações sísmicas. Portanto, é fundamental acompanhar o comportamento dinâmico das grandes barragens de betão de forma contínua, tendo em vista a deteção de eventuais processos de deterioração evolutiva, para um efetivo controlo da integridade estrutural, e a monitorização do comportamento sísmico [1], bem como analisar a resposta estrutural para sismos de grande intensidade, com o objetivo de avaliar o seu desempenho e apoiar a verificação da segurança sísmica [2]. Neste contexto, destaca-se a necessidade de investir não só em sistemas para monitorização dinâmica em contínuo, sob excitação ambiente/operacional e durante eventos sísmicos, mas também em avançados modelos de elementos finitos, para simulação do comportamento dinâmico dos sistemas barragem-fundação-albufeira, envolvendo a variação das ações estáticas e dinâmicas [3].

A modelação numérica do comportamento dinâmico de barragens de betão é uma área na qual tem sido desenvolvido um significativo trabalho de investigação, levando ao desenvolvimento de vários modelos baseados no Método dos Elementos Finitos (MEF) [4]. Em relação à modelação da albufeira e da interação dinâmica barragem-água, podem ser utilizados a) modelos clássicos de massas de água associadas, formulados em deslocamentos, nos quais se usa a solução de Westergaard [5] para calcular massas de água equivalentes à pressão hidrodinâmica, ou b) modelos acoplados, habitualmente formulados em deslocamentos (barragem-fundação) e em pressões ou potenciais de velocidade (albufeira), que consideram a interação sólido-fluido e a propagação de ondas de pressão na albufeira [4,6]. Quanto à modelação da fundação, podem utilizar-se a) modelos baseados na hipótese de fundação sem massa [7,8], assumindo que a barragem é suportada por um bloco de fundação elástico, com apoios rígidos na base, ou b) modelos de fundação com massa, que permitem considerar a dissipação de energia por radiação e a propagação de ondas no bloco de fundação [9], e.g. integrando elementos de fronteira [9] ou usando fronteiras viscoelásticas nos limites da fundação [10].

No que diz respeito ao comportamento sísmico de barragens abóbada, a análise da resposta pode ser efetuada em regime linear, considerando comportamento elástico linear no betão e juntas fechadas. Esta é uma abordagem válida para sismos de pequena intensidade, os quais são frequentemente medidos em obras com sistemas de monitorização em contínuo [11], e que induzem vibrações de amplitudes reduzidas no corpo da barragem. No entanto, sismos de maior intensidade podem originar movimentos oscilatórios significativos que resultam na abertura das juntas de contração verticais [7,12], e conseqüentemente, na libertação de tensões segundo os arcos na zona superior. Simultaneamente, podem surgir tensões elevadas, superiores à resistência do betão, provocando danos à tração e/ou à compressão [13,14]. Assim, na análise da resposta de barragens abóbada sob sismos de grande intensidade são necessários modelos constitutivos adequados, idealmente considerando tanto os movimentos das juntas como eventuais roturas no betão.

Com vista a contribuir para o conhecimento nesta área, apresenta-se neste trabalho um estudo sobre o comportamento sísmico não-linear da barragem do Cabril (132 m de altura), Portugal.

## 2 PROGRAMA UTILIZADO: *DamDySSA4.0*

Neste trabalho utilizou-se o programa de elementos finitos 3D *DamDySSA4.0*, desenvolvido para análise dinâmica de barragens de betão (Fig. 1). Este programa inclui três módulos, nomeadamente para (i) análise modal complexa; (ii) análise sísmica em regime linear; e (iii) análise sísmica não-linear.

O comportamento dinâmico do sistema barragem-fundação-albufeira é simulado com base num modelo acoplado [4,6], usando uma formulação de elementos finitos em deslocamentos, no domínio sólido (barragem-fundação), e em pressões hidrodinâmicas, no domínio fluido (albufeira). Consideram-se condições de fronteira específicas nas diferentes superfícies envolventes do sistema para simular a interação dinâmica barragem-albufeira, a pressão nula na superfície da albufeira e a propagação das ondas de pressão na água ao longo da albufeira, com radiação na fronteira água-água. Além disso, utiliza-se o método de subestruturação [8] para calcular separadamente o bloco de fundação como uma subestrutura elástica e sem massa, cuja contribuição em termos de rigidez e amortecimento é introduzida diretamente nos nós da interface barragem-fundação. Com este método, os cálculos dinâmicos ao longo do tempo são efetuados envolvendo apenas a barragem, apoiada elasticamente, e a albufeira, o que permite aumentar significativamente a eficiência computacional. O *input* sísmico (acelerogramas) é aplicado na base da barragem, admitindo-se uma distribuição uniforme ao longo da superfície de inserção.

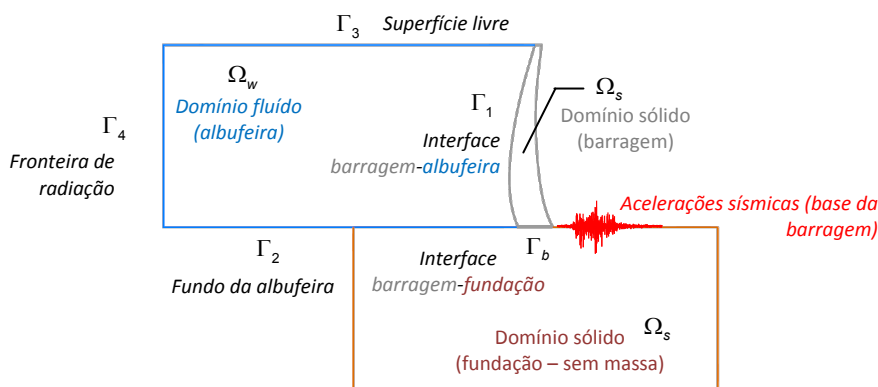
O módulo para análise sísmica não-linear foi desenvolvido para efetuar estudos de previsão do comportamento de barragens sob sismos de grande intensidade e para apoiar estudos de verificação da segurança sísmica ao colapso. Este módulo permite efetuar o cálculo sísmico do sistema barragem-fundação-albufeira com amortecimento não-proporcional, através da combinação de uma formulação acoplada para integração numérica no domínio do tempo, baseada no método de Newmark, e de uma técnica de redistribuição de tensões, que permite simular a resposta estrutural não-linear. Consideram-se os movimentos de abertura/fecho e deslizamento das juntas, usando um modelo constitutivo não-linear baseado no critério de rotura de Mohr-Coulomb e em leis de tensão-deslocamento adequadas [12], e o comportamento não-linear do betão até à rotura, com base num modelo de dano isotrópico com enfraquecimento, com duas variáveis de dano independentes [15]:  $d^+$ , dano à tração, e  $d^-$ , dano à compressão.

## 3 CASO DE ESTUDO: BARRAGEM DO CABRIL

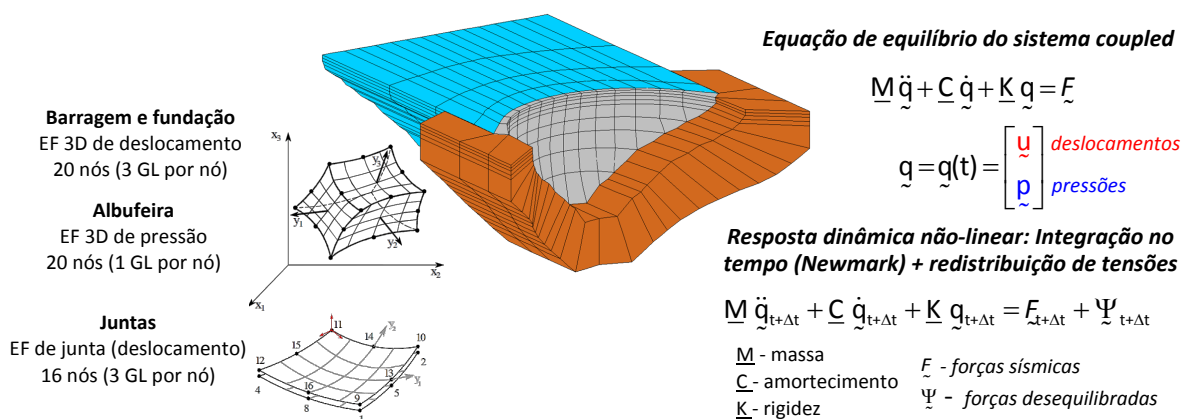
O caso de estudo escolhido para este trabalho é a barragem do Cabril (Fig.2), a mais alta barragem em Portugal, em funcionamento desde 1954 no Rio Zêzere. Esta é uma barragem abóbada de dupla curvatura, com 132 m de altura, e um coroamento com um desenvolvimento de 290 m. Na zona central, a espessura máxima é de 20 m, junto à base, e a mínima é de 4 m, a cerca de 7 m abaixo do nível do coroamento. A barragem foi construída sobre um maciço granítico de boa qualidade, e eleva-se a uma cota máxima de 297 m.

Durante o primeiro enchimento da albufeira surgiram fendas horizontais na zona superior da barragem (280-285 m), as quais são atualmente visíveis no paramento de jusante. De acordo com vários estudos computacionais, esta fendilhação é devida a efeitos estruturais associados à maior espessura adotada para a zona do coroamento e não põe em causa o bom comportamento global da obra. No final da década de 1990 foram detetadas reações expansivas no betão, de reduzida amplitude.

## Sistema barragem-fundação-albufeira

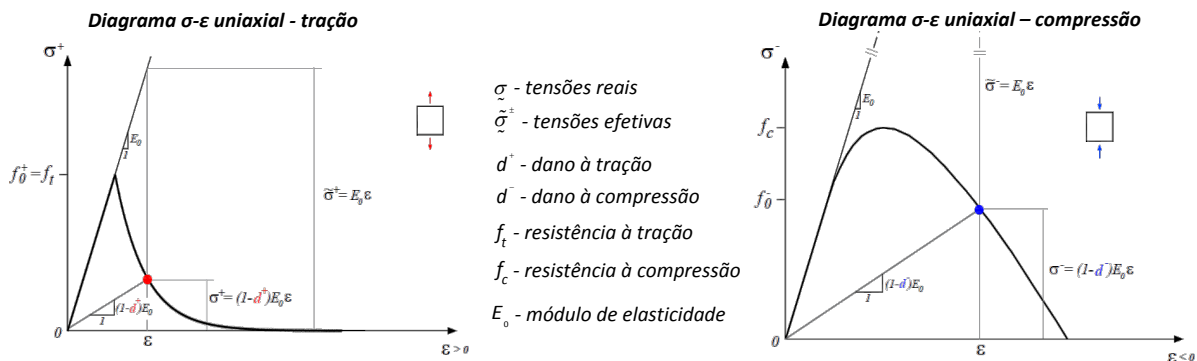


## Modelo de elementos finitos e formulação para cálculo dinâmico



## Modelo de dano isotrópico de duas variáveis independentes ( $d^+$ e $d^-$ )

$$\underline{\sigma} = (1 - d^+) \underline{\tilde{\sigma}}^+ + (1 - d^-) \underline{\tilde{\sigma}}^-$$



## Juntas - lei de Mohr-Coulomb

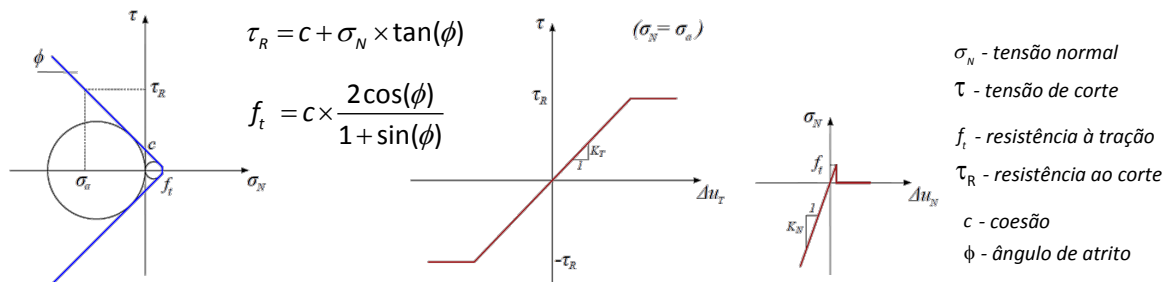


Figura 1. DamDySSA4.0. Modelo do sistema barragem-fundação-albufeira, formulação de elementos finitos para cálculo dinâmico, e modelos constitutivos (betão e juntas).

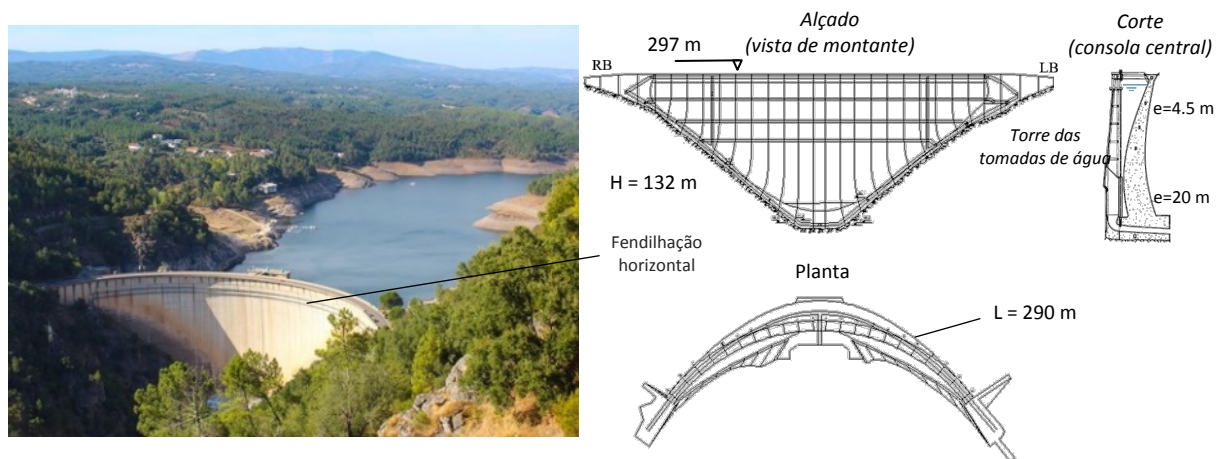


Figura 2. Caso de estudo: barragem do Cabril, Portugal

Os cálculos para simulação da resposta sísmica da barragem do Cabril foram efetuados com o programa *DamDySSA*, utilizando o modelo de elementos finitos do sistema barragem-fundação-albufera apresentado na Fig. 3. A malha de elementos finitos tem um total de 19219 nós e 2914 elementos, incluindo 909 na barragem, 1515 na albufera, e 490 na fundação. Além disso, foram introduzidas no modelo as juntas verticais na barragem, a superfície na interface barragem-fundação, e ainda uma fenda horizontal, que representa de forma simplificada a zona fendilhada existente no corpo da obra entre as cotas 280 m e 285 m, resultando num total de 924 elementos de junta.

O betão da barragem e a rocha da fundação são considerados materiais isotrópicos, com módulo de elasticidade  $E = 25 \text{ GPa}$  e coeficiente de Poisson  $\nu = 0,2$ , enquanto a água na albufera é assumida como um fluido compressível, com uma velocidade de propagação das ondas de pressão  $c_w = 1440 \text{ m/s}$ . Para análise sísmica não-linear, considera-se um coeficiente de amortecimento de cerca de 10% na banda de frequências dos primeiros modos de vibração (entre os 2 e os 3 Hz). As propriedades e parâmetros aqui utilizados foram previamente testados e calibrados em estudos anteriores, mediante a comparação de resultados numéricos com resultados de monitorização da barragem do Cabril [3,12].

No que diz respeito ao comportamento não-linear do betão, considera-se resistência à tração  $f_t = 3 \text{ MPa}$  e resistência à compressão  $f_c = -30 \text{ MPa}$ . Quanto ao comportamento não-linear das juntas: (i) nas juntas verticais, assume-se coesão nula, para permitir movimentos de abertura sob tensões normais de tração, e um ângulo de atrito de  $30^\circ$ , com vista a simular de forma simplificada o efeito das caixas de corte; (ii) na interface barragem-fundação consideram-se valores elevados de coesão e ângulo de atrito, para ter em conta o efeito de encaixe da barragem na rocha; e (iii) a fenda horizontal é modelada também com uma rigidez mais elevada que a das juntas verticais, para limitar os movimentos de abertura.

A resposta sísmica não-linear é analisada para a de ações envolvendo o peso próprio (PP), a pressão hidrostática (PH) para a condição de albufera cheia (água à cota 297 m), e a ação sísmica (Sismo), que atua na direção montante-jusante. Em relação ao input sísmico, utiliza-se um acelerograma gerado a partir de um espectro de resposta regulamentar, com duração de 10 s gerado e aceleração de pico de  $0,6g$ , o qual é aplicado ao nível da superfície de inserção da barragem (considera-se a hipótese de aceleração uniforme ao longo da inserção).

### Modelo de EF do sistema barragem-fundação-albufeira

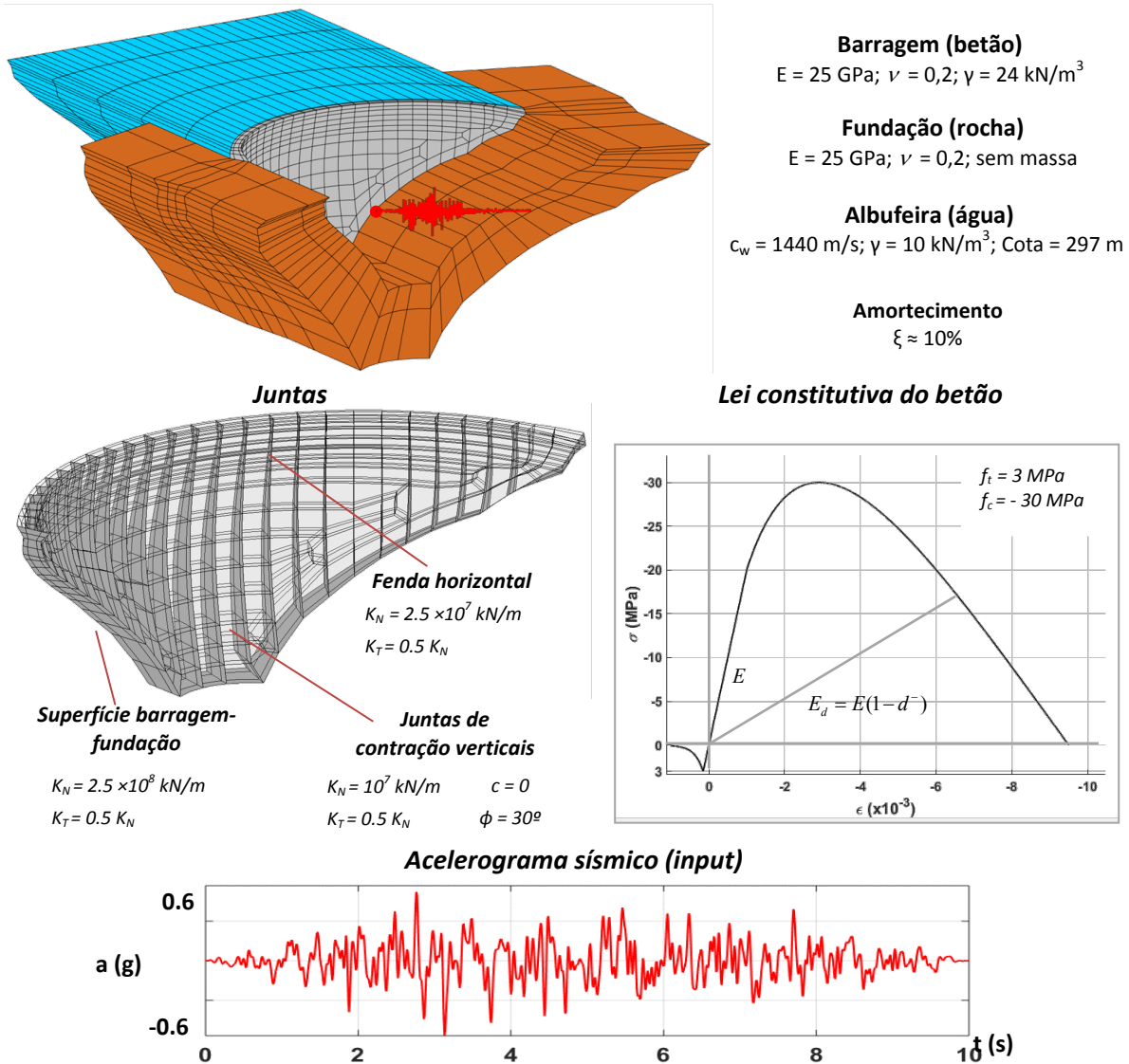


Figura 3. Modelo do sistema barragem-fundação albufeira utilizado para análise sísmica não-linear da barragem do Cabril. Propriedades das juntas, lei constitutiva do betão, e input sísmico.

## 4 APLICAÇÃO: ANÁLISE DA RESPOSTA SÍSMICA NÃO-LINEAR DA BARRAGEM DO CABRIL

Nesta secção apresentam-se os principais resultados do estudo do comportamento sísmico não-linear da barragem do Cabril, para a combinação de ações PP+PH297+Sismo. A resposta sísmica não-linear, calculada com o modelo da Fig. 3, é comparada com a resposta sísmica linear, obtida utilizando um modelo sem juntas na barragem nem danos no betão, com o objetivo de avaliar a influência dos movimentos das juntas no comportamento estrutura. Esta análise foca-se nos instantes em que a barragem se deforma para montante, tendo em conta que, no caso do cálculo não-linear, é nesse momento que ocorrem as aberturas de juntas mais significativas (quando a barragem se deforma para jusante a barragem fica globalmente comprimida e as juntas fecham). Por fim, avalia-se a distribuição dos danos à tração, tendo em conta as tensões instaladas.

Quanto à resposta sísmica em regime linear, verifica-se que os deslocamentos máximos na direção de montante ( $\approx 75 \text{ mm}$ ) ocorrem na zona central, junto ao coroamento (Fig. 4). Neste instante, as

trações máximas surgem no topo das consolas centrais na direção dos arcos, a montante (8 MPa). No paramento de jusante ocorrem também trações elevadas, entre os 3 e os 4,9 MPa. Junto à base das consolas laterais mais baixas, a montante, ocorrem trações de cerca de 4 MPa.

### Resposta sísmica linear: PP+PH297+Sismo(0,6g)

Instante de maior deslocamento sísmico para montante

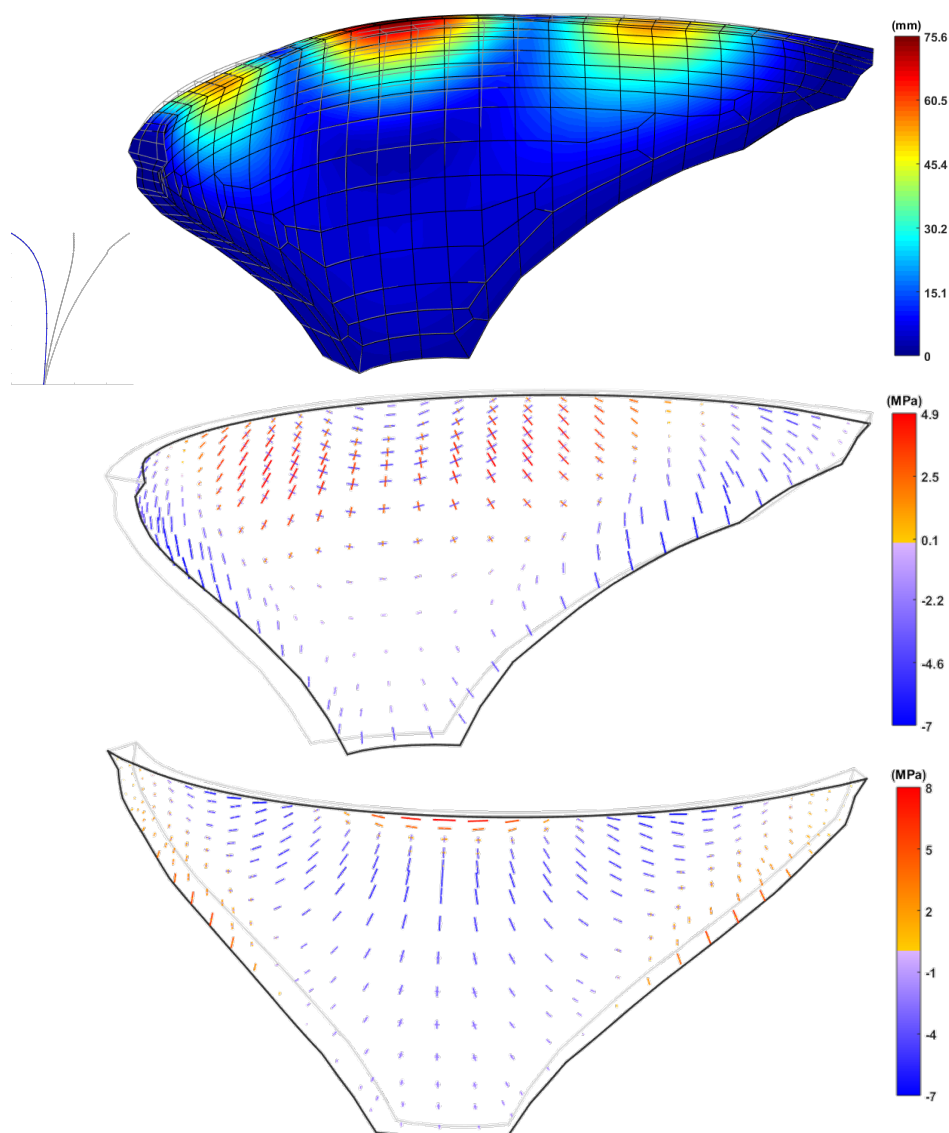


Figura 4. Resposta sísmica linear da barragem do Cabril.

Quanto à resposta sísmica não-linear (Fig. 5 e Fig. 6), calculada considerando os movimentos das juntas e o dano no betão, verifica-se que os maiores deslocamentos para montante são da ordem de 164 mm e ocorrem ao longo da zona superior das consolas mais altas da barragem, em particular no topo das consolas laterais, onde se observam as maiores aberturas de juntas ( $\approx 10$  mm) e deslizamentos tangenciais ( $\approx 20$  mm). Em relação aos campos de tensões, é possível notar que, quando a barragem se deforma para montante, a abertura das juntas de contração verticais origina a libertação das tensões de tração segundo os arcos na zona superior junto ao coroamento.

Consequentemente, surgem tensões verticais segundo as consolas, nomeadamente trações, a jusante, e compressões, a montante. Assim, surgem danos à tração significativos ao longo de toda a inserção junto à base da barragem e ao longo da altura de várias das consolas laterais, a montante, e ao longo da zona superior das consolas mais altas e de praticamente toda a altura das consolas mais baixas, a jusante. Em várias zonas os danos à tração atingem mesmo valores unitários ( $d^+ = 100\%$ ), em pontos onde ocorre a rotura (naturalmente, nas zonas onde surgem os danos mais elevados não são representadas as tensões). Para o acelerograma considerado, com aceleração de pico da ordem de 0,6g, verifica-se que não ocorrem quaisquer danos à compressão.

**Resposta sísmica linear: PP+PH297+Sismo(0,6g)**

**Instante de maior deslocamento sísmico para montante, com abertura de juntas verticais**

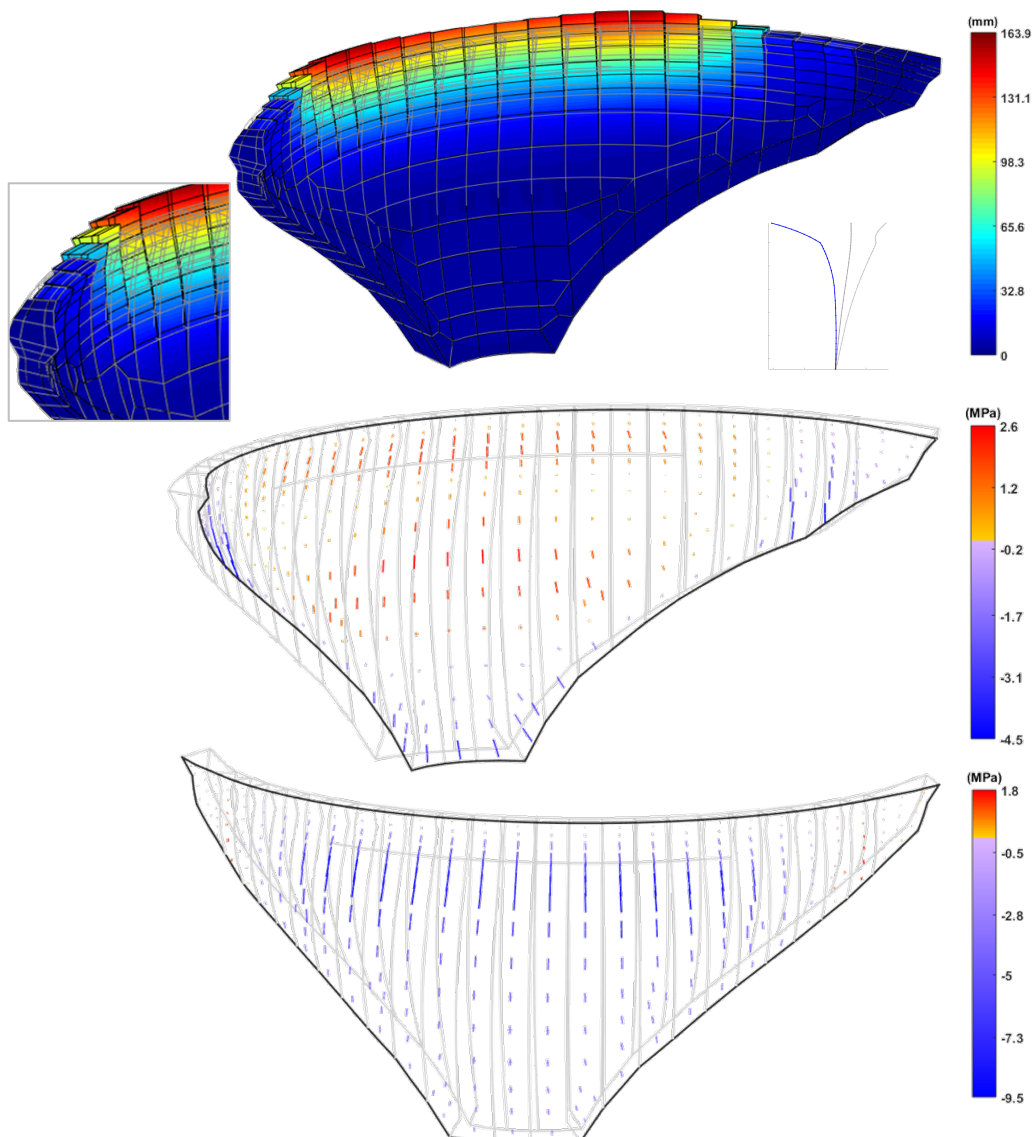


Figura 5. Resposta sísmica não-linear da barragem do Cabril.

**Resposta sísmica não-linear: PP+PH297+Sismo(0,6g)**

## Danos à tração ( $d^+$ )

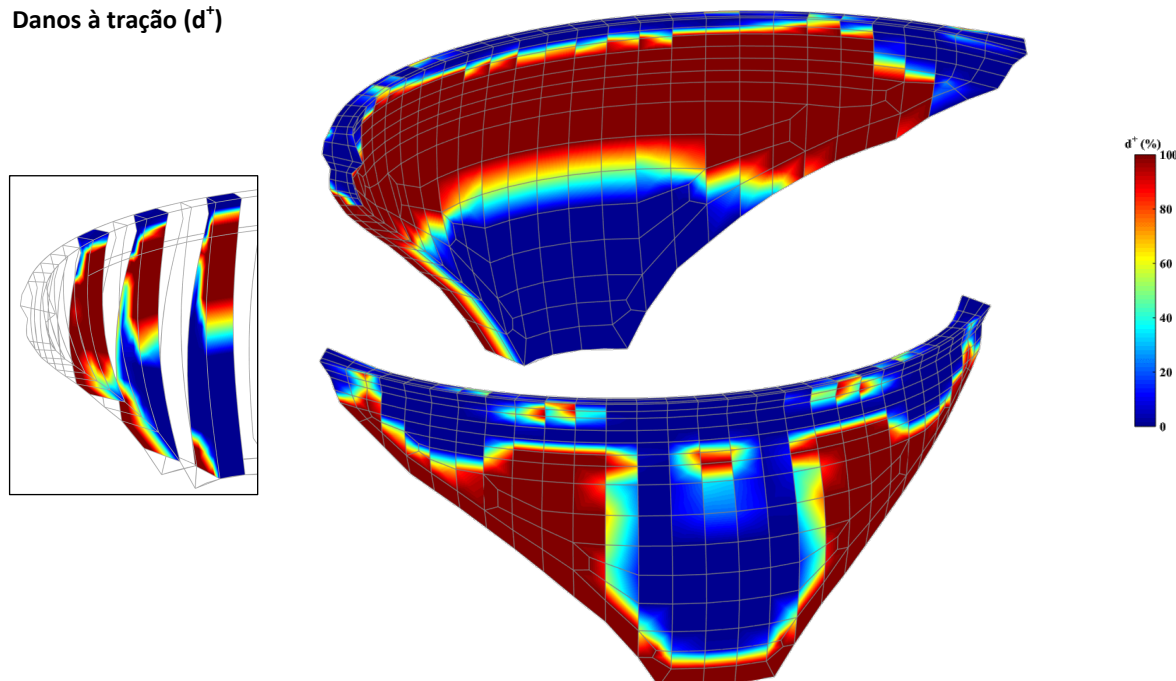


Figura 5. Resposta sísmica não-linear da barragem do Cabril. Danos à tração.

## 5 CONCLUSÕES

O presente trabalho focou-se no estudo do comportamento sísmico não-linear da barragem do Cabril, uma barragem abóbada de dupla curvatura com 132 m de altura. Os cálculos foram realizados utilizando o programa *DamDySSA*, desenvolvido para análise do comportamento dinâmico de barragens de betão. Em particular, usou-se o módulo para análise sísmica não-linear, simulando movimentos de juntas e danos no betão. Considerou-se neste estudo uma combinação de ações envolvendo o peso-próprio, a pressão hidrostática (albufeira cheia), e uma ação sísmica representada por um acelerograma aplicado na direção montante-jusante, com aceleração de pico de 0,6g.

Os resultados apresentaram permitiram mostrar que o comportamento estrutural de barragens abóbada é claramente influenciado pelos movimentos das juntas de contração verticais. No caso da barragem do Cabril, verificou-se que a abertura das juntas provocou a libertação das trações segundo os arcos junto ao coroamento, e, conseqüentemente, o aumento das trações verticais segundo as consolas, a jusante, e ao longo da inserção, a montante.

Do ponto de vista da performance sísmica, pode-se afirmar que a barragem do Cabril apresenta uma boa capacidade resistente a sismos de grande intensidade. Apesar dos danos à tração cobrirem grande parte do paramento de jusante, e em algumas zonas se propagarem através da espessura das consolas, situação que poderia comprometer a integridade estrutural da barragem e exigir intervenções de reparação, não seria expectável que esta situação causasse o colapso global da barragem.

Por fim, este trabalho permitiu demonstrar as potencialidades do programa *DamDySSA4.0* para efetuar estudos de previsão do comportamento sísmico não-linear de barragens de betão e para apoiar estudos de verificação da segurança sísmica.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) o financiamento do trabalho de investigação através da bolsa de doutoramento SFRH/BD/116417/2016.

## REFERÊNCIAS

- [1] ICOLD (2016). Bulletin 148: Selecting seismic parameters for large dams – Guidelines.
- [2] ICOLD (2018). Bulletin 158: Dam surveillance guide.
- [3] Oliveira, S., Alegre, A., Carvalho, E., Mendes, P., Proença, J. (2021). Seismic and Structural Health Monitoring Systems For Large Dams: Theoretical, Computational and Practical Innovations. *Bulletin of Earthquake Engineering*, (preprint).
- [4] Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., Zhu, J. Z. (2013). *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals* (7<sup>th</sup> ed.). Elsevier Butterworth-Heinemann.
- [5] Westergaard, H. M. (1933). Water pressures on dams during earthquakes. *Transactions (ASCE)*, 98, pp. 418–472.
- [6] Zienkiewicz, O. C., Bettess, P. (1978). Fluid-structure dynamic interaction and wave forces. An introduction to numerical treatment. *International Journal on Numerical Methods in Engineering*, 13, pp. 1–16.
- [7] Clough, R. W. (1980). Non-linear mechanisms in the seismic response of arch dams. *International Research Conference on Earthquake Engineering*, Skopje, Yugoslavia.
- [8] Fok, K. L., Chopra, A. K. (1986). Earthquake analysis of arch dams including dam-water interaction, reservoir boundary absorption and foundation flexibility. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 14, pp. 155–184.
- [9] Chopra, A. K., Tan, H. (1992). Modelling dam-foundation interaction in analysis of arch dams. *10th World Conference on Earthquake Engineering*, Madrid, Spain.
- [10] Zhang, C., Pan, J., Wang, J.-T. (2009). Influence of seismic input mechanisms and radiation damping on arch dam response. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29(9), pp. 1282–1293.
- [11] Fenves, G. L., Mojtahedi, S., Reimer, R. B. (1992). Effect of contraction joints on earthquake response of an arch dam. *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, 118, pp. 1039–1055.
- [12] Alegre, A., Carvalho, E., Matsinhe, B., Mendes, P., Oliveira, S., Proença, J. (2019). Monitoring vibrations in large dams. *HYDRO 2019 - Concept to Closure: Practical Steps*, Porto, Portugal.
- [13] Cervera, M., Oliver, J., & Faria, R. (1995). Seismic evaluation of concrete dams via continuum damage models. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 24(9), pp. 1225–1245.
- [14] Faria, R., Oliver, J., Cervera, M. (1998). A strain-based plastic viscous-damage model for massive concrete structures. *International Journal of Solids and Structures*, 35(14), pp. 1533–1558.
- [15] Oliveira, S., Faria, R. (2006). Numerical simulation of collapse scenarios in reduced scale tests of arch dams. *Engineering Structures*, 28(10), pp. 1430–1439.