

## **Análise e interpretação do comportamento observado da barragem de Pretarouca durante o primeiro enchimento da albufeira e o primeiro período de exploração**



**Ivo Figueiredo  
Dias<sup>1</sup>**



**António Lopes  
Batista<sup>2</sup>**



**José Boal Paixão<sup>3</sup>**

### **RESUMO**

A barragem de Pretarouca, no rio Balsemão (serra de Montemuro, concelho de Lamego), tem 29,70 m de altura e 305 m de desenvolvimento. A albufeira tem 3,2 hm<sup>3</sup>, destinando-se a água a abastecimento público. A obra, construída entre 2007 e 2009, é explorada pela empresa Águas do Norte, do grupo Águas de Portugal, com o apoio do LNEC 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 em 2009, e o período de exploração subsequente. Na análise estrutural considerou-se um modelo plano do conjunto barragem-fundação, o comportamento viscoelástico dos materiais, a variação das ações da água e as variações térmicas que ocorreram no betão da obra.

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

**Palavras-chave:** Barragem de Pretarouca, Primeiro enchimento da albufeira, Primeiro período de exploração, Observação, Método dos elementos finitos

## **1. INTRODUÇÃO**

### **1.1 Características da barragem**

A barragem de Pretarouca está implantada no rio Balsemão (afluente da margem esquerda do rio Varosa, que por sua vez é afluente da margem esquerda do rio Douro), a cerca de 17 km a montante da barragem de Varosa, numa zona planáltica da serra de Montemuro (Fig. 1). O seu projeto foi elaborado em 2006 pela empresa CENOR [1], tendo os trabalhos de construção do aproveitamento, a cargo do agrupamento

<sup>1</sup>Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Barragens de Betão, Lisboa, Portugal [idades@lnec.pt](mailto:idades@lnec.pt)

<sup>2</sup>Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Barragens de Betão, Lisboa, Portugal [a.l.batista@lnec.pt](mailto:a.l.batista@lnec.pt)

<sup>3</sup>Águas do Norte (AdN), Vila Real, Portugal [j.paixao@adp.pt](mailto:j.paixao@adp.pt)

formado pelas empresas Teixeira Duarte e Monte Adriano, decorrido entre 2007 e 2009. A albufeira da barragem destina-se a assegurar o abastecimento de água aos concelhos de Armamar, Tarouca, Lamego e Resende, e ainda a parte dos concelhos de Castro Daire, Vila Nova de Paiva e Cinfães.

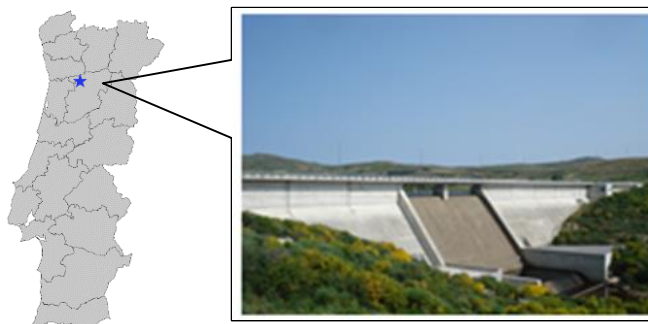


Figura 1. Localização e vista de jusante da barragem de Pretarouca.

A barragem é de betão, do tipo gravidade, com eixo reto na maior parte do seu desenvolvimento, apresentando apenas curvatura em planta nos blocos da margem direita (Fig. 2). Os paramentos de jusante e de montante são inclinados, com jorramentos de 0,80:1 (H:V) e 0,10:1 (H:V), respetivamente. O coroamento, com 305 m de desenvolvimento, acomoda o perfil transversal de uma estrada, à cota 923,40 m. A barragem é formada por um conjunto de 20 blocos separados por juntas de contração verticais endentadas. No corpo da barragem existem duas galerias de visita horizontais, nos quatro blocos centrais (blocos 8 a 11), e uma galeria geral de drenagem que acompanha a inserção do lado de montante, entre os blocos 5 e 15. O nível máximo de cheia (NMC) situa-se à cota 921,50 m e o nível de pleno armazenamento (NPA) situa-se à cota 919,50 m, originando uma área inundada de 43,4 ha e uma albufeira com um volume total armazenado de 3,2 hm<sup>3</sup>. O volume útil da albufeira é de 2,6 hm<sup>3</sup>.

A fundação da barragem foi realizada a pequena profundidade em granitos pouco alterados a sãos (W2 a W1), em toda a margem esquerda e no fundo do vale, e em granitos alterados e muito compartimentados na encosta da margem direita, sendo mesmo muito alterados (W4) no trecho superior. A superfície média mais baixa da fundação foi fixada à cota 893,70 m, no pé de montante do bloco 9, após o saneamento fundações, sendo a altura máxima da barragem 29,70 m.

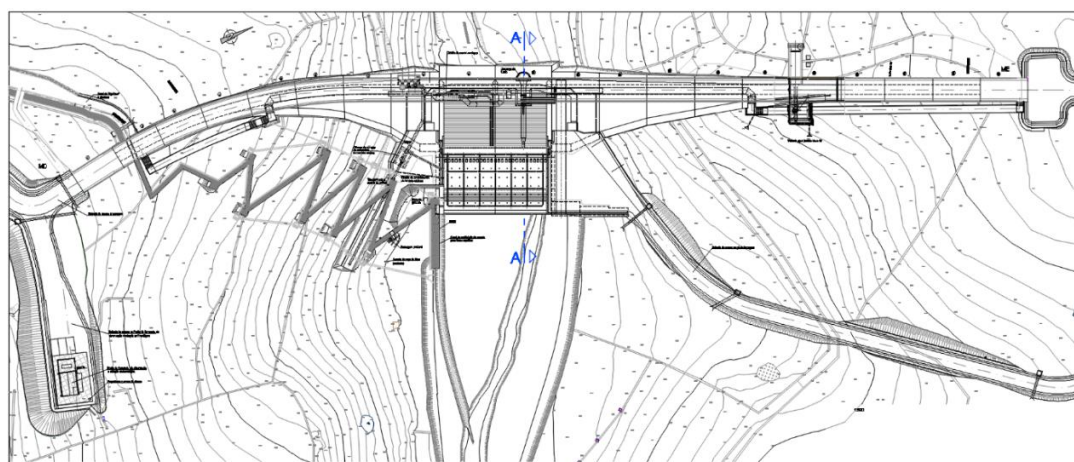


Figura 2. Planta da barragem.

Como órgãos hidráulicos de segurança a barragem dispõe de um descarregador de superfície e de uma descarga de fundo (Fig. 3). O descarregador de superfície, do tipo Creager, inscreve-se nos blocos centrais (blocos 9 e 10) e permite escoar um caudal máximo de 194 m<sup>3</sup>/s. É desprovido de comportas, tendo dois vãos de 15,5 m de largura cada, estando a crista da soleira à cota 919,50 m. A soleira de descarga, em degraus, sobre o paramento de jusante da barragem, termina numa bacia de dissipação com revestimento de betão. A descarga de fundo tem secção circular de 0,65 m de raio e uma capacidade máxima de 8,8 m<sup>3</sup>/s. A dissipação de energia é feita através de descarga submersa na bacia de dissipação.

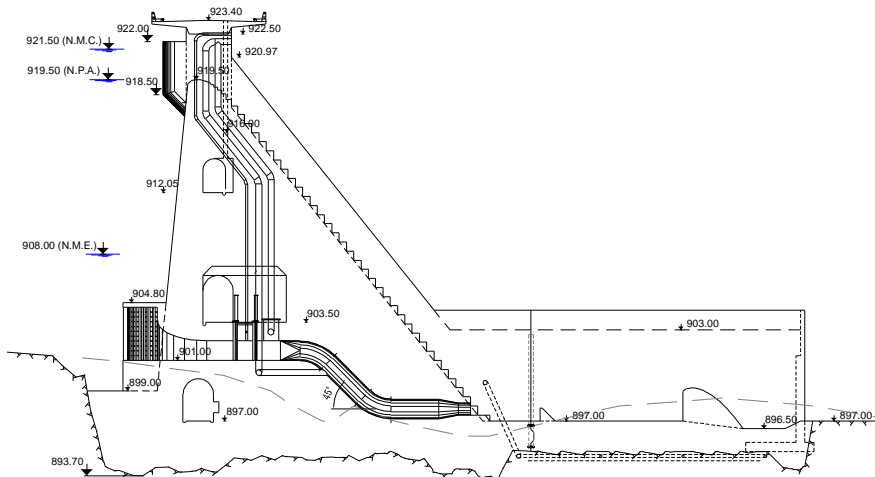


Figura 3. Perfil transversal da barragem pelo descarregador de superfície (corte A-A na Fig. 2).

Na construção da barragem foi usado betão D200 de maturação lenta, de forma a minimizar os efeitos da libertação do calor de hidratação do cimento. Foi usadas dosagens de  $140 \text{ kg/m}^3$  de cimento Portland de calcário CEMII/A-L 42,5R e  $60 \text{ kg/m}^3$  de cinzas volantes [2]. O volume de betão da obra é de cerca de  $37000 \text{ m}^3$ .

Na Fig. 4 representa-se a evolução no tempo do módulo de elasticidade do betão e da resistência à compressão obtidos em ensaios realizados no LNEC, às idades de 28, 90 e 365 dias. Pode comprovar-se que a maturação do betão foi lenta, sendo as resistências para idades maiores que 1 ano sempre superiores a 35 MPa, enquanto que o valor do módulo de elasticidade estático praticamente estabilizou próximo de 35 GPa ao ano de idade.

Foram também realizados ensaios de flexão para avaliação da resistência à tração do betão, às idades de 413 dias e 532 dias, tendo-se obtido valores entre 3,5 MPa e 4,5 MPa, que correspondem a cerca de 10% da resistência à compressão às mesmas idades, o que reflete um desempenho típico de betões com boas características.

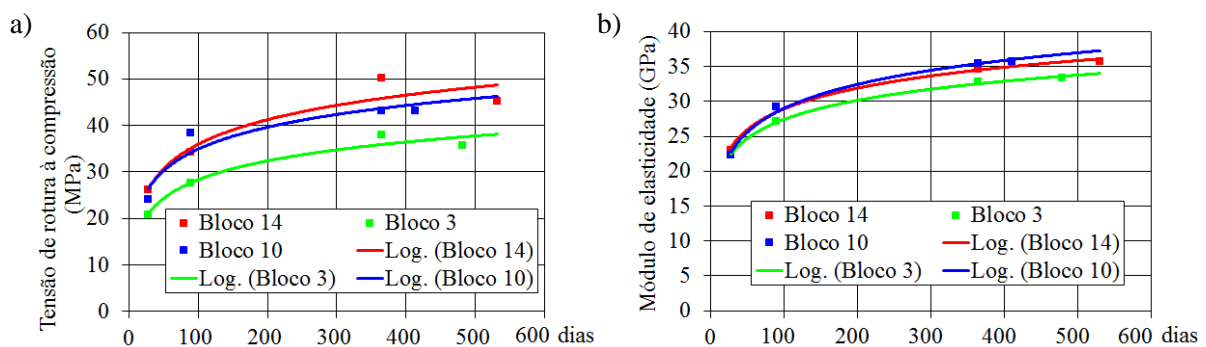


Figura 4. Resultados dos ensaios destrutivos do betão da barragem em diferentes idades e ajuste de funções logarítmicas à sua evolução: a) resistência à compressão; e b) módulo de elasticidade.

## 1.2 Sistema de observação e controlo da segurança

O sistema de observação instalado na barragem permite a avaliação das ações, das propriedades dos materiais e dos efeitos estruturais, através da monitorização de: i) nível da água na albufeira, em escala limnométrica instalada a montante e, automaticamente, com sonda de níveis; ii) temperatura e humidade relativa do ar, medidos na estação meteorológica instalada na cobertura do posto de observação e controlo (POC), na margem direita, à cota do coroamento; iii) deslocamentos horizontais na zona central, em três bases de coordenómetro de dois fios de prumo conjugados, um direito entre o coroamento e a galeria superior, e um invertido, entre esta galeria e um ponto profundo da fundação; iv) deslocamentos verticais, em 19 marcas de nivelamento geométrico de precisão do coroamento e em três extensómetros

de fundação de vara única; v) movimentos das juntas entre blocos, por meio de 17 bases tridimensionais; e vi) subpressões, em sete piezômetros de câmara única. Os caudais drenados e infiltrados na barragem são quantificados a partir de medições efetuadas nos 59 furos de drenagem, nos três furos dos extensómetros de varas e nas quatro bicas totalizadoras da galeria geral de drenagem.

O apoio do LNEC na barragem de Pretarouca começou ainda antes do início da construção da obra, com a elaboração do plano de observação e de primeiro enchimento da albufeira [3]. Posteriormente, o LNEC deu apoio durante a construção da barragem, fez o acompanhamento do primeiro enchimento controlado da albufeira e constituiu o arquivo informático dos dados e dos resultados da observação, que tem permitido realizar o controlo continuado do comportamento da obra. Este acompanhamento tem envolvido, também, a realização de inspeções regulares à estrutura e ao seu sistema de observação.

O primeiro enchimento da albufeira é um verdadeiro ensaio de carga do conjunto barragem-fundação, pelo que se exige um acompanhamento contínuo para deteção atempada de qualquer tipo de comportamento anómalo. O plano de primeiro enchimento [3] definiu um nível de estabilização de enchimento à cota 915,00 m (4,5 m abaixo do NPA), para possibilitar uma inspeção e análise do comportamento observado numa etapa intermédia do enchimento, bem como a tomada de decisões relativamente ao seu prosseguimento. O enchimento da barragem teve início formal no dia 16 de fevereiro de 2009, após a selagem do desvio provisório, com o nível da água à cota 905,65 m, tendo o nível de água atingido a cota 914,90 m, muito próximo do nível de estabilização (915,00 m), no dia 12 de março de 2009. Tendo as grandezas observadas sido genericamente coerentes com a variação das principais ações, o que evidenciava um comportamento satisfatório do conjunto barragem-fundação, confirmado pelas inspeções visuais, o enchimento da albufeira prosseguiu de seguida. Por razões relacionadas com a implementação de medidas de emergência, o nível da albufeira foi limitado nessa primavera. O NPA foi atingido já depois do período de estiagem, em 16 de novembro de 2009.

Para análise e interpretação dos resultados da observação durante o primeiro enchimento e subsequente período de exploração foram elaborados modelos numéricos de elementos finitos [4]. As características dos modelos utilizados descrevem-se na secção 2, enquanto nas secções 3 e 4 apresentam-se os resultados relevantes obtidos.

## **2. MODELOS TÉRMICO E ESTRUTURAL**

### **2.1 Modelo de elementos finitos**

A interpretação do comportamento observado da barragem foi realizada com o apoio de um modelo numérico de elementos finitos do conjunto barragem-fundação, nas vertentes térmica [5] e estrutural [6].

O modelo térmico, analisado em regime transiente, permitiu obter a distribuição de temperaturas no corpo da barragem, ao longo do tempo, considerando as temperaturas do ar e da água nas respetivas fronteiras, que foram estimadas com base nos dados da observação. Não se tendo realizado ensaios específicos para a caracterização das propriedades térmicas do betão, foram considerados, para a condutividade térmica e calor específico, os valores utilizados num estudo realizado na FEUP [7],  $3,0 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  e  $2300 \text{ kJm}^{-3}\text{K}^{-1}$ , respetivamente, que são valores habituais disponíveis na literatura para este tipo de betões. A estes valores corresponde uma difusibilidade térmica do betão de  $0,13 \text{ m}^2\text{dia}^{-1}$ . Também na ausência de ensaios específicos, considerou-se para o betão um coeficiente de dilatação térmica linear de  $1,0 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ .

No modelo estrutural foi considerado um comportamento elástico linear para os materiais do maciço rochoso de fundação, tendo sido usado um módulo de elasticidade estático de  $E_f = 10 \text{ GPa}$  e um coeficiente de Poisson  $\nu_f = 0,3$ . Relativamente ao betão da barragem, o seu comportamento foi representado por um modelo viscoelástico linear [8], que permite considerar os efeitos de fluência do betão, caracterizado por um coeficiente de Poisson de 0,2 e pela expressão de Bažant e Panula (1), que

foi estimada a partir da resistência à compressão do betão aos 28 dias de idade e dos valores do módulo de elasticidade em compressão,

$$J(t, t_0) = \frac{1}{48} \left( 1 + 3,8(t_0^{-0,37} + 0,05(t - t_0)^{0,12}) \right) \quad (\text{GPa}^{-1}) \quad (1)$$

A função de fluência (1) está representada na Fig. 5-a para três idades de carga. Na Fig. 5-b representa-se a evolução do módulo de elasticidade, dado pela expressão (2),

$$E(t_0) = \frac{48}{1 + 2,89(t_0^{-0,37} + 0,05)} \quad (\text{GPa}) \quad (2)$$

Na modelação numérica é importante simular adequadamente a rigidez do conjunto barragem-fundação que, num modelo admitido como contínuo, depende, essencialmente, das propriedades dos materiais, da geometria e das condições de fronteira. No entanto, existem alguns aspetos práticos, não considerados no modelo, que é importante ter em consideração, ainda que de forma simplificada, designadamente:

- os provetes de betão, cujos resultados dos ensaios de deformabilidade estão representados na Fig. 5-b, são realizados e curados em condições ideais, representando, assim, um limite superior das características do betão existente em obra;
- as juntas de betonagem horizontais, que resultam da construção faseada da barragem, dificilmente igualam as características do betão estrutural;
- existem algumas aberturas na barragem que não foram consideradas explicitamente no modelo, devido ao tamanho dos elementos finitos da malha adotada.

Por estes motivos, considerou-se uma deformabilidade do betão maior do que a estimada a partir dos ensaios dos provetes (Eq. (2)), em acordo com os resultados de estudos recentes sobre esta temática [9,10], tendo-se usado, no cálculo estrutural ao longo do tempo, a curva de evolução do módulo de elasticidade do betão representada a traço interrompido na Fig. 5-b. Com esta curva foi conseguida uma melhor concordância entre os valores das grandezas observadas e calculadas, relativamente aquela que seria possível obter com a curva ajustada diretamente a partir dos resultados dos ensaios.

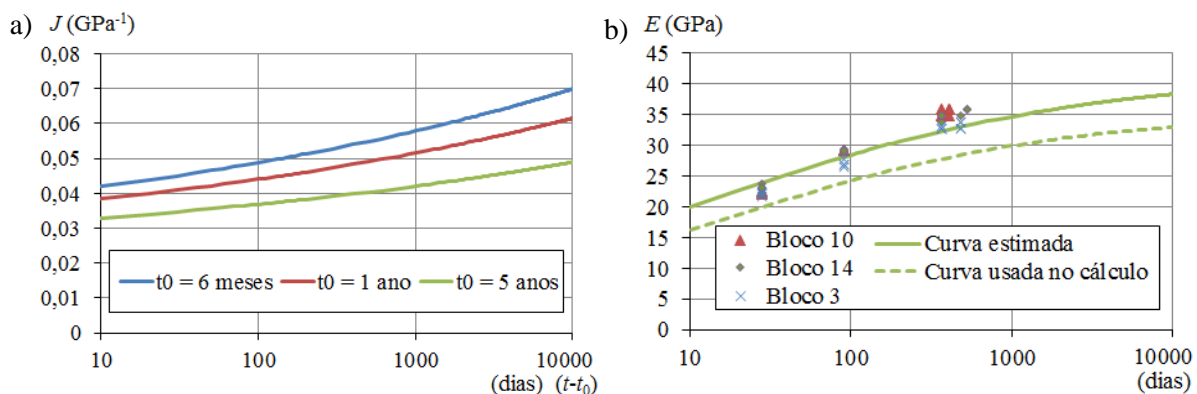


Figura 5. Deformabilidade estimada para o betão: a) função de fluência de Bazant e Panula; e b) módulo de elasticidade. Resultados dos ensaios laboratoriais e curvas de evolução, uma obtida a partir da função de fluência estimada e outra considerada na análise estrutural.

A malha de elementos finitos utilizada para resolver os problemas térmico e estrutural é constituída por 1204 pontos nodais e 148 elementos finitos tridimensionais do tipo cubo, isoparamétricos do segundo grau, com 20 pontos nodais, sendo que 78 pertencem ao corpo da barragem, 11 ao pilar do descarregador e 59 à fundação (Fig. 6). Foi considerada uma discretização mensal das ações no domínio do tempo.

O desenvolvimento do modelo na direção normal ao perfil foi considerado igual à largura do pilar do descarregador de superfície (1,50 m), o que possibilita a correta representação estrutural deste elemento. Para garantir as condições de estado plano de deformação do corpo da barragem e da fundação, foram

impedidos os deslocamentos normais nas duas superfícies verticais de fronteira paralelas ao perfil da barragem. O pilar do descarregador não foi restringido lateralmente, para se representar o seu estado plano de tensão. Nas restantes fronteiras planas que limitam lateralmente e inferiormente o modelo, foram impostos deslocamentos nulos na direção normal às duas fronteiras verticais perpendiculares ao perfil da barragem e nas três direções na fronteira horizontal inferior.

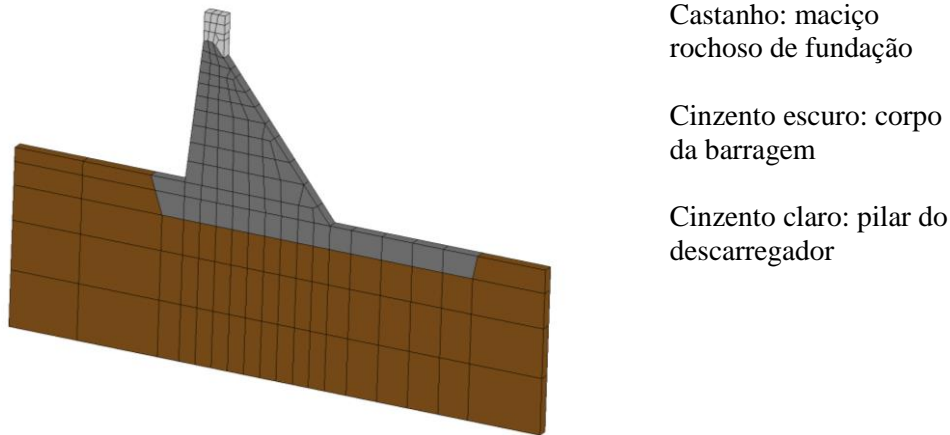


Figura 6. Malha “plana” de elementos finitos do conjunto barragem-fundação, na zona central

## 2.2 Ações

O peso próprio do betão foi representado por forças mássicas verticais ( $\gamma_b = 24 \text{ kN/m}^3$ ), aplicadas na fase inicial do cálculo, não sendo, portanto, considerado o processo construtivo.

Relativamente à pressão hidrostática, a evolução do nível de água na albufeira foi discretizada mensalmente (Fig. 7-a). As pressões foram representadas através de forças de superfície ( $\gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3$ ), aplicadas no paramento de montante da barragem. Não foram consideradas as subpressões na base nem a pressão hidrostática no paramento de jusante, por terem sido de reduzido valor e terem tido pequenas variações no tempo.

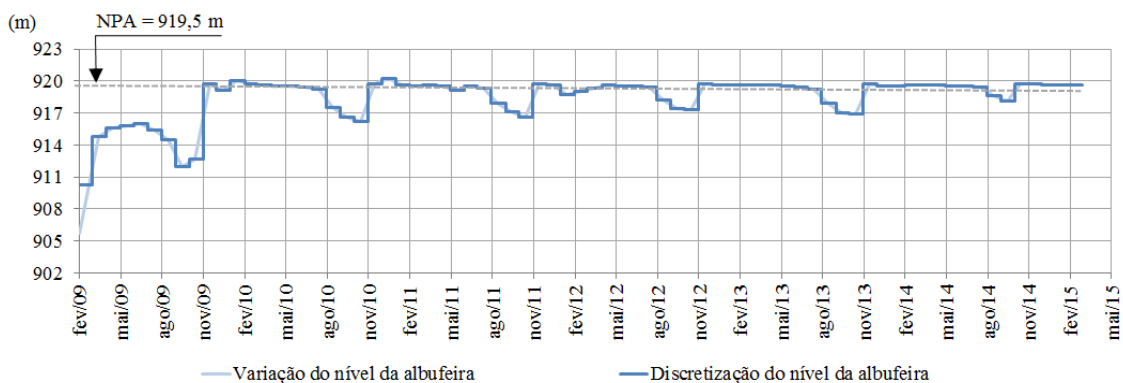


Figura 7. Discretização mensal do nível de água na albufeira.

As ações térmicas foram representadas por ondas sinusoidais de período anual [11] para o ar e a água (Fig. 8). Os parâmetros da onda térmica do ar foram ajustados com base nas temperaturas observadas no local da obra e na barragem de Ranhados (geograficamente próxima e em condições de altitude semelhantes), uma vez que o registo de temperaturas no local da obra era escasso. Relativamente à temperatura da água, foram definidas três curvas de temperatura para diferentes profundidades: i) à superfície; ii) a 10 m de profundidade; e iii) a 20 m de profundidade. A variação de temperatura entre os vários níveis foi admitida linear, considerando-se uma temperatura constante no fundo da albufeira, igual à temperatura média anual da água. Admitiu-se também que a temperatura à superfície da água é igual à temperatura do ar, ao passo que para as profundidades de 10 m e 20 m foram ajustadas ondas

térmicas anuais com base nas temperaturas obtidas a partir das amostras de água recolhidas a diferentes profundidades, nas campanhas realizadas pelo LNEC entre 2009 e 2015 [4].

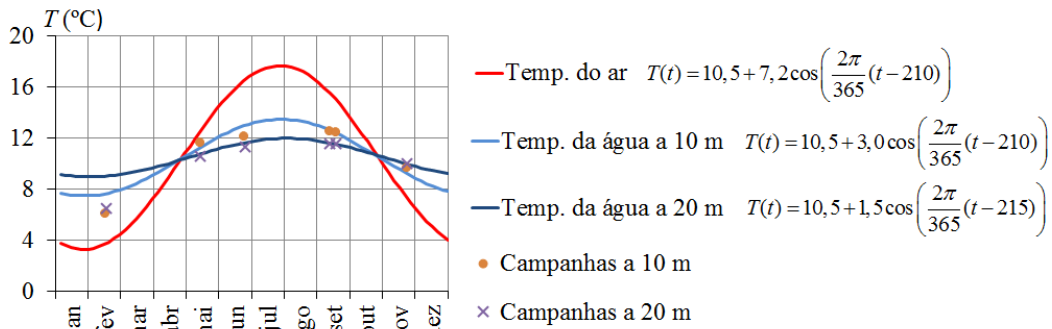


Figura 8. Ondas térmicas anuais consideradas no cálculo térmico, para o ar e para a água, e temperaturas da água medidas nas inspeções realizadas pelo LNEC entre 2009 e 2015.

### 3. INTERPRETAÇÃO DO COMPORTAMENTO OBSERVADO

#### 3.1 Resultados do modelo térmico

O campo térmico no corpo da barragem, no início do primeiro enchimento da albufeira (meados de fevereiro de 2009) foi estimado realizando, previamente, uma análise térmica em regime transiente até se obter uma estabilização das temperaturas. Nesta análise considerou-se a temperatura inicial igual à temperatura média anual do ar.

A distribuição de temperatura no corpo da barragem foi calculada mensalmente, de acordo com a discretização no tempo adotada no período em análise, desde fevereiro de 2009 a fevereiro de 2015. Dado o carácter cíclico da onda térmica anual e a pequena variação do nível de água na albufeira, que se manteve relativamente elevado ao longo do período em análise, os campos térmicos são bastante semelhantes para os sucessivos anos de análise. Reproduzem-se na Fig. 9 os resultados do cálculo, considerando a albufeira no nível de pleno armazenamento, em 15 de março e 15 de setembro.

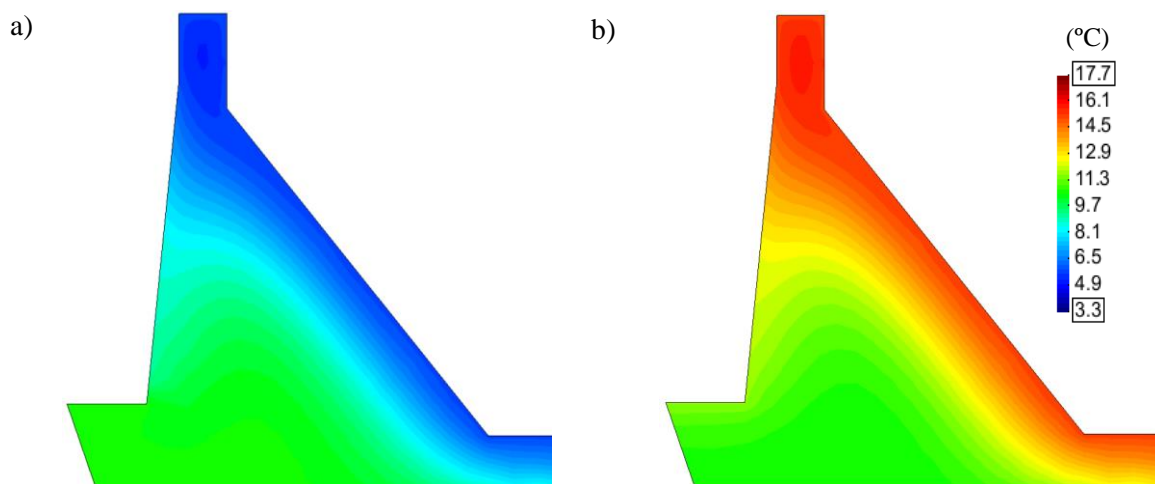


Figura 9. Distribuição de temperaturas no corpo da barragem na fase de exploração: a) em 15 de setembro; e b) em 15 de março.

A distribuição de temperaturas obtidas com o modelo térmico, ao longo do período em análise, permitiu calcular as variações de temperatura usadas no modelo estrutural, em todos os pontos nodais de discretização do corpo da barragem, para cada intervalo de tempo.

### 3.2 Resultados do modelo estrutural e interpretação das grandezas observadas

Os resultados obtidos na modelação estrutural permitiram interpretar os principais resultados da observação.

Na Fig. 10 representam-se os deslocamentos horizontais na direção montante-jusante num ponto correspondente à base de leitura do fio de prumo à cota 923,30 m, observados e calculados, entre fevereiro de 2009 e fevereiro de 2015. No gráfico superior da Fig. 10 comparam-se os valores observados com os calculados considerando a ação conjunta do peso próprio, pressão hidrostática e variações de temperatura, bem como os efeitos diferidos (fluência e relaxação), e no gráfico inferior apresentam-se os mesmos efeitos considerados separadamente, o que permite avaliar o peso relativo de cada efeito na resposta da barragem.

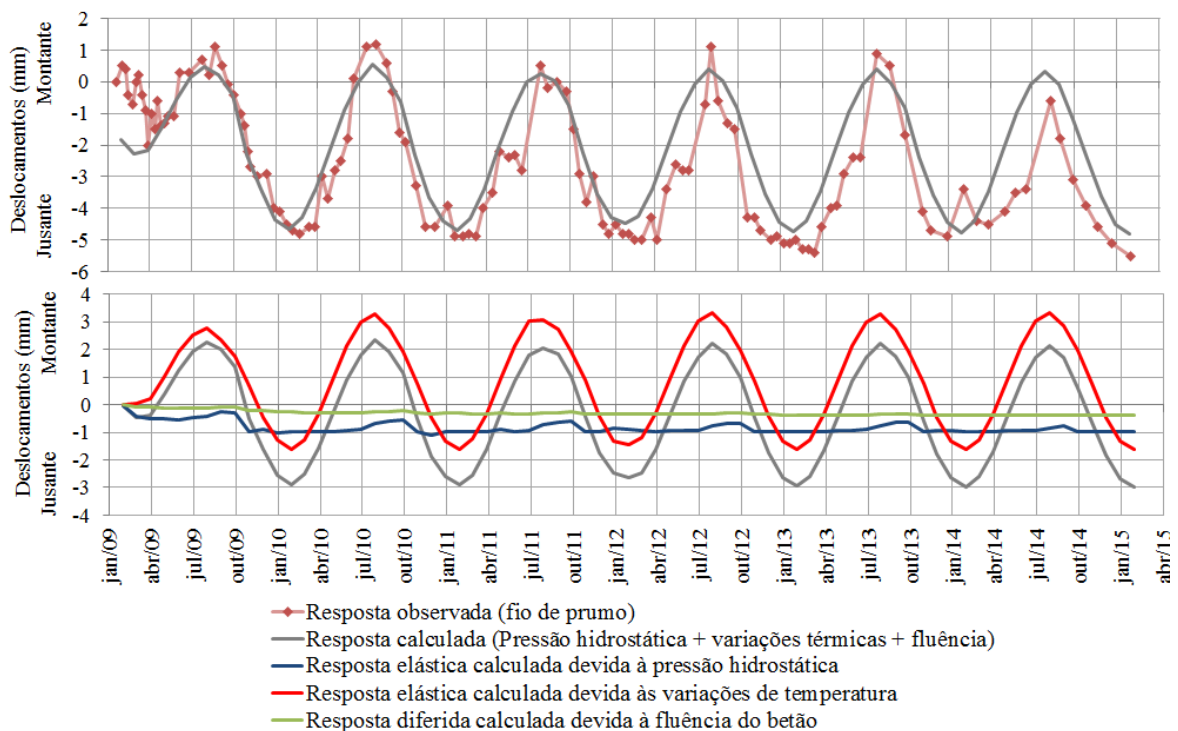


Figura 10. Deslocamentos horizontais na direção montante-jusante, observados e calculados, no ponto à cota 923,30 m, correspondente à fixação do fio de prumo direito.

Verifica-se que existe, globalmente, um bom ajuste entre os valores observados e calculados, sendo os valores calculados ligeiramente inferiores aos observados. Esta diferença, que em algumas épocas é significativa, pode dever-se à ocorrência, em alguns períodos de tempo, de temperaturas maiores no verão e menores no inverno que as simuladas pelas ondas térmicas anuais do ar e da água. Por outro lado, o ponto em observação à cota 923,30 m localiza-se relativamente próximo das superfícies exteriores (no pilar do descarregador), podendo por essa razão sofrer também influência significativa da onda térmica diária. A título de exemplo, deve referir-se que nos meses de verão as temperaturas máximas diárias podem atingir 30 °C, enquanto que o valor máximo da onda térmica anual do ar considerada no modelo numérico é de 18,7 °C.

Verifica-se que deslocamentos devidos às variações térmicas são a parcela dominante, com uma amplitude de cerca de 5,0 mm, seguida dos efeitos elásticos devidos à pressão hidrostática, com cerca de 1,0 mm de deslocamento para jusante, em situação de albufeira cheia, sendo a resposta diferida de menor valor, cerca de 0,4 mm em fevereiro de 2015.



#### 4. AVALIAÇÃO DO ESTADO DE TENSÃO

Na Fig. 11-a) representam-se as tensões principais na barragem devidas às ações do peso próprio do betão, pressão hidrostática ( $h=919,50$  m) e variações de temperatura anuais máximas positivas. No perfil da barragem verifica-se que os paramentos se encontram comprimidos e o núcleo tracionado, o que é consistente com os gradientes térmicos que ocorrem na direção montante-jusante, que são reduzidos no núcleo e muito significativos junto aos paramentos. Deste facto decorre que, em época quente, os paramentos tendem a dilatar mais que o núcleo, o que resulta em tensões de compressão nos paramentos e de tração no núcleo. No núcleo as tensões de tração máximas calculadas são aproximadamente verticais, com valores de cerca 0,9 MPa, enquanto junto aos paramentos as tensões de compressão são aproximadamente paralelas aos paramentos, com valores máximos de 3,3 MPa e 1,3 MPa junto ao pé de jusante e de montante, respetivamente. Ao longo do desenvolvimento da obra (perpendicularmente ao perfil da barragem) geram-se tensões de compressão horizontais, que têm valores significativos juntos aos paramentos. As tensões junto ao paramento de montante são menores que junto ao paramento de jusante, pois está sujeito a menores variações de temperatura (por estar submerso). As compressões máximas localizam-se junto ao pé de jusante e também junto à superfície do descarregador, tendo valores de cerca de 4,0 MPa. Na Fig. 11 a magnitude das tensões perpendiculares ao plano do perfil é representada, esquematicamente, pelo tamanho dos círculos.

Na Fig. 11-b) representam-se as tensões principais na barragem devidas às ações do peso próprio do betão, pressão hidrostática ( $h=919,50$  m) e variações de temperatura anuais máximas negativas. Tendo em conta a simetria teórica das ondas térmicas do ar e da água e que o efeito das variações térmicas é dominante no comportamento estrutural da barragem, o campo de tensões apresentado na Fig. 11-b é aproximadamente simétrico (intensidade semelhante mas de sinal contrário) relativamente ao apresentado na Fig. 11-a, tendo-se calculado, junto aos paramentos, com direção paralela aos mesmos, tensões de tração com valores significativos, com máximos de 2,5 MPa junto ao pé de jusante e de 1,3 MPa junto ao pé de montante. No núcleo da barragem as tensões são de compressão, com valores máximos de 1,1 MPa.

Como foi utilizado um modelo estrutural contínuo e homogéneo da barragem, as tensões horizontais calculadas na direção longitudinal da barragem, junto aos paramentos de jusante e de montante, provocadas pelas variações de temperatura anuais máximas negativas, são de tração, com valores máximos que chegam a atingir 4,0 MPa. Contudo, estas tensões não podem ocorrer em obra, uma vez que os blocos podem contrair na direção longitudinal praticamente sem restrição, devido à existência das juntas verticais de contração.

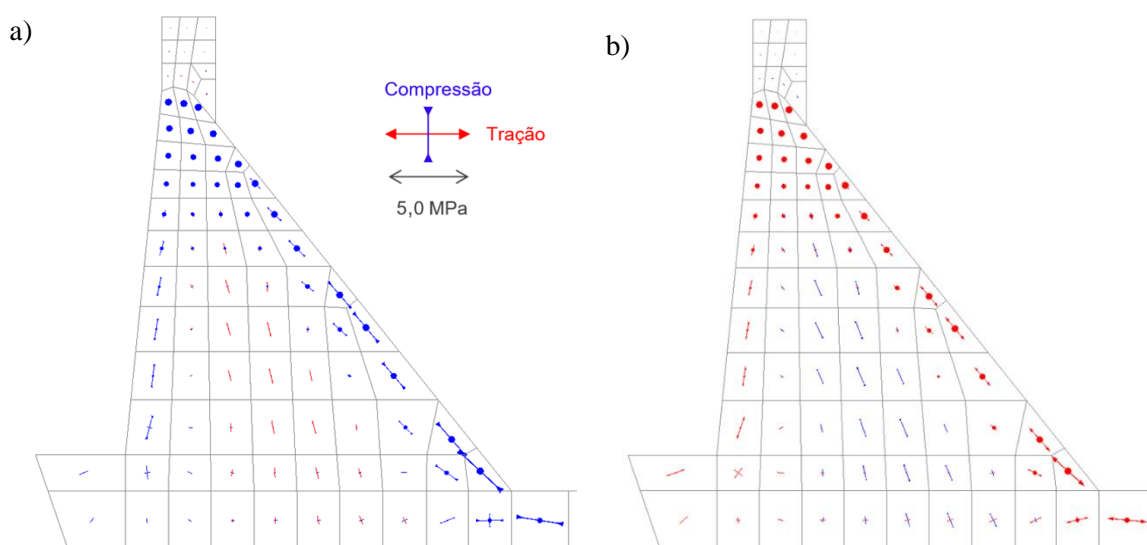


Figura 11. Tensões principais no perfil da barragem devidas às ações do peso próprio do betão, à pressão hidrostática ( $h=919,50$  m) e às: a) variações de temperatura anuais máximas positivas; e b) variações de temperatura anuais máximas negativas.

## **5. CONCLUSÕES**

As metodologias numéricas utilizadas para interpretar o comportamento estrutural da barragem de Pretarouca durante o primeiro enchimento da albufeira e primeiro período de exploração revelaram-se adequadas aos fins em vista, nomeadamente na consideração dos efeitos instantâneos e diferidos das principais solicitações que atuam sobre a barragem, designadamente o peso próprio, a pressão hidrostática e as variações de temperatura.

Os resultados da observação da barragem durante o primeiro enchimento da albufeira e nos sete anos seguintes de exploração, interpretados com apoio em modelos matemáticos desenvolvidos e calibrados para o efeito, permitem afirmar que o comportamento da obra foi globalmente satisfatório, existindo uma boa concordância entre grandezas observadas e calculadas. O comportamento da obra tem sido condicionado, essencialmente, pelas ações térmicas ambientais, designadamente no que respeita aos deslocamentos absolutos e relativos da estrutura e aos campos de tensões.

Os campos de tensões calculados permitem estabelecer as envolventes que podem ocorrer na barragem. As tensões de compressão são de valor relativamente reduzido, tendo valores máximos generalizados de cerca de 4,0 MPa na direção longitudinal (desenvolvimento da obra). No perfil da barragem foram calculadas tensões máximas de tração de cerca de 0,9 MPa no núcleo e de 2,5 MPa junto ao pé de jusante. Este último valor, embora seja significativo, é menor que a resistência média à tração do betão (entre 3,5 MPa e 4,5 MPa, obtida em ensaios realizados no LNEC), pelo que o risco de fendilhação é reduzido.

## **REFERÊNCIAS**

- [1] CENOR (2006). Barragem de Pretarouca. Projeto de execução. Lisboa.
- [2] CIMPOR BETÃO (2007). Barragem de Pretarouca. Estudo de composição de betão nº 02/07.
- [3] LNEC (2007). Barragem de Pretarouca. Planos de observação e de primeiro enchimento da albufeira. Relatório 399/2007, Lisboa.
- [4] LNEC (2016). Barragem de Pretarouca. Análise e interpretação do comportamento observado durante o primeiro enchimento da albufeira e o primeiro período de exploração. Relatório 311/2017, Lisboa.
- [5] Lawrence, K. L. (2012). ANSYS Workbench Tutorial Release 14. SDC Publications, Arlington, ISBN 978-1-58503-754-4.
- [6] Oliveira, S. B. M. (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] Azenha, M.; Faria, R.; Ferreira, D. (2008). Monitorização e simulação numérica do processo construtivo de uma barragem gravidade de betão. Encontro Nacional Betão Estrutural - BE2008, Guimarães.
- [8] Batista, A.L. (1998). Análise do comportamento ao longo do tempo de barragens abóbada. Tese de doutoramento, Instituto Superior Técnico (IST), Lisboa.
- [9] Pereira, R.; Batista, A.L.; Neves, L.C. (2016). Quantificação das propriedades estruturais do betão de barragens. Parte 1 – Caracterização probabilística das propriedades potenciais a partir de resultados de ensaios. Encontro Nacional Betão Estrutural - BE2016, Coimbra.
- [10] Pereira, R.; Batista, A.L.; Neves, L.C. (2016). Quantificação das propriedades estruturais do betão de barragens. Parte 2 – Estimativa das propriedades reais a partir das propriedades potenciais. Encontro Nacional Betão Estrutural - BE2016, Coimbra.
- [11] Silveira, A. F. (1961). As variações de temperatura nas barragens. Memória nº 177, LNEC.