

ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DO COMPORTAMENTO OBSERVADO DA BARRAGEM DE REBORDELO DURANTE O PRIMEIRO ENCHIMENTO DA ALBUFEIRA E PRIMEIRO PERÍODO DE EXPLORAÇÃO



António Lopes Batista

Investigador Principal
LNEC
Lisboa
a.l.batista@lnec.pt



Renato Pereira

Bolsheiro de Doutoramento
FCT/UNL
Torre da Caparica
r.pereira@campus.fct.unl.pt



Carlos Serra

Bolsheiro de Doutoramento
LNEC
Lisboa
cserra@lnec.pt

SUMÁRIO

Apresentam-se os aspetos relevantes da análise e interpretação do comportamento observado da barragem de Rebordelo, no rio Rabaçal, em Trás-os-Montes, durante o primeiro enchimento controlado da albufeira, ocorrido no início de 2005, e nos primeiros anos de exploração, com base na observação das ações e das respostas, bem como na utilização de modelos matemáticos para resolução dos problemas térmico e estrutural.

Nas análises térmica e estrutural consideraram-se: i) um modelo tridimensional da barragem e do maciço rochoso de fundação, resolvido pelo método dos elementos finitos; ii) o comportamento viscoelástico do betão; e iii) a variação das ações da água sobre o paramento de montante e das ações térmicas no corpo da barragem.

As grandezas observadas e os resultados numéricos apresentaram uma boa concordância, atestando a adequabilidade dos modelos de comportamento utilizados e o bom desempenho da obra.

Palavras-chave: Barragem de betão; Primeiro enchimento da albufeira; Primeiro período de exploração; Observação; Comportamento viscoelástico do betão; Método dos elementos finitos; Análise térmica; Análise estrutural

1. INTRODUÇÃO

1.1 Descrição da obra

A barragem de Rebordelo (Figura 1) localiza-se no rio Rabaçal, junto à localidade que lhe deu o nome, a cerca de 300 m a montante da ponte que serve a EN103, no trecho entre Rebordelo e Chaves. A barragem integra-se num aproveitamento hidroelétrico e cria uma albufeira com cerca de 3,1 hm³.

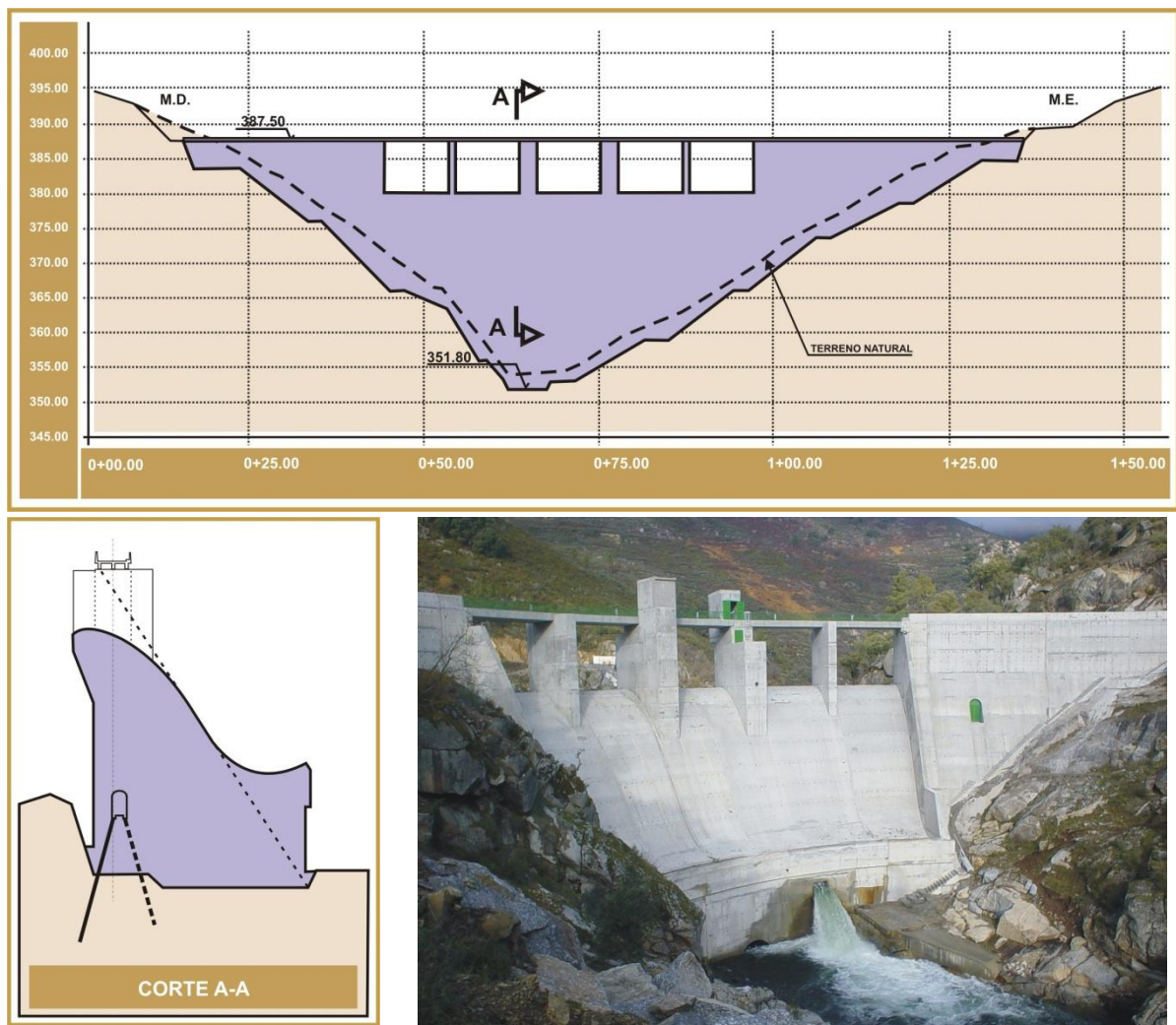


Figura 1. Barragem de Rebordelo. Perfis longitudinal e transversal e vista de jusante antes do início do primeiro enchimento, com a descarga de fundo aberta.

Trata-se de uma barragem de betão, do tipo arco-gravidade, com o paramento de montante vertical e o de jusante inclinado a 0,65(H):1(V), com uma altura máxima de 36,70 m, implantada num maciço granítico. O eixo é um arco de três centros com raios de 55,0 m na zona central e de 90,0 m junto aos encontros. O coroamento, à cota 387,50 m, tem 4,0 m de

espessura e cerca de 127,0 m de desenvolvimento. Na parte central da barragem está implantado o descarregador de cheias, com soleira de lâmina aderente sem comportas, fazendo-se a restituição ao rio por salto de ski. A crista do descarregador, com 45,8 m de desenvolvimento útil, situa-se à cota 380,00 m, que define o nível de pleno armazenamento da albufeira (NPA). Sobre o descarregador a continuidade do coroamento é assegurada por um passadiço de betão com cinco vãos de 9,16 m, delimitados por 4 pilares com larguras compreendidas entre 1,00 m e 2,40 m.

O local da barragem situa-se num trecho encaixado do rio, onde o maciço granítico é aflorante, genericamente pouco alterado e pouco fraturado. O maciço rochoso apresenta boa qualidade global, com perfil de meteorização pouco a medianamente evoluído.

Os trabalhos de construção decorreram em cerca de 2 anos. Iniciaram-se em novembro de 2002, com a abertura de acessos e construção do estaleiro. As escavações começaram em dezembro de 2002 e terminaram em abril de 2003. As betonagens dos blocos começaram em julho de 2003 e terminaram em junho de 2004. Os trabalhos de tratamento das fundações decorreram entre agosto e novembro de 2004, tendo as juntas de contração sido injetadas de seguida. A instalação do sistema de observação terminou em janeiro de 2005.

O betão da barragem foi fabricado com cimento Portland de calcário CEM II A-L 42,5R (norma NP EN 197-1), cinzas volantes, agregados graníticos com 100 mm de máxima dimensão e o adjuvante Melcret PF75, que teve as funções de plastificante e de melhoria das características de compacidade e de impermeabilidade. Aos 180 dias de idade obtiveram-se, em provetes cúbicos de 15 cm de aresta de betão crivado pelo peneiro de 38 mm, os valores médio e característico da resistência à compressão de 25,2 MPa e 20,1 MPa, respetivamente.

O projeto da obra foi elaborado pela empresa COBA e a construção das obras do empreendimento esteve a cargo da Mota-Engil.

1.2 Observação e controlo da segurança da barragem

A barragem de Rebordelo está incluída na classe I do Regulamento de Segurança de Barragens (RSB) [1], pelo que o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) tem uma intervenção de carácter sistemático nas atividades de observação e controlo da segurança da obra.

O plano de observação da barragem foi elaborado em observância do RSB e das Normas de Observação e Inspeção de Barragens (NOIB) [2]. A definição das grandezas a observar e a escolha do tipo de aparelhagem foi feita tendo em consideração a racionalização das atividades de observação e a experiência relativa à monitorização e controlo da segurança de obras similares [3].

O sistema de observação instalado na barragem permite o controlo das ações, das propriedades dos materiais e dos efeitos estruturais, ao longo das diferentes fases de vida,

através da monitorização de: i) nível da água na albufeira, em escala limnimétrica instalada a montante; ii) temperatura do ar, em termómetro do posto meteorológico instalado junto ao coroamento, na margem esquerda; iii) deslocamentos horizontais, em bases de coordenómetro instaladas nos pontos de cruzamento dos fios de prumo com as galerias de visita; iv) deslocamentos verticais, através de nivelamento geométrico de precisão do coroamento, e com extensómetros de fundação instalados próximo da inserção; v) movimentos de juntas, por meio de bases tridimensionais; vi) temperaturas no betão, em termómetros; vii) subpressões, em piezómetros simples e duplos; e viii) caudais drenados e infiltrados, em drenos e bicas totalizadoras.

O plano de primeiro enchimento da albufeira [4], que definiu as atividades de observação e de controlo da segurança num período correspondente ao verdadeiro ensaio de carga do conjunto barragem-fundação, em que se exige um acompanhamento contínuo para deteção atempada de qualquer tipo de comportamento anómalo, é de difícil cumprimento no caso de barragens com albufeiras de pequeno volume em rios muito caudalosos. De facto, após a conclusão das betonagens verificou-se um enchimento muito rápido que não foi possível controlar, devido à reduzida capacidade de vazão da descarga de fundo. O primeiro enchimento controlado da albufeira decorreu no final de fevereiro de 2005, depois de concluídos os trabalhos de instalação do sistema de observação.

A intervenção do LNEC no acompanhamento da obra iniciou-se em fevereiro de 2004, já com as betonagens da barragem em curso. Através de um conjunto de visitas ao estaleiro e de reuniões, o LNEC participou na revisão do plano de observação e apoiou alguns trabalhos de instalação do sistema de observação. O LNEC fez o acompanhamento do primeiro enchimento controlado da albufeira e constituiu o arquivo informático dos dados e dos resultados da observação, que tem vindo a explorar, o que tem permitido realizar o controlo continuado do comportamento da obra [5, 6]. Este acompanhamento tem envolvido, complementarmente, a realização de inspeções regulares à estrutura e ao seu sistema de observação.

2. ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DO COMPORTAMENTO OBSERVADO

2.1 Evolução das ações

A evolução do nível da água na albufeira, desde o primeiro enchimento controlado da albufeira, é apresentada na Figura 2. Como referido, o primeiro enchimento controlado ocorreu num período relativamente curto, entre 22 de fevereiro e 10 de março de 2005. Entre março de 2005 e junho de 2006 a cota da albufeira variou pouco, mantendo-se próxima do NPA (380,00 m), exceto na estiagem de 2005, quando atingiu a cota mínima de 377,50 m, no dia 16 de outubro. No final de junho de 2006 procedeu-se ao esvaziamento da albufeira, para realização das obras de construção de um “by-pass” no túnel de adução, num troço não revestido que tinha ficado obstruído pelo desmoronamento do maciço rochoso, tendo a albufeira permanecido vazia até meados de outubro de 2006 (estas obras

iniciaram-se em meados de 2006 e terminaram em outubro de 2007). Nessa altura ocorreu o segundo enchimento controlado da albufeira, dado que a descarga de fundo não conseguia escoar os elevados caudais afluentes. No final de março de 2007 decorreu um novo esvaziamento da albufeira, para permitir novamente o acesso, por montante, ao túnel de adução.

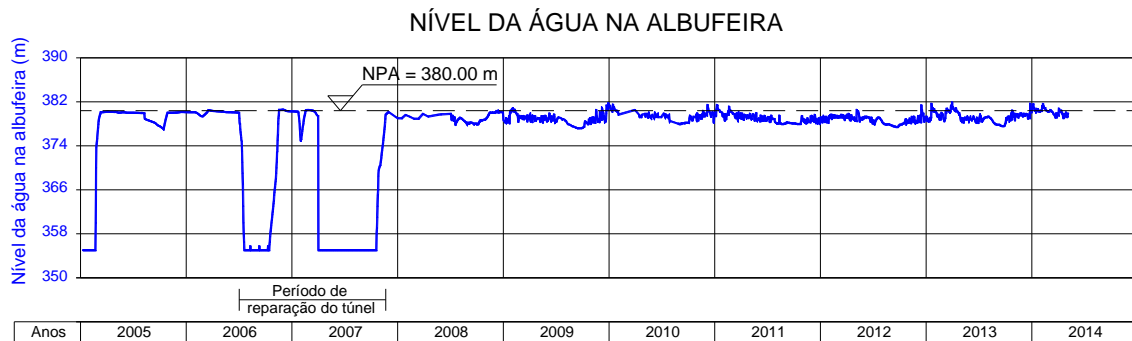


Figura 2. Evolução do nível da água na albufeira desde o primeiro enchimento controlado da albufeira até 2014.

Na Figura 3 representam-se as temperaturas médias mensais do ar, calculadas a partir das temperaturas máximas e mínimas diárias, desde o final de 2010, em que existem medições fiáveis da temperatura do ar.

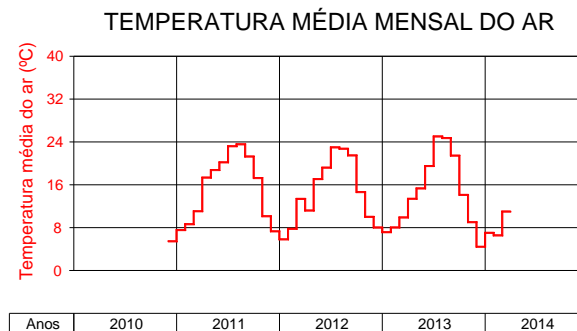


Figura 3. Temperaturas médias mensais do ar observadas desde finais de 2010.

Em termos médios, os meses mais quentes foram julho de 2013, com uma temperatura média mensal de 25,0°C, e o mês mais frio foi dezembro de 2013, com uma temperatura média mensal de 4,4°C.

2.2 Modelos térmico e estrutural

O comportamento da barragem foi analisado e interpretado com base nos resultados fornecidos pelo sistema de observação, utilizando modelos tridimensionais contínuos, nas vertentes térmica e estrutural, da barragem e do maciço rochoso de fundação, analisados

através do método dos elementos finitos [7]. Nas análises foram utilizados programas de cálculo automático desenvolvidos no Departamento de Barragens de Betão do LNEC.

A malha de elementos finitos utilizada tem 9158 pontos nodais e 1771 elementos finitos do tipo cubo, isoparamétricos do segundo grau, com 20 pontos nodais nos vértices e a meio das arestas (Figura 4). Na malha de elementos finitos não foram representados os dois pilares laterais do descarregador, dadas as suas reduzidas dimensões.

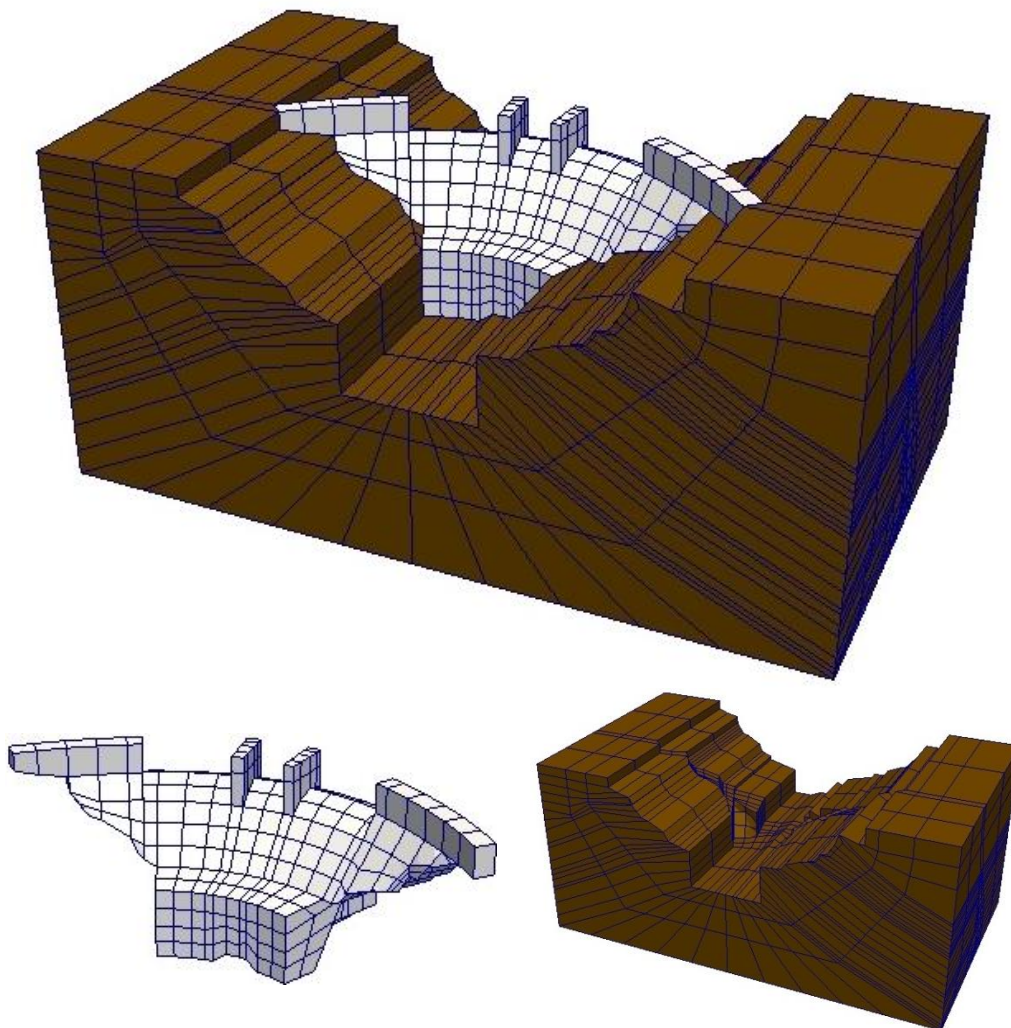


Figura 4. Perspetiva geral da malha de elementos finitos (em cima) e malhas da barragem (em baixo, à esquerda) e do maciço rochoso de fundação (em baixo, à direita).

No modelo térmico consideraram-se para o betão uma difusibilidade térmica $h^2 = 0,13 \text{ m}^2/\text{dia}$ e um coeficiente de dilatação térmica linear $\alpha = 1,0 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$.

O comportamento diferido do betão foi representado por um modelo viscoelástico linear com maturação, sendo a função de fluência aproximada por uma série de exponenciais reais (série de Dirichlet). Considerou-se que os materiais da barragem e do maciço rochoso de fundação são homogéneos e isotrópicos. Em função da resistência à compressão aos

28 dias de idade e da composição, o comportamento reológico do betão da barragem foi caracterizado pela função de fluência de Bažant e Panula (1) e coeficiente de *Poisson* $\nu_b=0,2$.

$$J(t, t_0) = \frac{1}{38,0} \left(1 + 5,2 \left(t_0^{-0,44} + 0,046 \right) (t - t_0)^{0,12} \right) \quad (GPa^{-1}) \quad (1)$$

Na Figura 5 representa-se a função de fluência (1) para três idades de carga.

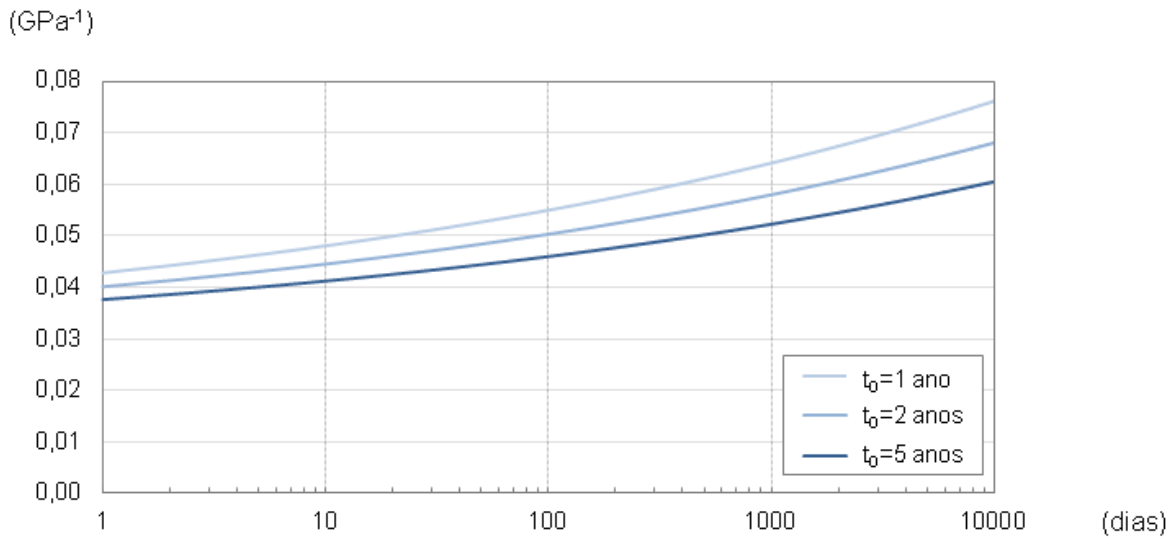


Figura 5. Representação da função de fluência de Bažant e Panula estimada para o betão utilizado na barragem, para três idades de carga.

Na Figura 6 representa-se a evolução no tempo do módulo de elasticidade, calculado a partir da função de fluência (1), verificando-se um aumento significativo do seu valor nos primeiros 3 anos.

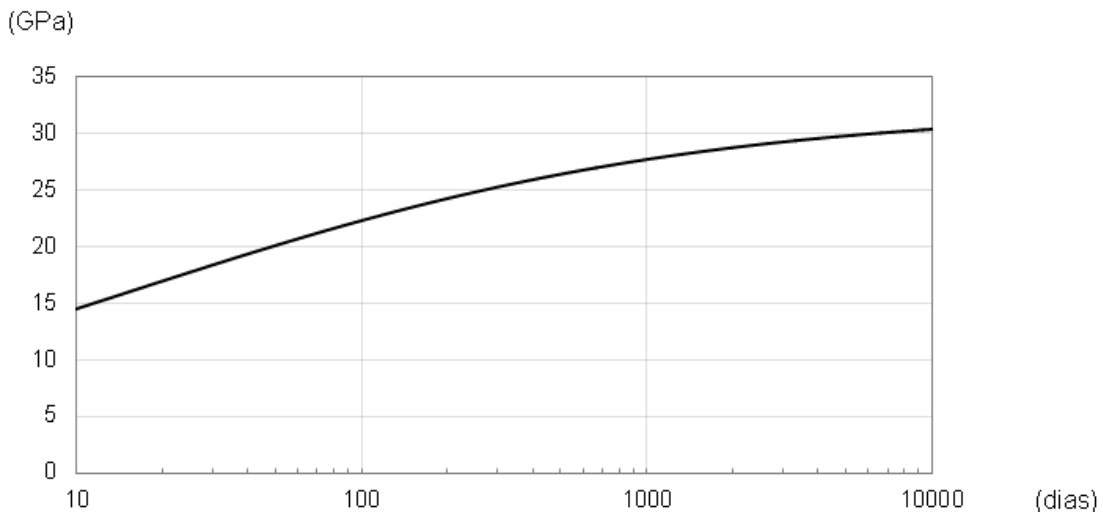


Figura 6. Evolução no tempo do módulo de elasticidade estimado para o betão utilizado na barragem, obtida a partir da função de fluência de Bažant e Panula.

Para o maciço rochoso de fundação considerou-se o módulo de deformabilidade $E_f = 20,0 \text{ GPa}$ e o coeficiente de *Poisson* $\nu_f = 0,2$. Não se consideraram os efeitos do tempo sobre o comportamento da fundação.

2.3 Modelação das ações

As ações da água foram representadas pela pressão hidrostática sobre o paramento de montante da barragem ($\gamma_a = 10,0 \text{ kNm}^{-3}$), tendo sido discretizadas em 196 patamares quinzenais do nível da albufeira. Atendendo ao seu reduzido valor, não foram consideradas as subpressões na superfície de inserção da barragem na fundação.

Com base nas temperaturas do ar e das temperaturas observadas nos termómetros do paramento de montante, determinaram-se, através do método dos mínimos quadrados, as funções sinusoidais que melhor se ajustam às temperaturas observadas (Figura 7). Para o ar a temperatura média é de $15,0^\circ\text{C}$, a semi-amplitude da função sinusoidal é de $8,5^\circ\text{C}$ e a sua desfasagem é de 210 dias. Para a temperatura da água em profundidade obteve-se um valor médio de $14,2^\circ\text{C}$, uma semi-amplitude da onda anual de $5,4^\circ\text{C}$ e uma desfasagem é de 240 dias.

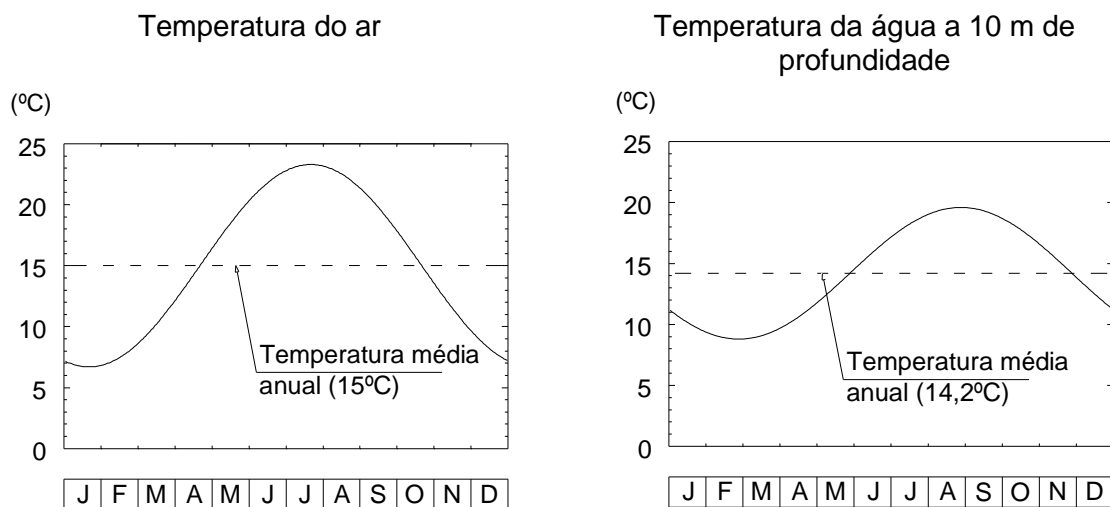


Figura 7. Ondas térmicas anuais do ar e da água em profundidade, calculadas a partir das temperaturas observadas.

A partir dos registos dos termómetros T5, T8 e T11, localizados a jusante, verificou-se que a orientação da barragem causa diferenças térmicas da margem esquerda para a margem direita devido à radiação solar. Por este facto, admitiu-se uma variação linear da temperatura média no paramento de jusante, ao longo da projeção do eixo da barragem (Figura 8).

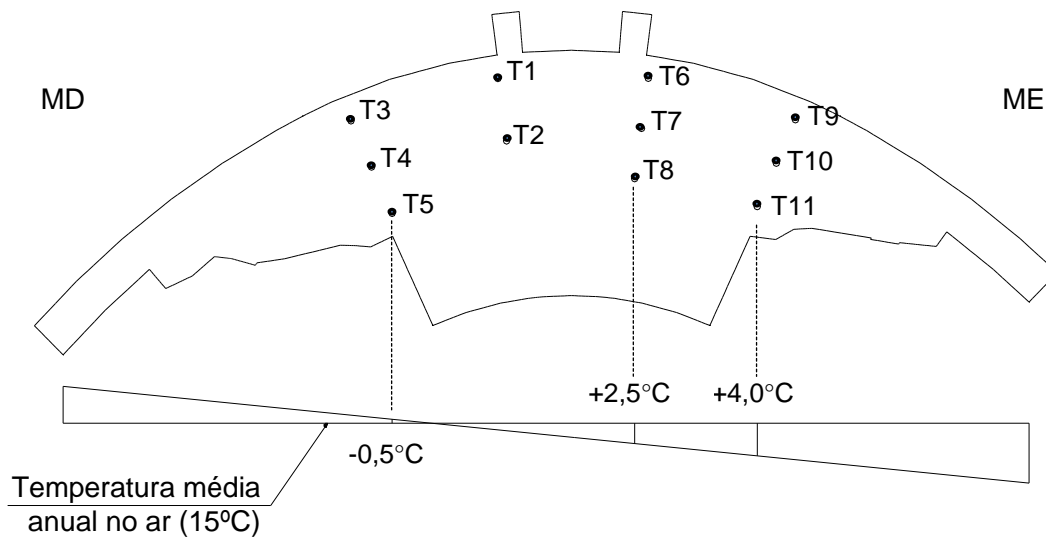


Figura 8. Ajustamento da temperatura relativamente à temperatura média anual no ar para ter em consideração o efeito da radiação solar.

A temperatura da água foi considerada idêntica à do ar, à superfície, e igual à da água em profundidade, abaixo de 10 m de profundidade. A variação entre a superfície e o plano a 10 m de profundidade foi suposta linear.

As temperaturas do ar e da água foram consideradas como condições de fronteira para a resolução do problema térmico, usando o método dos elementos finitos.

A partir das temperaturas calculadas com o modelo térmico determinaram-se as variações de temperatura a adotar no modelo estrutural, considerando uma discretização quinzenal a partir da data de injeção das juntas.

2.4 Principais resultados

Na Figura 9 apresentam-se os diagramas de evolução ao longo do tempo das temperaturas observadas nos termómetros T6 a T8, localizados no bloco 5, na secção à cota 369,50 m, e as temperaturas calculadas nos pontos da malha de elementos finitos correspondentes aos locais dos referidos termómetros.

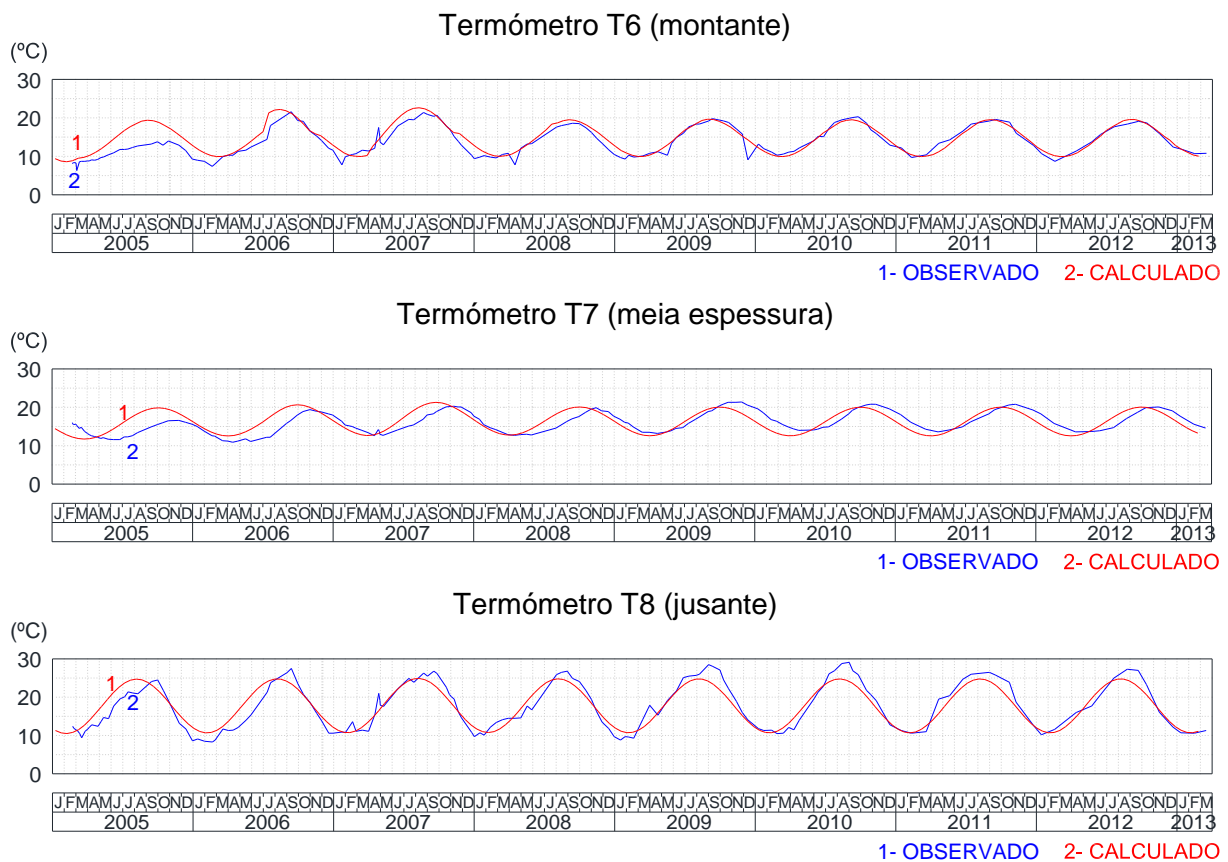


Figura 9. Temperaturas observadas e calculadas nos pontos correspondentes aos termómetros T6, T7 e T8, localizados na secção do bloco 5 à cota 369,50 m.

A concordância entre os valores observados e calculados é, em geral, muito boa.

Na Figura 10 representam-se três perfis de temperaturas calculadas a 19 de agosto de 2005, que corresponde a uma situação de verão após o primeiro enchimento. No paramento de jusante, em contacto com o ar, obtiveram-se temperaturas maiores que 20°C, sendo estas crescentes da margem direita para a margem esquerda. No paramento de montante calculou-se uma temperatura mínima de cerca de 19°C, no trecho submerso.

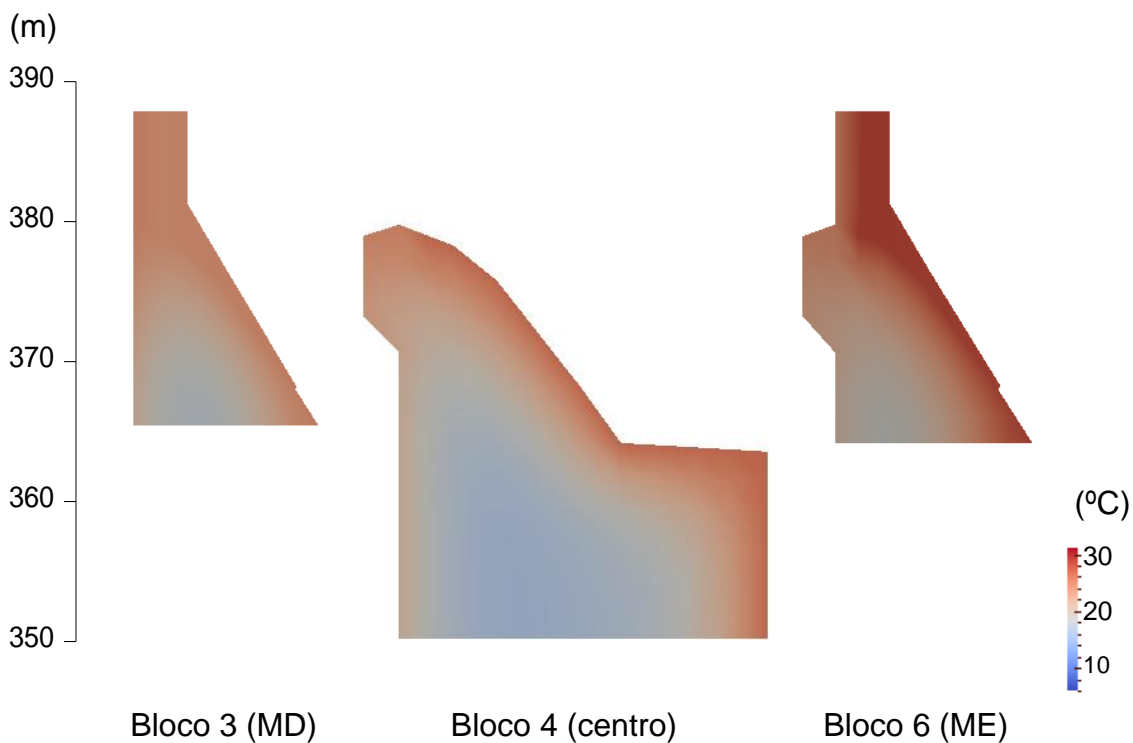


Figura 10. Perfis de temperaturas calculadas para a situação de verão depois do primeiro enchimento, no dia 19 de agosto de 2005.

Na Figura 11 apresentam-se os deslocamentos radiais do ponto correspondente à base de leitura superior do fio de prumo da barragem, observados e calculados entre o início de 2005 e março de 2013: o gráfico de cima apresenta, para facilitar a interpretação, as variações do nível da água na albufeira; na parte intermédia comparam-se os valores observados com os calculados considerando a ação conjunta da pressão hidrostática, variações térmicas no betão e efeitos diferidos; e no gráfico inferior apresentam-se as diferentes parcelas dos valores calculados.

A concordância entre os valores observados e calculados é relativamente boa, mas neste ponto superior verificou-se uma desfasagem entre eles, que pode ser atribuída ao facto de se ter considerado o pilar maciço na malha de elementos finitos das análises térmica e estrutural, quando na realidade é vazado.

Os deslocamentos devidos às variações térmicas no betão são a parcela dominante, seguida dos efeitos elásticos devidos à pressão hidrostática. A parcela da fluência (resposta diferida) , como seria de esperar, é muito pequena.

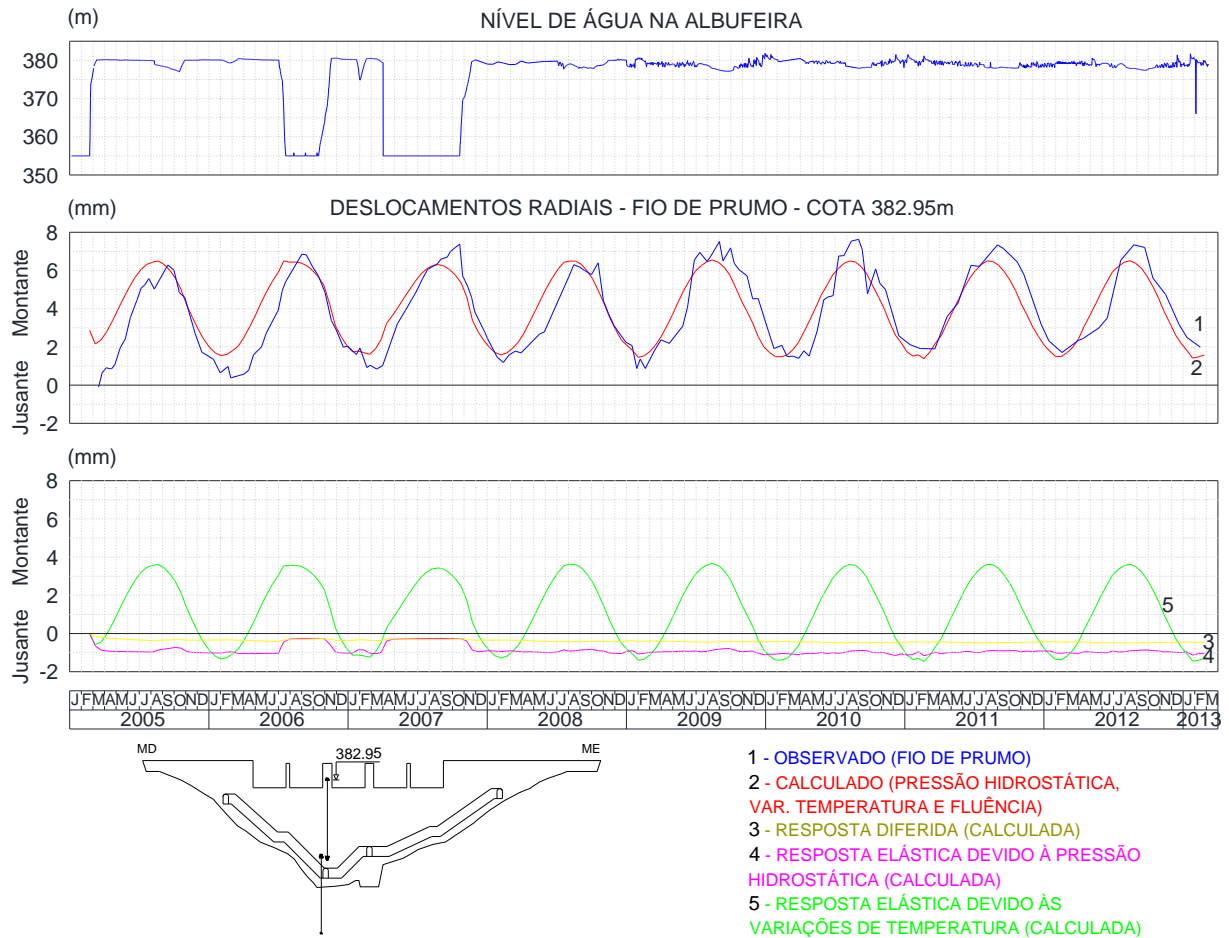


Figura 11. Deslocamentos radiais do ponto correspondente à base de leitura do fio de prumo à cota 382,95 m, observados e calculados.

3. CAMPOS DE TENSÕES NA BARRAGEM

Para o cenário representativo duma situação de exploração da obra em época quente mas com a albufeira cheia, representam-se na Figura 12 as tensões principais nos paramentos devidas à ação do peso próprio, pressão hidrostática ($h=380,00$ m) e variações máximas positivas de temperatura relativamente às temperaturas na data teórica de injeção das juntas de contração (final de fevereiro de 2005). No paramento de jusante, na zona central do trecho inferior, calcularam-se tensões de compressão, na zona central do trecho inferior, normais à fundação, com valores máximos de 3,3 MPa. A montante, na zona central do trecho inferior, calcularam-se tensões de compressão normais à fundação, com valores máximos de 2,6 MPa e na zona dos rins, com direção normal à fundação, com valores máximos de 2,9 MPa.

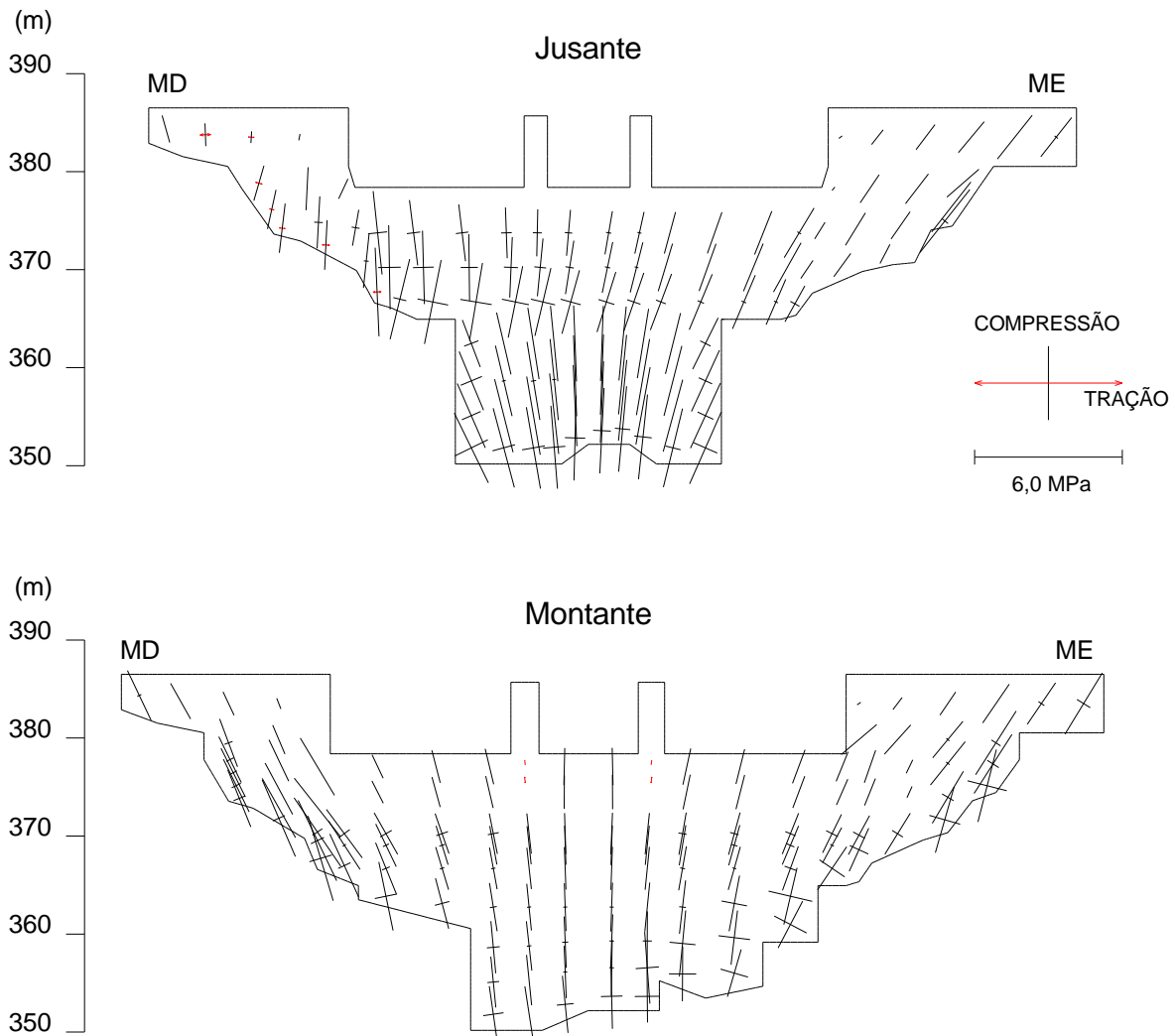


Figura 12. Tensões principais nos paramentos da barragem, devidas ao peso próprio do betão, à pressão hidrostática ($h=380,00$ m) e às variações máximas positivas de temperatura relativamente às temperaturas na data teórica de injeção das juntas de contração (final de fevereiro de 2005).

Para o cenário representativo duma situação de exploração da obra em época fria com a albufeira cheia, representam-se na Figura 13 as tensões principais nos paramentos devidas às ações do peso próprio do betão, pressão hidrostática ($h=380,00$ m) e variações máximas negativas de temperatura relativamente às temperaturas na data teórica de injeção das juntas (final de fevereiro de 2005). A jusante obteve-se um campo generalizado de trações, com valores máximos de 1,1 MPa, verticais, na zona central. A montante calcularam-se tensões de tração, na zona dos rins, com direção paralela à fundação, com valores máximos de 0,7 MPa e pequenas tensões de compressão na zona central do trecho inferior, com valores máximos de 0,3 MPa. Atendendo ao valor da resistência média do betão à tração,

que pode ser estimado em cerca de 2,5 MPa (10% do valor da resistência à compressão), afigura-se não existir o risco de ocorrência de fendilhação do betão.

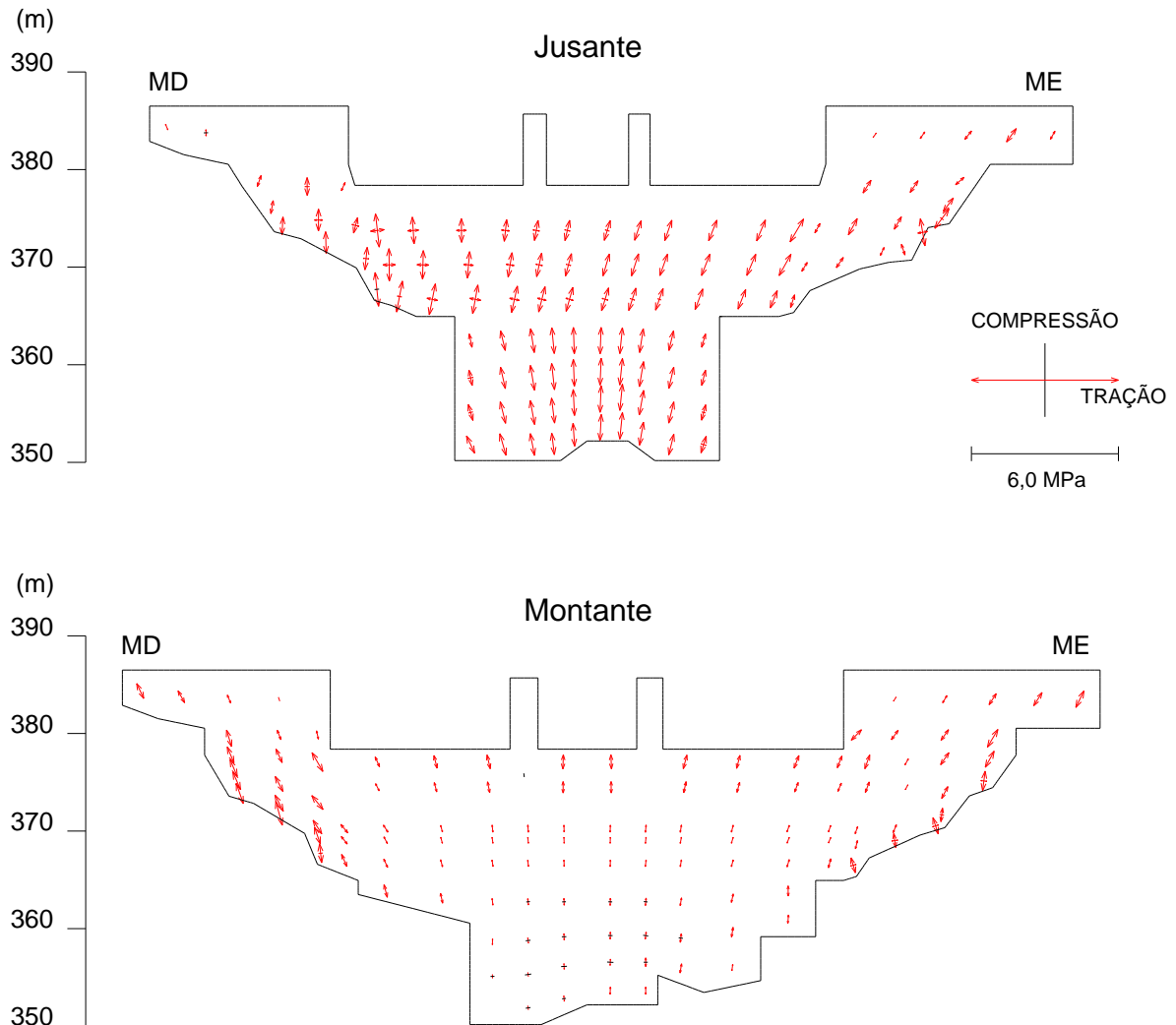


Figura 13. Tensões principais nos paramentos da barragem, devidas ao peso próprio do betão, à pressão hidrostática ($h=380,00$ m) e às variações máximas negativas de temperatura relativamente às temperaturas na data teórica de injeção das juntas de contração (final de fevereiro de 2005).

4. CONCLUSÕES

A segurança das barragens de betão é controlada através da observação e interpretação do seu comportamento. A realização de inspeções regulares permite avaliar a condição aparente das obras. O tratamento dos dados recolhidos na exploração dos sistemas de observação instalados, realizada segundo critérios definidos nos planos de observação, fornece os resultados que permitem caracterizar as principais ações, as propriedades dos materiais e os efeitos estruturais. Na interpretação do comportamento devem utilizar-se modelos que representem adequadamente a geometria e as propriedades dos materiais, sendo que o método dos elementos finitos tem vindo a ser usado, com generalidade, na análise térmica, hidráulica e estrutural dos modelos.

Para a análise e interpretação do comportamento observado da barragem de Rebordelo desde o primeiro enchimento controlado da albufeira utilizou-se um modelo tridimensional de elementos finitos da barragem e fundação para resolver os problemas térmico e estrutural. Uma avaliação adequada das variações térmicas no corpo da barragem permitiu a obtenção de uma excelente concordância entre os resultados da observação contínua da obra e os resultados das modelações térmica e estrutural. Os efeitos diferidos foram, no presente caso, diminutos.

Os campos de tensões calculados no corpo da barragem, para as situações mais desfavoráveis em condições de serviço, mostram que as tensões máximas ocorrem no paramento de jusante, na zona central do trecho inferior, normais à fundação, com valores de 3,3 MPa e 1,1 MPa, de compressão e de tração, respetivamente. As tensões de compressão têm valores moderados e a ordem de grandeza das tensões de tração configura a não existência de risco de ocorrência de fendilhação do betão, o que tem sido comprovado nas inspeções visuais regulares à obra.

AGRADECIMENTOS

Agradece-se à Pebble Hydro (grupo EDP) a autorização concedida para a divulgação dos resultados da observação da barragem de Rebordelo.

REFERÊNCIAS

- [1] RSB – Regulamento de Segurança de Barragens. Decreto-Lei nº 344/2007. Diário da República, Lisboa, 2007.
- [2] NOIB - Normas de Observação e Inspeção de Barragens. Portaria N.º 847/93. Diário da República. Lisboa, 1993.
- [3] COBA – Aproveitamento Hidroeléctrico do rio Rabaçal junto a Rebordelo. Projecto de execução. Plano de observação. Hidroeléctrica do Rabaçal Ponte, Lda / Mota-Engil, S.A., 2004.

- [4] COBA – Aproveitamento Hidroeléctrico do rio Rabaçal junto a Rebordelo. Projecto de execução. Plano de primeiro enchimento. Hidroeléctrica do Rabaçal Ponte, Lda / Mota-Engil, S.A., 2004.
- [5] Santo, A.; Gomes, F.; Garcia, J.V.; Batista, A.L. – Aproveitamentos hidroeléctricos de Rebordelo e Bouçoais-Sonim. Parte I – Projecto. Seminário Barragens: Tecnologia, Segurança e Interação com a Sociedade, CNPGB, Lisboa, 2005.
- [6] Santo, A.; Gomes, F.; Garcia, J.V.; Batista, A.L. – Aproveitamentos hidroeléctricos de Rebordelo e Bouçoais-Sonim. Parte II – Construção e observação. Seminário Barragens: Tecnologia, Segurança e Interação com a Sociedade, CNPGB, Lisboa, 2005.
- [7] LNEC – Barragem de Rebordelo. Análise e interpretação do comportamento observado durante o primeiro enchimento da albufeira e primeiro período de exploração. Relatório, LNEC, Lisboa, 2014.