



## Identificação e Modelação dos Efeitos das Expansões do Betão na Barragem da Bemposta

**Rodolfo Rebelo**

*Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Portugal, [rodolfoprebelo@gmail.com](mailto:rodolfoprebelo@gmail.com)*

**Ivo Figueiredo Dias**

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

**António Lopes Batista**

*Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, [a.l.batista@lnec.pt](mailto:a.l.batista@lnec.pt)*

### Resumo

A barragem da Bemposta, no trecho internacional do rio Douro, foi construída entre 1960 e 1964. Destina-se à produção de energia, permitindo ainda alguma regularização de caudais. Trata-se de uma barragem em arco-gravidade de betão, aligeirada com um grande vazamento junto à fundação. É definida em planta por arcos circulares e tem cerca de 87 m de altura máxima acima da fundação. O betão da barragem está afetado por reações expansivas, do tipo álcalis-sílica, de moderada magnitude, pelo que os seus efeitos estruturais aparentes são pouco significativos.

Para interpretação do comportamento observado da barragem e dos efeitos das reações expansivas, foi elaborado um modelo estrutural que considerou a evolução no tempo das principais ações (pressão hidrostática, variações de temperatura e expansões) e das propriedades do betão. 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. O modelo estrutural foi analisado em regime viscoelástico, para ter em consideração a fluência e a relaxação do betão.

Foi obtido um ajuste notável entre os resultados da observação e das modelações térmica e estrutural. Os resultados evidenciam que os efeitos das expansões são já dominantes no comportamento da obra, em termos de deslocamentos horizontais e verticais e de tensões.

**Palavras-chave:** Barragem da Bemposta; Reações expansivas; Fluência e relaxação; Modelos estrutural e térmico

## 1 INTRODUÇÃO

A barragem da Bemposta é uma estrutura do tipo arco-gravidade, vazada nos blocos centrais (Fig. 1). Está localizada no trecho intermédio do troço internacional do rio Douro, a jusante da barragem de Picote e a montante da barragem espanhola de Aldeadavila. Tem 87 m de altura e está fundada num maciço rochoso constituído por granitos e migmatitos. A barragem foi concluída em 1964, tendo sido utilizados agregados graníticos no fabrico do betão. A pintura dos blocos e das estruturas de betão da margem direita, a jusante, foi realizada no âmbito da intervenção arquitetónica nas obras de reforço de potência do aproveitamento hidroelétrico, terminadas em 2011.

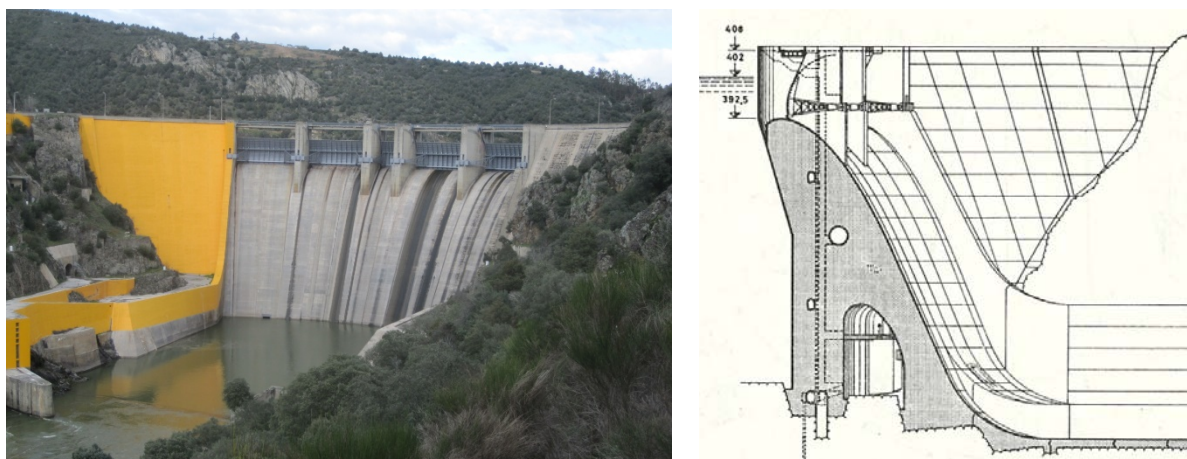


Figura 1. Vista de jusante e corte pela consola central da barragem da Bemposta

A obra tem tido um acompanhamento regular pelo LNEC. Os resultados da observação mostram um comportamento muito influenciado, nas últimas décadas, pelos efeitos de reações expansivas do betão, do tipo álcalis-silica, que ainda são de moderada magnitude.

No âmbito de uma dissertação de mestrado, foi realizado recentemente um estudo de análise e interpretação do comportamento observado da barragem [1]. Pretendeu-se conhecer melhor os efeitos da ação expansiva, incluindo os campos de tensões na obra. 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. O modelo estrutural considerou a evolução no tempo das principais ações (pressão hidrostática, variações de temperatura e expansões) e das propriedades do betão, tendo sido analisado em regime viscoelástico, para ter em consideração a fluência e a relaxação do betão. As expansões foram estimadas a partir dos resultados da observação, considerando os efeitos térmicos no desenvolvimento da cinética das reações químicas.

## 2 EVIDÊNCIAS DOS EFEITOS DAS EXPANSÕES DO BETÃO

As evidências dos fenómenos expansivos foram identificadas na década de 1990, cerca de 30 anos após a construção, através da observação de deslocamentos progressivos, verticais para cima (Figs 2 e 11) e radiais para montante (Fig. 12), bem como de deslizamentos verticais nas juntas de contração (ao nível do coroamento), fecho dos vãos laterais do descarregador de superfície (Fig. 3) e incremento das extensões medidas em alguns extensómetros corretores. Existem também

superfícies deterioradas de betão nas galerias e fendilhação difusa em zonas específicas das galerias e dos paramentos, de expressão moderada (Fig. 4).

No que respeita aos deslocamentos verticais do coroamento, a taxa de variação nos últimos 20 anos é praticamente constante, sendo de cerca de 0,6 mm/ano na zona central da barragem (Fig. 2). As extensões verticais médias, acumuladas desde 1977, são de cerca de  $250 \times 10^{-6}$ .

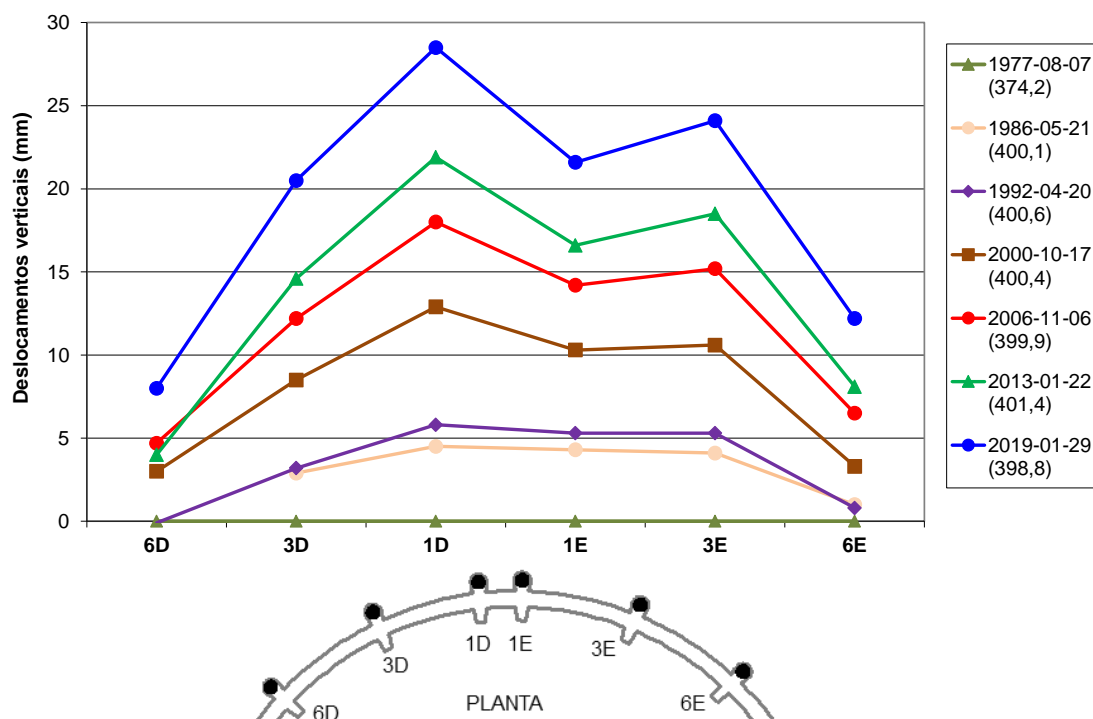


Figura 2. Deslocamentos verticais do coroamento observados por nivelamento geométrico de precisão, entre 1983 e 2019 (deslocamentos positivos para cima)

Verificam-se deslocamentos radiais progressivos para montante, na zona superior central da barragem, observados por triangulação geodésica e nos fios de prumo, com valores de cerca de 25 mm, a que corresponde uma taxa de variação praticamente constante nas últimas décadas, de cerca de 0,8 mm/ano (Fig. 12). O fecho dos vãos laterais do descarregador de superfície é superior a 15 mm (Fig. 3). Valores desta ordem de grandeza não causarão problemas de movimentação das comportas, mas podem provocar a deterioração precoce dos sistemas de estanqueidade caso sejam operadas com regularidade na época das chuvas.

Nos extensómetros corretores da obra, os valores observados das extensões livres do betão são homotéticos com a onda térmica anual (variações anuais máximas da ordem de  $200 \times 10^{-6}$ ), apenas se registando em alguns deles uma tendência evolutiva no tempo. As duas células tensométricas verticais em funcionamento (C2 e C4, na zona central, a meia altura do vazamento) não indicam variações de tensões no tempo.

Margem direita

Margem esquerda

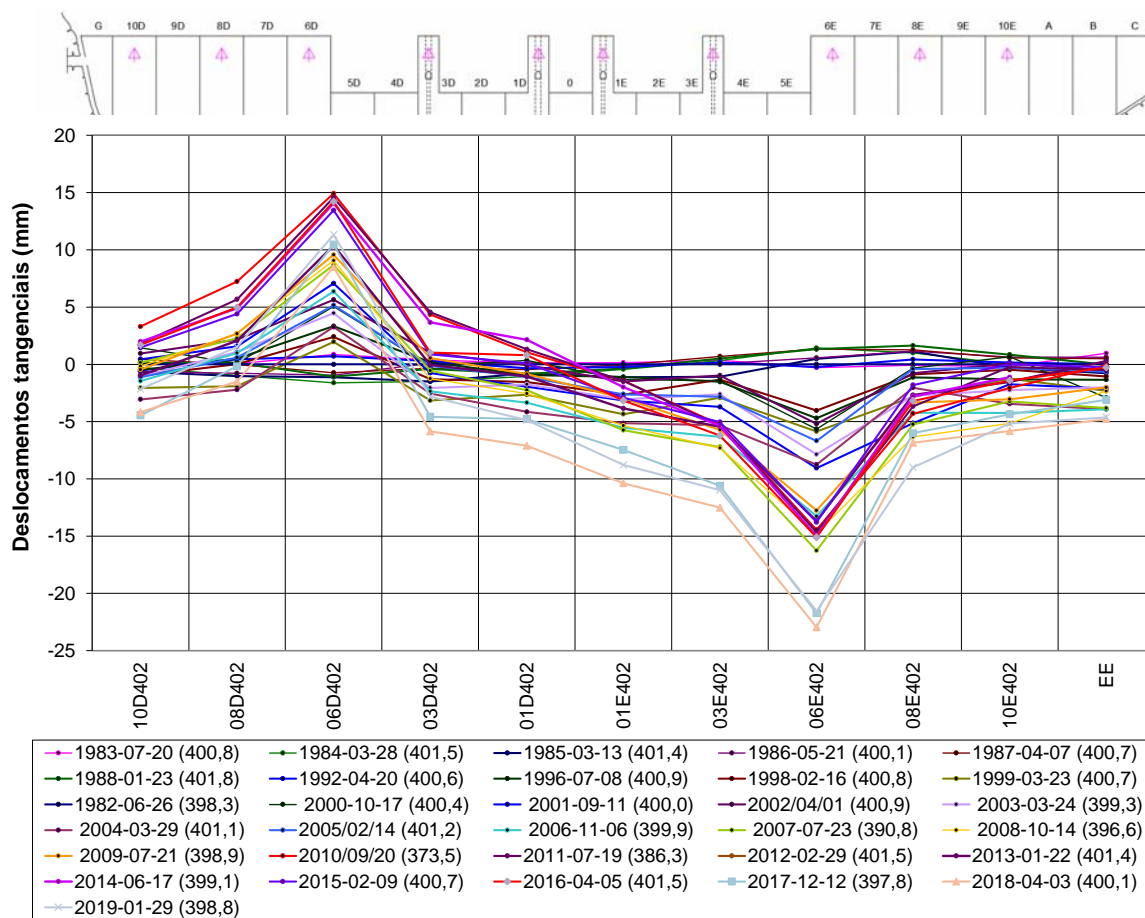


Figura 3. Deslocamentos tangenciais observados por triangulação geodésica junto ao coroamento (cota 402,00 m), entre 1983 e 2019 (deslocamentos positivos no sentido da margem esquerda)



Figura 4. Fendilhação difusa no topo do encontro da margem direita (à esquerda) e na face da margem direita do pilar 1D, a montante (à direita) (fotografias de junho de 2019)

### 3 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO AO LONGO DO TEMPO

#### 3.1 Evolução do nível da água na albufeira

Na Fig. 5 representa-se a evolução do nível de água na albufeira entre 1963 e 2020. Os abaixamentos realizados em 2010 e 2011 estiveram relacionados com as obras de reforço de potência da central.

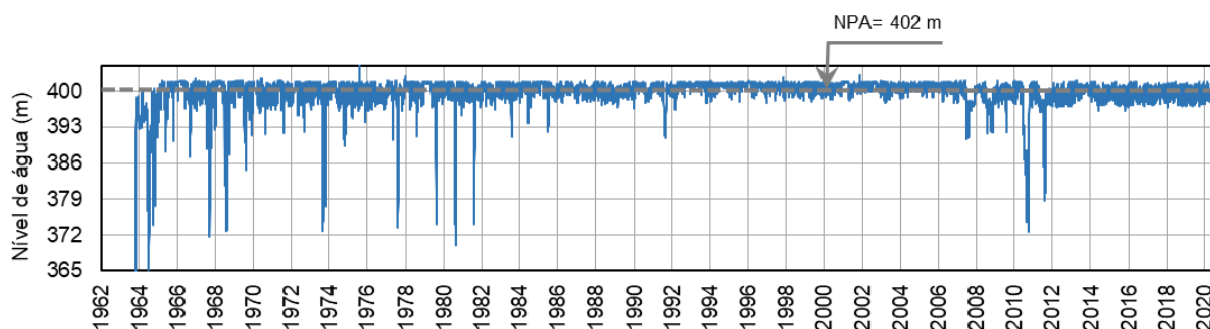


Figura 5. Evolução do nível da água na albufeira entre 1963 e 2020

#### 3.2 Malha de elementos finitos

Na Fig. 6 apresenta-se a malha de elementos finitos do conjunto barragem-fundação. A malha tem 8300 elementos e 31181 pontos nodais, dos quais 2235 são elementos hexaedros de 27 pontos nodais (barragem e comportas) e 6065 são tetraedros (fundação) de 10 pontos nodais. As comportas foram consideradas de forma simplificada, apenas para facilitar a aplicação da pressão hidrostática.

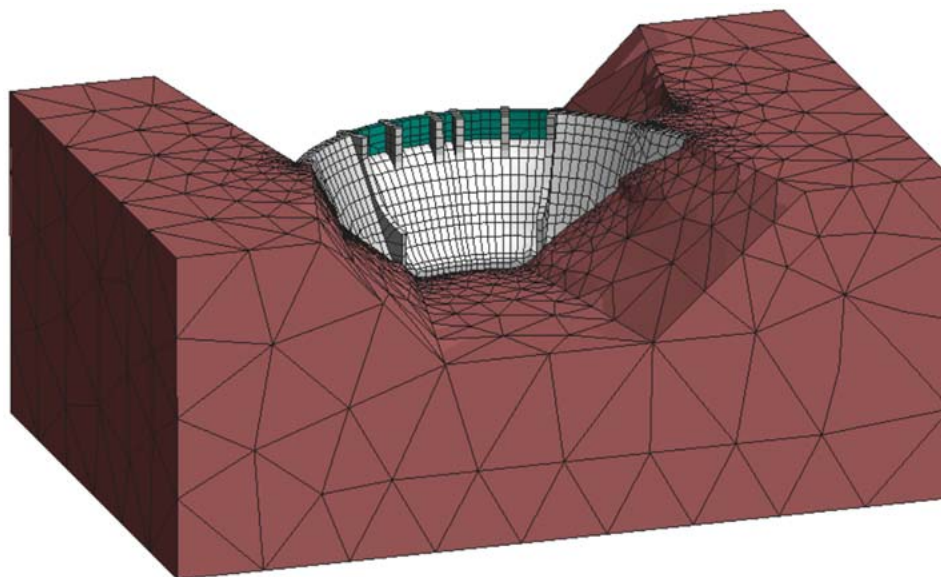


Figura 6. Malha de elementos finitos utilizada na análise e interpretação do comportamento térmico e estrutural da barragem

#### 3.3 Modelação térmica

A partir das temperaturas observadas no ar e na água da albufeira a diferentes cotas, foram ajustadas, através do método dos mínimos quadrados, funções harmónicas de período anual, com a forma,

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

em que  $T_m$  é a temperatura média anual,  $t$  é o tempo em dias decorrido desde o início do ano e  $S_a$  e  $\phi$  são, respetivamente, a semi-amplitude e o número de dias após o início do ano até à data correspondente ao máximo da temperatura anual. Na Fig. 7 apresentam-se os resultados obtidos, verificando-se que na água a temperatura média e a semi-amplitude diminuem em profundidade.

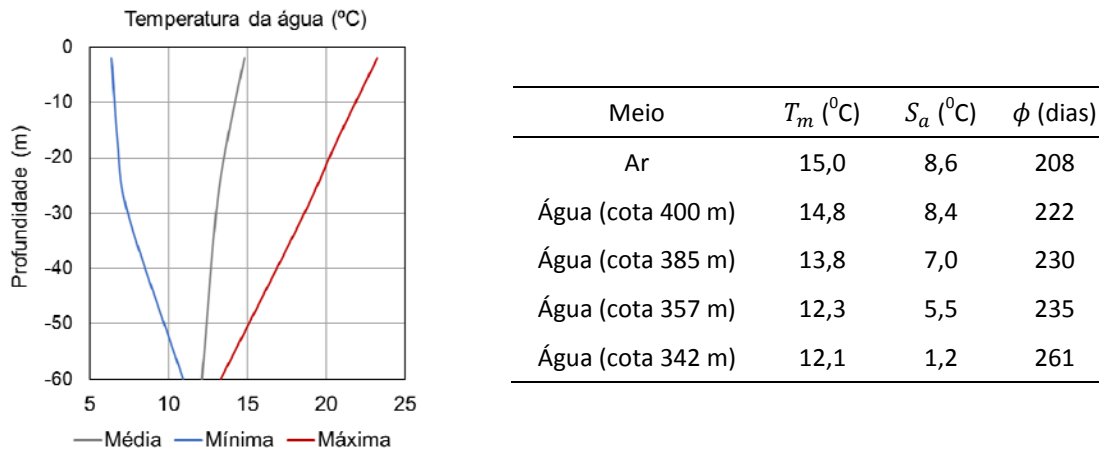


Figura 7. Representação gráfica da evolução da temperatura da água em profundidade (à esquerda) e valores dos parâmetros das funções harmónicas representativas das temperaturas do ar e da água da albufeira a diferentes cotas (à direita)

A distribuição das temperaturas no corpo da barragem, entre novembro de 1963 e abril de 2020, foi obtida com o auxílio de um programa de análise térmica desenvolvido no LNEC [2], baseado no método de elementos finitos, tendo sido adotada uma discretização horária no domínio do tempo, para ter em conta os efeitos da radiação solar. Nas superfícies exteriores da barragem em contacto com o ar foram consideradas transferências de calor sob a forma de convecção (condições de Neumann), enquanto que aos pontos nodais das superfícies em contacto com a água foi atribuída diretamente a temperatura da água (condições de fronteira de Dirichlet). Não havendo ensaios específicos, foram considerados, para o betão, uma condutividade térmica  $k=2,6 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ , um calor específico  $c=920 \text{ J/(kg K)}$ , um coeficiente de convecção  $h_c=25 \text{ W/(m}^2\text{K)}$  e um coeficiente de absorção  $a=0,65$ , que são valores habitualmente usados para betões de barragens.

Na Fig. 8 são apresentados, em alçado de jusante e corte, os resultados obtidos no cálculo térmico da barragem, numa época fria (29 de dezembro de 2019). Como esperado, as temperaturas são mais elevadas no núcleo e mais reduzidas junto aos paramentos, verificando-se ainda que as temperaturas no lado da margem direita são maiores que no lado da margem esquerda, porque sofre maior influência da radiação solar.

Na Fig. 9 faz-se a comparação entre as temperaturas calculados e os valores observados nos pares termoelectrónicos embebidos no corpo da barragem, à cota 385,0 m, no bloco 6E, ordenados de jusante para montante. Verifica-se que os valores calculados se ajustam bem aos valores observados. Devido à temperatura média da água ser inferior à temperatura média do ar, acrescida da radiação solar, a temperatura média do paramento de jusante é cerca de 5°C superior à temperatura média do paramento de montante.

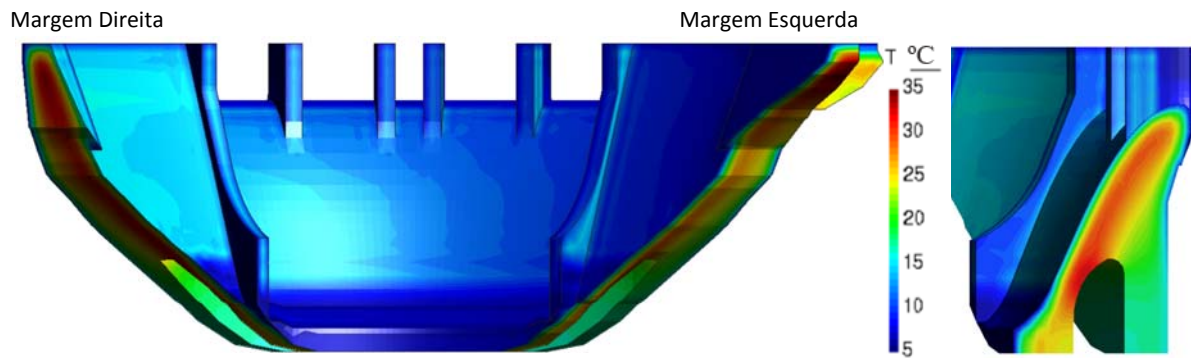


Figura 8. Distribuição das temperaturas calculadas no corpo da barragem em 29 de dezembro de 2019: vista de jusante e corte pelo bloco 1D

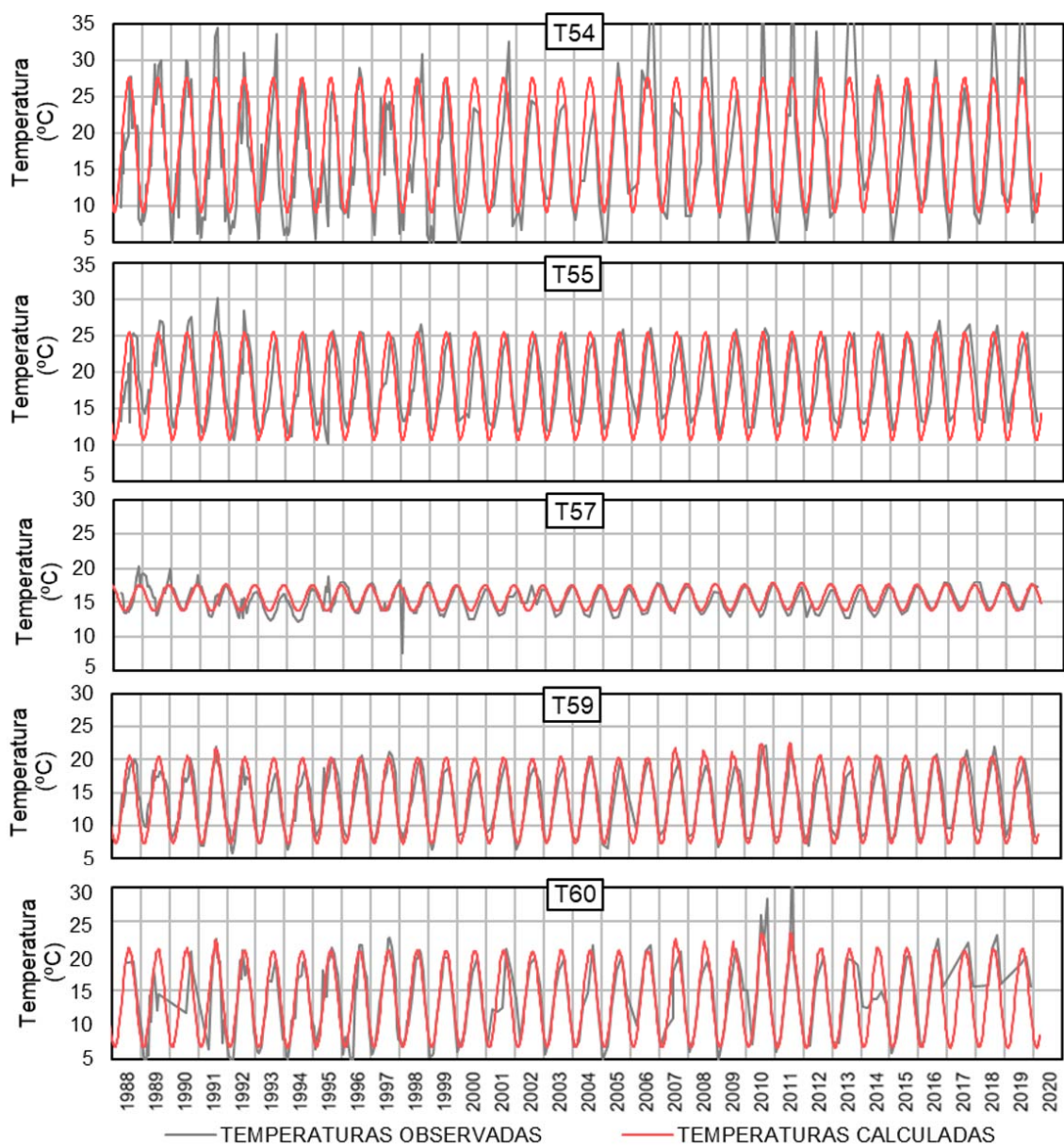


Figura 9. Comparação entre as temperaturas calculadas e observadas em pares termoeletricos à cota 385,0 m, no bloco 6E, ordenados de jusante para montante

### 3.4 Estimativa das expansões livres

As expansões livres  $\varepsilon_{exp, livre}$  no corpo da barragem foram calculadas tendo em conta o efeito da temperatura  $g_T(T)$ , de acordo com a seguinte equação,

$$\varepsilon_{exp, livre}(T) = g_T(T) \varepsilon_{exp}(T_{ref}) \quad , \quad g_T(T) = e^{6000\left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T}\right)} \quad (2)$$

em que  $T$  é a temperatura e  $\varepsilon_{exp}(T_{ref})$  é a expansão para a temperatura de referência  $T_{ref}$ . Admitiu-se que a evolução no tempo das expansões livres tem a forma tradicional de um sigmóide [3], considerando que a longo prazo será de  $600 \times 10^{-6}$  em toda a barragem.

Na Fig. 7 apresenta-se o zonamento e as curvas das expansões livres do betão, para a temperatura de referência  $T_{ref} = 14,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Estes valores foram estimados a partir das extensões medidas nos extensómetros corretores (influenciadas pelas condições de humidade interna, que ditou o zonamento considerado) e dos resultados da observação de deslocamentos horizontais e verticais da barragem.

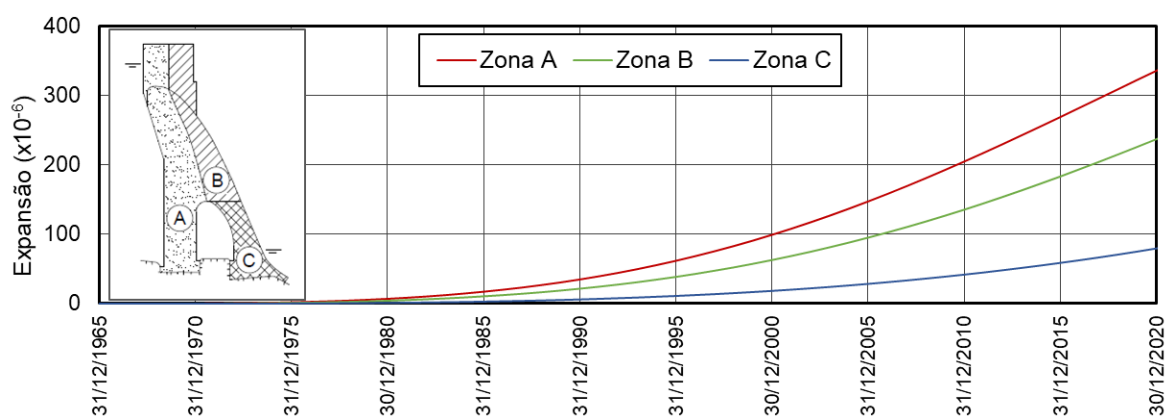


Figura 10. Zonamento e curvas de evolução no tempo das expansões livres do betão para a temperatura de referência  $T_{ref} = 14,5 \text{ } ^\circ\text{C}$

### 3.5 Modelação estrutural

No modelo estrutural foram considerados, para o betão, um coeficiente de Poisson de 0,2 e a seguinte lei de fluência de Bazant e Panula, em que  $t_0$  representa a idade de aplicação das cargas,

$$J(t, t_0) = \frac{1}{43,3} (1 + 4,5 (t_0^{-0,40} + 0,05) (t - t_0)^{0,12}) \quad (\text{GPa}^{-1}) \quad (3)$$

O maciço rochoso de fundação foi considerado homogéneo e isotrópico, com comportamento independente do tempo caracterizado por um módulo de deformabilidade de 15 GPa e um coeficiente de Poisson de 0,2.

Para coeficiente de dilatação térmica linear do betão foi adotado o valor de  $1,2 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ .

O modelo estrutural foi resolvido através de um programa de cálculo automático que está em desenvolvimento no LNEC, a partir de outros anteriores [4,5]. Na análise estrutural ao longo do tempo foram consideradas as ações correspondentes ao peso próprio do betão, à pressão hidrostática sobre o paramento de montante, às variações de temperatura no corpo da barragem (calculadas com o modelo térmico) e às expansões. Foi considerada uma discretização semanal



destas ações no tempo. As expansões estruturais foram calculadas, a partir das expansões livres estimadas, considerando o efeito de confinamento proporcionado pelas tensões de compressão, de acordo com a função exponencial de Larive [3], sendo a anisotropia do processo considerada admitindo independência de comportamento nas três direções.

Nas Figs 11 e 12 apresentam-se, respetivamente, os deslocamentos verticais observados através de nivelamentos geométricos de precisão no topo do pilar do bloco 1E e os deslocamentos radiais observados no fio de prumo e por triangulação geodésica no trecho superior do pilar do bloco 1E, fazendo-se a comparação com os correspondentes deslocamentos calculados entre 1963 e 2020. Pode verificar-se, em ambos os casos, o bom acordo conseguido.

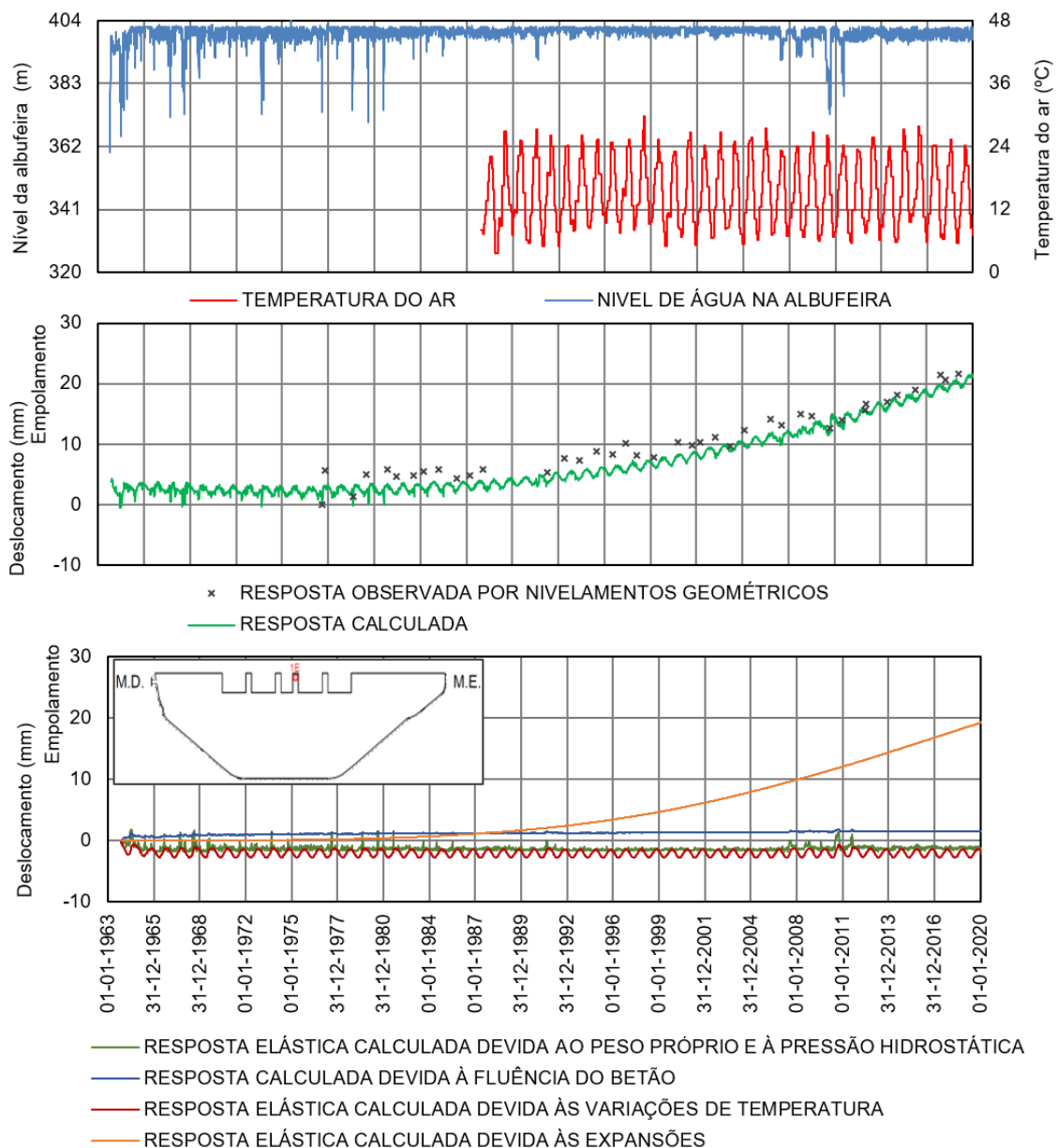


Figura 11. Deslocamentos verticais observados e calculados no topo do pilar do bloco 1E, entre 1963 e 2020

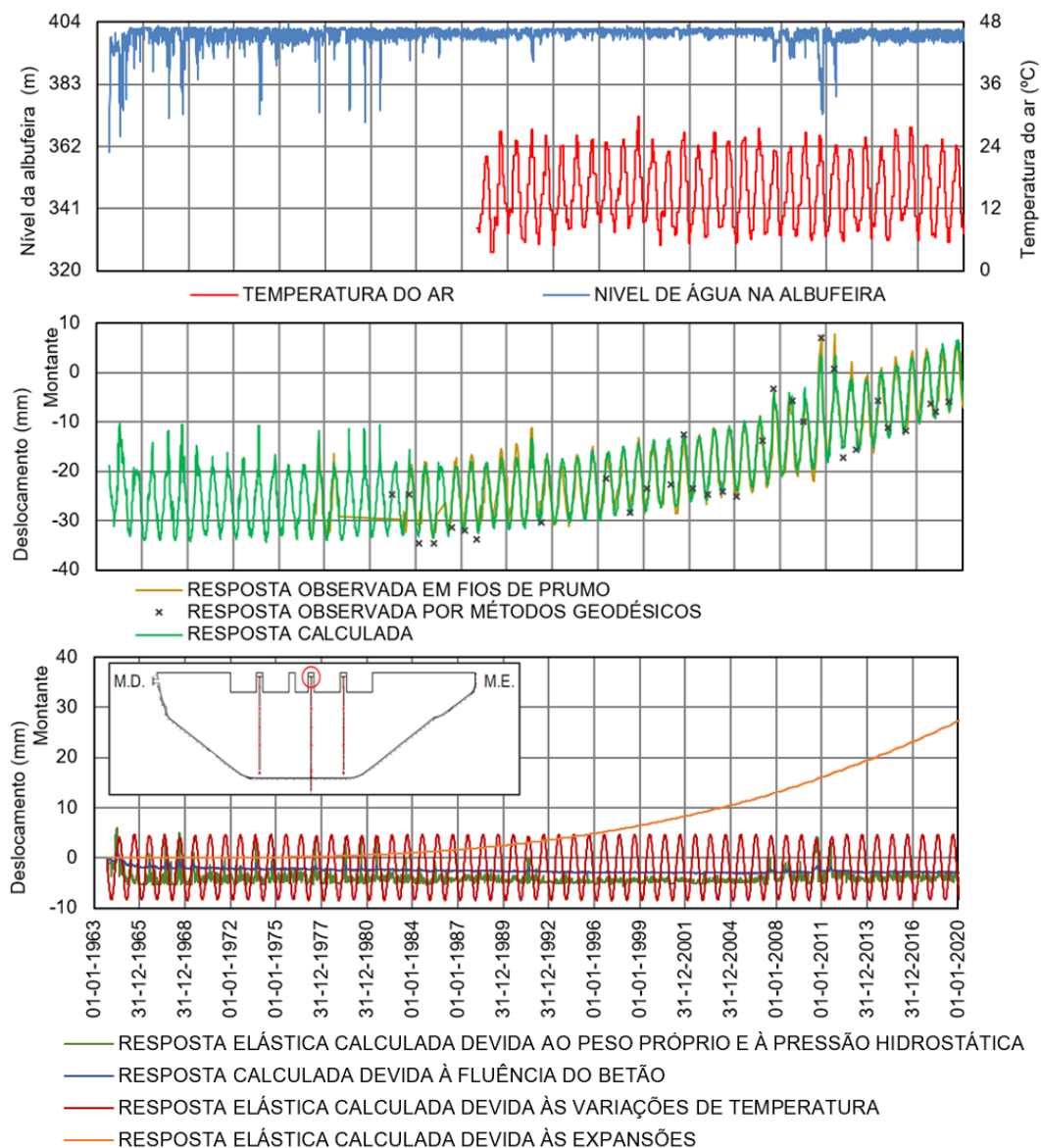


Figura 12. Deslocamentos radiais observados e calculados no trecho superior do pilar do bloco 1E, entre 1963 e 2019

Nas Figs 13 e 14 apresentam-se, respetivamente, as tensões principais nos paramentos de montante e jusante devidas à ação conjunta do peso próprio do betão, pressão hidrostática no paramento de montante e expansões, em 2020, e apenas devidas às expansões, também em 2020. O estado de tensão nos paramentos, para o conjunto das ações, é, na generalidade, de compressão. No paramento de montante as compressões máximas localizam-se ao longo da inserção da barragem na fundação, atingindo valores de cerca de 10 MPa na zona do encontro direito. No paramento de jusante as compressões máximas são cerca de 6 MPa, tanto no encontro do lado direito como no encontro do lado esquerdo. Relativamente às tensões de tração, verifica-se que as mais significativas são aproximadamente verticais e ocorrem próximo dos encontros, sendo de cerca de 2,7 MPa no encontro do lado da margem esquerda, a jusante. Devido apenas às expansões, o estado de tensão é também de um modo geral de compressão, mas existem trações no trecho inferior do paramento de jusante e nos encontros perpendiculares à inserção, que ascendem a 3,6 MPa nos encontros.

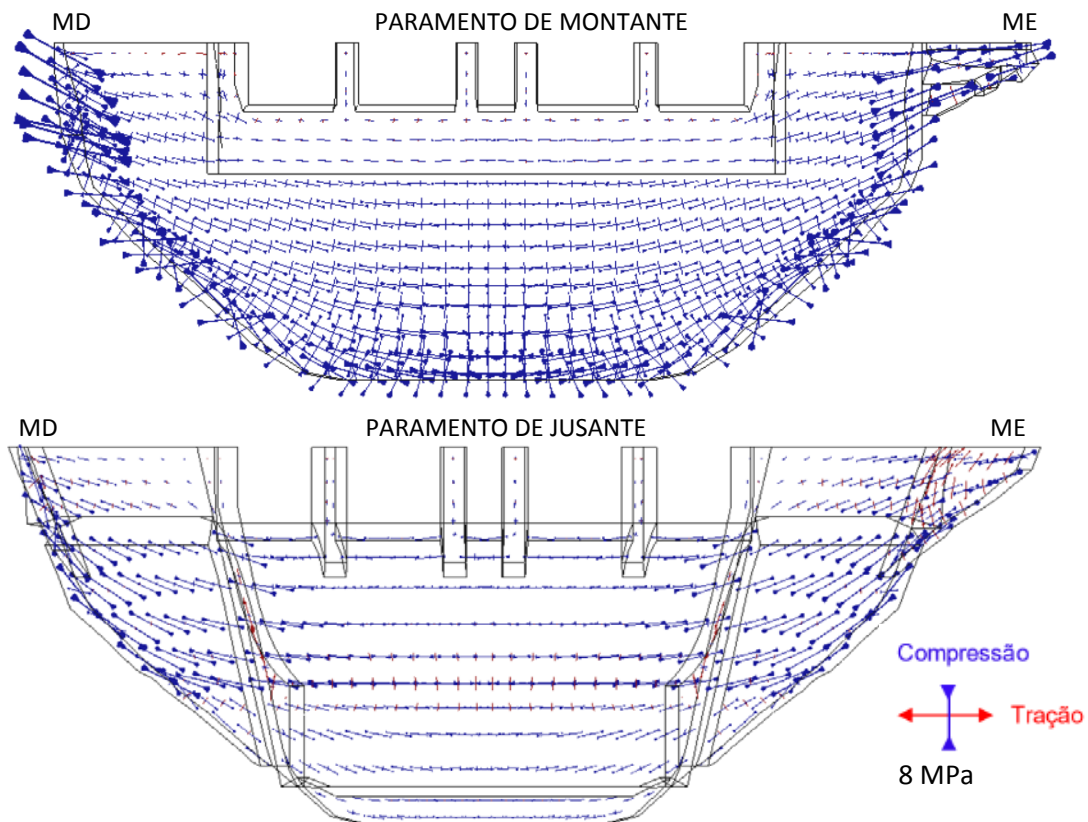


Figura 13. Tensões principais nos paramentos da barragem devidas ao peso próprio do betão, pressão hidrostática no paramento de montante e expansões do betão, em 2020

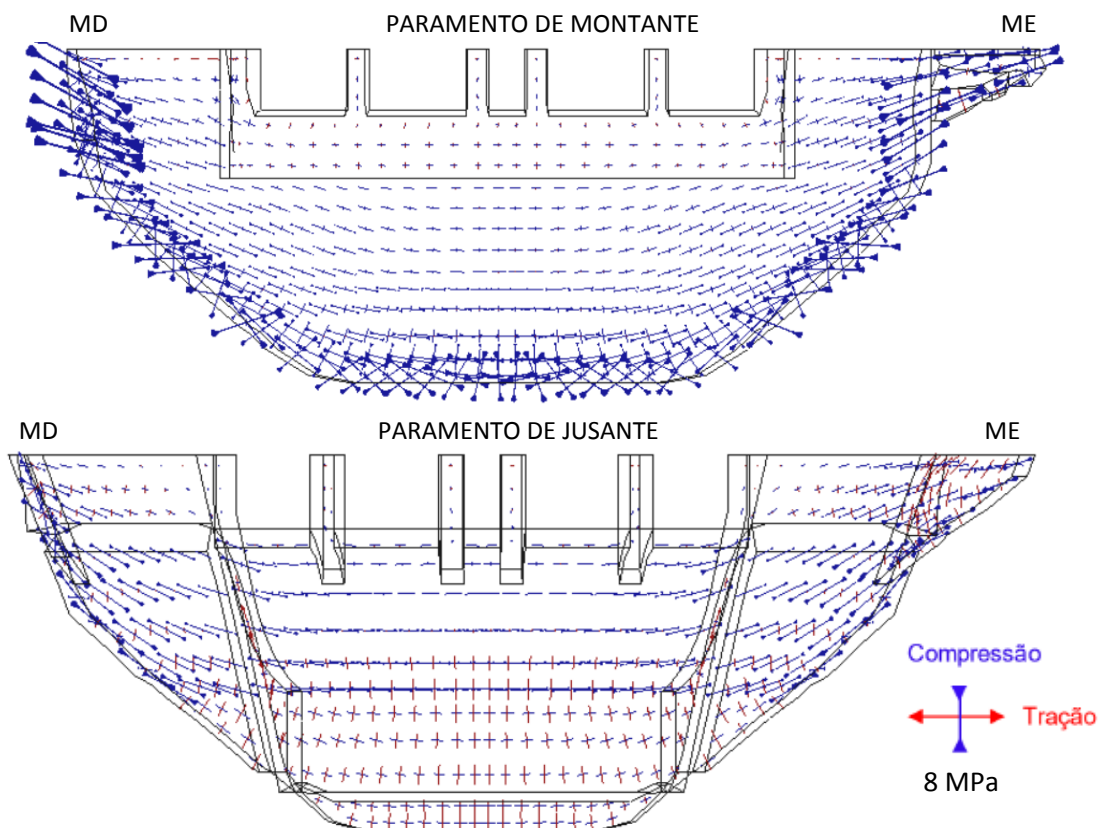


Figura 14. Tensões principais nos paramentos da barragem devidas às expansões do betão, em 2020

## 4 CONCLUSÕES

Os efeitos das expansões no comportamento da barragem da Bemposta foram interpretados com o apoio de modelos de elementos finitos, nas vertentes térmica e estrutural. A comparação entre os valores calculados com os modelos e os observados na obra mostrou uma boa concordância, tanto para as temperaturas do betão como para os deslocamentos da estrutura.

As expansões, devidas a reações álcalis-sílica, são ainda moderadas, pelo que os seus efeitos aparentes são pouco expressivos (aparecimento de produtos da reação e fendilhação difusa em zonas localizadas). Contudo, confirmou-se que o comportamento da obra é muito influenciado pela ação expansiva, tanto em termos de deslocamentos como de tensões.

Os campos de tensões na barragem são qualitativamente semelhantes aos que ocorrem nas barragens abóbada, sendo caracterizados por elevadas tensões de compressão ao longo da superfície de inserção na fundação, junto do paramento de montante, com direção normal a essa superfície, exceto nos arcos superiores, onde essas tensões rodam no sentido da inclinação da superfície de inserção. A jusante, as expansões provocam trações com direção perpendicular à inserção, que estão total ou parcialmente compensadas pelas compressões devidas ao peso próprio do betão e à pressão hidrostática, exceto no trecho superior, junto aos encontros.

As tensões de compressão máximas calculadas são cerca de 10 MPa, correspondendo a valores admissíveis, tendo em conta que a resistência média estimada para o betão é de cerca de 30 MPa. As tensões de tração máximas são cerca de 2,7 MPa, pelo que não se pode excluir que possa ocorrer, no futuro, alguma fendilhação estrutural, em zonas muito localizadas, caso as taxas de desenvolvimento das expansões se mantenham.

## AGRADECIMENTOS

Agradece-se à Engie, concessionária do aproveitamento hidroelétrico de Bemposta, a autorização concedida para a publicação de elementos da observação da barragem.

## REFERÊNCIAS

- [1] Rebelo, R. (2021). Estudo do comportamento estrutural de barragens arco-gravidade afetadas por expansões do betão. Aplicação à barragem da Bemposta. Dissertação de mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (FCT/UNL), Lisboa.
- [2] LNEC (2012). Análise térmica de barragens de betão. Relatório 185/2012, Lisboa.
- [3] Larive, C. (1997). 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, França.
- [4] Batista, A.L. (1998). Análise do comportamento ao longo do tempo de barragens abóbada. Tese de doutoramento, Instituto Superior Técnico (IST), Lisboa.
- [5] Oliveira, S. (2000). 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.