

# INTERPRETAÇÃO E PREVISÃO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DA BARRAGEM DO COVÃO DO MEIO, AFETADA POR EXPANSÕES DO BETÃO



Samuel Ferra

Mestre em Eng. Civil  
 FCT/UNL  
 Lisboa  
 s.ferra@campus.fct.unl.pt



Ivo Figueiredo Dias

Investigador Auxiliar  
 LNEC  
 Lisboa  
 idias@lnec.pt



António Lopes Batista

Investigador Principal  
 com Habilitação  
 LNEC, Lisboa  
 albatista@lnec.pt

## SUMÁRIO

A barragem do Covão do Meio, localizada na vertente sul da serra da Estrela a uma altitude de 1650 m, é uma estrutura em abóbada com 28 m de altura máxima cujo betão está afetado por reações expansivas de moderada magnitude, do tipo álcalis-silica.

Para interpretar o comportamento observado da barragem e os efeitos estruturais das expansões, desenvolveram-se modelos de elementos finitos da obra, nas vertentes estrutural e térmica, tendo os resultados da modelação apresentado uma boa concordância com resultados da observação contínua. Numa segunda fase foi feita a previsão do comportamento da obra para um horizonte temporal de 20 anos, tendo em conta dois cenários, um otimista, em que as expansões estabilizam a médio prazo com valores finais moderados, e um pessimista, em que o potencial remanescente de expansão é mais significativo.

**Palavras-chave:** Barragem do Covão do Meio; Expansões do betão; Modelos térmico e estrutural; Interpretação e previsão do comportamento

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 Principais características da barragem

A barragem do Covão do Meio localiza-se na serra da Estrela, a uma altitude de 1650 m, na ribeira de Loriga, na bacia do rio Mondego (Figura 1). Trata-se de uma abóbada esbelta com 28 m de altura máxima acima da fundação, com espessura que varia entre 1,8 m no

coroamento e 6,8 m na base da consola central (Figura 2), construída em 1953. O maciço rochoso de fundação é granítico.



Figura 1. Barragem do Covão do Meio. Vista geral a partir da encosta da margem direita

Na encosta da margem esquerda a barragem é dotada de um descarregador de cheias, constituído por um perfil gravidade com cerca de 170 m de desenvolvimento e uma altura máxima acima da fundação de 13 m, que possibilita a passagem de um caudal máximo de  $40 \text{ m}^3/\text{s}$ . A crista da soleira situa-se à cota 1653,70 m. O descarregador é desprovido de comportas e de sistema de dissipação de energia.

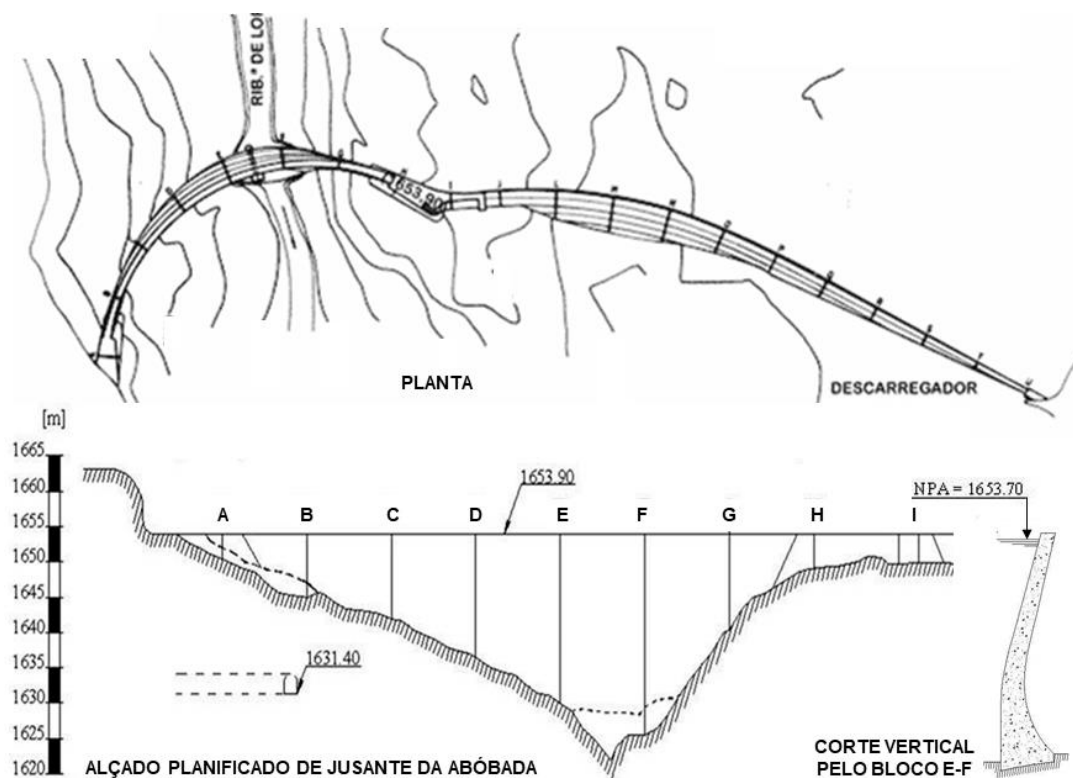


Figura 2. Barragem do Covão do Meio. Planta, alçado planificado de jusante da abóbada e corte pelo bloco mais alto da abóbada

O nível de pleno armazenamento (NPA) da albufeira situa-se à cota 1653,7 m, a que corresponde uma capacidade de armazenamento de cerca de 1,4 hm<sup>3</sup>, para uma área inundada de 0,9 km<sup>2</sup>. O nível de máxima cheia (NMC) está à cota 1653,9 m. A bacia hidrográfica da albufeira tem uma área de apenas 4,8 km<sup>2</sup>.

A água armazenada na albufeira é usada, nos meses de inverno, para a produção de energia hidroelétrica. No início do verão a água destina-se à rega dos campos de Loriga, ficando a albufeira vazia, normalmente, durante o período compreendido entre junho e novembro.

A observação da barragem foi feita até 1960 através de campanhas de observação geodésica e de inspeções regulares. Devido ao bom comportamento da barragem e às menores exigências regulamentares da época, a observação da barragem foi interrompida por um longo período, tendo sido retomada em 1981.

O sistema de observação foi reformulado em 1996, passando a monitorizar-se as seguintes grandezas: nível de água na albufeira, temperaturas do ar e da água, temperaturas do betão, deslocamentos absolutos (usando métodos geodésicos, fios de prumo e extensómetros de varas) e relativos (usando medidores de movimentos de juntas e bases de alongâmetro) e subpressões e caudais drenados na fundação.

## 1.2 Evidências do processo expansivo

As primeiras evidências do processo expansivo no betão da barragem do Covão do Meio foram detetadas na década de 1990, cerca de 40 anos após a construção, através da observação de fendas no betão e de deslocamentos progressivos, verticais para cima e radiais para montante. Entre 1985 e 2018, o coroamento do bloco EF teve deslocamentos verticais irreversíveis ascendentes de cerca de 18 mm, correspondendo a deformações verticais acumuladas de cerca de  $640 \times 10^{-6}$  em 34 anos e taxa de aumento de cerca de  $32 \times 10^{-6}$ /ano nos últimos 5 anos. Desde o primeiro levantamento realizado em 1983 [1], a fendilhação progrediu consideravelmente, existindo, atualmente, fendas do tipo craquelê no coroamento e orientadas no paramento de jusante, próximo da inserção da barragem na fundação (horizontal, nas juntas de betonagem, ou paralela à inserção).

Em 2005, o LNEC realizou um estudo de interpretação do comportamento observado da barragem [2], com apoio de um modelo de elementos finitos da barragem e do maciço de fundação. As principais conclusões do estudo foram: i) os deslocamentos horizontais e verticais progressivos e os movimentos relativos são consistentes com um processo expansivo do betão de origem interna; e ii) as fendas orientadas no paramento de jusante são causadas pelo processo expansivo, pelo que a sua evolução deve ser acompanhada.

Poucos anos depois, em 2011, foram retirados 8 provetes do corpo da barragem para caracterizar, através de ensaios laboratoriais, as reações expansivas e as propriedades do betão (módulo de elasticidade, resistências à compressão e à tração, perda de rigidez, análise mineralógica, caracterização petrográfica, teores de cimento, sulfatos e álcalis e expansão residual). Os ensaios, que começaram em 2012 e terminaram em 2015 [3-4], identificaram um processo expansivo moderado do tipo álcali-silica. Os valores médios da resistência à compressão e do módulo de elasticidade do betão obtidos foram de cerca de 40 MPa e 25 GPa, respetivamente. Verificou-se, para ambos os casos, uma grande dispersão dos

valores obtidos, que dependeram da localização das amostras, o que pode estar relacionado com diferentes dosagens de cimento utilizadas no fabrico do betão da barragem.

### **1.3 Contexto e objetivos**

Foi recentemente realizado, no âmbito de uma tese de mestrado, um estudo de interpretação e previsão do comportamento da barragem do Covão do Meio [5], tendo em conta o processo expansivo do betão, bem como as características particulares desta obra, por estar localizada a uma altitude elevada na serra da Estrela, a cerca de 1650 m, e sujeita a grandes variações sazonais do nível de água na albufeira.

Para interpretar o comportamento observado da barragem e os efeitos das expansões, foi utilizado um modelo estrutural que considerou a evolução no tempo das propriedades do betão, nomeadamente a maturação, a fluência e a relaxação, e das principais ações (pressão hidrostática, variações de temperatura no betão e expansões). As variações de temperatura no corpo da barragem foram calculadas com um modelo térmico, que teve em consideração as temperaturas do ar e da água nas superfícies exteriores da barragem e os efeitos da radiação solar. A modelação da ação expansiva teve em consideração a influência da temperatura do betão e do confinamento proporcionado pelas tensões de compressão no desenvolvimento das expansões estruturais.

Foi obtido um bom ajuste entre resultados da observação e das modelações térmica e estrutural, o que evidenciou a adequação dos modelos para interpretar o comportamento da obra, bem como prever o seu comportamento futuro. Os modelos desenvolvidos foram também usados para compreender melhor os efeitos das grandes variações sazonais de temperatura e de tensões no desenvolvimento das expansões estruturais na barragem [6].

Nesta comunicação apresenta-se a previsão do comportamento da obra para um horizonte temporal de 20 anos. Devido à incerteza relacionada com a evolução futura das expansões do betão, foram considerados dois cenários, um otimista, em que as expansões estabilizam a médio prazo com valores finais moderados, e um pessimista, em que o potencial remanescente de expansão é mais significativo.

## **2. MODELOS NUMÉRICOS**

### **2.1 Malha de elementos finitos**

Na modelação do comportamento da barragem foi utilizado um modelo contínuo de elementos finitos, uma vez que os movimentos nas juntas de contração são muito pequenos (o aumento de volume do betão devido às reações expansivas também contribui para o fecho generalizado das juntas).

Na Figura 3 apresenta-se a malha de elementos finitos do conjunto barragem-fundação usada nas modelações térmica e estrutural. A malha tem 9336 pontos nodais e 1848 elementos hexaedros de 20 pontos nodais, dos quais 736 pertencem à barragem e 1112 ao maciço rochoso de fundação.

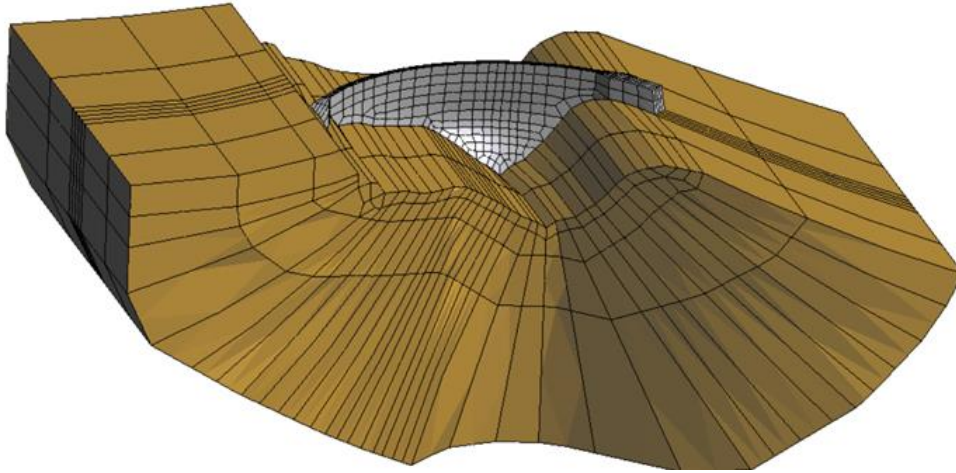


Figura 3. Vista de jusante da malha de elementos finitos utilizada na modelação térmica e estrutural da barragem

## 2.2 Modelo térmico

A análise térmica da barragem foi realizada através de um programa de cálculo automático, baseado no método dos elementos finitos, desenvolvido no LNEC [7], que resolve o problema de condução de calor em regime transiente.

Foram consideradas as variações da temperatura do ar e da água da albufeira nas superfícies exteriores do modelo. Nas superfícies em contacto com o ar foi também considerado o efeito da radiação solar através de um fluxo de calor prescrito, tendo, por essa razão, sido adotada uma discretização horária no domínio do tempo.

As ações térmicas foram representadas através de ondas de período anual, com a forma,

$$T(t) = T_m + S_a \cos\left(\frac{2\pi}{365}(t - \phi)\right) \quad (1)$$

onde  $t$  representa o tempo em dias, decorrido desde o início do ano,  $T_m$  é o valor da temperatura média anual,  $S_a$  é a semi-amplitude e  $\phi$  é o número de dias desde o início do ano até à data em que ocorre a temperatura máxima anual.

A onda térmica do ar, representada graficamente na Figura 4, foi ajustada pelo método dos mínimos quadrados às temperaturas médias diárias observadas no local da obra, sendo caracterizada por uma temperatura média anual de 12,85°C, uma semi-amplitude de 11,8°C e uma defasagem de 188,4 dias. Para a temperatura da água da albufeira foram consideradas 3 ondas de período anual (Figura 5), cujos parâmetros foram estimados a partir das temperaturas observadas em termómetros localizados a diferentes profundidades, verificando-se que a temperatura média e a amplitude diminuem em profundidade.

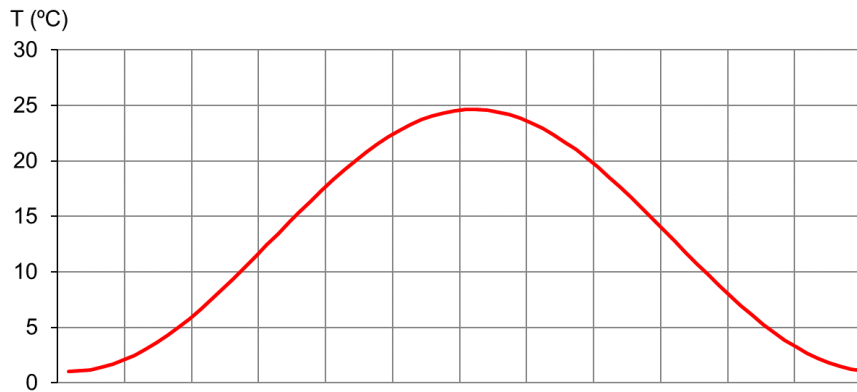


Figura 4. Onda térmica anual média do ar

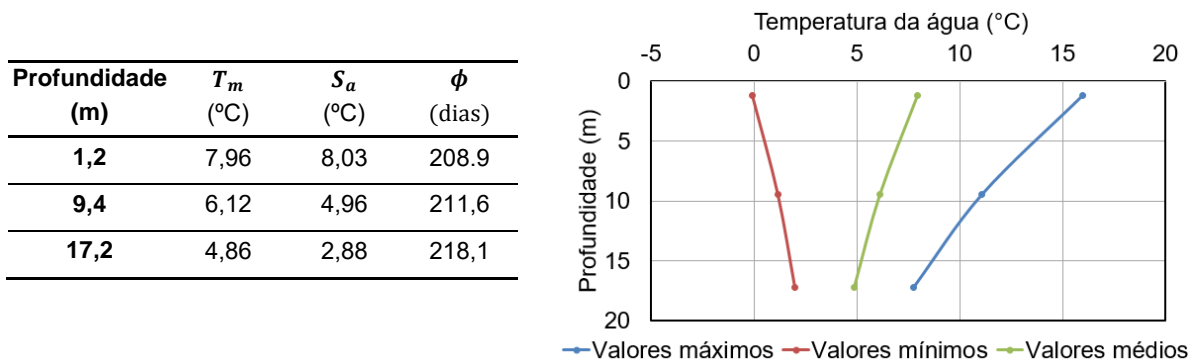


Figura 5. Temperatura da água da albufeira. Parâmetros das ondas térmicas anuais a 3 profundidades (à esquerda) e variação em profundidade da temperatura média anual e da amplitude térmica (à direita)

Não havendo ensaios específicos, foram consideradas as seguintes propriedades térmicas para o betão: coeficiente de dilatação linear  $\alpha_c = 11 \times 10^{-6} / ^\circ C$ , condutividade térmica  $k = 2,6 W.m^{-1}.K^{-1}$ , calor específico  $c = 920 J/(kg.K)$  e coeficiente de convecção  $h_c = 25 W.m^{-2}.K^{-1}$ . Estes valores correspondem a valores médios do betão de barragens.

Na Figura 6 apresentam-se os resultados da análise térmica, em vistas de jusante e cortes, relativos a uma época fria (31 de dezembro de 2019, às 00:00h). Calcularam-se no perfil da barragem temperaturas de cerca de  $5^\circ C$ , exceto no núcleo da barragem, na zona próxima da fundação, em que as temperaturas são um pouco mais elevadas, devido à maior espessura do perfil nessa zona. Não se obtiveram gradientes relevantes na direção montante-jusante porque, nesta altura do ano, as temperaturas do ar e da água são bastante próximas. No lado da margem direita as temperaturas são um pouco mais elevadas devido à maior exposição solar desta zona da obra.

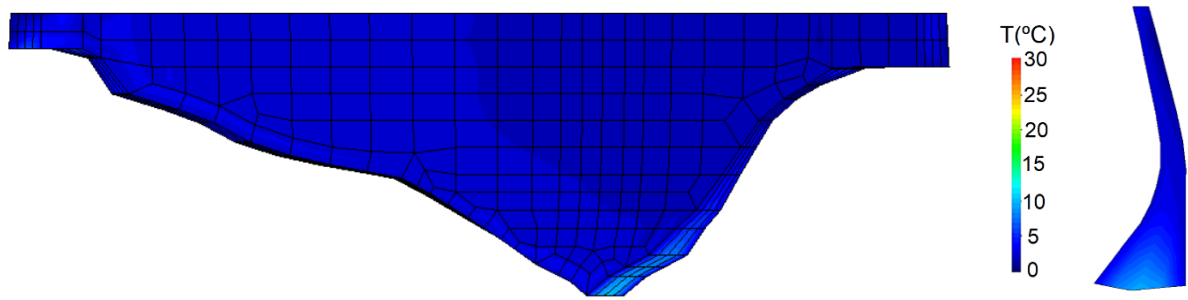


Figura 6. Vista de jusante e corte transversal com a distribuição de temperaturas na barragem em época fria (31 de dezembro de 2019)

Na Figura 7 apresenta-se a comparação entre as temperaturas observadas e calculadas no betão, em alguns pontos de observação da barragem, entre 1998 e 2020, verificando-se que existe um bom ajuste entre os resultados do cálculo e da monitorização.

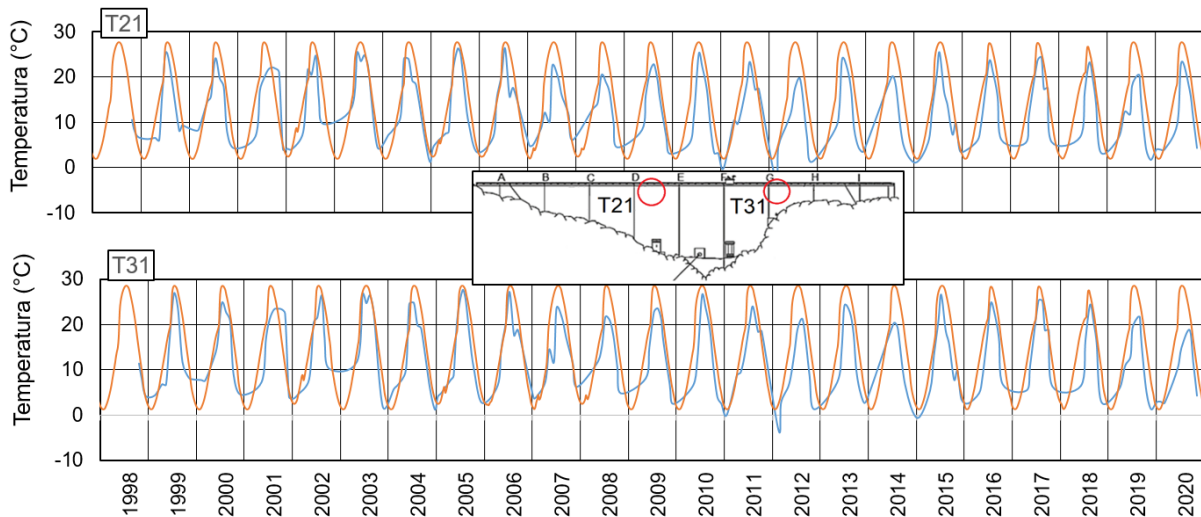


Figura 7. Temperaturas do betão medidas nos termómetros de resistência elétrica T21 e T31 e calculadas nos mesmos pontos com o modelo térmico

### 2.3 Estimativa das expansões livres

Na modelação da ação expansiva assumiu-se que a evolução das expansões estruturais depende dos efeitos, considerados desacoplados, da temperatura, da humidade interna e do estado de tensão, de acordo com a seguinte expressão,

$$\varepsilon_{exp}(H, T, \sigma, t) = \frac{\varepsilon_{exp,\infty} \xi_{exp}(t)}{\varepsilon_{exp,free}(H_{100}, T_{ref}, t)} g_H(H) g_T(T) g_\sigma(\sigma) \quad (2)$$

em que  $\varepsilon_{exp,\infty}$  é a expansão a longo prazo,  $\xi_{exp}$  é uma função que representa a evolução da reação expansiva, variando entre 0, para o instante inicial ( $\xi_{exp}(t_0) = 0$ ), e 1, a longo prazo, quando a reação se esgota ( $\xi_{exp}(t_\infty) = 1$ ). O produto  $\varepsilon_{exp,\infty} \xi_{exp}(t)$  representa a expansão livre para uma determinada temperatura de referência,  $T_{ref}$ , e para uma humidade relativa interna de 100%,  $H_{100}$ . Neste trabalho considerou-se para a função  $\xi_{exp}$  a expressão exponencial do tipo sigmoide (3), que é do tipo das obtidas em ensaios,

$$\xi_{exp}(t) = 1 - e^{-\frac{t^n}{\beta}} ; \quad \beta = \frac{n}{n-1}(t_{hs})^n \quad (3)$$

onde  $t$  representa o tempo (em dias),  $t_{hs}$  é a idade (em dias) correspondente ao ponto de inflexão da curva e  $n$  um número real que afeta a forma da curva.

Para a função  $g_T$  adotou-se a expressão (4),

$$g_T(T) = e^{6000\left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T}\right)} \quad (4)$$

em que  $T$  é a temperatura (em Kelvin).

Quando os ciclos de exposição ao ar de superfícies que estão normalmente submersas são curtos relativamente ao processo de secagem do betão, pode admitir-se que existe sempre disponibilidade de água para alimentar as reações expansivas (isto é,  $g_H \approx 1$ ), exceto nas faixas superficiais junto aos paramentos durante a época quente. Esta simplificação tem a vantagem de dispensar a elaboração de um modelo higrométrico para determinação da humidade interna do betão, para o qual não se dispõe de qualquer tipo de elementos de observação para validação.

Para a função  $g_\sigma(\sigma)$ , que representa o efeito das tensões de confinamento na restrição das expansões, foi considerada a curva exponencial da Figura 8, que foi ajustada no LNEC [8] aos resultados experimentais obtidos Larive [9] e Clayton [10]. A função  $g_\sigma$  foi considerada de forma independente para cada uma das três direções principais de tensão.

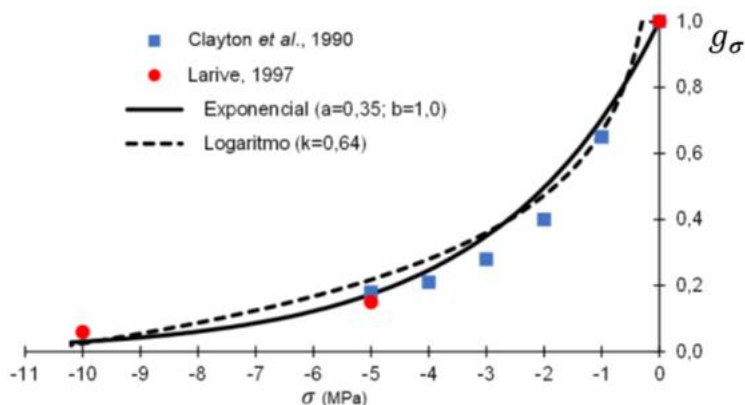
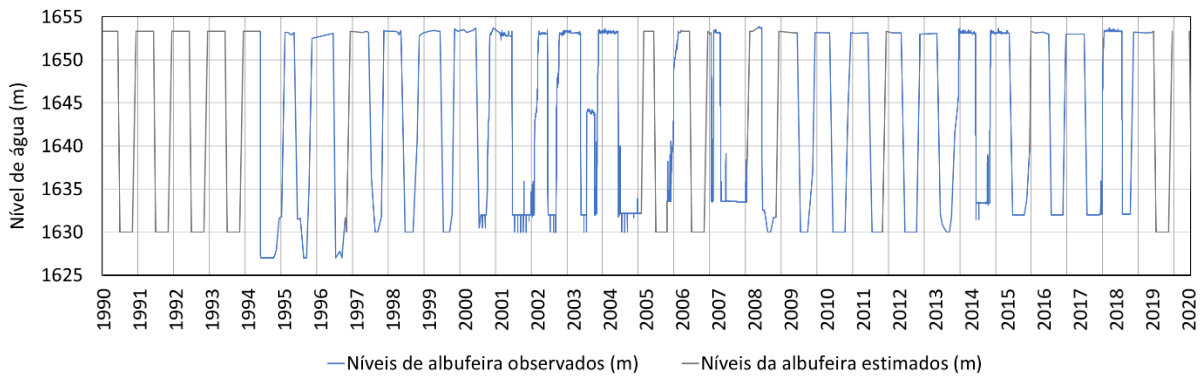


Figura 8. Influência do campo de tensões no desenvolvimento do processo expansivo

## 2.4 Modelação estrutural

A análise estrutural ao longo do tempo foi realizada utilizando um programa de cálculo automático, baseado no método dos elementos finitos, desenvolvido no LNEC [11-13], tendo sido consideradas as ações do peso próprio do betão ( $\gamma_c=24 \text{ kN/m}^3$ ), da pressão hidrostática ( $\gamma_w=10 \text{ kN/m}^3$ ) no paramento de montante, de acordo com evolução do nível da albufeira (Figura 9), das variações de temperatura do betão e das expansões. Foi usada uma discretização quinzenal no domínio do tempo.





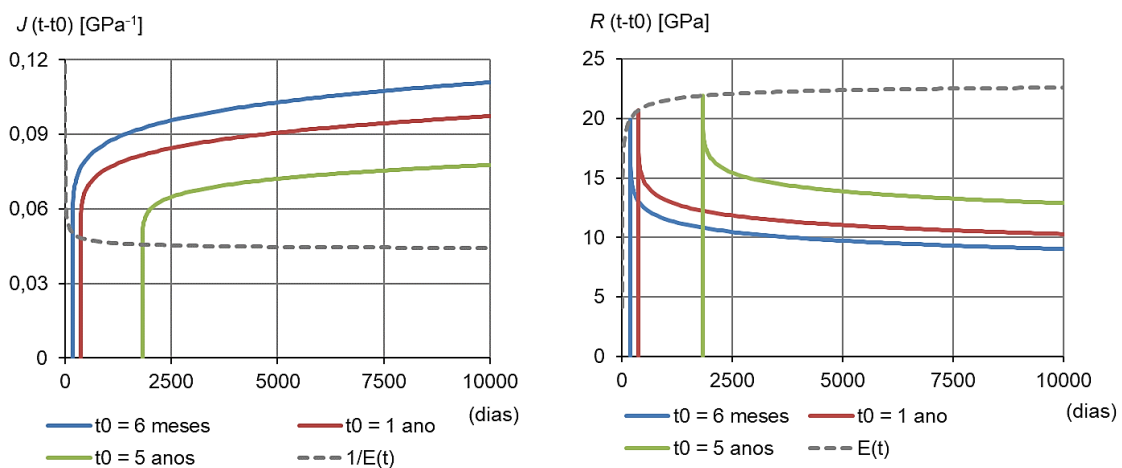
**Figura 9. Nível de água na albufeira (os segmentos a cinzento correspondem a estimativas do nível durante os períodos em que não estavam disponíveis dados de observação)**

O comportamento do betão foi representado por um modelo viscoelástico linear com maturação, que tem em conta a variação da sua deformabilidade ao longo do tempo, bem como as deformações de fluência associadas às cargas aplicadas e a relaxação das tensões devidas a deformações impostas, como é o caso das ações térmica e expansiva. Foi considerado um coeficiente de Poisson de 0,2 e a seguinte lei de fluência de Bažant e Panula,

$$J(t, t_0) = \frac{1}{25} (1 + 2,64(t_0^{-0,441} + 0,042)(t - t_0)^{0,168}) \text{ (GPa}^{-1}\text{)} \quad (5)$$

em que  $t_0$  representa a idade de aplicação das cargas. A função de fluência encontra-se representada na Figura 10, à esquerda, para as idades de carga de 6 meses, 1 ano e 5 anos. Na Figura 10, à direita, apresenta-se a correspondente função de relaxação de tensões, para as mesmas idades de carga, bem como, a traço interrompido, a curva de evolução do módulo de elasticidade.

O comportamento do maciço rochoso de fundação foi considerado elástico linear, caracterizado por um módulo de elasticidade  $E_f = 20 \text{ GPa}$  e um coeficiente de Poisson de 0,2.



**Figura 10. Função de fluência de Bažant e Panula, estimada para o betão da barragem, para três idades de carga (à esquerda) e função de relaxação para as mesmas idades de carga e curva de evolução do módulo de elasticidade (à direita)**

### 3. PREVISÃO DO COMPORTAMENTO FUTURO DA OBRA

#### 3.1 Cenários de previsão do comportamento da obra

A interpretação do comportamento observado até 2020, realizada através da comparação dos resultados das modelações numéricas com os resultados da observação, permitiu validar os modelos térmico e estrutural, tendo sido utilizados, de seguida, para prever o comportamento da obra para os próximos 20 anos.

A previsão do comportamento da barragem foi realizada admitindo que a exploração da albufeira seguirá o padrão atual, considerando-se assim que a subida do nível ocorre entre 4 de novembro e 12 de dezembro e a descida dá-se entre 8 de junho e 1 de julho. Admitiu-se ainda que as curvas representativas das variações anuais de temperatura do ar e da água do reservatório são as apresentadas nas Figuras 4 e 5.

Relativamente à evolução das expansões livres no betão foram considerados dois cenários: um otimista, em que as expansões estabilizam a médio prazo, e um pessimista, em que o potencial remanescente de expansão é mais significativo. Na Figura 11 representam-se graficamente as expansões livres consideradas no cálculo, para uma temperatura de referência de 20 °C, e no Quadro 1 apresentam-se os parâmetros definidores das curvas. A barragem foi dividida em três zonas, uma vez que os deslocamentos verticais, medidos através de nivelamentos, evidenciam expansões significativamente maiores nos blocos da margem esquerda. A estimativa das expansões livres teve em conta os principais resultados de ensaios laboratoriais [3-4], tendo, até 2020, sido calibradas as respetivas curvas de forma a ajustar os valores das expansões aos deslocamentos irreversíveis observados. Após 2020 considerou-se que os valores de expansão a longo prazo divergem em cerca de 30% a 40%.

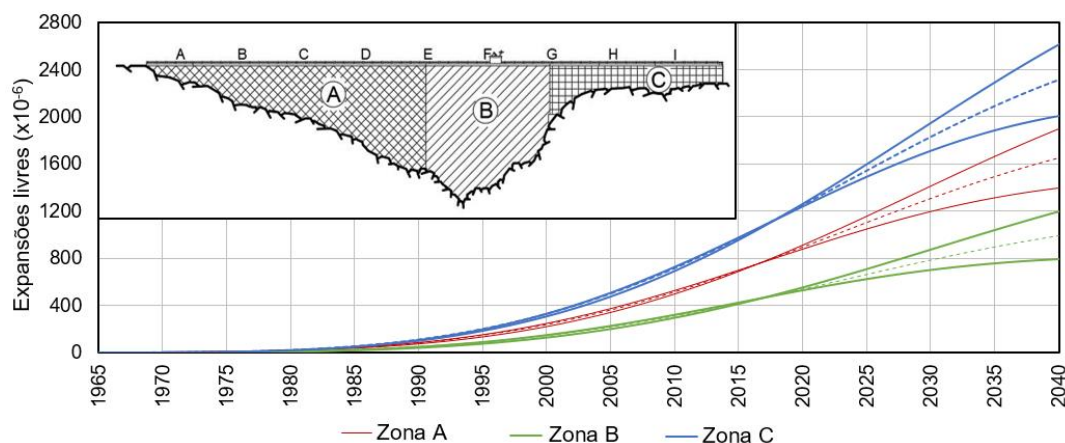


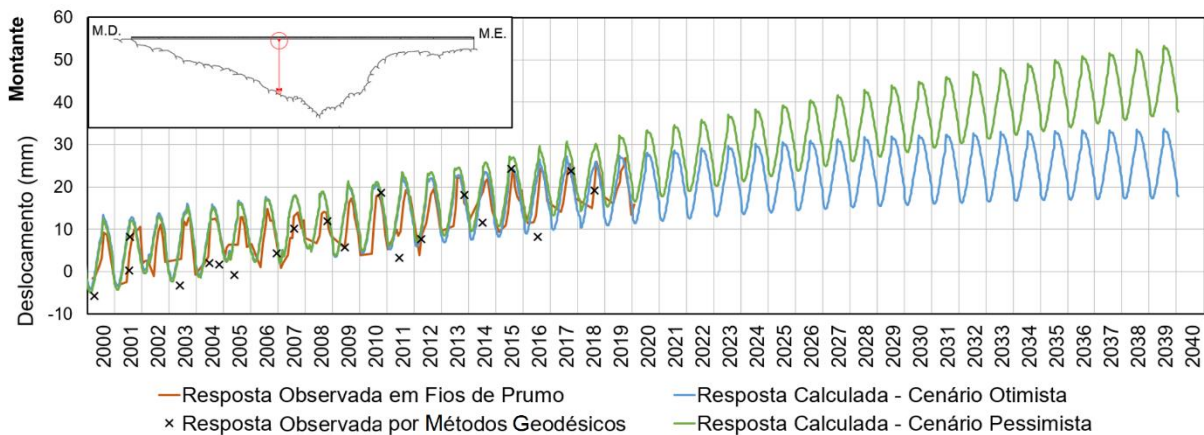
Figura 11. Curvas estimadas para as expansões livres até 2040 (para uma temperatura de referência de 20 °C), considerando dois cenários, um otimista e outro pessimista

Quadro 1. Parâmetros das curvas de evolução das expansões livres

Zona	A		B		C	
Cenário	Pessimista	Otimista	Pessimista	Otimista	Pessimista	Otimista
$n$	3,7	3,7	3,75	3,8	3,65	3,8
$t_{hs}$ (dias)	24000	19800	24600	19100	24000	20000
$\varepsilon_{\infty}$ ( $\times 10^{-6}$ )	2600	1500	1700	825	3600	2150

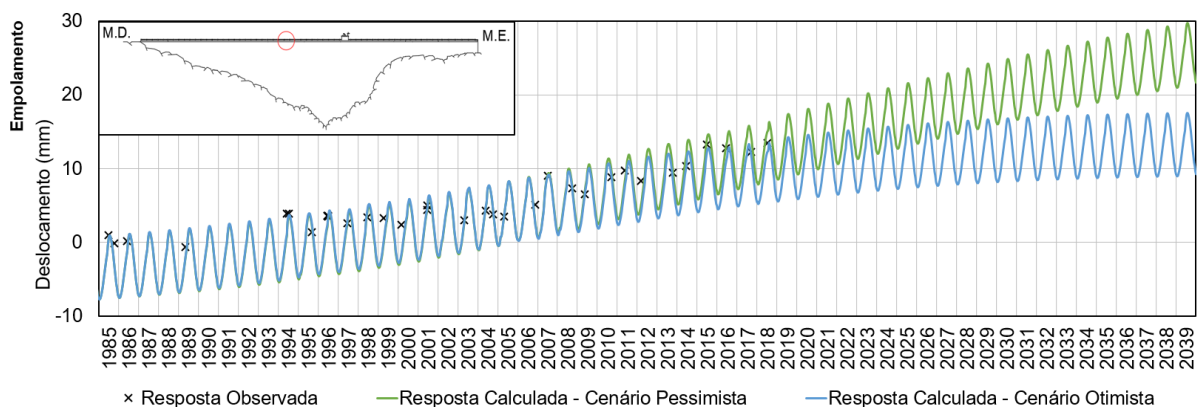
### 3.2 Principais resultados obtidos

Na Figura 12 representam-se os deslocamentos radiais observados no fio de prumo 2 e por triangulação geodésica (em alvo próximo), desde o início de 2000 até ao final de 2019, e os correspondentes deslocamentos calculados, para os dois cenários considerados, até ao final de 2039. Verifica-se um bom ajuste entre as respostas observada e calculada até 2020. Para 2040 verifica-se, no caso do cenário otimista, uma clara tendência de estabilização dos deslocamentos, principalmente após 2030, enquanto no cenário pessimista os deslocamentos ainda aumentam significativamente.



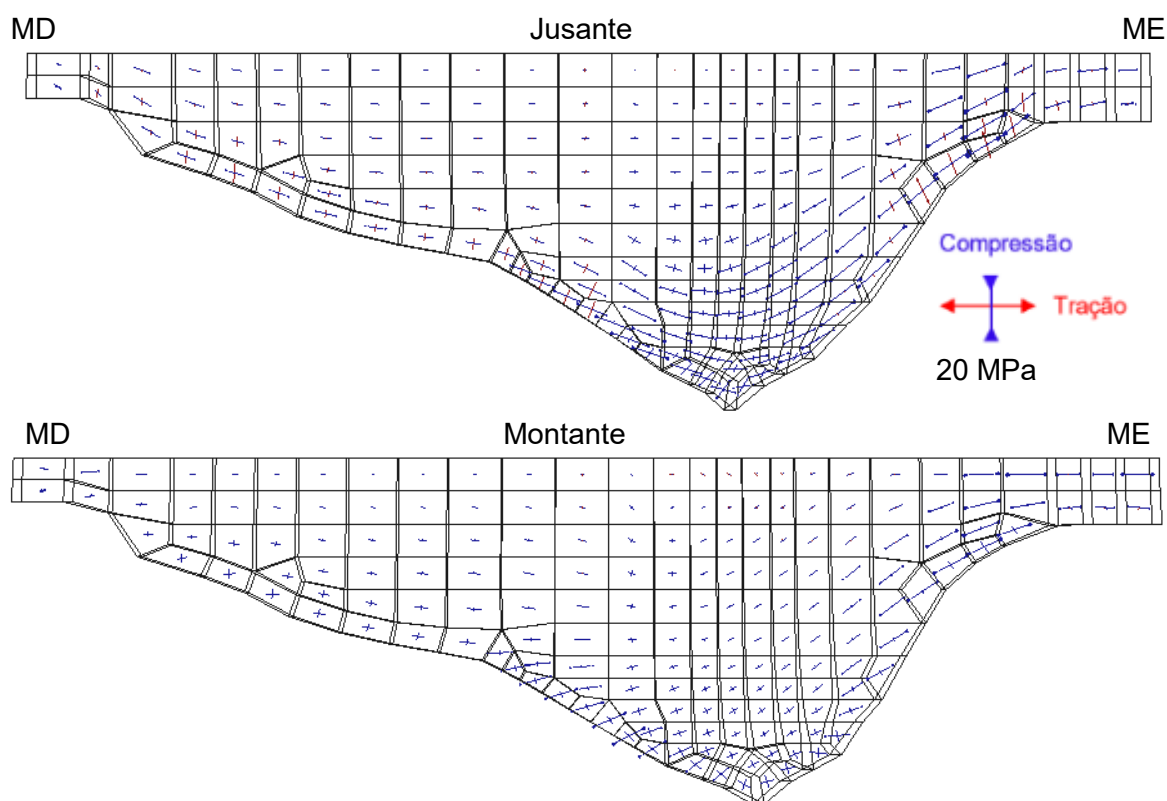
**Figura 12. Deslocamentos radiais previstos até 2040 no ponto correspondente ao local de amarração do fio de prumo 2 (cota 1653,90 m) e ao alvo geodésico DE53B, e valores observados até 2020**

Na Figura 13 representam-se os deslocamentos verticais observados por nivelamentos de precisão numa marca localizada no coroamento da barragem, desde o início de 1985 até ao final de 2019, e os correspondentes deslocamentos calculados, até ao final de 2039, verificando-se que os valores obtidos através de nivelamentos, em que as campanhas são geralmente efetuadas em época quente (devido às dificuldades de acesso à obra durante o inverno), são consistentes com os valores calculados. Em 2040 prevê-se, caso o pior cenário ocorra, que os deslocamentos verticais de empolamento ainda aumentem significativamente.



**Figura 13. Deslocamentos verticais previstos até 2039, para os cenários otimista e pessimista, no ponto correspondente à marca de nivelamento no bloco DE, e valores observados até 2020**

Nas Figuras 14 e 15 representam-se, respetivamente, as tensões principais nos paramentos de montante e jusante devidas à ação conjunta do peso próprio do betão, da pressão hidrostática no paramento de montante e das expansões e apenas devidas às expansões, no início de 2020. Para o conjunto das ações, o estado de tensão nos paramentos é, na generalidade, de compressão, verificando-se que as maiores tensões de compressão são paralelas à inserção, com valores da ordem de 9,8 MPa, e ocorrem junto ao encontro da margem esquerda, a jusante. As tensões de tração máximas (cerca de 5,6 MPa) também ocorrem próximo do encontro da margem esquerda, a jusante, mas são perpendiculares à inserção. Estas trações teóricas elevadas, superiores à resistência à tração estimada para o betão da barragem (4 MPa), são consistentes com a fendilhação orientada existente nesta zona da obra. Na margem direita as tensões máximas de tração são cerca de 3,6 MPa. Devido apenas às expansões, o estado de tensão é também, de um modo geral, de compressão, mas verifica-se a ocorrência de tensões de tração no fecho dos arcos, a montante, com valores máximos de cerca de 2,7 MPa junto ao coroamento. As trações que ocorrem junto à inserção, a jusante, têm valores mais elevados, cerca de 7,1 MPa, próximo do encontro da margem esquerda, e cerca de 5,2 MPa, do lado da margem direita. O valor máximo das tensões de compressão é cerca de 9,6 MPa, junto do encontro da margem esquerda.



**Figura 14. Tensões principais nos paramentos da abóbada devidas às ações do peso próprio, pressão hidrostática no paramento de montante e expansões, no início de 2020**

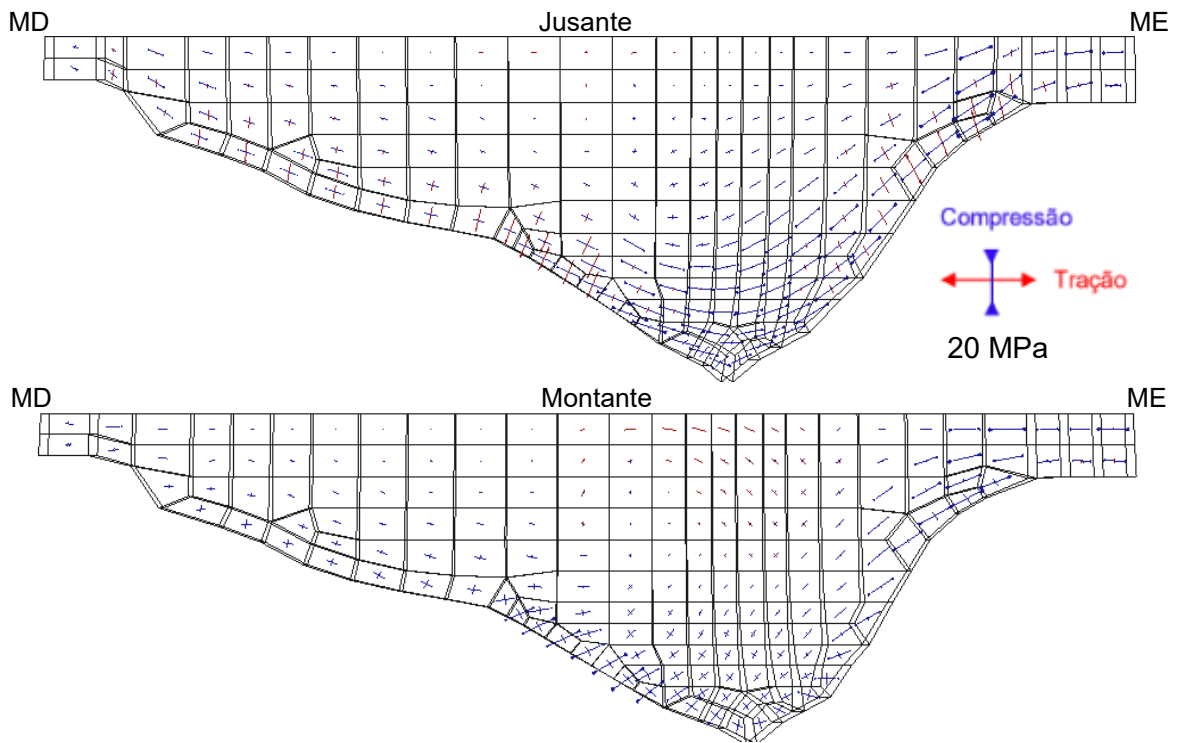


Figura 15. Tensões principais nos paramentos da abóbada devidas às expansões, em 2020

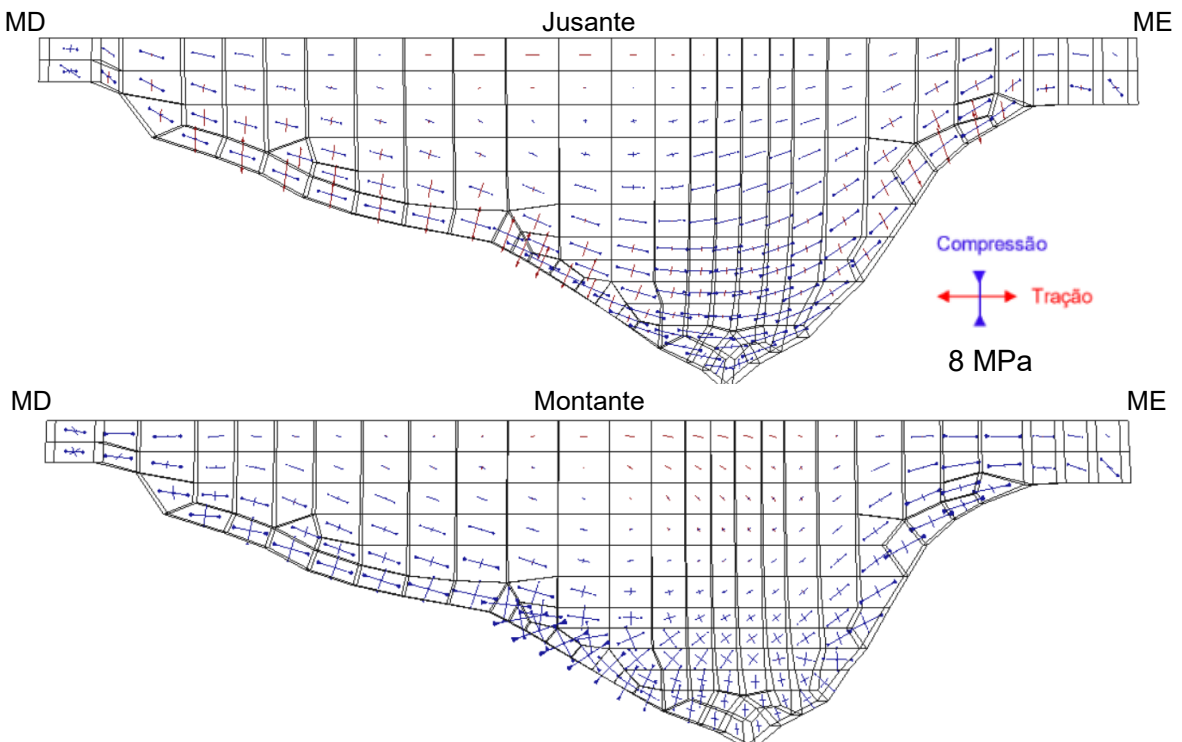


Figura 16. Tensões principais nos paramentos da abóbada devidas ao aquecimento entre o inverno e o verão

Na Figura 16 representam-se as tensões principais devidas ao aquecimento da barragem entre as épocas fria (7 de janeiro de 2020) e quente (12 de julho de 2020). O estado de tensão é, na generalidade, de compressão, verificando-se que as tensões máximas de compressão ocorrem próximo da inserção, do lado de ambas as margens, sendo de cerca de 5,6 MPa no paramento de montante e de cerca de 4,1 MPa no paramento de jusante. As tensões máximas de tração ocorrem junto à inserção a jusante, também do lado de ambas as margens, com valores de cerca de 3,8 MPa, sendo perpendiculares à inserção.

Nas Figuras 17 e 18 representam-se, para os cenários otimista e pessimista, as tensões principais nos paramentos, no início de 2040, devidas à ação conjunta do peso próprio, pressão hidrostática e expansões. As maiores compressões ocorrem do lado da margem esquerda, junto à inserção, sendo máximas no paramento de jusante, com valores entre 10,6 MPa e 14,1 MPa, para os cenários otimista e pessimista, respetivamente. Relativamente às trações, os valores máximos foram calculados no paramento de jusante, junto à inserção, com valores entre 6,9 MPa, para o cenário otimista, e 9,8 MPa, para o cenário pessimista.

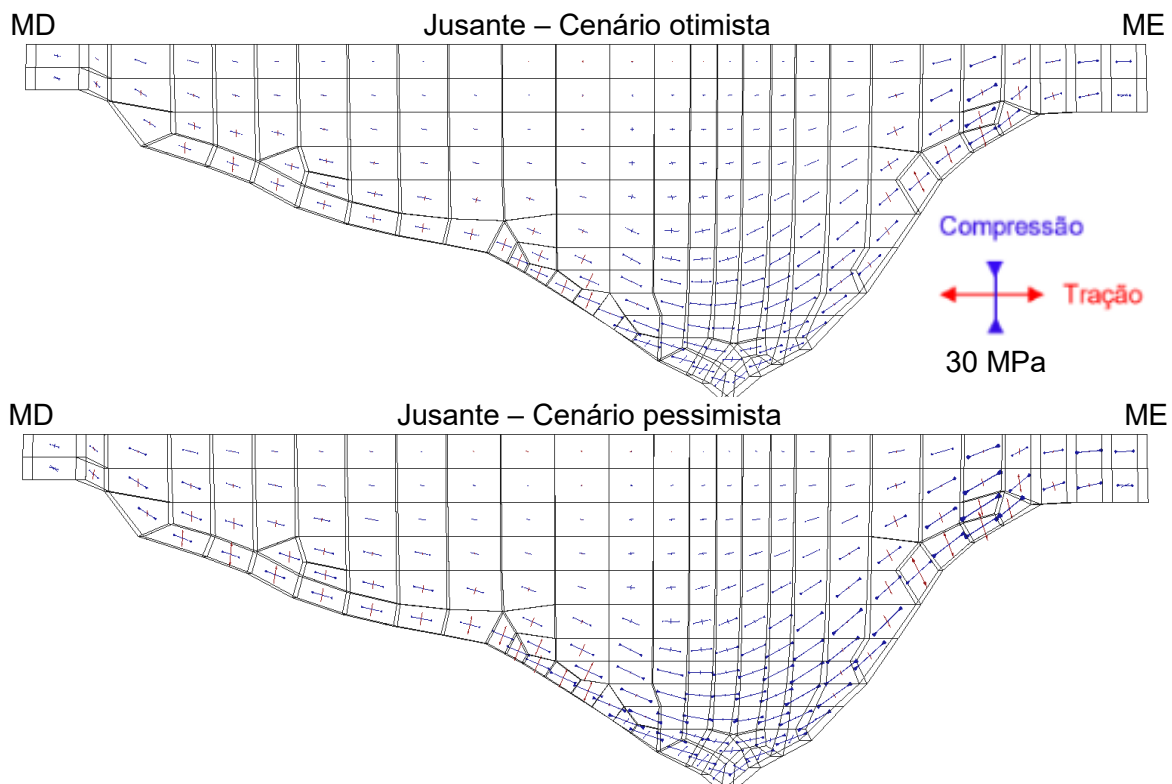


Figura 17. Tensões principais no paramento de jusante devidas ao peso próprio, pressão hidrostática e expansões em 2040, para o cenário otimista (em cima) e pessimista (em baixo)

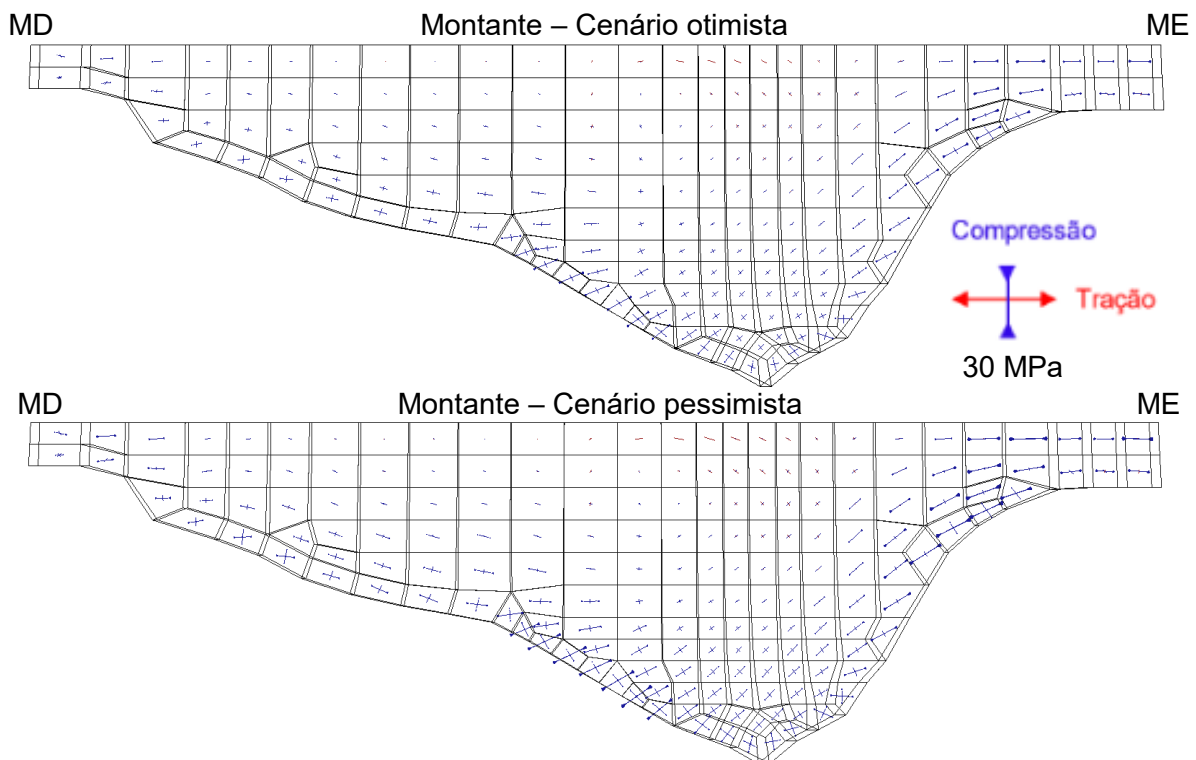


Figura 18. Tensões principais no paramento de montante devidas ao peso próprio, pressão hidrostática e expansões em 2040, para o cenário otimista (em cima) e pessimista (em baixo)

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados da observação da obra e os obtidos através de modelação, em termos de temperaturas e deslocamentos, mostraram uma boa concordância até ao início de 2020, o que evidencia a adequação dos modelos utilizados para simular o comportamento da barragem do Covão do Meio. Esses modelos foram usados, numa segunda fase, para prever o comportamento da barragem para as próximas duas décadas, tendo sido considerados dois cenários para a evolução das expansões, um pessimista e outro otimista, que pretendem balizar o comportamento futuro da obra.

No início de 2020, tendo em conta o efeito conjunto do peso próprio, da pressão hidrostática e das expansões, calcularam-se tensões máximas de compressão, paralelas à inserção, de cerca de 10 MPa, junto ao encontro da margem esquerda, a jusante. Na mesma zona, as tensões de compressão devidas às variações térmicas (correspondentes ao aquecimento da obra) são de cerca de 4,0 MPa e têm orientação semelhante, o que resulta em tensões máximas de compressão no betão de cerca de 14 MPa. As tensões máximas de tração calculadas, de cerca de 10 MPa, ocorrem também nesta zona e são devidas às ações do peso próprio, das expansões e do aquecimento da obra. São valores elevados, muito superiores à resistência à tração estimada para o betão da barragem, que é de cerca de 4 MPa, que justificam a fendilhação orientada existente nesta zona da obra. Nos blocos da margem direita também foram calculadas tensões significativas de tração, da ordem de 8 MPa, que também justificam a fendilhação aí existente.

Para 2040, tendo em conta a ação conjunta do peso próprio, da pressão hidrostática, das expansões e ainda das variações térmicas correspondentes a um aquecimento da barragem, prevêem-se tensões de compressão máximas compreendidas entre 15 MPa, para o cenário otimista, e 18 MPa, para o cenário pessimista, junto do encontro da margem esquerda, a jusante, que correspondem a cerca de 38% e 45% da resistência média à compressão do betão da barragem (estimada, com base em ensaios, em cerca 40 MPa). Estes valores são relevantes, principalmente caso o pior cenário se venha a concretizar. Prevê-se que a fendilhação estrutural, junto da inserção a jusante, possa aumentar em extensão e abertura, uma vez que o modelo viscoelástico utilizado indica que as trações nesta zona continuarão a aumentar no futuro.

A fendilhação existente, que é localizada, tem uma influência diminuta no comportamento global da barragem. Contudo, numa próxima abordagem de cálculo será considerado o comportamento não linear do betão no ramo de tração através de um modelo de dano, para se poder simular a formação das fendas e a sua evolução.

## AGRADECIMENTOS

Agradece-se à EDP, concessionária da barragem do Covão do Meio, a autorização concedida para a publicação de elementos da observação da obra.

## REFERÊNCIAS

- [1] LNEC (Matos, M.) – “Observação da barragem do Covão do Meio. Levantamento de fendas existentes nos paramentos de jusante e montante”. Relatório 156/1986, DB/NO, 1986.
- [2] LNEC (Oliveira, S.; Mendes, L.A.M.; Dias, I.F.; Ramos, J.M.) – “Barragem do Covão do Meio. Análise do comportamento e avaliação das condições de segurança”. Relatório 58/2006, NMMF/NO, 2006.
- [3] LNEC (Santos Silva, A.; Custódio, J.; Costa, D.) – “Barragem do Covão do Meio. Avaliação do estado de degradação do betão com base nos resultados dos ensaios laboratoriais realizados em 2012”. Relatório 62/2013, DM/NMM/NPC, 2013.
- [4] LNEC (Custódio, J.; Santos Silva, A.; Costa, D.) – “Barragem do Covão do Meio. Avaliação do estado de degradação do betão com base nos resultados dos ensaios laboratoriais”. Relatório final. Relatório 310/2015, DM/NBPC, 2015.
- [5] Ferra, S. – “Estudo da influência de grandes variações sazonais de temperatura e de tensão no desenvolvimento das expansões do betão em barragens. Aplicação à barragem do Covão do Meio”. Dissertação de mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2021.
- [6] Dias, I.F.; Batista, A.L.; Ferra, S. – “Influence of temperature and stress field seasonal variations in the development of concrete swelling in dams. Application to the case of Covão do Meio dam (Portugal)”. *Second Book of Proceedings of the 16th ICAAR*, Lisboa, 2022.
- [7] LNEC (Leitão, N.) – “Análise térmica de barragens de betão”. Relatório 185/2012, 2012.
- [8] Batista, A.L. – “Deterioração e reabilitação de barragens afetadas por reações expansivas internas do betão”. Programa de Investigação, LNEC, Lisboa, 2021.



- [9] Larive, C. – “Apports combinés de l’expérimentation et la modélisation à la compréhension de l’alcali-réaction et de ses effets mécaniques”. Tese de doutoramento, École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 1997.
- [10] Clayton, N.; Currie, R.J.; Moss, R.M. – “The effects of alkali-silica reaction on the strength of prestressed concrete beams”. *The Structural Engineer*, 1990, 68, N. 15, p. 287-292.
- [11] Batista, A.L. – “Análise do comportamento ao longo do tempo de barragens abóboda”. Tese de doutoramento, Instituto Superior Técnico (IST), Lisboa, 1998.
- [12] Oliveira, S. – “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 (FEUP), Porto, 2000.
- [13] Dias, I.F., Oliver, J., Huespe, A.E. – “Strain injection techniques in numerical modeling of propagating material failure”. Monografia CIMNE M134. International Center for Numerical Methods in Engineering, Barcelona, 2012.