

# Considerações sobre a utilização de modelos numéricos no controlo de segurança de barragens de betão

Considerations about the use of numerical models in the safety assessment of concrete dams

Noemi Schclar Leitão  
Eloisa Castilho  
Nuno Monteiro Azevedo  
Maria Luísa Braga Farinha

## Resumo

O presente trabalho pretende resumir os requisitos mínimos a que devem obedecer os modelos numéricos utilizados na avaliação da segurança das barragens de betão durante a fase de primeiro enchimento da albufeira ou face a potenciais cenários de rotura. Apresentam-se critérios gerais para a definição e a discretização dos modelos; para calcular o campo de temperaturas no corpo da barragem; para representar os comportamentos não lineares na barragem e no maciço de fundação e para realizar cálculos com comportamentos acoplados.

## Abstract

This paper aims to summarize the minimum requirements that the numerical models must meet in order to be used in the safety assessment of concrete dams during the phase of the first filling of the reservoir or in cases of potential failure scenarios. General criteria for the definition and discretization of the models; for the computation of the body dam temperature field; for the representation of nonlinear behaviours in the dam and foundation mass and for performing coupling behaviours analysis are presented.

Palavras-chave: Barragens de betão / Avaliação de segurança / Modelos numéricos / Análise não linear

Keywords: Concrete dams / Safety assessment / Numerical models / Non-linear analysis

## Noemi Schclar Leitão

Investigadora Principal  
Laboratório Nacional de Engenharia Civil  
Lisboa, Portugal  
nschclar@lnec.pt

## Eloísa Castilho

Aluna de Doutoramento  
Instituto Superior Técnico  
Lisboa, Portugal  
eloisa.castilho@tecnico.ulisboa.pt

## Nuno Monteiro Azevedo

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

## Maria Luísa Braga Farinha

Investigadora Auxiliar  
Laboratório Nacional de Engenharia Civil  
Lisboa, Portugal  
lbraga@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.*

LEITÃO, N.S. [et al.] – Considerações sobre a utilização de modelos numéricos no controlo de segurança de barragens de betão. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 12. ISSN 2183-8488. (março 2020) 5-16.

## 1 Introdução

A avaliação de segurança das barragens requer a comparação das medições realizadas através do sistema de observação instalado nas barragens com valores de referência. Para este fim, é necessário desenvolver modelos de comportamento das barragens que permitam calcular os valores de referência a partir das ações que atuam sobre as mesmas [1]. De um modo geral, os modelos de comportamento utilizados podem classificar-se como: modelos numéricos, modelos tipo *data-driven* e modelos híbridos.

Os modelos numéricos estão baseados em leis físicas que simplificam e descrevem os fenómenos envolvidos nos problemas em estudo, geralmente expressas na forma de equações diferenciais em derivadas parciais. A sua aplicação na resolução e diagnóstico de problemas de análise estrutural permite estabelecer os deslocamentos, as deformações e as tensões para diversos cenários e, assim, avaliar o desempenho das barragens. Estes métodos podem também ser utilizados, entre outras, na análise térmica, higrométrica, dinâmica e de escoamento de fluidos, permitindo, ainda, estabelecer acoplamentos multifísicos para análise em simultâneo dos diferentes fenómenos envolvidos. Como exemplos destes tipos de modelos podem citar-se os elementos finitos, as diferenças finitas e os elementos discretos.

Os modelos tipo *data-driven* não estão baseados em equações da física, pelo que a sua aplicação não requer um conhecimento profundo do fenómeno estudado. Estes modelos baseiam-se na análise de séries temporais de entrada e saída obtidas através do sistema de observação instalado nas barragens. Neste contexto, os modelos mais utilizados em barragens são os modelos estatísticos e os modelos de *machine learning*.

Por sua vez, os modelos híbridos recorrem a ambos os métodos anteriores para obter os seus resultados.

Como vantagens dos modelos numéricos assinala-se que os parâmetros utilizados têm significado físico, podem ser calibrados com um número reduzido de dados e, uma vez calibrados, são a melhor ferramenta para calcular a distribuição total da variável requerida (deslocamentos, temperaturas, pressões, etc.).

Os modelos tipo *data-driven* exigem um grande número de dados e, no geral, não podem ser aplicados em regimes não estacionários. Estes modelos apresentam a vantagem de não serem influenciados pela habilidade do analista em identificar corretamente as leis físicas aplicáveis nem as hipóteses de cálculo.

Os modelos estatísticos têm sido largamente utilizados no controlo de segurança das barragens de betão. O denominado “método de interpretação quantitativa”, amplamente utilizado no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), foi apresentado pela primeira vez por Rocha, Serafim e Silveira em 1958 [2]. Este método baseia-se no estabelecimento de relações funcionais semiempíricas entre as grandezas ou efeitos observados e as solicitações que os originam e na respetiva análise por técnicas estatísticas de ajuste aos valores observados (minimização de erros).

Comparativamente com os métodos estatísticos, os métodos baseados nas novas técnicas de *machine learning* são mais apropriados para reproduzir efeitos não lineares e interações complexas entre as variáveis de entrada e a resposta da estrutura. A

maior limitação destes métodos é a sua incapacidade de extrapolar, ou seja, gerar previsões fora do intervalo de variação dos dados de treino [3].

Do anterior, resulta evidente que durante a fase de primeiro enchimento da albufeira da barragem, a qual é considerada a fase mais crítica na vida da obra, e durante os primeiros anos de exploração não é possível utilizar os modelos tipo *data-driven* como meio de controlo do comportamento [1]. A falta de um número suficiente de dados e o carácter não estacionário dos fenómenos desenvolvidos durante os primeiros anos de vida da barragem levaram a que Lombardi [4] tenha considerado conveniente esperar 12 anos desde a construção antes que a aplicação destes modelos possa ser considerada fiável.

Por outro lado, uma vez que estão baseados em experiência passada, os modelos tipo *data-driven* são incapazes de prever comportamentos que sirvam para avaliar potenciais cenários de rotura.

Assim sendo, os modelos numéricos tornam-se o meio mais eficaz para avaliar o nível de segurança das barragens durante os primeiros anos de vida da obra assim como no caso de potenciais cenários de rotura.

Na prática tem sido corrente a adoção de modelos de comportamento linear, o que requer a adoção de hipóteses simplificativas, como por exemplo: comportamento monolítico da barragem (ignorando as juntas de contração e fendas), fundações contínuas (ignorando a superfície betão/rocha e as descontinuidades do maciço) e modelos de comportamento dos materiais elásticos lineares. Estas simplificações levam a um número considerável de incertezas, o que pode conduzir a uma interpretação errada do comportamento estrutural [5]. Pelo contrário, a análise não linear, incorporando as não linearidades da barragem e da fundação, tem a potencialidade de dar origem a resultados mais realistas conduzindo a uma melhor compreensão da resposta e dos mecanismos de rotura das barragens.

O presente artigo tem por objetivo tecer breves comentários a respeito dos requisitos mínimos a que devem obedecer os modelos numéricos a fim de poderem ser utilizados de forma adequada e eficiente no controlo de segurança das barragens.

## 2 Definição do modelo

Como é sabido, a geometria das barragens está bem definida, resultando numa idealização razoavelmente fácil. Igualmente, as características do betão das barragens podem ser adequadamente definidas através de ensaios específicos. Contrariamente, a modelação do maciço de fundação envolve muito mais incertezas e complexidade tanto na geometria como nas suas propriedades.

Como regra geral, só é necessário representar a geometria correspondente ao corpo da barragem. No entanto, quando as barragens estejam equipadas com descarregadores de superfície de volume considerável ou possuam outras alterações importantes, estas deverão ser também modeladas (Figura 1).

Como critério geral, o volume de maciço rochoso representado deve ter as fronteiras suficientemente afastadas da barragem para não influenciar os deslocamentos e tensões calculados no corpo da obra

[7]. Normalmente a topografia da localização da barragem pode simplificar-se mediante uma malha prismática construída sobre planos semicirculares ou desenvolvida mediante a simples projeção ao longo das coordenadas globais.

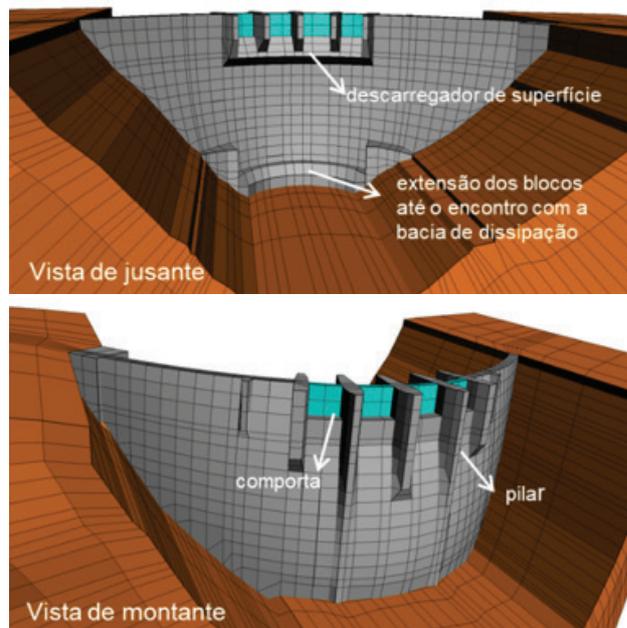


Figura 1 Detalhes do modelo de elementos finitos utilizado no acompanhamento do primeiro enchimento da barragem de Foz Tua (adaptado de [6])

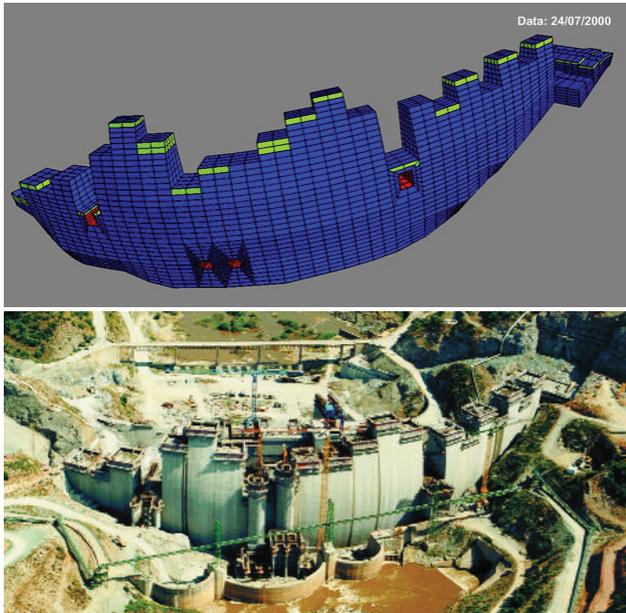
O módulo de deformabilidade do maciço rochoso é usualmente estimado utilizando classificações geomecânicas baseadas em parâmetros geológico-geotécnicos e ensaios *in situ* e/ou em laboratório. O módulo de deformabilidade provê uma medida da rigidez do maciço rochoso, sendo de notar que a deformabilidade dum maciço rochoso é mais elevada do que a da rocha constituinte, pois mesmo no caso de as fraturas se encontrarem preenchidas os enchimentos apresentam em regra deformabilidade muito mais elevada do que a da rocha e, além disso, na vizinhança das fraturas a rocha encontra-se muitas vezes alterada numa certa profundidade o que também contribui para acentuar a sua deformabilidade [8].

## 3 Discretização

Para discretizar as barragens têm sido habitualmente utilizados elementos finitos hexaédricos. Estes elementos adaptam-se naturalmente à representação das juntas de contração e das camadas de betonagens, permitindo a simulação do comportamento da barragem desde a sua construção (Figura 2).

O grau de refinamento a adotar para a malha depende do objetivo do modelo. Uma malha com elevada densidade conduz a uma maior precisão nos resultados mas o seu processamento requererá um maior tempo de computação e a utilização de maior capacidade

de memória. Em todos os casos o princípio de St. Venant será um dos melhores aliados no momento de decidir a discretização da malha. Nesse sentido é importante distinguir entre a modelação do comportamento global da modelação do comportamento local da estrutura. De facto, é sempre recomendável ter um modelo menos refinado que permita efetuar uma avaliação global do conjunto barragem/fundação e utilizar um modelo parcial que represente mais pormenorizadamente a geometria nos sítios onde seja necessário efetuar uma avaliação das tensões locais.



**Figura 2** Simulação da fase de construção da barragem de Alqueva (adaptado de [9])

## 4 Requisitos mínimos dos programas de cálculo

Como alerta Saouma [10], aceitando correr o risco de cair em valores irrealistas de alguns dos parâmetros físicos utilizados, é quase sempre possível calibrar um modelo numérico para produzir uma correlação aparentemente aceitável entre os resultados e os deslocamentos medidos nas barragens. No entanto, este procedimento de calibração não converte o modelo num modelo válido. Para que o modelo possa ser considerado válido, seja na fase de primeiro enchimento da albufeira seja para gerar previsões de longo prazo, será necessário que as ferramentas de cálculo utilizadas satisfaçam certos requisitos mínimos [10,11]:

- Ter capacidade para calcular a distribuição espacial e a evolução temporal da temperatura  $T(x,y,z,t)$ ;
- Permitir representar o comportamento não linear das fendas e

das juntas da barragem e do maciço de fundação;

- Possuir modelos constitutivos que permitam representar comportamento elástico linear assim como, no caso de ser necessário, comportamentos não lineares devidos à fendilhação e ao esmagamento do betão;
- Poder simular o comportamento diferido do betão através de leis apropriadas de viscoelasticidade;
- Possibilitar a realização de análises dinâmicas considerando a interação albufeira/barragem/fundação.

Quando o objetivo do cálculo é a simulação das reações expansivas de origem interna são, ainda, necessárias as seguintes funcionalidades [10]:

- Ter capacidade para calcular a distribuição espacial e a evolução temporal da humidade relativa  $H(x,y,z,t)$ ;
- Permitir ter em conta a anisotropia induzida pelo estado de tensão;
- Possuir a capacidade de representar a deformação induzida pelos fenómenos expansivos.

### 4.1 Cálculo térmico

A distribuição da temperatura no corpo da barragem é regida pelas equações de transferência de calor por condução, considerando como condições de fronteira as variações da temperatura do ar e da água da albufeira, o nível da água da albufeira e a radiação solar. Para resolver estas equações têm sido habitualmente utilizados o método das diferenças finitas e o método dos elementos finitos para problemas 1D e 3D, respetivamente.

Para pontos localizados em zonas afastadas da superfície de inserção da barragem e/ou do coroamento, os modelos 1D permitem obter resultados adequados. Devido à sua simplicidade, estes modelos têm sido amplamente utilizados na prática desde os tempos pré-computador até à atualidade [12,13], se bem que no presente a sua utilização esteja mais direcionada ao apoio dos modelos estatísticos [14].

Os modelos 3D apresentam a vantagem de dar uma boa aproximação do campo de temperaturas em todo o domínio da barragem, mas exigem mais memória e tempo de computação que os modelos 1D. No entanto, convém lembrar que num cálculo térmico o número de graus de liberdade do sistema é igual ao número de nós do modelo, pois o campo de temperaturas é um campo escalar. Assim, o número de incógnitas no cálculo térmico é um terço do número de incógnitas do problema mecânico tridimensional.

Para além de simular a troca de calor entre a superfície da barragem e o ar e/ou a água, os modelos de elementos finitos permitem também a simulação da geração interna de calor devido ao processo de hidratação do cimento [9] e a simulação do arrefecimento do betão durante a fase de refrigeração artificial previamente à injeção das juntas de contração (Figura 3).

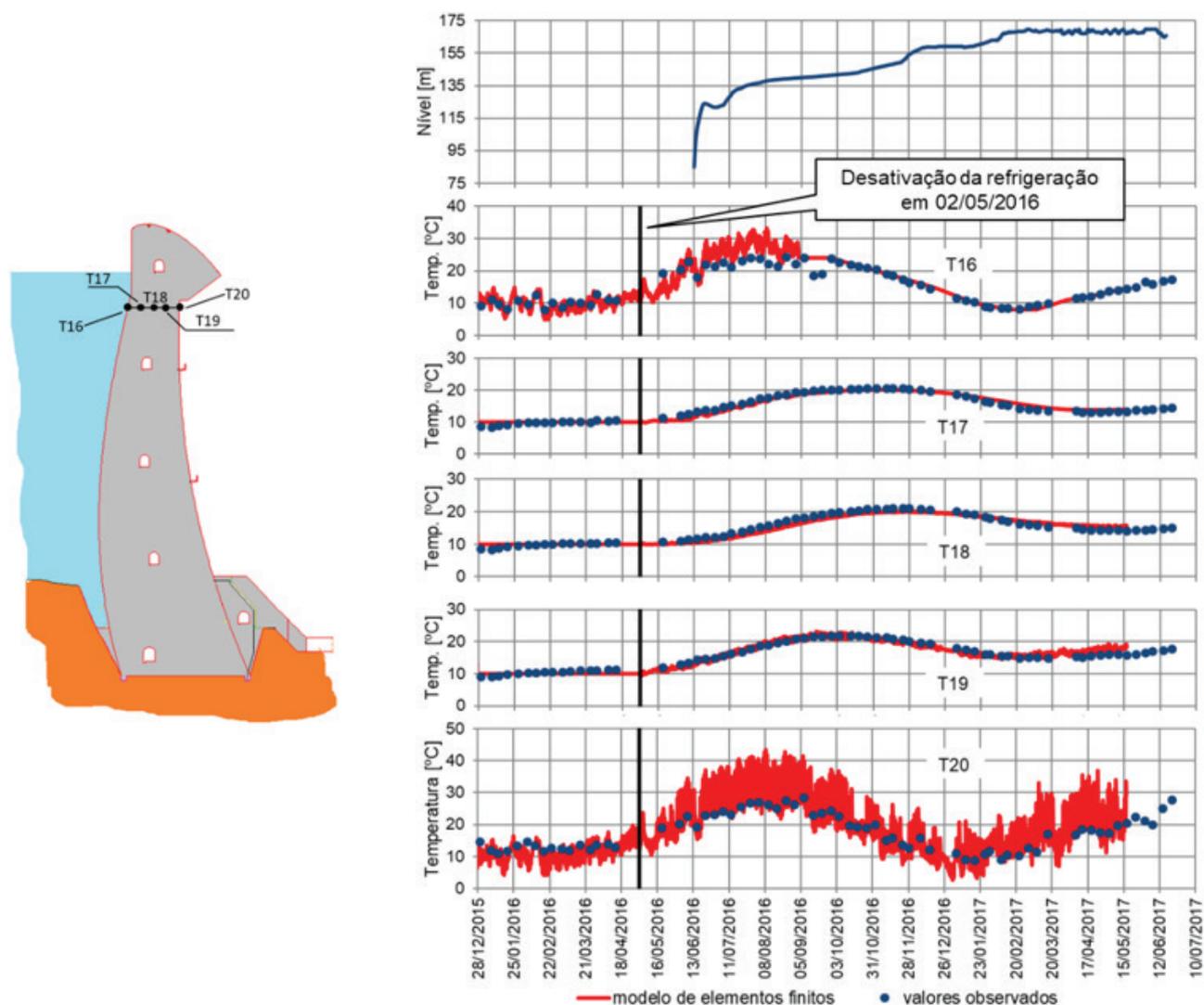


Figura 3 Comparação da temperatura calculada e da temperatura medida à cota de 141 m num dos blocos da barragem de Foz Tua durante a fase de refrigeração e do primeiro enchimento da albufeira (adaptado de [6])

## 4.2 Representação de juntas e fendas

### 4.2.1 Juntas de contração

As barragens de betão são construídas como um conjunto de blocos monolíticos separados por juntas de contração verticais. Os blocos são construídos separadamente de modo que a deformação devida à dissipação do calor de hidratação e a retração possam desenvolver-se independentemente em cada um dos blocos.

Nas barragens abóbada, após o período construtivo, as juntas de contração são injetadas com o objetivo de obter uma estrutura monolítica. No entanto, a experiência demonstra que as juntas de contração abrem e fecham em resposta às variações de temperatura (Figura 4). As tensões de tração resultam assim dissipadas por as juntas injetadas poderem resistir a pouca ou praticamente nenhuma

tensão de tração [15].

Como resultado deste comportamento, os modelos contínuos podem conduzir a uma interpretação errónea da resposta estrutural, sendo necessário realizar análises não lineares que tenham em conta o carácter descontínuo da barragem [11].

Na experiência dos autores, para a fase de primeiro enchimento da albufeira, a utilização de elementos de interface simples que permitam representar a abertura/fecho das juntas em função das tensões normais que atuam sobre a mesma resulta suficiente para representar adequadamente o comportamento da barragem (Figura 5). No entanto, no caso de análise dinâmica de barragens deverão ser utilizados elementos de interface mais sofisticados que permitam considerar as caixas de corte, tensões iniciais, aberturas iniciais, etc. [18].

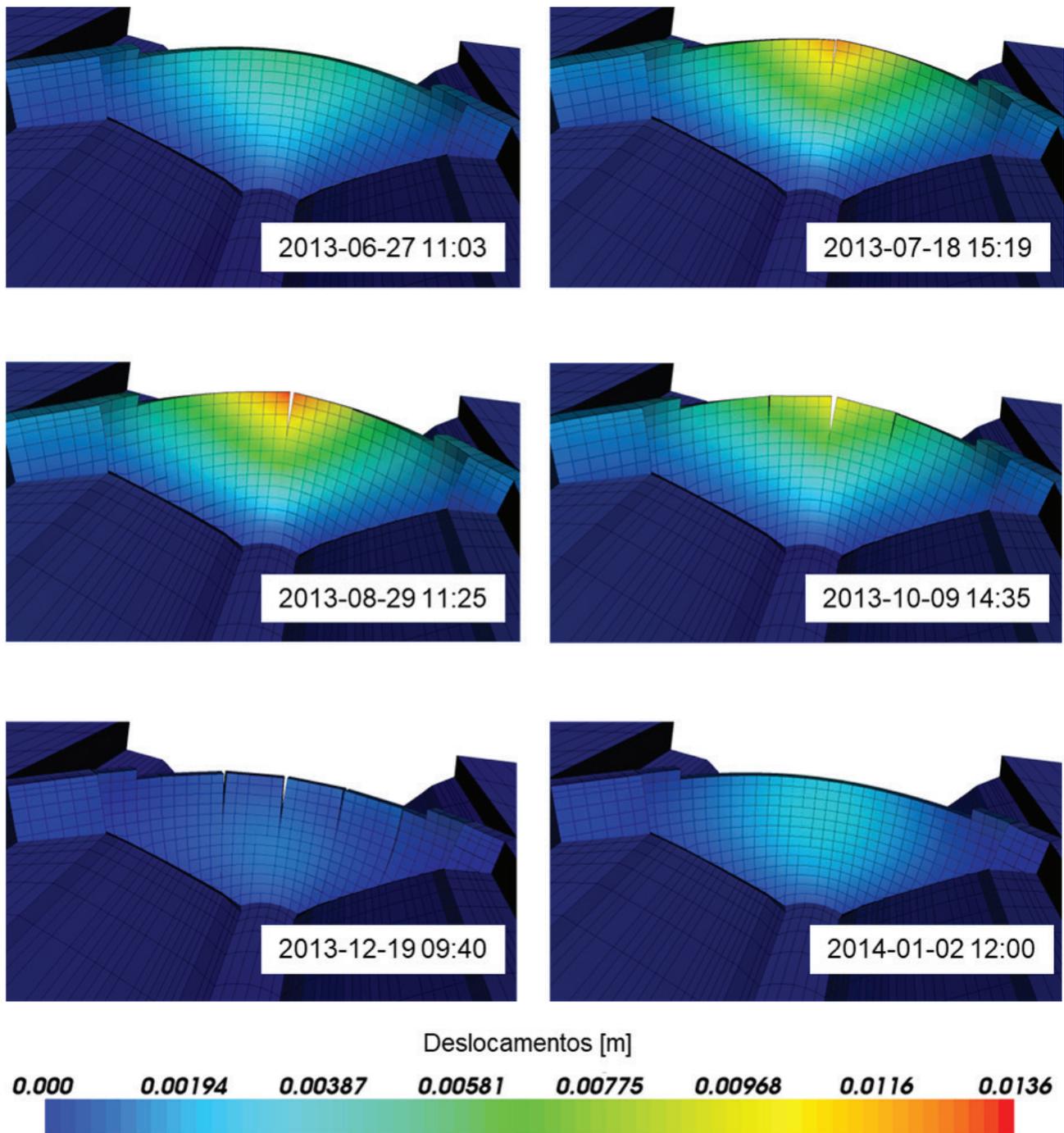
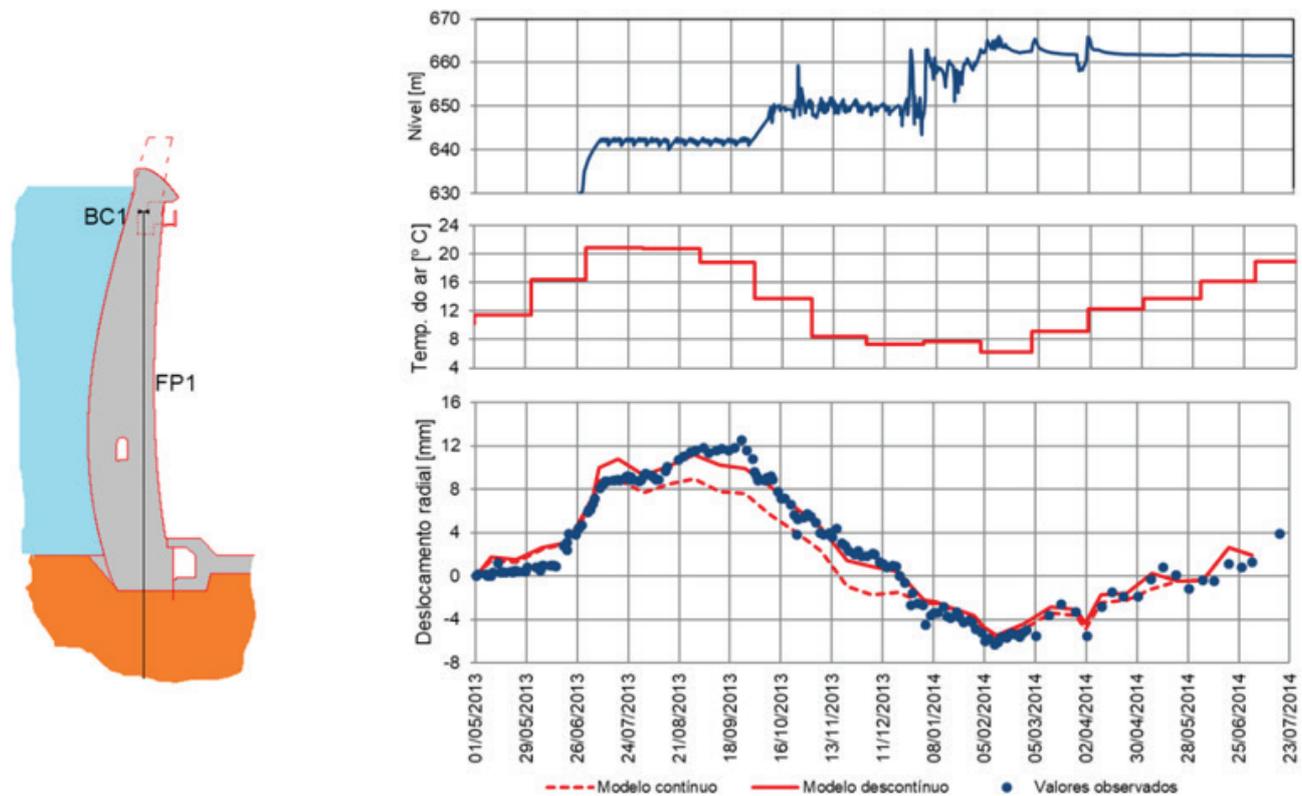


Figura 4 Cálculos efetuados para o acompanhamento do primeiro enchimento da barragem do Alto Ceira II (adaptado de [16])



**Figura 5** Comparação entre os deslocamentos radiais calculados com um modelo contínuo e um modelo descontínuo e os valores medidos na base BC1 do fio de prumo FP1 da barragem do Alto Ceira II durante o primeiro enchimento da albufeira (adaptado de [17])

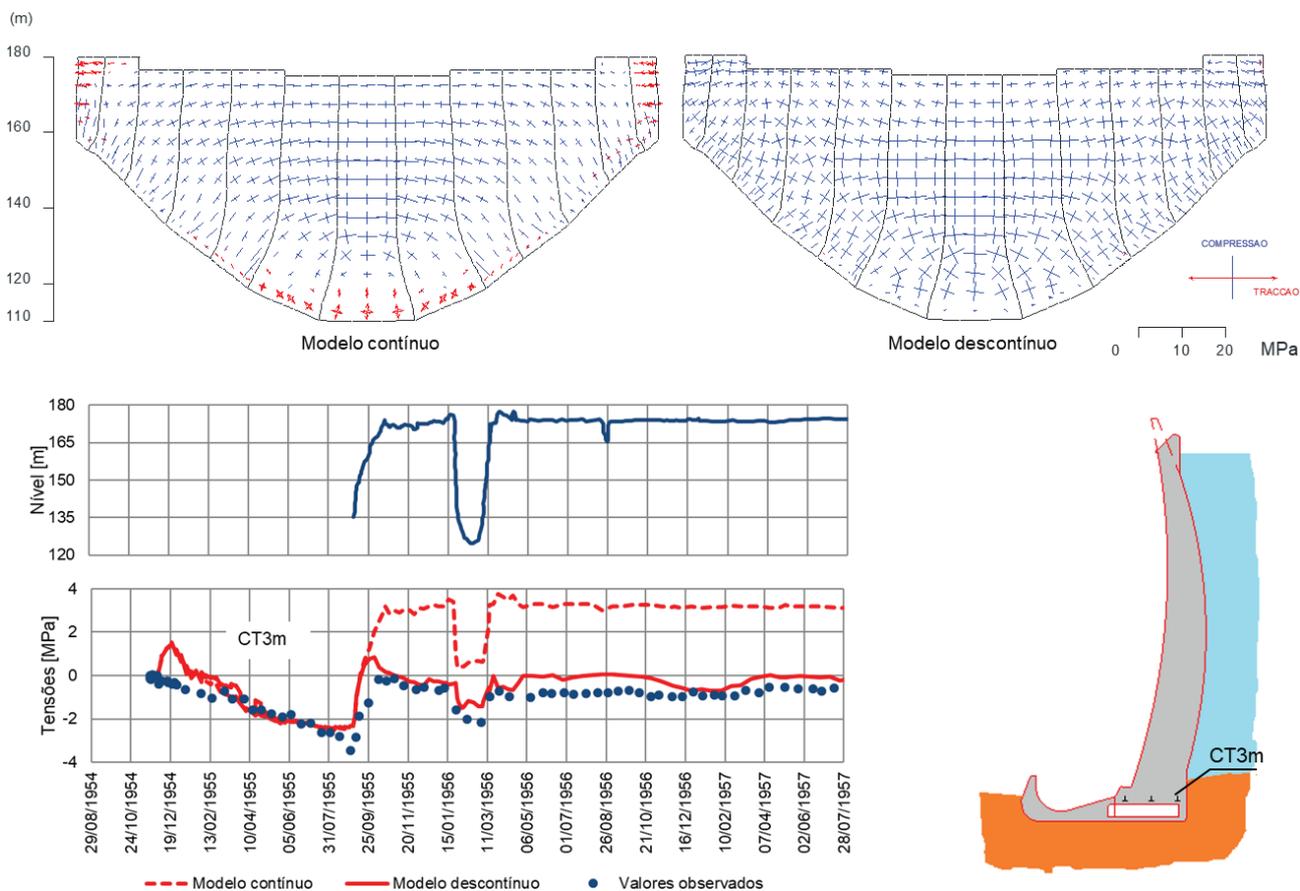
#### 4.2.2 Superfície de contacto betão/rocha

Na análise de barragens de gravidade deve sempre assumir-se que a interface betão/rocha é incapaz de resistir a tensões normais. Nesse sentido a FERC [11] recomenda a utilização de elementos de interface que modelem o atrito na superfície de contacto betão/rocha, considerando inaceitável a ligação perfeita entre ambos os materiais.

No caso das barragens abóbada, a elevada pressão hidrostática no pé de montante pode levar ao desenvolvimento de fendas na base da barragem (Figura 6). As fendas assim formadas são usualmente

estáveis sempre e quando as tensões de corte não excedam a resistência ao corte entre o betão e a rocha. No entanto, é de ter em conta que se se abre a fenda na base da barragem, a deformação da barragem aumentará conduzindo a uma redistribuição de tensões e ao incremento das tensões no sentido do arco [19].

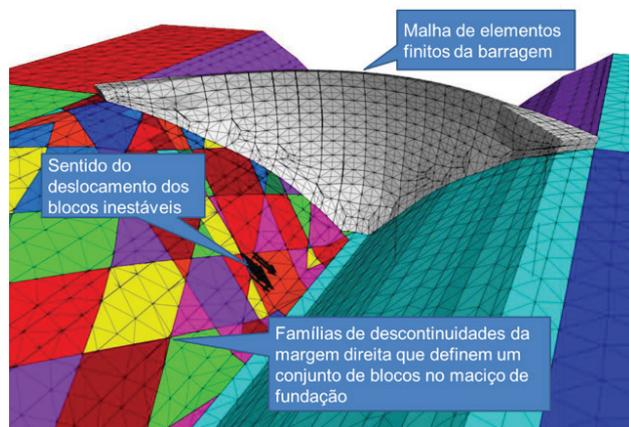
É de notar que, pese embora para efeitos do cálculo seja representativo colocar elementos de interface entre a base da barragem e a sua fundação, na prática esta fenda pode materializar-se em outras superfícies como as discontinuidades do maciço localizadas imediatamente abaixo da base da barragem ou, inclusivamente, em juntas de betonagem defeituosas [20].



**Figura 6** Comparação das tensões calculadas com um modelo contínuo e um modelo descontinuo para a barragem da Bouçã durante o primeiro enchimento da albufeira: distribuição das tensões no paramento de montante em 16/01/1956, e comparação entre os valores calculados e os valores medidos com a célula tensométrica CT3m (adaptado de [21])

#### 4.2.3 Descontinuidades do maciço de fundação

Não obstante ser viável representar as descontinuidades do maciço com os mesmos elementos de interface utilizados para as juntas e fendas das barragens, tem-se demonstrado vantajosa, quando o foco da análise é colocado no comportamento do maciço, a utilização conjunta de elementos discretos para a fundação e elementos finitos para a barragem (Figura 7). É de mencionar que do ponto de vista conceptual os modelos de elementos discretos deformáveis e os modelos de elementos finitos com elementos de interface são semelhantes. No entanto, diferem do ponto de vista numérico, já que os modelos de elementos discretos deformáveis se adequam melhor à representação de grandes deslocamentos, apresentam maior facilidade na deteção dos contactos entre blocos com padrões complexos e utilizam algoritmos de resolução baseados na relaxação dinâmica [22].



**Figura 7** Estudo de cenários de rotura pela fundação da barragem do Alto Tâmega: utilização conjunta de modelos de elementos finitos e de elementos discretos (adaptado de [23])

### 4.3 Modelos de comportamento não linear do betão

São numerosas as abordagens apresentadas ao longo dos anos para a modelação do comportamento não linear do betão. Dentre estas opções podem mencionar-se: elasticidade não linear, plasticidade, mecânica da fratura, mecânica do dano contínuo, teoria endocrónica, entre outras. A fendilhação pode modelar-se em forma discreta ou utilizando modelos de fendas distribuídas, a qual por sua vez apresenta as opções de fendas rotativas, fendas fixas ou de múltiplas fendas não ortogonais. Cada uma destas abordagens adequa-se melhor a certas estruturas ou a certas situações de carga, mas não existe uma única abordagem que funcione bem para todo o espectro de aplicações encontradas na prática [24].

No âmbito das barragens a experiência do LNEC foi desenvolvida utilizando um modelo de dano com duas variáveis independentes, uma para compressão e outra para tração, associado a uma lei constitutiva viscoelástica [25].

Outros autores têm implementado uma abordagem combinada entre fratura e plasticidade, baseada nos modelos constitutivos em tração (fratura) e em compressão (plasticidade) [26]. O modelo de fratura está baseado no modelo de fenda distribuída. Nesta abordagem, a fendilhação é assumida como uma faixa de microfendas distribuídas sobre um elemento finito. Assim que um elemento ultrapasse a resistência à tração a matriz de rigidez do elemento, inicialmente isotrópica, é transformada numa matriz ortotrópica em que a rigidez na direção da tensão principal é gradualmente reduzida a zero conforme o modelo de fenda coesiva ou fenda fictícia de Hillerborg [27]. Para o betão esmagado por compressão, utiliza-se um modelo de plasticidade, por exemplo a formulação de Menétrey e Willam [28].

### 4.4 Efeito da fluência do betão

A fluência é a deformação do betão ao longo do tempo sob carga constante. Comparativamente a outras estruturas de engenharia civil as barragens apresentam uma deformação por fluência bastante considerável. Entre outras causas a ICOLD [29] assinala a elevada temperatura no interior do corpo das barragens e o elevado estado de carga (peso próprio) durante as primeiras idades do betão, o carácter cíclico das cargas hidrostáticas e o baixo conteúdo de cimento.

Em linhas gerais, existem três métodos para calcular as deformações por fluência [30]: coeficiente de fluência, fluência específica e funções de fluência ou relaxação. Os dois primeiros métodos são os mais utilizados na prática da engenharia e podem ser encontrados em diversos códigos. O denominado coeficiente de fluência  $\varphi(t,t')$  é definido como a relação entre a deformação por fluência  $\varepsilon_c$  e a deformação instantânea  $\varepsilon_e$ , sendo a deformação total calculada como  $\varepsilon(t) = \varepsilon_e + \varphi(t,t') \varepsilon_e$  (ver por exemplo o Eurocódigo 2 ou o modelo *fib* Model Code 2010). O segundo método, a fluência específica, é mais utilizado nos códigos americanos. A função de fluência  $J(t,t')$  descreve a evolução da deformação total devida a

uma carga constante, enquanto que a função de relaxação  $R(t,t')$  descreve a evolução da tensão para uma deformação constante. Em todos os casos a deformação por fluência é função da idade do betão  $t$  e da idade de aplicação da carga  $t'$ .

Com o objetivo de orientar a seleção do método de cálculo a utilizar, Bažant e Jirásek [31] classificam as estruturas em cinco níveis de sensibilidade em que o nível 5 é atribuído aos casos em que se requer uma simulação mais realista. Dentro desta classificação, as barragens abóbada, de gravidade e de contrafortes encontram-se localizadas no nível 4, ou seja, onde, apesar de não ser considerado obrigatório, é recomendável efetuar uma análise rigorosa baseada numa formulação viscoelástica, utilizando a função de fluência ou a função de relaxação.

### 4.5 Modelação sísmica albufeira/barragem/ fundação

A análise do comportamento sísmico no domínio do tempo para o cenário corrente, envolvendo o sismo base de projeto (SBP), e para um cenário de rotura, considerando o sismo máximo de projeto (SMP), requer modelos de elementos finitos tridimensionais que tenham em consideração a interação do corpo de barragem com a albufeira, a interação com a fundação, incluindo a sua flexibilidade, massa e amortecimento, variação espacial da ação sísmica e comportamento não linear da barragem e fundação, incluindo as juntas de contração e a superfície de contacto betão/rocha [32, 33] (Figura 8). A interação sob excitações dinâmicas do corpo da barragem com a albufeira é realizada recorrendo a uma das seguintes abordagens: i) massas associadas de Westergaard com fatores de correção das massas de água associadas [34], ii) formulação de Euler do fluido em pressões [34,35], iii) formulação de Lagrange do fluido garantindo a sua irrotacionalidade através da incorporação de multiplicadores de Lagrange [36].

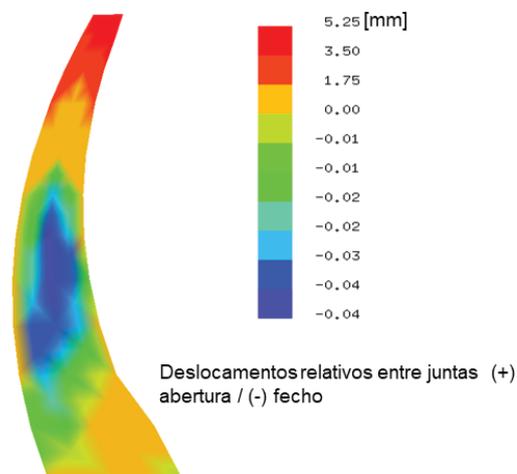


Figura 8 Aberturas máximas na junta da consola central para uma combinação associada ao sismo máximo de projeto (PP+PH+SMP:3HL-4V-NL) (adaptado de [33])

## 5 Acoplamentos multifísicos

Denominam-se acoplamentos multifísicos as simulações que envolvem o cálculo de diversas grandezas físicas, estando o seu modelo matemático formado por um conjunto de equações diferenciais em derivadas parciais acopladas, ou seja, o cálculo de uma grandeza depende do valor das demais.

Em linhas gerais, a resolução dos problemas multifísicos pode agrupar-se em duas estratégias diferentes. Na primeira estratégia, denominada de fracamente acoplada ou acoplamento sequencial, cada fenómeno físico é resolvido de forma independente tendo como entrada o resultado do anterior. Quando a interação entre os diferentes fenómenos físicos se dá nos dois sentidos (acoplamento bidirecional) o problema é resolvido de forma iterativa, isto é, após a resolução sequencial de todos os fenómenos envolvidos, o processo é repetido até que a convergência seja alcançada. Se a interação entre os diferentes fenómenos físicos envolvidos é só num sentido (acoplamento unidirecional) o problema é resolvido numa única iteração.

Na segunda estratégia, denominada de acoplamento direto ou fortemente acoplada, o conjunto completo de equações é resolvido de maneira simultânea através da criação de um único sistema global de equações, materializado numa grande matriz contendo todos os graus de liberdade do sistema acoplado. A matriz resultante do acoplamento é não simétrica. Esta estratégia é utilizada quando as interações físicas são muito fortes ou o problema é altamente não linear.

Em geral, nos cálculos de estruturas os fenómenos envolvidos não exibem nem interações muito fortes nem são altamente não

lineares, pelo que é recomendado utilizar sempre acoplamentos sequenciais que oferecem as seguintes vantagens [37,38]:

- A resolução de vários sistemas de equações de menores dimensões (um para cada fenómeno) é mais eficiente do que a resolução de um grande sistema de equações;
- Conserva a simetria dos sistemas de equações a resolver;
- Permite a utilização de *software* diferente para a resolução de cada problema;
- Permite uma melhor adaptação a cada fenómeno analisado, especialmente em termos de malha e passos de tempo.

No âmbito das barragens os cálculos acoplados mais frequentes são: i) análise termomecânica, ii) análise termo-higro-mecânica, para o estudo do comportamento das barragens afetadas por reações expansivas (Figura 9), e iii) análise hidromecânica das fundações.

## 6 Os modelos numéricos segundo a legislação portuguesa

O Decreto-Lei n.º 21/2018, de 28 de março, que veio alterar o Regulamento de Segurança de Barragens (Decreto-Lei n.º 344/2007, de 15 de outubro), determinou também a revogação das Portarias n.º 846/93 e n.º 847/93, de 10 de setembro, e n.º 246/98, de 21 de abril, com as disposições normativas relativas ao projeto, à observação e inspeção e à construção das barragens. Estas Portarias foram substituídas pelos Documentos Técnicos de Apoio [40] estabelecidos pela Autoridade Nacional de Segurança de Barragens.

Este documento, no seu Artigo n.º 33 da Secção 3 do Capítulo III relativo ao dimensionamento e verificação da funcionalidade e da

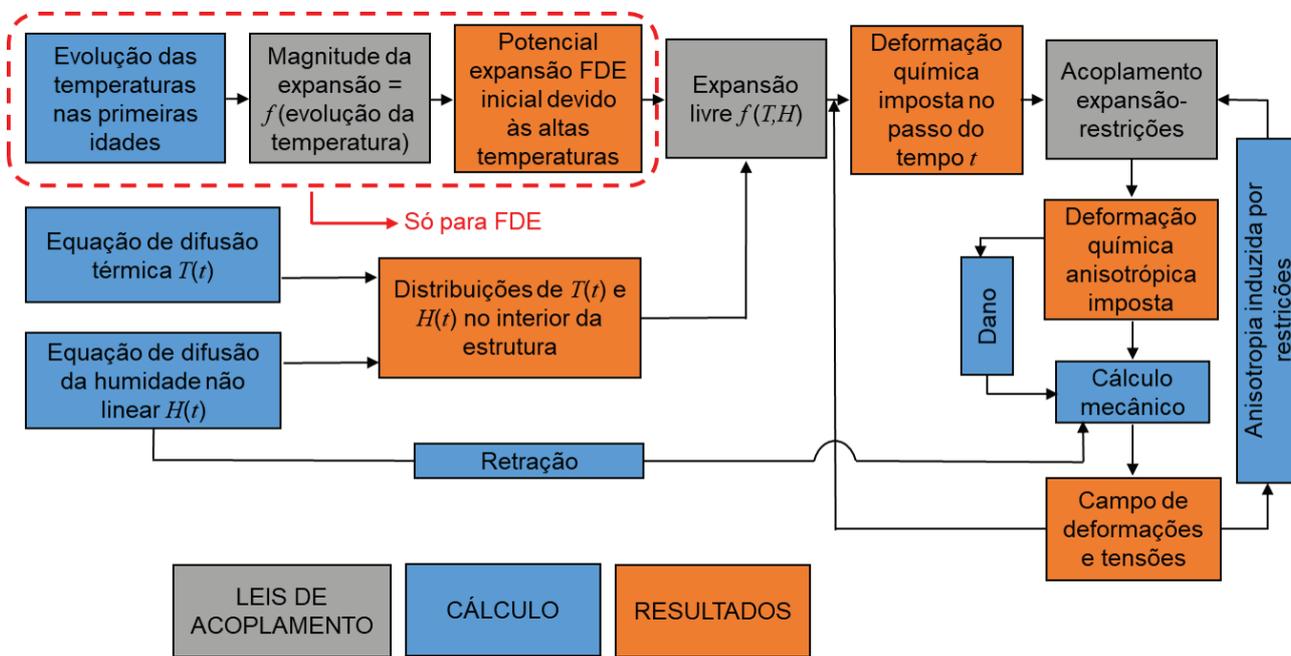


Figura 9 Esquema de cálculo sequencial para a análise termo-higro-mecânica de estruturas afetadas por reações expansivas do tipo álcali-agregado (RAA) e por formação diferida de etringite (FDE) (adaptado de [39])

segurança de barragens de betão e alvenaria, define que podem ser utilizados modelos de diferentes tipos, nomeadamente:

- Para situações de construção, modelos da estrutura completa, de blocos independentes ou com sucessivas geometrias, em regra com juntas de contração e propriedades estruturais, dependentes da idade dos materiais;
- Para as situações de primeiro enchimento e exploração da albufeira, modelos em que se supõe a estrutura contínua, tendo em consideração os efeitos da fluência e da relaxação;
- Para as situações extremas, modelos de comportamento não linear.

Assim, e com base no exposto no presente trabalho, é de notar que:

- A prática demonstra que a utilização de modelos contínuos durante a fase do primeiro enchimento da albufeira não é sempre realista, seja para níveis baixos da albufeira, devido à abertura das juntas de contração (ver Figura 5), seja para níveis altos da albufeira, devido ao desenvolvimento de fendas no contacto barragem/fundação no pé de montante (ver Figura 6);
- A experiência portuguesa recente revela que grande parte dos primeiros enchimentos da albufeira se processa num curto período de tempo, muitas vezes em menos de um ano, pelo que a consideração dos efeitos da fluência e da relaxação nestes casos não se reveste de grande importância prática;
- Para situações extremas o documento não diferencia as diferentes fontes de não linearidade, nomeadamente i) não linearidade devido à abertura/fecho de juntas e fendas no betão, ii) comportamentos não lineares do betão devido ao esmagamento e à fendilhação e iii) não linearidades devidas ao deslizamento ao longo da superfície de ligação da barragem à fundação ou ao longo de descontinuidades dos maciços rochosos.

Assim, à luz da experiência adquirida nestes últimos anos, dos desenvolvimentos recentes nos métodos de modelação não linear e do avanço da tecnologia dos computadores, considera-se que os modelos recomendados no Artigo n.º 33, que, no essencial, reproduz o ponto n.º 2 do Artigo n.º 30 das Normas de Projeto de Barragens (Portaria n.º 846/93, de 10 de setembro), beneficiariam de uma revisão e atualização com maior profundidade.

## 7 Comentários finais

No presente trabalho foram apresentados os pressupostos e orientações teórico-metodológicas que se devem aplicar na avaliação de segurança das barragens de betão durante a fase do primeiro enchimento da albufeira e para situações de potenciais cenários de rotura. Em particular o trabalho debruçou-se sobre as seguintes questões:

- Campo de aplicação dos modelos numéricos e dos modelos tipo *data-driven*;
- Critérios gerais para a definição e a discretização dos modelos de barragens de betão;
- Adequação dos modelos numéricos na definição do campo de temperaturas no corpo da barragem;

- Importância de representar os comportamentos não lineares na barragem e no maciço de fundação. Em particular, os exemplos apresentados realçaram a importância da modelação das juntas e fendas existentes na barragem e na fundação durante a fase do primeiro enchimento da albufeira;
- Princípios orientadores a adotar na realização de cálculos com acoplamentos multifísicos;
- Legislação portuguesa em vigor.

Finalmente considera-se importante salientar que a utilização da análise não linear preconizada pelo presente trabalho difere significativamente das técnicas utilizadas comumente na prática da engenharia. Nesse sentido, é de realçar que as análises não lineares exigem competências adequadas na área dos métodos numéricos e das teorias não lineares que ultrapassam os conteúdos programáticos dos cursos de engenharia civil, pelo que a criação de uma pós-graduação nesta área seria de grande utilidade.

## Agradecimentos

O trabalho que se apresenta é parte do projeto de investigação DAMFA – *Soluções de ponta para a avaliação sustentável das fundações de barragens de betão*, promovido pelo LNEC.

## Referências

- ICOLD – *Dam surveillance guide*. International Commission on Large Dams. Tech. Rep. Bulletin 158. CRC Press/Balkema, 2018, 222 p.
- Rocha, M.; Serafim, J.L.; Silveira, A.F. – “A method of quantitative interpretation of the results obtained in the observation of dams”. *6th Congress on Large Dams*, 1958, R.83 Question 21. ICOLD, New York. LNEC, Memória n.º 128, Lisboa.
- Salazar, F.; Morán, R.; Toledo, M.A.; Oñate, E. – “Data-based models for the prediction of dam behaviour: A review and some methodological considerations”. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2017, Vol. 24 (1), pp. 1-21. <https://doi.org/10.1007/s11831-015-9157-9>
- Lombardi, G. – *Advanced data interpretation for diagnosis of concrete dams*. Tech. Rep. CISM, 2004, 31 p.
- USBR – *State-of-practice for the nonlinear analysis of concrete dams at the Bureau of Reclamation*. U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Reclamation, EUA, 2006, 144 p.
- Leitão, N.S.; Castilho, E. – “Numerical modelling of the thermo-mechanical behaviour of concrete arch dams during the first filling of the reservoir”. *Numerical Modelling in Civil Engineering*, NME 2018, Ghent, Bélgica.
- USACE – *Arch dam design*. Engineer Manual 1110-2-2201. U.S. Army Corps of Engineers, EUA, 1994, 240 p.
- Rocha, M. – *Mecânica das rochas*. Capítulos 1,2 e 3 – Texto. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1971, 179 p.
- Castilho, E.; Schclar, N.; Tiago, C.; Farinha, M.L.B. – “FEA model for the simulation of the hydration process and temperature evolution during the concreting of an arch dam”. *Engineering Structures*, 2018, Vol. 174, pp. 165-177. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.07.065>

- [10] Saouma, V. – *Numerical modelling of AAR*. CRC Press, 2014, 324 p.
- [11] FERC – *Chapter 11 – Arch dams. Engineering guidelines for the evaluation of hydropower projects*. Federal Energy Regulatory Commission, EUA, 2018.
- [12] Stucky, A.; Derron, M. – *Problèmes thermiques posés par la construction des barrages-réservoirs*. École Polytechnique de l'Université de Lausanne, Suíça, 1957, 178 p.
- [13] Léger, P.; Leclerc, M. – “Hydrostatic, temperature, time-displacement model for concrete dams”. *Journal of Engineering Mechanics*, 2007, Vol. 133(3), pp. 267-277. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2007\)133:3\(267\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2007)133:3(267))
- [14] Santillán, D.; Salet, E.; Toledo, M. – “A new 1D analytical model for computing the thermal field of concrete dams due to the environmental actions”. *Applied Thermal Engineering*, 2015, Vol. 85, pp. 160-171. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.04.023>
- [15] Boggs, H.L.; Tabox, G.S.; Jansen, R.B. – “Arch dam design and analysis”. Em Jansen, R.B. (ed.) *Advanced Dam Engineering for Design, Construction and Rehabilitation*. Springer, 1988, pp. 493-539.
- [16] Leitão, N.S.; Castro, A.T.; Cunha, J.G. – “Analysis of the observed behaviour of Alto Ceira II dam during the first filling of the reservoir”. *2nd International Dam World Conference*, 2015, Lisboa.
- [17] Leitão, N.S.; Castro, A.T. – *Barragem do Alto Ceira II – Análise e interpretação do comportamento observado durante o primeiro enchimento da albufeira*. Relatório do LNEC 63/2016 – DBB/NO, Lisboa, 2016.
- [18] Guerra, A. – *Shear key research project – Literature review and finite element analysis*. Bureau of Reclamation, Denver, Colorado, EUA, 2007, 94 p.
- [19] Wideland, W.; Malla, S. – “Investigating stress concentration”. *International Water Power & Dam Construction*, January 2007, pp. 28-33.
- [20] Carrère, A. – “Arch dam uplift and design criteria: are heel base joints useful?” *Hydropower & Dams*, 1994, pp. 78-86.
- [21] Leitão, N.S. – *Barragem da Bouçã. Estudo do processo de fendilhação no paramento de jusante*. Relatório do LNEC 137/2017 – DBB/NO, Lisboa, 2017.
- [22] Lemos, J.V. – “Modelling the failure modes of dams’ rock foundations”. *MIR 2012 – Nuovi metodi di indagine, monitoraggio e medellazione degli ammassi rocciosi*, Barla, C.; Barla, M.; Ferrero, A.M.; Rotonda, T. (Eds.), Politecnico di Torino, Italia, 2012, pp. 259-272.
- [23] Resende, J.R.; Farinha, M.L.B.; Leitão, N.S. – *Estudos de cenários de rotura pela fundação da barragem do Alto Tâmega*. Relatório do LNEC 421/2010 – NMMF/NFOS/NO; Lisboa, 2010.
- [24] Vecchio, F.J. – “Non-linear finite element analysis of reinforced concrete: at the crossroads?” *Structural Concrete*, 2001, Vol. 2(4), pp. 201-212. 10.1680/stco.2.4.201.40356
- [25] Oliveira, S.B.M. – *Modelos para análise do comportamento de barragens de betão considerando a fissuração e os efeitos do tempo, formulação de dano*. Tese de doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2000, 200 p.
- [26] Saouma, V. – *MERLIN - Theory manual*. University of Colorado, Boulder, EUA, 2010, 292 p.
- [27] Hillerborg, A.; Modéer, M.; Petersson, P. – “Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements”. *Cement and Concrete Research*, 1976, 6(6), pp. 773-782. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(76\)90007-7](https://doi.org/10.1016/0008-8846(76)90007-7)
- [28] Menétrey, P.; Willam, K. – “Triaxial failure criterion for concrete and its generalization”. *ACI Structural Journal*, 1995, 92(3), pp. 311-318.
- [29] ICOLD – *The physical properties of hardened conventional concrete in dams*. International Commission on Large Dams. Draft for ICOLD Review, 2008, 262 p.
- [30] Havlásek, P. – *Creep and shrinkage of concrete subjected to variable environmental conditions*. Tese de doutoramento, Czech Technical University in Prague, República Checa, 2014, 192 p.
- [31] Bažant, Z.; Jirásek, M. – *Creep and hydrothermal effects in concrete structures*. Springer, 2018, 960 p. <https://doi.org/10.1007/978-94-024-1138-6>
- [32] Lokke, A.; Chopra, A.K. – “Direct finite element method for nonlinear earthquake analysis of 3-dimensional semi-unbounded dam-water foundation rock systems”. *Earthquake Engineering Structural Dynamics*, 2019, Vol. 4 (7), pp. 1309-1328. <https://doi.org/10.1002/eqe.3019>
- [33] Monteiro Azevedo N.; Romano, C. – *Barragem de Alto Tâmega – Segunda definição de formas: Análise do Comportamento dinâmico para o sismo máximo de projecto*, Relatório do LNEC 30/2014 – DBB/NMMR, Lisboa, 2014.
- [34] Alegre, A.; Oliveira, S.; Espada, M.; Câmara, R.; Lemos, J. – “Hydrodynamic pressures on arch dams: Numerical and experimental results”. *Revista Portuguesa de Análise Experimental de Tensões*, 2017, Vol. 28, pp. 55-62.
- [35] Alegre, A.; Oliveira, S.; Espada, M.; Câmara, R. – “Seismic analysis of an ultra-high arch dam using the 3DFE program DamDySSA3.0. Study on the influence of the reservoir water level”. *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas*, 2019, Vol. 11, pp. 115-125.
- [36] Monteiro Azevedo, N.; Câmara, R. – “Dynamic analysis of concrete dams: fluid structure displacement based interaction models”. *Dam Engineering*, 2015, Vol. XXV (4), pp. 113-132.
- [37] ANSYS – *ANSYS Mechanical APDL coupled-field – Analysis Guide*. Release 15.0, 2013.
- [38] ABAQUS – *ABAQUS Analysis- User’s manual*, Vol. II, 2011.
- [39] Martin, R.P.; Metalssi, O.O.; Toutlemonde, F. – “Modelling of concrete structures affected by internal swelling reactions: couplings between transfer properties, alkali leaching and expansion”. *2nd International Conference on Microstructure Related Durability of Cementitious Composites*, 2012, França.
- [40] APA – *Documentos Técnicos de Apoio ao Regulamento de Segurança de Barragens (RSB)*. Agência Portuguesa do Ambiente, I.P., Lisboa, 2018, 159 p.