

Análise e interpretação do comportamento observado da barragem de Ermida após o início do primeiro enchimento da albufeira

António Tavares de Castro

Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, tcastro@lnec.pt

Ivo Figueiredo Dias

Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, tcastro@lnec.pt

Resumo

A barragem de Ermida, uma estrutura de gravidade de betão convencional, de perfil triangular e retilíneo, com uma altura máxima acima da fundação de cerca de 35 m, foi construída no rio Vouga, no concelho de Sever do Vouga, entre 2012 e 2015, para regular os caudais provenientes da central hidroelétrica da barragem de Ribeiradio, situada no mesmo rio, a montante, e para produção de energia, numa central própria, integrada nos blocos da margem direita.

A barragem dispõe de um sistema de observação que permite a medição de deslocamentos absolutos e relativos, de temperaturas no interior do betão e de subpressões e caudais drenados na fundação.

De acordo com o estipulado no Regulamento de Segurança de Barragens e nos respetivos documentos de apoio, o acompanhamento da obra durante o primeiro enchimento da albufeira foi objeto de um plano de observação específico que definia as observações e os procedimentos a adotar para o controlo de segurança e a interpretação do comportamento durante esse importante período da vida da obra.

Nesta comunicação apresentam-se os aspetos relevantes da análise e interpretação do comportamento térmico e estrutural da barragem de Ermida após o início do primeiro enchimento da albufeira, utilizando modelos do conjunto barragem-fundação em duas secções da estrutura, analisados pelo método dos elementos finitos. Neste trabalho incluem-se apenas aspetos relacionados com a evolução do campo de deslocamentos, tendo sido considerados os efeitos associados à evolução do nível da água na albufeira e às variações de temperatura do ar e da água da albufeira e foi tido em consideração o comportamento viscoelástico do betão.

Os resultados numéricos são comparados com os resultados da observação contínua da obra, apresentando uma boa concordância.

Palavras-chave: Barragem de Ermida; Primeiro enchimento da albufeira; Observação; Método dos elementos finitos; Comportamento térmico; Comportamento estrutural

1 INTRODUÇÃO

O primeiro enchimento da albufeira é uma importante fase da vida das barragens, na medida em que constitui um primeiro ensaio de carga da barragem, razão pela qual se justifica uma particular atenção sobre o controlo de segurança estrutural da obra, incluindo a elaboração de um plano de observação específico para este período da vida das obras. Nesta fase, a avaliação da segurança efetua-se fundamentalmente através da comparação dos resultados da observação com os correspondentes resultados de modelos numéricos representativos das grandezas mais importantes e da verificação de que as tensões calculadas são compatíveis com as resistências mecânicas dos materiais.

Como o primeiro enchimento da albufeira de Ermida decorreu durante um período de elevados caudais afluentes, sem possibilidades de um efetivo controlo da subida da água, a análise do comportamento da obra incluiu um período de tempo mais alargado, que permite caracterizar os efeitos das variações do nível da albufeira e das ações ambientais no comportamento estrutural da obra.

Neste trabalho apresentam-se os principais resultados da análise e interpretação dos deslocamentos observados e do estado de tensão na barragem de Ermida durante o primeiro enchimento da sua albufeira. Após uma breve descrição da obra, do sistema de observação e do plano de primeiro enchimento da albufeira, apresentam-se os modelos térmicos e estruturais que apoiaram o controlo de segurança da obra, bem como os respetivos resultados e a sua comparação com a observação. Os bons resultados obtidos nessa comparação permitem validar o comportamento da obra, os resultados da observação e a representatividade dos modelos utilizados.

Embora não constem deste trabalho, os resultados da observação das restantes grandezas, nomeadamente das referentes aos movimentos de junta e ao comportamento hidromecânico da fundação, não registaram anomalias importantes, permitindo concluir que a barragem de Ermida demonstrou durante este período um comportamento estrutural adequado.

2 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DA OBRA

2.1 Barragem e fundação

O aproveitamento de Ermida, situado nas proximidades da povoação de Pessegueiro do Vouga, no concelho de Sever do Vouga, distrito de Aveiro, inclui uma barragem de gravidade, de betão, e uma central hidroelétrica integrada nos blocos da margem direita [1] (Fig. 1).

A albufeira, tem um volume total de $3,86 \text{ hm}^3$, com a água à cota do nível de pleno armazenamento (NPA= 44,0 m), sendo o nível de máxima cheia (NMC) à cota 53,0 m. Junto ao encontro direito existem duas tomadas de água, à cota 31,0 m, que alimentam os dois grupos instalados na central.

A barragem é do tipo gravidade de betão convencional, de perfil triangular e eixo retilíneo, e tem uma altura máxima acima da fundação de 35,0 m. O coroamento, à cota 55,0 m, tem 175,1 m de desenvolvimento e é interrompido por um descarregador de cheias, não controlado. Este descarregador, com crista à cota 44,0 m, tem 55,0 m de desenvolvimento e uma capacidade de escoamento, à cota do NMC, de $3250 \text{ m}^3/\text{s}$, e termina numa bacia de dissipação por ressalto, com 25,0 m de comprimento. A

obra dispõe ainda de uma descarga de fundo, de secção circular, com 1,5 m de diâmetro e uma capacidade de escoamento de 20 m³/s, para a albufeira à cota do NPA.



Figura 1. Vista aérea da barragem de Ermida

O corpo da barragem, constituído por 12 blocos, separados por juntas de contração verticais, é atravessado por 3 galerias (Fig. 2). O betão do núcleo da barragem, da classe C16/20, é constituído por agregados de origem granítica, com dimensão máxima de 63 mm, e por um ligante composto por 115 g/m³ de cimento e 115 kg/m³ de cinzas volantes [1].

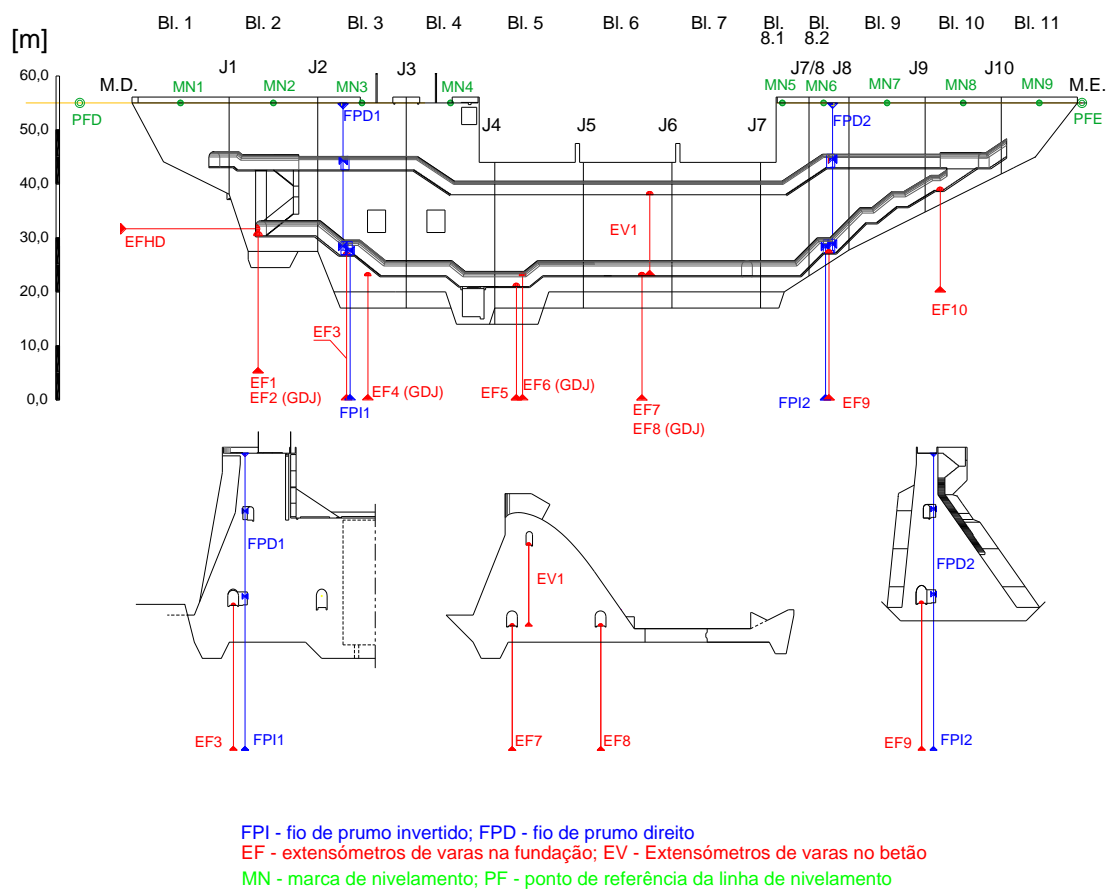


Figura 2. Definição da obra e sistema de observação de deslocamentos na barragem de Ermida

4 ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DO COMPORTAMENTO OBSERVADO COM MODELOS TÉRMICOS E ESTRUTURAIS

4.1 Considerações gerais

As betonagens no corpo da barragem decorreram entre novembro de 2012 e outubro de 2014, período durante o qual ocorreram algumas cheias que originaram galgamentos das zonas de trabalho. O primeiro enchimento iniciou-se a 15 de outubro de 2014, data em que se realizou a inspeção prévia prevista no RSB. O enchimento decorreu durante um período de grande pluviosidade, não tendo sido sempre possível evitar algumas subidas não controladas do nível da albufeira. Na Fig. 4 apresenta-se a evolução do nível da água na albufeira e indicam-se as datas e os níveis nos patamares de observação.

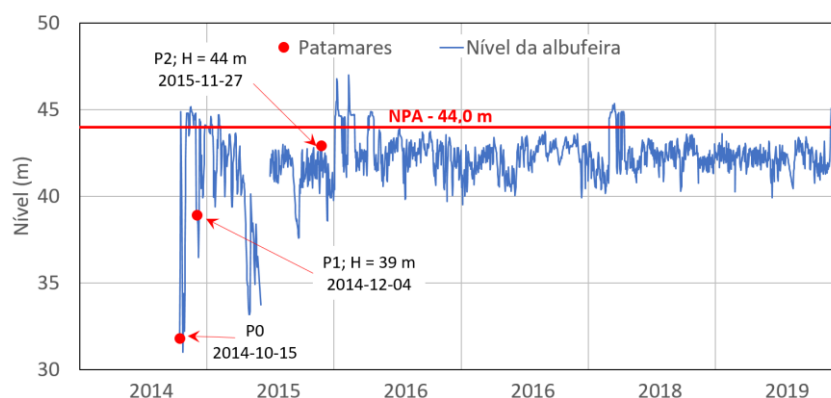


Figura 4. Evolução do nível da água na albufeira e datas dos patamares de observação

Os resultados da observação durante o período em análise demonstram um comportamento adequado, de acordo com o normal em obras deste tipo e dimensão e com as previsões da fase de projeto, tendo os resultados observados nos blocos 8.2 e 3, onde estão instalados os fios de prumo, sido interpretados com o apoio de modelos numéricos, baseados no método dos elementos finitos, desenvolvidos e calibrados para representar o seu comportamento térmico e estrutural [6].

O bloco 8.2, onde está instalado o fio de prumo FP2 e alguns dos termómetros de resistência elétrica, foi representado por uma malha de elementos finitos tridimensionais do tipo cubo, isoparamétricos do segundo grau, com 20 pontos nodais, constituída por 1287 pontos nodais e 155 elementos, dos quais 81 estão no corpo da barragem e 74 na fundação (Fig. 5 (a)). O modelo tem um desenvolvimento de 1 m na direção normal ao perfil. Para representar o estado plano de deformação foram restringidos os deslocamentos transversais nas duas superfícies de fronteira normais ao perfil e os deslocamentos normais às superfícies inferiores e às superfícies que limitam o modelo na direção do eixo do rio.

O bloco 3, onde está instalado o fio de prumo FP1, tem uma geometria relativamente complexa, com destaque para a variação de secção na direção transversal e para a existência de uma abertura, com dimensões consideráveis, usada para a colocação de comportas nos circuitos das tomadas de água, que afetam o seu comportamento térmico. Neste sentido, o bloco foi representado integralmente, considerando também uma malha de elementos finitos do segundo grau de 20 pontos nodais, constituída por 4949 nós e 912 elementos, 468 dos quais estão no corpo da barragem e 444 na fundação (Fig. 5 (b)). Foram usadas quatro fiadas de elementos ao longo do desenvolvimento do bloco, identificadas com as letras A a D na Fig. 5 (b), cujos perfis se apresentam na Fig. 6.

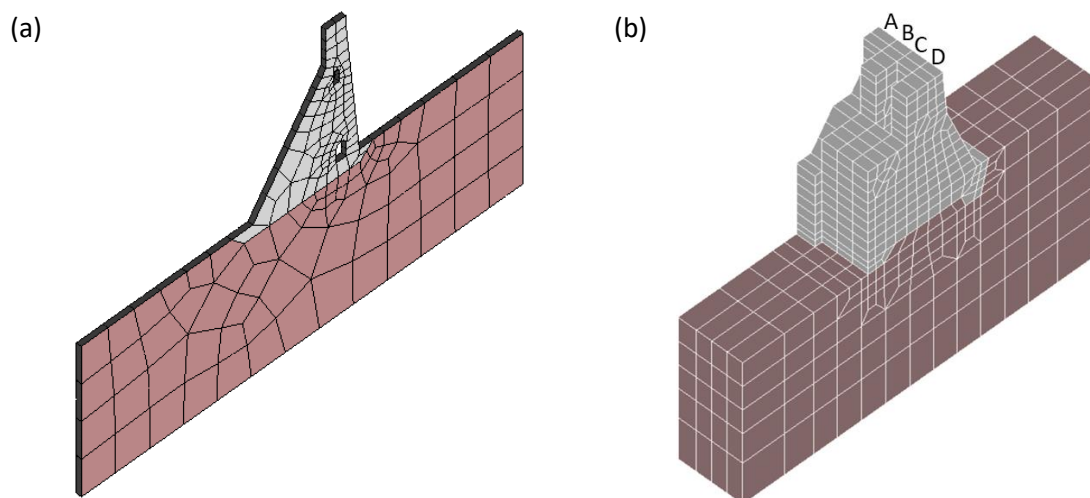


Figura 5. Malhas de elementos finitos: (a) do bloco 8.2 e (b) do bloco 3

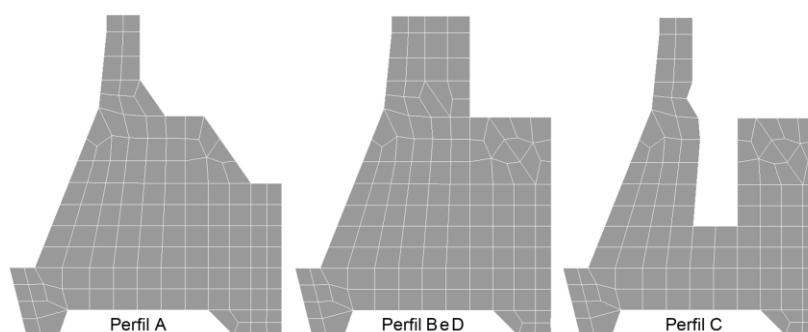


Figura 6. Perfis da malha de elementos finitos do bloco 3

4.2 Modelação térmica

A análise térmica dos blocos foi realizada com um programa baseado no método dos elementos finitos, desenvolvido no LNEC [7]. Foram considerados os efeitos das variações da temperatura do ar e da água da albufeira e da radiação solar, admitindo-se que, à data do início do primeiro enchimento, os efeitos relacionados com a libertação do calor de hidratação já não seriam significativos. Para ter em conta o efeito da radiação solar, foi adotada uma discretização horária no domínio do tempo.

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

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

onde T_m corresponde ao valor da temperatura média anual, S_a representa a semi-amplitude e ϕ é o número de dias entre o início do ano e a data em que se verifica a temperatura máxima anual.

A onda térmica relativa à temperatura do ar, representada graficamente na Fig. 7 (a), foi ajustada às temperaturas observadas na estação meteorológica da barragem de Ribeiradio, situada cerca de 5 km a nordeste e a uma cota aproximadamente 50 m superior. Relativamente à temperatura da água da albufeira foram definidas três ondas de período anual, cujos parâmetros (Fig. 7 (b)) foram estimados a partir das temperaturas observadas nos termómetros instalados no paramento de montante dos blocos 6 (T5 e T13) e 8.2 (T1 e T9).

Nas superfícies em contacto com o ar foram consideradas condições de transferência de calor por convecção (condições de Neumann), bem como os efeitos da transmissão de calor por radiação solar. Aos pontos nodais das superfícies em contacto com a água foram impostas temperaturas (condições de fronteira de Dirichlet) correspondentes à temperatura da água.

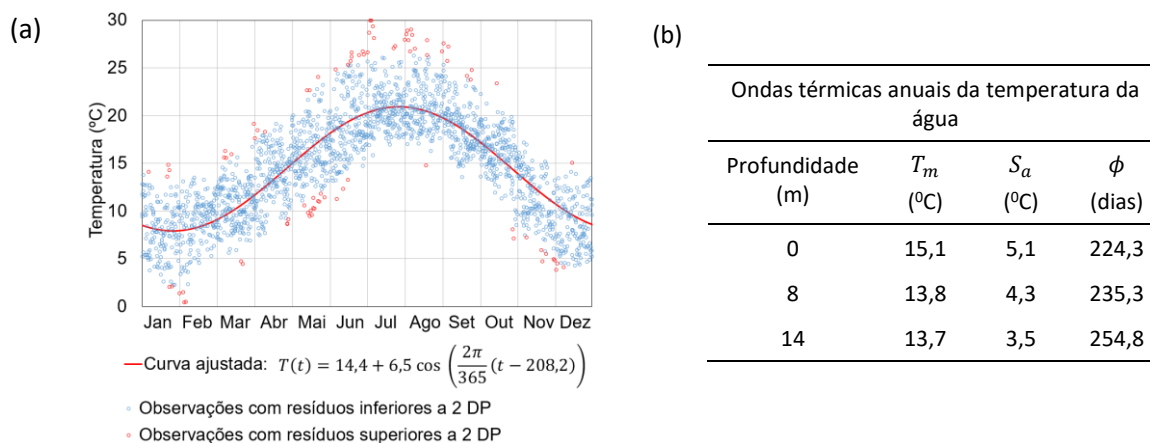


Figura 7. Ondas térmicas anuais consideradas no cálculo térmico: (a) representação gráfica da onda térmica do ar e (b) parâmetros das ondas térmicas da água (à direita)

A difusibilidade do betão dominante foi estimada a partir da média ponderada dos valores da mesma grandeza nos seus constituintes, tendo sido obtido o valor de $0,13 \text{ m}^2 \text{ dia}^{-1}$, e as propriedades térmicas do maciço de fundação foram consideradas iguais às do betão.

4.3 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 [8]. Foram considerados os efeitos da evolução do nível da água na albufeira e das variações de temperatura determinadas no modelo térmico, tendo sido considerada uma discretização semanal no domínio do tempo. Para analisar o estado de tensão, foram também considerados os efeitos do peso próprio, aplicado instantaneamente no início do primeiro enchimento.

O comportamento do betão ao longo do tempo foi representado por um modelo viscoelástico linear com maturação, tendo a lei de fluência de Bazant e Panula (Eq. 2) sido estimada a partir dos resultados dos ensaios de determinação da resistência à compressão e do módulo de elasticidade realizados na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP). Para o coeficiente de Poisson do betão foi usado um valor de 0,2.

$$J(t, t_0) = \frac{1}{49,3} (1 + 3,365(t_0^{-0,350} + 0,05)(t - t_0)^{0,127}) \quad (2)$$

Na Fig. 8 (a) representa-se graficamente a evolução estimada do módulo de elasticidade e os resultados dos ensaios para determinação do módulo de elasticidade em compressão realizados na FEUP e, na Fig. 8 (b), representa-se a função de fluência para três idades de carga (t_0).

O maciço rochoso de fundação foi considerado como um meio contínuo, homogéneo e isotrópico, com um comportamento elástico linear, com um módulo de elasticidade de 20 GPa e um coeficiente de Poisson igual a 0,2.

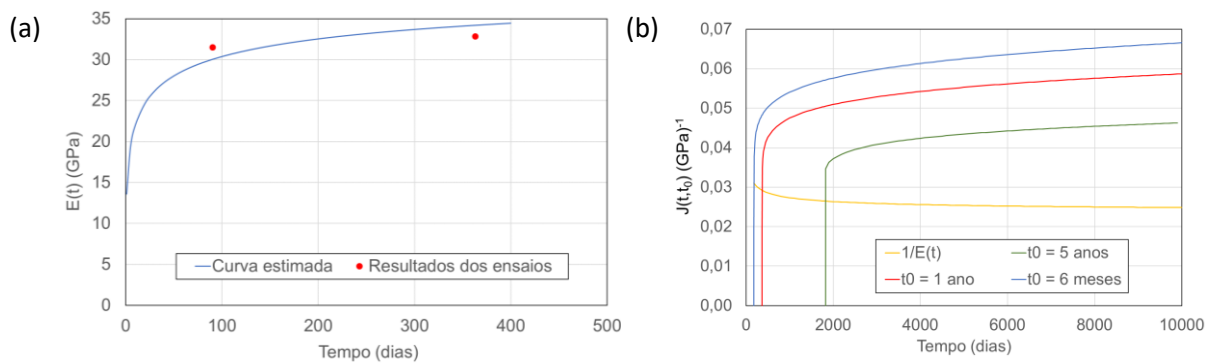


Figura 8. (a) Evolução estimada do módulo de elasticidade e resultados dos ensaios laboratoriais e (b) função de fluência de Bazant e Panula, representada para três idades de carga

4.4 Comportamento térmico e estrutural do bloco 8.2

Na Fig. 9 representam-se as isotérmicas correspondentes às temperaturas calculadas em duas datas representativas de épocas quentes (2016-08-28) e frias (2017-02-12). Em épocas quentes as temperaturas são naturalmente mais elevadas junto ao paramento de jusante, ao coroamento e às zonas emersas do paramento de montante e mais próximas do valor médio das temperaturas no interior do bloco. Pelo contrário, em épocas frias o núcleo do bloco mantém temperaturas relativamente elevadas, enquanto que nas superfícies expostas as temperaturas são mais reduzidas.

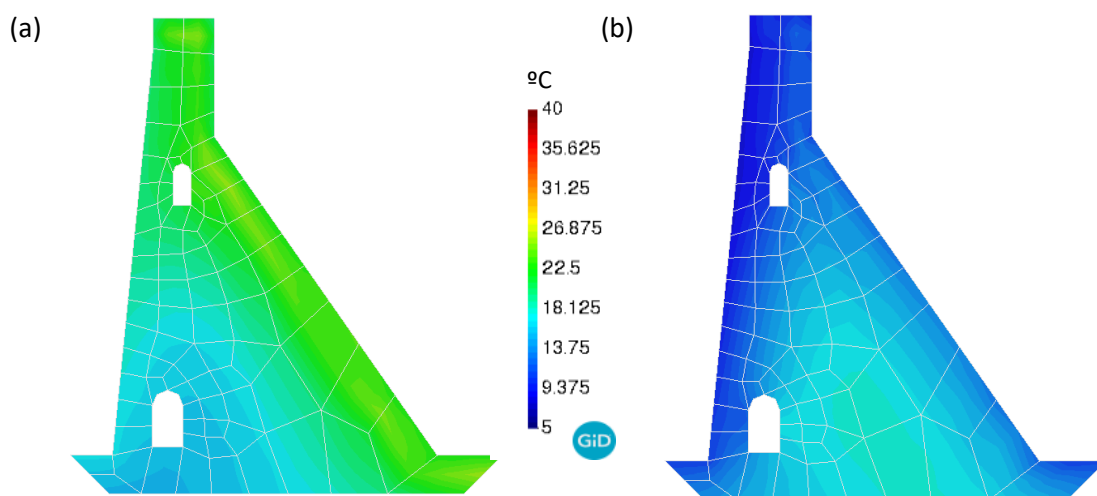


Figura 9. Isotérmicas no bloco 8.2 correspondentes a uma época quente em 2016-08-28 (a) e a uma época fria em 2017-02-12 (b)

A comparação das temperaturas calculadas e observadas nos pontos em que existem termómetros à cota 41 m (Fig. 10) é globalmente boa, verificando-se que as amplitudes térmicas são superiores nos instrumentos junto dos paramentos e menores nos localizados no interior do betão. O fluxo de calor correspondente à radiação solar contribui significativamente para que a temperatura média junto do paramento de jusante seja superior, em cerca de 5 °C, à temperatura média do paramento de montante e para que junto do paramento de jusante exista uma banda de variação diária da temperatura significativa.

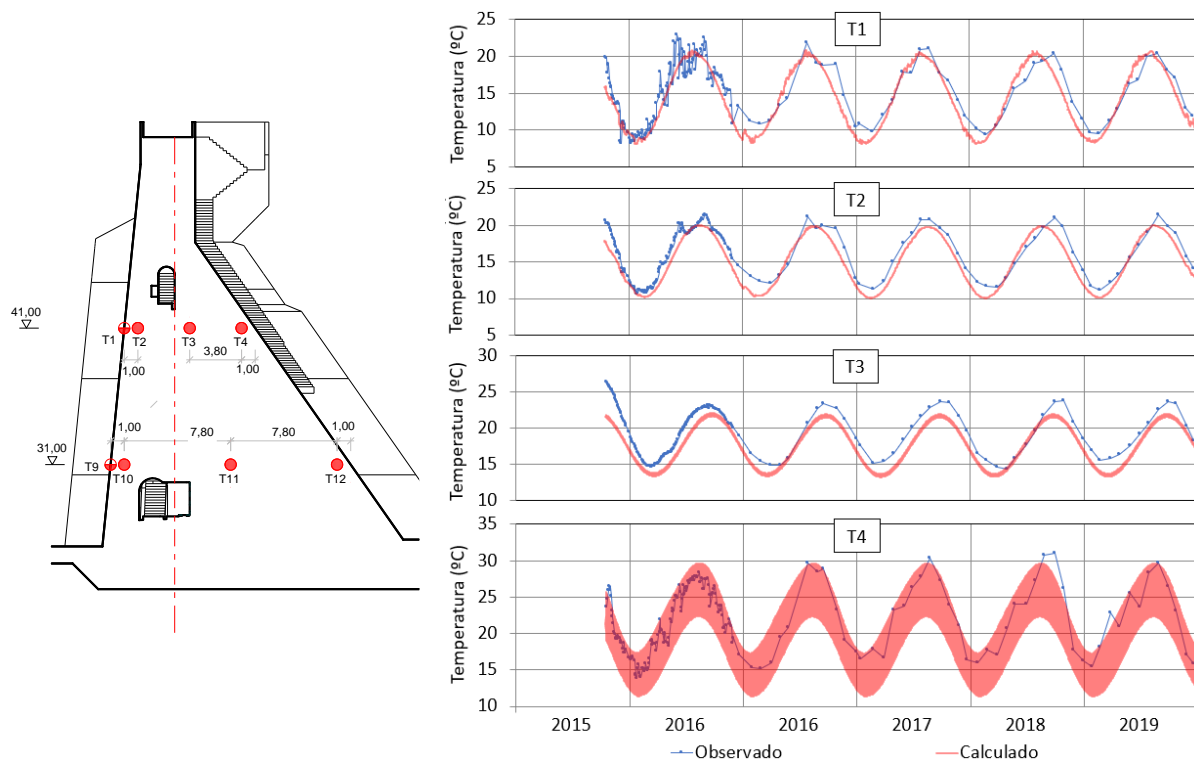


Figura 10. Temperaturas calculadas e observadas nos termómetros do bloco 8.2, à cota 41 m

Os deslocamentos axiais calculados e observados na base superior do fio de prumo, colocada à cota 54,88 m, apresentam uma evolução semelhante (Fig. 11), verificando-se apenas ligeiras diferenças até meados de 2016, período durante o qual a curva calculada se situa mais a jusante do que a observada, podendo esse afastamento estar relacionado com algum ajuste local na fundação, que não é possível representar no modelo. Na representação separada das várias parcelas da resposta calculada verifica-se que a ação dominante no comportamento da obra é a devida às variações de temperatura.

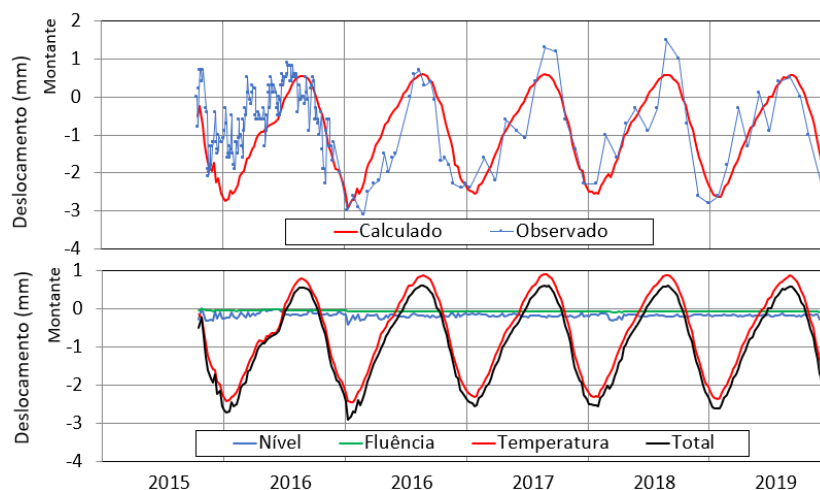


Figura 11. Deslocamentos axiais calculados e observados na base superior do fio de prumo FP2 (bloco 8.2), à cota 54,88 m e representação separada das várias parcelas da resposta calculada

Na Fig. 12 (a) apresentam-se as tensões principais devidas à ação combinada do peso próprio e da água à cota do NPA, que não incluem praticamente trações, sendo as máximas compressões da ordem de

0,8 MPa, no pé de montante. Na Fig. 12 (b) representam-se as tensões principais entre uma época fria (31-01-2018) e uma quente (11-07-2018), que corresponde a um aquecimento da obra. As tensões, de compressão junto aos paramentos e de tração no núcleo do bloco, apresentam valores máximos de cerca de 2,5 MPa e de 1,5 MPa, respetivamente. Como as tensões devidas às ações térmicas são mais importantes do que as restantes, a escala das tensões na Fig. 12 (b) é diferente da utilizada na figura Fig. 12 (a), para permitir a visualização adequada do campo de tensões nos dois casos.

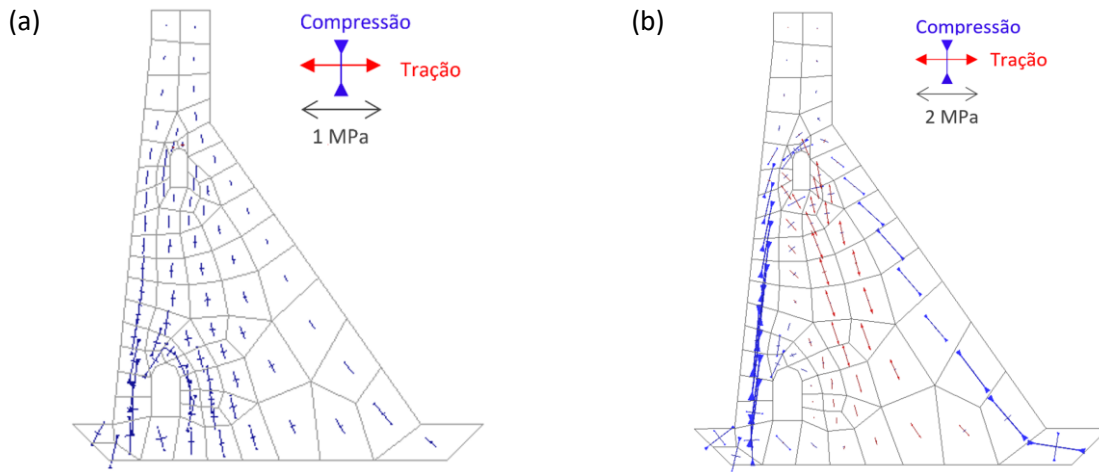


Figura 12. Tensões principais no bloco 8.2 devido: (a) à ação combinada do peso próprio e da água na albufeira à cota do NPA e (b) a um aquecimento (inverno->verão) da estrutura

4.5 Comportamento térmico e estrutural do bloco 3

Na Fig. 13 representam-se as isotérmicas em duas datas representativas de épocas quente (2016-08-30) e fria (2017-02-13). Embora neste bloco não existam termómetros no betão que permitam verificar os resultados do modelo térmico, os resultados obtidos são plausíveis, verificando-se que, devido à grande espessura do bloco, as temperaturas no núcleo variam pouco, enquanto que nas zonas superficiais as variações térmicas são significativas, acompanhando as ondas térmicas do ar e da água na albufeira (coroamento, paramentos de montante e jusante e abertura para instalação das comportas).

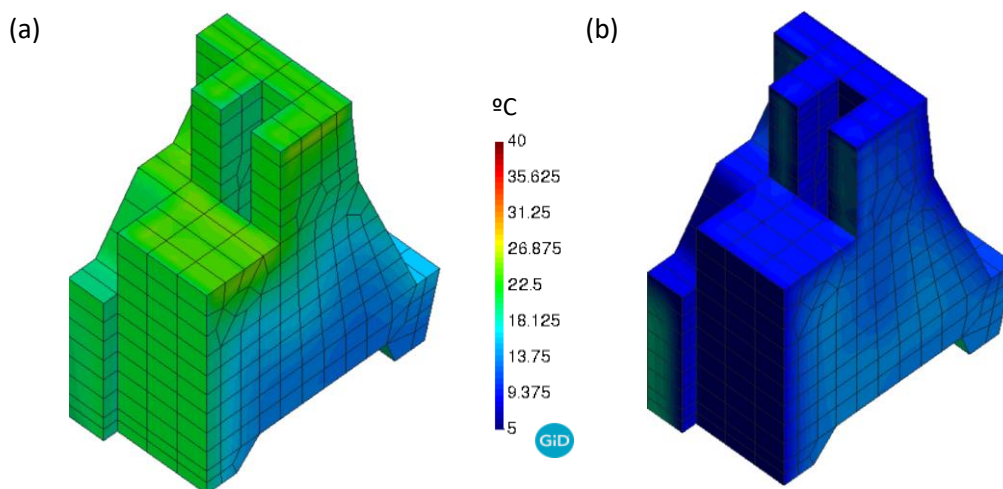


Figura 13. Isotérmicas no bloco 3 correspondentes a uma época quente (a) e a uma época fria (b)

Na Fig. 14 representam-se os valores dos deslocamentos axiais observados e calculados na base de coordenómetro do fio de prumo FP1 à cota 54,96 m, entre o início do primeiro enchimento e o final de 2019, incluindo a representação separada das várias parcelas da resposta calculada. Apesar de a amplitude da curva calculada ser um pouco inferior à observada, o acerto é razoável. Tal como no bloco 8.2, os efeitos devidos às variações de temperatura são dominantes no comportamento deste bloco.

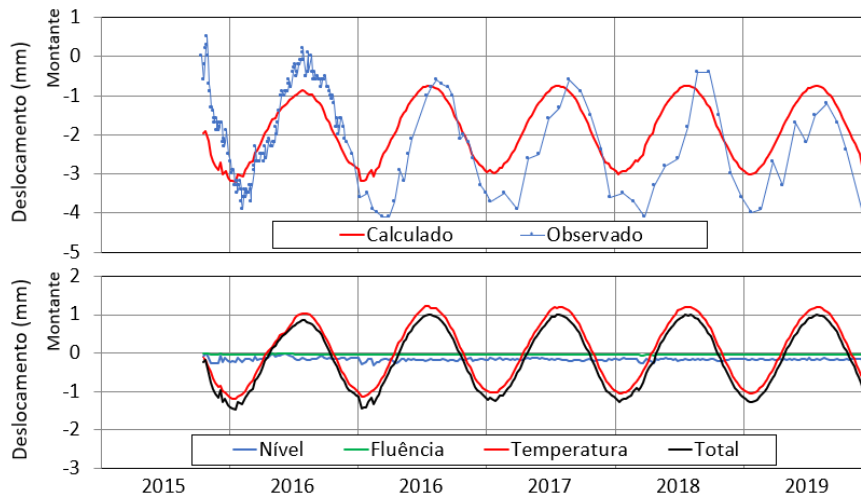


Figura 14. Deslocamentos axiais calculados e observados na base superior do fio de prumo FP1 (bloco 3), à cota 54,96 m, e representação separada das várias parcelas da resposta calculada

Na Fig. 14 (a) apresentam-se, para o perfil B do bloco 3, as tensões principais devidas à ação combinada do peso próprio do betão e da água à cota do NPA. Observa-se um estado generalizado de compressão com valores máximos de cerca de 1,2 MPa, no pé de jusante da barragem. Na Fig. 14 (b) representam-se as tensões principais devidas às variações de temperatura entre 31 de janeiro e 11 de julho de 2018, correspondentes a um aquecimento. Verifica-se que ocorrem tensões de tração junto dos paramentos, do coroamento e da abertura (zonas em que as variações térmicas são mais acentuadas), enquanto que no interior do bloco, com variações térmicas menores, as tensões são de compressão. As trações máximas (cerca de 2,6 MPa) ocorrem no perfil B, a jusante.

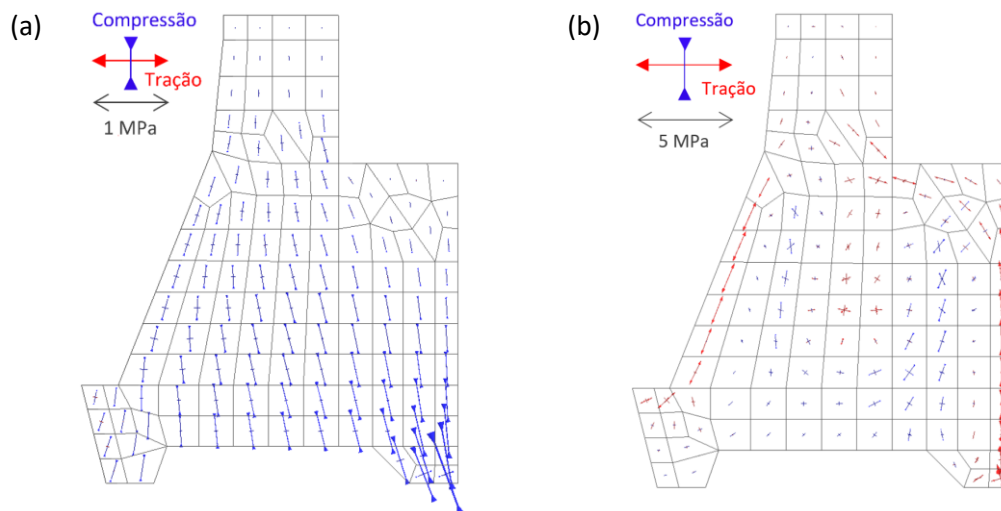


Figura 15. Tensões principais no perfil B do bloco 3 devido: (a) à ação combinada do peso próprio e da água na albufeira à cota do NPA e (b) a um aquecimento (inverno->verão) do bloco

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho apresenta-se um resumo dos resultados obtidos na análise e interpretação dos deslocamentos axiais da barragem de Ermida durante o primeiro enchimento da sua albufeira e nos meses seguintes, com o apoio de modelos numéricos, baseados no método dos elementos finitos, representativos do comportamento térmico e estrutural de dois blocos da estrutura.

No que se refere à modelação do comportamento, realça-se a importância de uma representação adequada dos blocos, nomeadamente no que se refere à sua geometria, às condições de fronteira nos cálculos térmicos e estruturais e às ações consideradas. No caso apresentado, o bloco 8.2 pode ser representado apenas por uma fiada de elementos, ao passo que o bloco 3, geometricamente mais complexo, exigiu a representação de todo o bloco. Por outro lado, a consideração dos efeitos da radiação solar foi determinante na interpretação do comportamento térmico da estrutura.

De uma forma geral, obteve-se um bom acordo entre os resultados calculados e observados, atestando o comportamento adequado da estrutura e a representatividade quer dos modelos elaborados quer dos resultados da observação obtidos. As tensões calculadas são compatíveis com a resistência mecânica dos betões, havendo apenas a referir a obtenção, em algumas situações, de tensões de tração com valores ligeiramente inferiores à resistência à tração estimada para o betão (3,0 MPa), pelo que não se pode excluir, completamente, o risco de fendilhação em zonas localizadas da obra.

REFERÊNCIAS

- [1] EDP (2019). Aproveitamento hidroelétrico de Ribeiradio-Ermida. Escalão de Ermida. Arquivo técnico relativo à construção. Relatório de síntese.
- [2] COBA (2014). Aproveitamento hidroelétrico de Ribeiradio-Ermida. Projeto de execução. Escalão de Ermida. Barragem. Tratamento da fundação. Nota Técnica.
- [3] RSB (2018). Regulamento de Segurança de Barragens. Decreto-Lei n. 21/2018. Diário da República.
- [4] COBA (2009). Aproveitamento hidroelétrico de Ribeiradio-Ermida. Escalão de Ermida. Plano de observação.
- [5] COBA (2014). Aproveitamento hidroelétrico de Ribeiradio-Ermida. Projeto de execução. Escalão de Ermida. Plano de primeiro enchimento da albufeira.
- [6] LNEC (2020). Barragem da Ermida. Análise e interpretação do comportamento observado durante o primeiro enchimento da albufeira e o primeiro período de exploração. Relatório 311/2020 – DBB/NO.
- [7] LNEC (2012). Análise térmica de barragens de betão. Relatório 185/2012, Lisboa.
- [8] 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.