

Análise e interpretação do comportamento observado da barragem do Baixo Sabor durante o primeiro enchimento da albufeira



José Piteira Gomes¹



António Lopes Batista²



João Conde Silva³

RESUMO

A barragem do Baixo Sabor é uma abóbada de betão de dupla curvatura, com uma altura de 123,00 m e um desenvolvimento do coroamento de 505 m, construída entre 2009 e 2014. Localiza-se no trecho inferior do rio Sabor e cria uma albufeira com 1095 hm³, destinando-se à produção de energia hidroelétrica. O projeto e a construção da barragem estiveram a cargo da EDP, que também tem a responsabilidade da sua exploração. O LNEC tem dado apoio continuado à EDP nos aspetos relacionados com a segurança estrutural.

Na comunicação apresentam-se os aspetos relevantes da análise e interpretação do comportamento observado da barragem durante o primeiro enchimento da albufeira, ocorrido entre 2014 e 2016. Sendo o primeiro enchimento uma fase crítica da vida da obra, já que corresponde a um verdadeiro ensaio de carga, o controlo da segurança da obra foi realizado através do acompanhamento contínuo do seu comportamento, com base nos planos de observação e de primeiro enchimento da albufeira, para permitir a deteção e mitigação atempada de qualquer tipo de sintoma de desempenho anómalo. O apoio de modelação estrutural foi determinante para a realização de uma coerente interpretação das relações entre as causas e os efeitos.

Adotou-se um modelo tridimensional do conjunto barragem-fundação, analisado pelo método dos elementos finitos, considerando o comportamento viscoelástico dos materiais, a variação das ações da água e as variações térmicas que ocorreram no corpo da barragem.

Obteve-se um bom acordo entre os resultados numéricos e os resultados da observação contínua da obra, o que confirmou o bom desempenho da barragem e a adequação da modelação estrutural nesta fase tão importante da vida da obra.

Palavras-chave: Barragem do Baixo Sabor, Primeiro enchimento da albufeira, Observação, Método dos elementos finitos

¹Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Barragens de Betão, Lisboa. Portugal. pgomes@lneec.pt

²Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Barragens de Betão, Lisboa. Portugal. a.l.batista@lneec.pt

³Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Barragens de Betão, Lisboa. Portugal. jrsilva@lneec.pt

1. INTRODUÇÃO

1.1 Breve descrição da obra

A barragem do Baixo Sabor, que integra o Aproveitamento Hidroelétrico do Baixo Sabor (AHBS), localiza-se no trecho inferior do rio Sabor, a cerca de 13 km da confluência com o rio Douro. O AHBS integra ainda, a jusante, a barragem do Feiticeiro. As centrais das duas barragens são reversíveis (turbinação-bombagem), pelo que permitem bombear água do rio Douro, a partir da albufeira da Valeira, para a grande albufeira de armazenamento do Baixo Sabor (1095 hm³ de volume total), usando o escalão intermédio do Feiticeiro [1].

A barragem é constituída por uma abóbada de betão de dupla curvatura, com altura máxima acima da fundação de 123,00 m, um coroamento de 6,00 m de espessura e 505 m de desenvolvimento, à cota 236,00 m (Fig. 1). O nível de pleno armazenamento da albufeira (NPA) situa-se à cota 234,00 m.



Figura 1. Barragem do Baixo Sabor. Vista de jusante (à esquerda) e corte vertical pela consola central (à direita)

A abóbada é formada por 32 blocos, separados por juntas de contração verticais, afastadas de cerca de 15,40 m na margem direita, 15,70 m na margem esquerda e 17,00 m na zona central. Na zona superior central da barragem está implantado o descarregador de cheias de superfície, pelo que os arcos superiores são interrompidos no trecho central. A estrutura tem seis galerias horizontais, espaçadas de cerca de 20 m, e uma galeria geral de drenagem (GGD) que acompanha o contacto com a fundação, do lado de montante. Na zona central da abóbada existe também uma galeria de drenagem a jusante (GDJ), que comunica com a de montante por duas galerias radiais (Fig. 2).

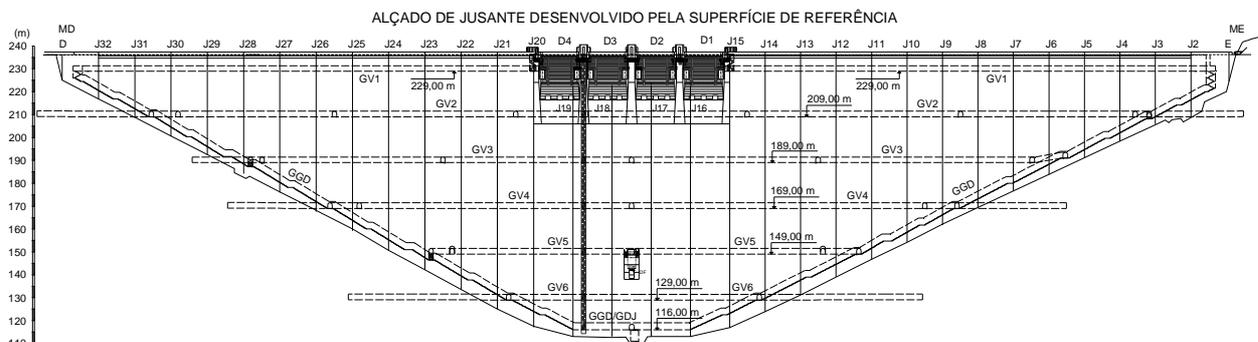


Figura 2. Barragem do Baixo Sabor. Alçado planificado de jusante com representação das juntas de contração e das galerias

O maciço rochoso de fundação é granítico, genericamente de boa qualidade, mas tem características mecânicas e hidráulicas heterogêneas ao longo do desenvolvimento da obra.

1.2 Plano de observação

O primeiro enchimento da albufeira constitui uma fase crucial no controlo da segurança das barragens, na qual se exige um acompanhamento contínuo para deteção atempada de qualquer tipo de comportamento anómalo. Para tal foram seguidos o plano de observação da obra [4] e o plano específico de primeiro enchimento [5], nos quais foram definidos níveis de estabilização e patamares de observação, bem como todas as atividades inerentes de controlo da segurança.

Para monitorização do comportamento estático da barragem, designadamente das ações e dos seus efeitos, estão instalados: escalas e sondas de níveis, a montante e a jusante; estação meteorológica digital, para leitura e registo contínuo da temperatura e humidade relativa do ar, radiação solar e precipitação; 27 bases de leitura de deslocamentos horizontais em 5 fios de prumo (nos três fios de prumo centrais existe uma conjugação de um fio direito, entre a galeria superior e a galeria geral de drenagem, e de um fio invertido, entre esta galeria e um ponto profundo no maciço de fundação; os dois fios de prumo laterais são invertidos); 15 extensómetros de varas na fundação, a partir da GGD e da GDJ), 12 verticais, 2 horizontais e 1 subvertical, sendo 6 simples (uma vara), localizados nas encostas a cotas mais elevadas, e os restantes 9 duplos, para medição de deslocamentos da fundação; 152 medidores de movimentos de junta de resistência elétrica, embebidos no betão, e 103 bases tridimensionais nas galerias, para medição de deslocamentos relativos entre blocos; 232 extensómetros de resistência elétrica do tipo Carlson, dispostos em 40 pontos de amostragem com maiores tensões, segundo 17 secções, em 8 grupos unidirecionais, 26 grupos planos e 6 grupos tridimensionais, para medição de extensões no betão; 10 células tensométricas, dispostas em 5 secções junto de grupos de extensómetros, para medição direta de tensões nas zonas onde se prevê que sejam de maior magnitude (fecho dos arcos, rins e base da consola central); 52 termómetros de resistência elétrica, 26 dos quais junto aos paramentos de montante e de jusante, que em conjunto com os extensómetros e os medidores de movimentos de junta permitem a obtenção da temperatura em 480 pontos do corpo da barragem; 6 células de pressão, para quantificação da pressão da água nos poros do betão; 42 piezómetros na fundação, de câmara manométrica única, para quantificação de subpressões; e 215 drenos da fundação (5 por bloco, em média), a partir das GGD e GDJ, e 18 bicas totalizadoras, para coletar caudais drenados e infiltrados.

Para obtenção de redundância nos deslocamentos medidos com maior frequência através de outras técnicas, já referidas, foi previsto um sistema de observação geodésica. Foram instaladas, nas galerias horizontais GV2, GV4 e GV6 (que têm prolongamento para o interior do maciço rochoso de fundação em ambas as encostas), linhas de poligonação e de nivelamento, para determinação de deslocamentos horizontais e verticais, respetivamente. No coroamento e no fundo do vale (trechos horizontais das GGD e GDJ) foram também instaladas linhas de nivelamento.

A barragem foi ainda dotada de um sistema GNSS (Global Navigation Satellite System), com o objetivo de permitir a medição em contínuo de deslocamentos, em complemento da informação disponibilizada pelos fios de prumo e pelos métodos geodésicos. Os equipamentos instalados consistem em antenas GNSS de alta precisão e respetivos recetores. A configuração adotada tem uma antena de referência fora da zona de influência da obra e três antenas no coroamento da barragem, implantadas nas verticais dos fios de prumo centrais.

Refere-se ainda a instalação de 3 células de fluência, para realização “in situ” de ensaios de deformabilidade do betão, instantâneos e ao longo do tempo, para determinação do módulo de elasticidade e da função de fluência, respetivamente.

Dada a dimensão e importância da obra, num subconjunto de instrumentos previamente selecionado foi prevista a automatização das leituras. Contudo, não foi possível ter esta valência operacional durante o primeiro enchimento.

1.3 Cronologia do primeiro enchimento da albufeira

A inspeção prévia ao primeiro enchimento da albufeira realizou-se em dezembro de 2013, mas o enchimento iniciou-se efetivamente no final de fevereiro de 2014. O enchimento foi interrompido, para avaliação das condições de funcionalidade e segurança, em três patamares intermédios (P1, P2 e P3, às cotas 180 m, 206 m e 224 m, respetivamente) e em dois níveis de estabilização (NE1 e NE2, nos níveis 216 m e 231 m, respetivamente), tendo-se completado em abril de 2016 (patamar P4), quando se atingiu uma cota próxima do NPA (234,00 m). O primeiro enchimento demorou cerca de 28 meses (Fig. 3).

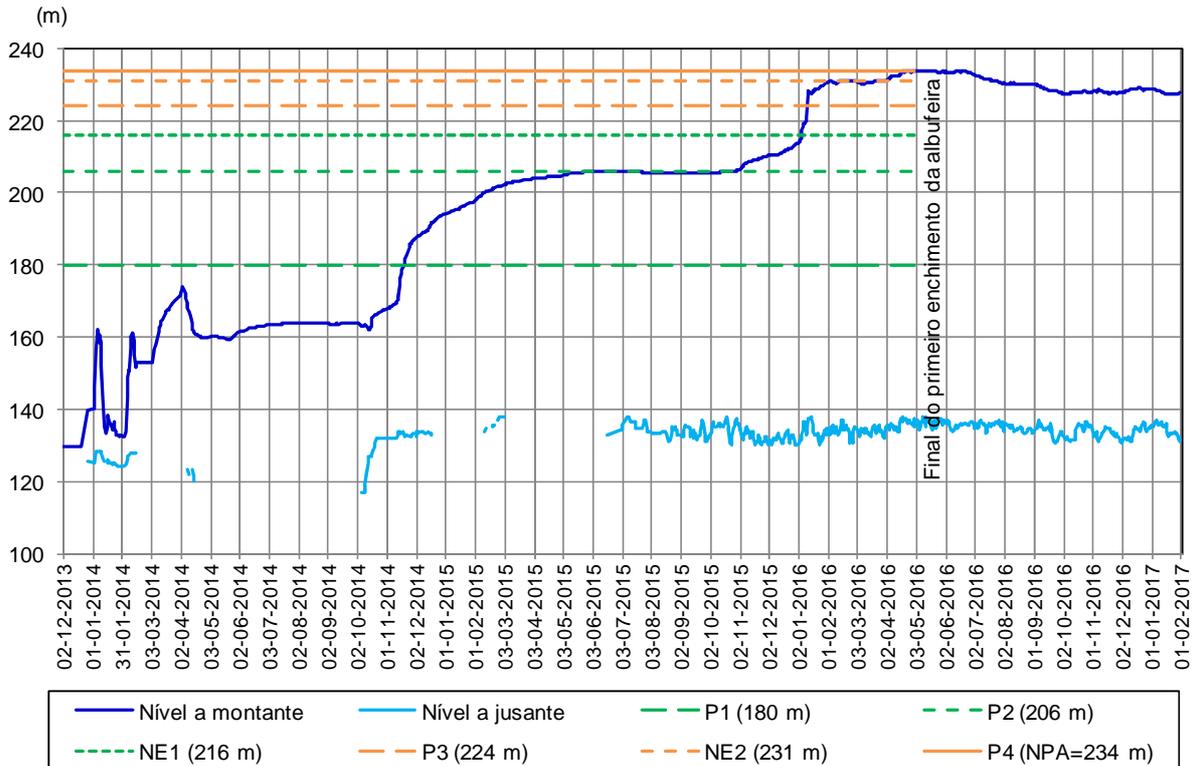


Figura 3. Evolução dos níveis da albufeira e de jusante entre o início de dezembro de 2013 e o final de janeiro de 2017.

2. ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DO COMPORTAMENTO OBSERVADO

2.1 Continuidade estrutural da abóbada

A continuidade das barragens abóbada é crucial na garantia do seu adequado funcionamento estrutural. No caso da barragem do Baixo Sabor, a injeção das juntas de contração foi feita em duas etapas, recorrendo a refrigeração artificial do betão, nas zonas a injetar, até se atingirem temperaturas médias de cerca de 10°C. A primeira etapa, até à cota 170 m, foi levada a efeito entre abril e maio de 2013, tendo a segunda fase, acima da cota 170 m (zonas menos espessas da abóbada), sido concretizada entre dezembro de 2013 e fevereiro de 2014. A injeção cuidada das juntas estabeleceu a continuidade estrutural da abóbada, pelo que os movimentos de juntas observados durante o primeiro enchimento da albufeira foram muito pequenos (Fig. 4), o que confirmou o bom desempenho da estrutura neste aspeto.

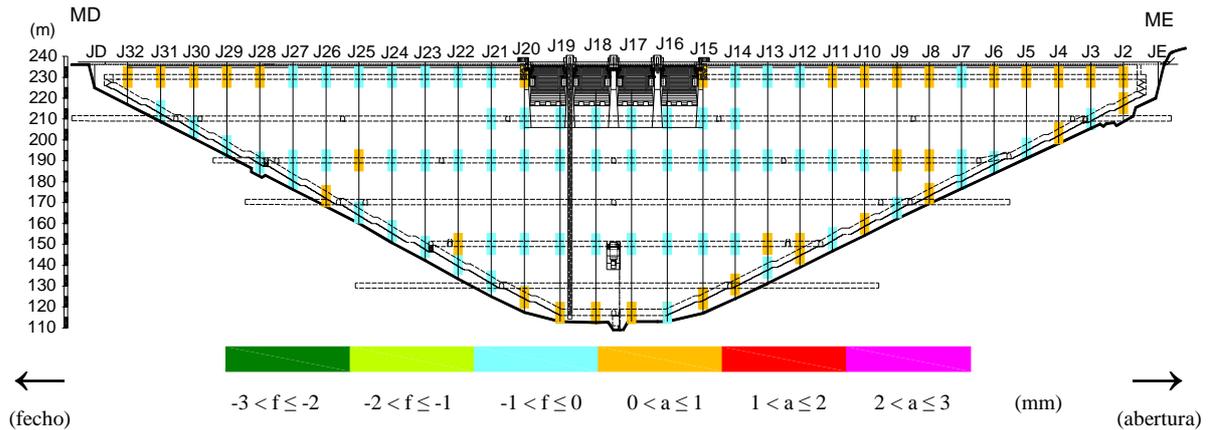


Figura 4. Movimentos de abertura/fecho das juntas de contração observados nas bases tridimensionais das galerias, entre 2 de julho de 2014 e 19 de abril de 2016 (patamar P4).

2.2 Modelo estrutural do conjunto barragem-fundação

O comportamento da barragem foi analisado e interpretado com base nos resultados da observação e da exploração de um modelo estrutural contínuo do conjunto barragem-fundação (já que não se verificaram deslocamentos relativos significativos nas juntas de contração durante todo o primeiro enchimento) [6,7,8].

A estrutura da barragem foi representada por um conjunto de blocos contínuos e homogêneos, considerando uma discretização mensal em 30 fases de construção. O comportamento viscoelástico do betão dominante da barragem foi representado por uma função de fluência de Bazant e Panula (Eq. (1)), ajustada a partir de resultados de ensaios laboratoriais e “in situ”, e coeficiente de Poisson $\nu_b=0,2$.

$$J(t, t_0) = \frac{1}{40,0} (1,0 + 3,2(t_0^{-0,35} + 0,05))(t - t_0)^{0,12} \quad (\text{GPa}^{-1}) \quad (1)$$

A função de fluência é representada na Fig. 5 para três idades de carga. Na Fig. 5 representam-se também as correspondentes funções de relaxação, obtidas através de inversão numérica. Deve referir-se que o betão dominante da barragem apresenta muito pouca fluência para idades de carga maiores que cerca de 3 anos.

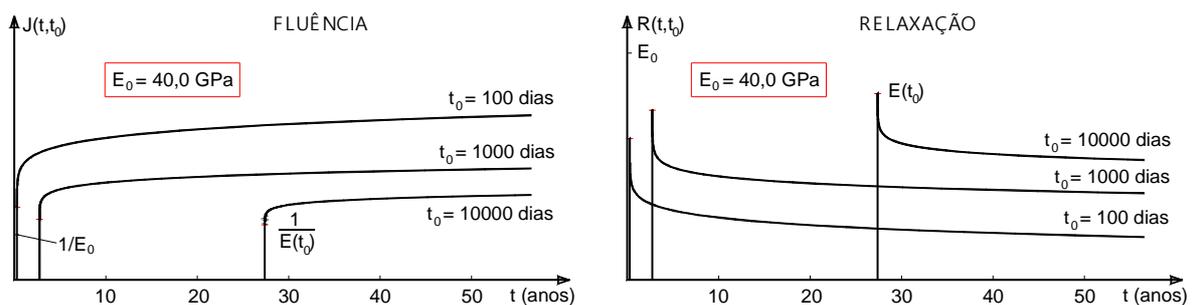
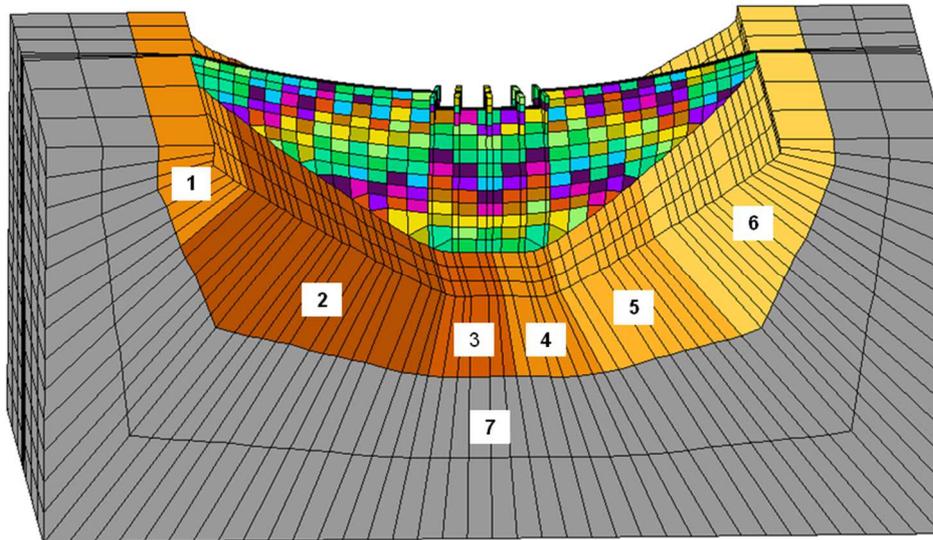


Figura 5. Representação das funções de fluência e de relaxação do betão dominante da barragem, para três idades de carga.

O maciço rochoso de fundação foi dividido em sete zonas de diferente deformabilidade (Fig. 6), que foi caracterizada a partir dos resultados da prospeção geomecânica e das tomografias sísmicas realizadas “in situ” [7]. Considerou-se em todas as zonas do maciço de fundação um coeficiente de Poisson $\nu_f=0,2$. Não foram considerados os efeitos do tempo no comportamento da fundação.

A malha de elementos finitos do conjunto barragem-fundação tem 14854 pontos nodais e 2795 elementos finitos do tipo cubo, isoparamétricos do segundo grau, com 20 pontos nodais nos vértices e a meio das arestas, sendo que 1067 pertencem ao corpo da barragem e os restantes 1728 ao maciço rochoso

de fundação. Foram considerados três elementos na espessura da abóbada. As formas do descarregador de superfície, designadamente os vãos, o lábio e os pilares, foram representados explicitamente na malha (Fig. 6). Nas fronteiras planas, que limitam lateralmente e inferiormente o modelo, foram impostos deslocamentos nulos na direção normal às quatro fronteiras verticais e nas três direções na fronteira horizontal inferior.



Faseamento mensal das betonagens do corpo da barragem:

 01-2012	 01-2013
 02-2012	 02-2013
 03-2012	 03-2013
 04-2012	 04-2013
 05-2011	 05-2012
 05-2013	
 06-2011	 06-2012
 06-2013	
 07-2011	 07-2012
 07-2013	
 08-2011	 08-2012
 08-2013	
 09-2011	 09-2012
 09-2013	
 10-2011	 10-2012
 10-2013	
 11-2011	 11-2012
 12-2011	 12-2012

Módulos de deformabilidade das zonas individualizadas do maciço rochoso de fundação:

$E_{f1} = 20 \text{ GPa}$
$E_{f2} = 30 \text{ GPa}$
$E_{f3} = 25 \text{ GPa}$
$E_{f4} = 20 \text{ GPa}$
$E_{f5} = 15 \text{ GPa}$
$E_{f6} = 10 \text{ GPa}$
$E_{f7} = 40 \text{ GPa}$

Figura 6. Malha de elementos finitos do conjunto barragem-fundação, considerando o faseamento mensal das betonagens do corpo da barragem e o zonamento do maciço rochoso de fundação.

2.3 Modelação das ações

As subpressões e o nível da água a jusante tiveram uma pequena variação durante o primeiro enchimento da albufeira, pelo que as ações da água foram representadas apenas por incrementos da pressão hidrostática sobre o paramento de montante, considerando $\gamma_a=10 \text{ kN/m}^3$.

As variações de temperatura no corpo da barragem foram calculadas a partir das temperaturas observadas no betão, ar e água, considerando uma metodologia numérica de espalhamento dos valores monitorizados num número discreto de pontos de amostragem para todos os pontos nodais da malha de elementos finitos [9]. Nas Figs. 7 e 8 representam-se exemplos dos campos de temperaturas em alguns passos da análise (na Fig. 7 representam-se as temperaturas observadas e interpoladas na consola central em julho de 2014 e janeiro de 2016 e na Fig. 8 representam-se as temperaturas interpoladas na consola central e no paramento de jusante, do lado da margem direita, em agosto de 2014 e dezembro de 2015). Considerou-se para o betão da barragem um coeficiente de dilatação térmica linear $\alpha=1,1 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$.

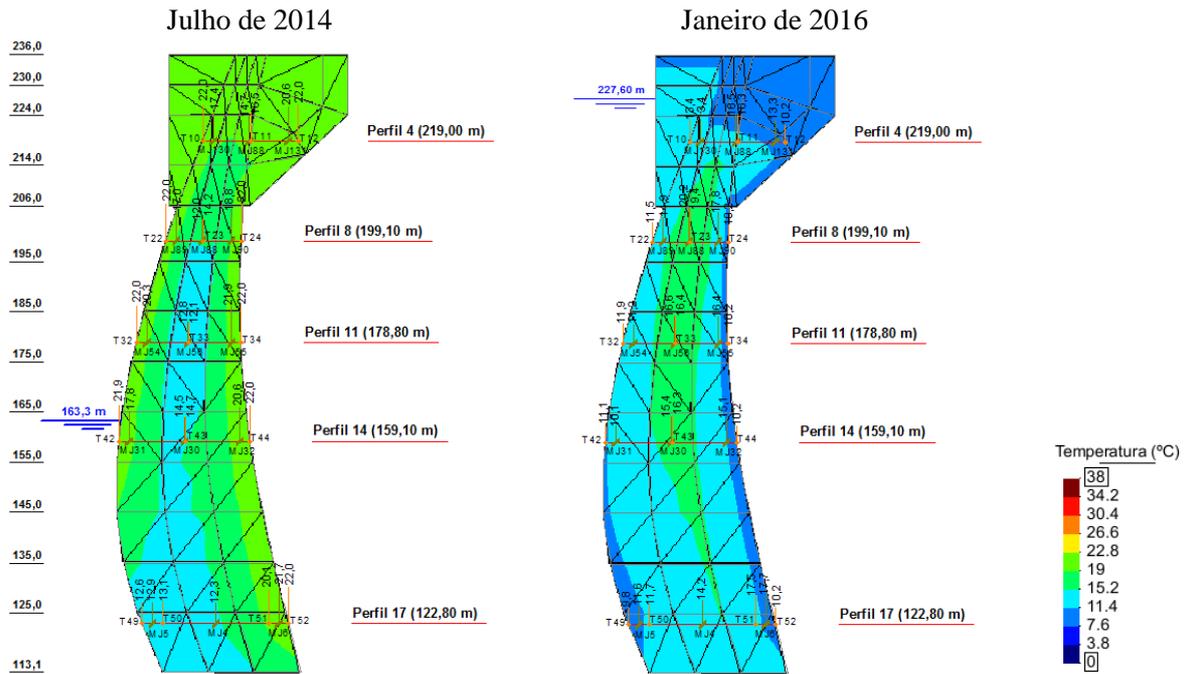


Figura 7. Temperaturas observadas nos termómetros e medidores dos movimentos de juntas do bloco central da barragem e correspondentes campos de temperatura em julho de 2014 e janeiro de 2016.

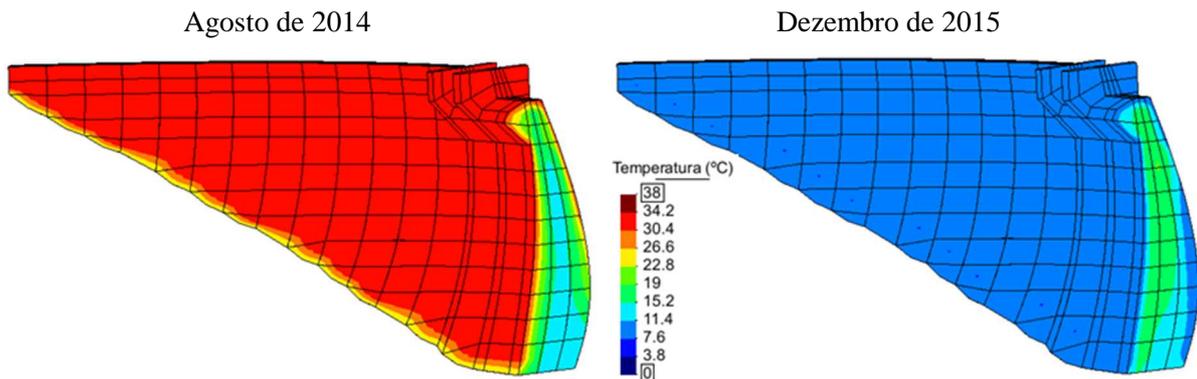


Figura 8. Campos de temperatura considerados no corpo da barragem em duas fases de análise (agosto de 2014 e dezembro de 2015), obtidos a partir das temperaturas observadas.

A análise realizada compreendeu o todo o período do primeiro enchimento da albufeira e o subsequente período de exploração até ao final de janeiro de 2017. As ações da água e as variações de temperatura foram discretizadas quinzenalmente.

2.4 Alguns resultados relevantes

Na Fig. 9 representam-se os deslocamentos horizontais observados ao longo do tempo (entre julho de 2014 e janeiro de 2017) na base superior de leitura do fio de prumo central (cota 233,10 m) e os correspondentes deslocamentos calculados com o modelo estrutural, considerando os efeitos da pressão hidrostática, variações de temperatura e fluência/relaxação do betão. Refere-se a grande influência nas variações de temperatura na resposta estrutural e a excelente concordância entre os valores observados e calculados. Nos outros pontos de monitorização de deslocamentos da barragem conseguiram-se também bons ajustes entre valores observados e calculados.

Na Fig. 10 são apresentados os deslocamentos verticais observados na galeria de visita GV4, à cota 169 m, através de nivelamentos geométricos de precisão, em datas próximas dos patamares do enchimento, e os deslocamentos verticais obtidos na modelação estrutural. Os deslocamentos são no sentido

descendente nas zonas laterais e de empolamento na zona central, devido à influência dominante das variações térmicas ocorridas no corpo da barragem entre julho de 2014 e abril de 2016. Pode notar-se um ajuste genericamente aceitável entre os valores observados e calculados, nas três épocas de comparação.

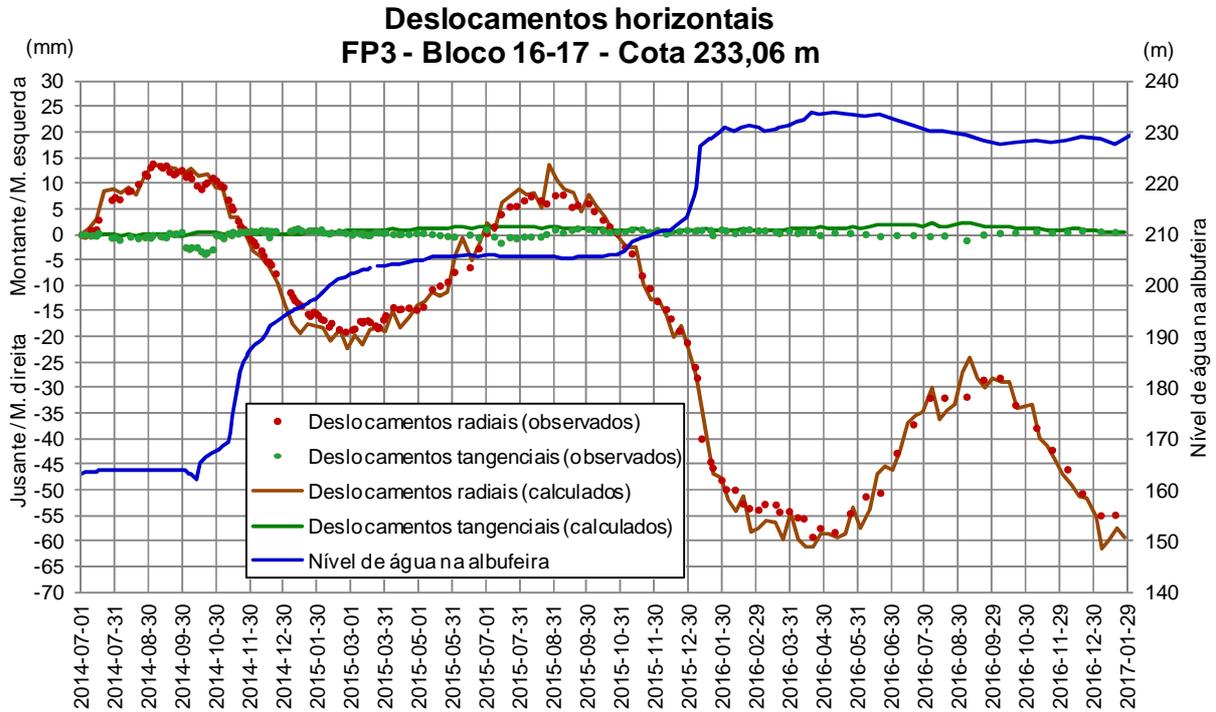


Figura 9. Deslocamentos horizontais observados e calculados no ponto correspondente à base de leitura superior do fio de prumo central.

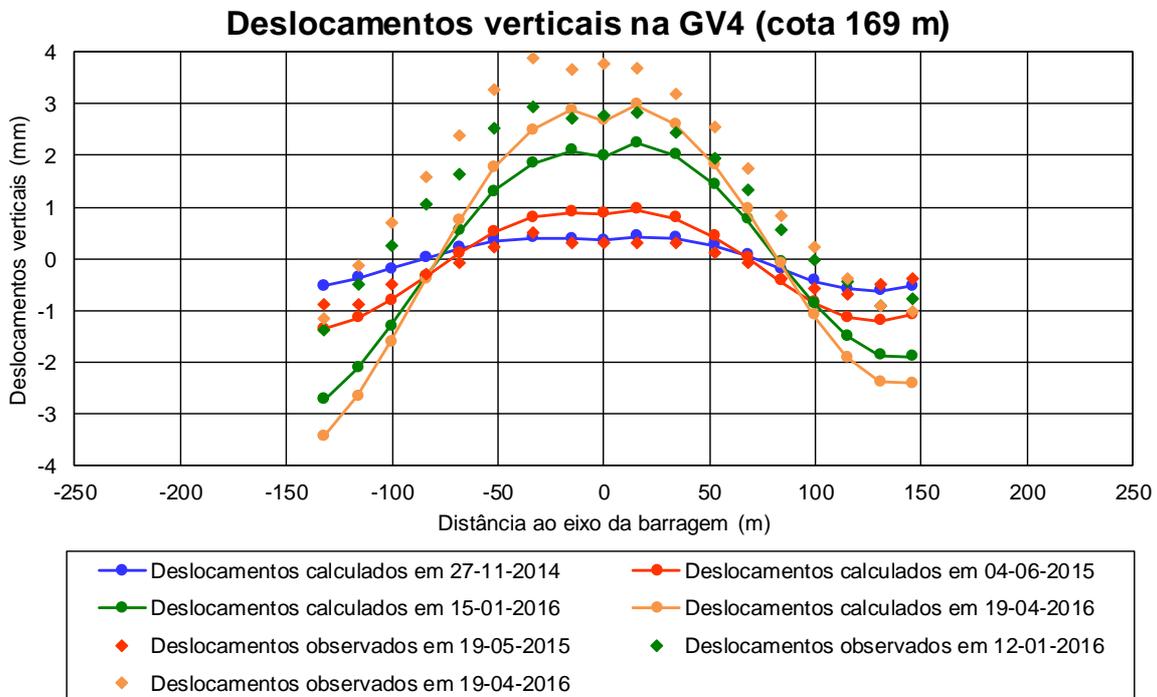


Figura 10. Deslocamentos verticais observados (nivelamentos geométricos de precisão) e calculados na galeria GV4 (cota 169 m) em datas próximas dos patamares de enchimento.

A Fig. 11 mostra os deslocamentos observados e calculados do maciço rochoso de fundação, no ponto correspondente à cabeça de leitura do extensômetro de fundação subvertical EF9, localizado na bloco central, na GDJ à cota 116,3 m, também entre julho de 2014 e janeiro de 2017. Neste caso o ajuste já não é tão bom. A evolução no tempo dos deslocamentos é similar, mas os deslocamentos observados são cerca do dobro dos deslocamentos calculados. Nos restantes extensómetros de fundação conseguiram-se ajustes melhores ou do mesmo tipo.

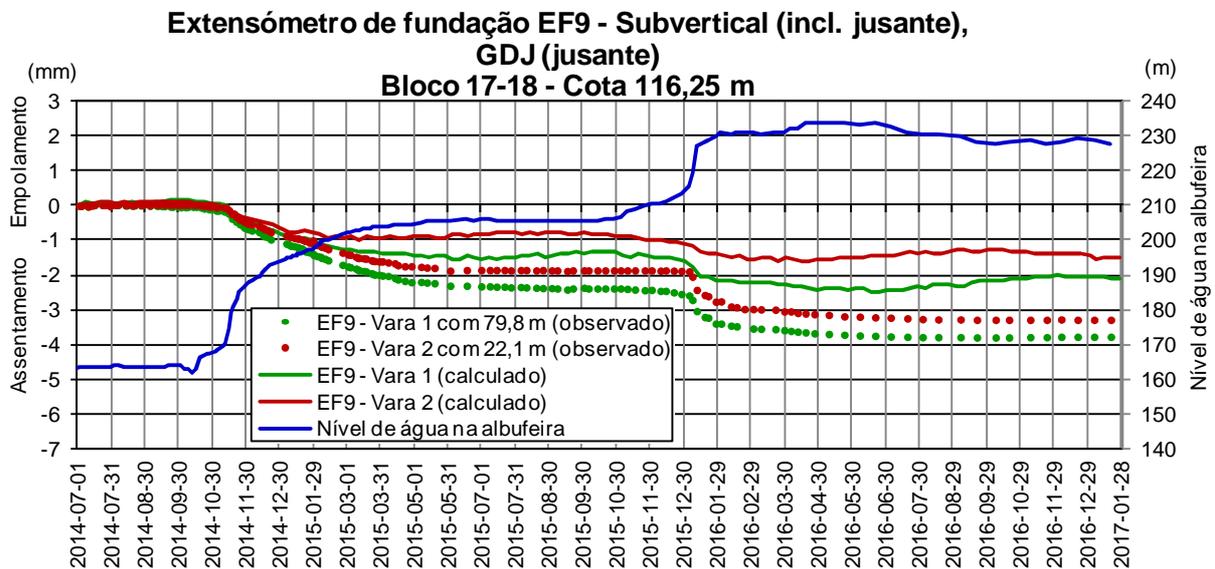


Figura 11. Deslocamentos observados e calculados no ponto correspondente à cabeça de leitura do extensómetro de fundação subvertical de jusante da base do bloco central.

Obtiveram-se também concordâncias aceitáveis na comparação de valores observados e calculados em outros dispositivos de observação, designadamente em extensómetros Carlson, o que demonstra o bom desempenho da barragem e a adequação dos modelos adotados para a análise e interpretação do comportamento da barragem.

3. CONCLUSÕES

A segurança das barragens de betão é controlada através da observação (monitorização, ensaios e inspeções) e interpretação do seu comportamento. O tratamento dos dados recolhidos durante a 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 utilizam-se modelos, que podem ir de simples analogias qualitativas até elaboradas formulações matemáticas baseadas na reologia e na mecânica dos materiais. A escolha do tipo de modelo depende dos objetivos dos estudos e da importância e fase da vida das obras. No caso da barragem do Baixo Sabor, atendendo à importância e características da obra, foi utilizado um modelo tridimensional de elementos finitos do conjunto barragem-fundação, contínuo, com consideração do comportamento viscoelástico do betão.

As metodologias de análise e interpretação do comportamento estrutural da barragem do Baixo Sabor durante o primeiro enchimento da albufeira revelaram-se adequadas, em particular no que respeita à representação da deformabilidade dos materiais da barragem e do maciço rochoso de fundação, à representação das principais ações (pressão hidrostática e variações de temperatura) e à obtenção das respostas instantâneas e diferidas, designadamente em termos de deslocamentos. Destacam-se o ajuste da função de fluência do betão dominante da barragem a partir de resultados de ensaios laboratoriais e “in situ”, a determinação da deformabilidade do maciço rochoso de fundação a partir de resultados de ensaios “in situ” e o método utilizado para interpolação em todo o corpo da barragem das temperaturas

observadas num número discreto de pontos, o que permitiu a obtenção de uma boa concordância entre os resultados da observação contínua da obra e os resultados da modelação estrutural.

O planeamento adequado do primeiro enchimento da albufeira e os resultados das inspeções e da análise e interpretação do comportamento observado permitiram realizar cabalmente o controlo da segurança durante este verdadeiro ensaio de carga da barragem. Os resultados obtidos constituem ainda uma referência para os períodos seguintes de vida da obra.

AGRADECIMENTOS

Agradece-se à EDP Produção a autorização concedida para apresentação dos resultados referentes à observação da barragem do Baixo Sabor.

REFERÊNCIAS

- [1] EDP (2005). Aproveitamento hidroelétrico do Baixo Sabor. Projeto. Porto.
- [2] Miranda, M.P.; Silva Matos, D.; Pimentel, R.; Gomes, A. (2012). The Baixo Sabor upstream and downstream dams. Relevant design and construction features. First International Dam World Conference, Maceió, Brasil.
- [3] Gomes, A.T.; Gonçalves, J.S.; Silva Matos, D.; Miranda, M.P. (2012). A barragem de montante do Baixo Sabor. Aspectos relevantes de projeto e construção. Encontro Nacional Betão Estrutural - BE2012, Porto.
- [4] EDP (2007). Aproveitamento hidroelétrico do Baixo Sabor. Escalão de montante. Plano de observação. Porto.
- [5] EDP (2013). Aproveitamento hidroelétrico do Baixo Sabor. Escalão de montante. Plano de primeiro enchimento da albufeira. Porto.
- [6] Oliveira, S. (2000). Modelos para a análise do comportamento de barragens de betão considerando a fissuração e os efeitos do tempo. Formulações de dano. Tese de doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), Porto.
- [7] Mota, R.; Coelho, M.J.; Piteira Gomes, J.; Batista, A.L.; Neves, J.; Lima, C.; Silva Matos, D. (2018). Rock mass foundation seismic tomography and its contribution for the modelling of Baixo Sabor dam's structural behaviour. Third International Dam World Conference, Foz do Iguaçu, Brasil.
- [8] Piteira Gomes, J.; Batista, A.L.; Silva Matos, D. (2018). Analysis and interpretation of the Baixo Sabor dam's behaviour during the first filling of the reservoir. Symposium Hydro Engineering - 26º Congresso Mundial da ICOLD, Viena.
- [9] Piteira Gomes, J.; Batista, A.L.; Casaca, J. (2018). Methodology for the spatial interpolation of continuum physical quantities in a finite domain based on discrete samples. Third International Dam World Conference, Foz do Iguaçu, Brasil.