

## **Análise e interpretação do comportamento observado das barragens de Ferradosa e Olgas durante o primeiro enchimento da albufeira e nos primeiros 10 anos de exploração**

**Ivo Figueiredo Dias**

*Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa, Portugal, idias@lnec.pt*

**António Lopes Batista**

*Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa, Portugal, a.l.batista@lnec.pt*

**José António Boal Paixão**

*Águas do Norte (AdN), Vila Real, Portugal, j.paixao@adp.pt*

### **Resumo**

As barragens de Ferradosa e Olgas, localizadas no Alto Douro, nos concelhos de Freixo de Espada à Cinta e Moncorvo, respetivamente, foram construídas entre 2007 e 2009. São estruturas gravidade de betão com cerca de 30 m de altura. A água das respetivas albufeiras destina-se ao abastecimento público, sendo exploradas 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 das barragens durante o primeiro enchimento da albufeira e os primeiros 10 anos de exploração.

Na análise estrutural consideraram-se modelos planos de elementos finitos das barragens e respetivas fundações, o comportamento viscoelástico dos materiais, a variação das ações da água e as variações térmicas no betão das obras.

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

**Palavras-chave:** Barragem da Ferradosa; Barragem de Olgas; Primeiro enchimento da albufeira; Primeiro período de exploração; Observação; Método dos elementos finitos

## 1 CARACTERÍSTICAS DAS BARRAGENS DA FERRADOSA E OLGAS

As barragens de Ferradosa e Olgas, localizadas no Alto Douro, nos concelhos de Freixo de Espada à Cinta e Torre de Moncorvo, respetivamente, foram construídas entre 2007 e 2009. A água das respetivas albufeiras destina-se ao abastecimento público, sendo exploradas pela empresa Águas do Norte, do grupo Águas de Portugal.

As duas barragens são de betão, do tipo gravidade (Fig. 1). Têm características estruturais muito semelhantes, tendo sido projetadas pelo gabinete CENOR (Ferradosa em 2005 e Olgas em 2006) [1,2]. Têm eixo com uma ligeira curvatura em planta (raio de 200 m) e os paramentos de jusante e de montante são inclinados, com jorramentos de 0,80:1 (H:V) e 0,10:1 (H:V), respetivamente. As juntas de contração, verticais, são endentadas.

As barragens têm descarregadores de cheias de conceção similar, do tipo Creager, inscritos na zona central, com dois vãos desprovidos de comportas. A soleira de descarga é em degraus, sobre o paramento de jusante, terminando em bacia de dissipação com revestimento de betão.

Barragem da Ferradosa (foto de março de 2010)



Barragem de Olgas (foto de janeiro de 2010)

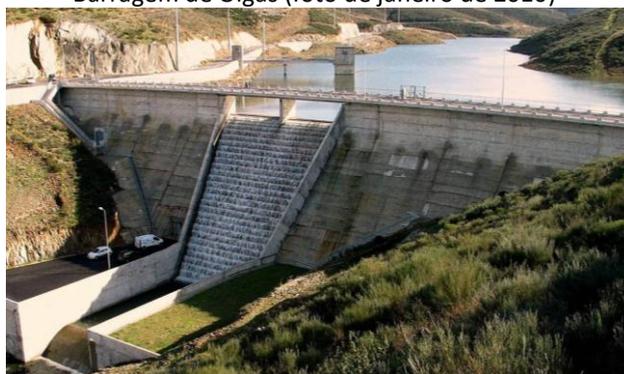


Figura 1. Vistas de jusante das barragens da Ferradosa e Olgas, após o primeiro enchimento das respetivas albufeiras, com os descarregadores em funcionamento

A barragem da Ferradosa, na ribeira com esse nome, tem 34,40 m de altura e coroamento com 121 m de desenvolvimento, à cota teórica de 531,50 m. É formada por 9 blocos (Fig. 2). O volume de betão da barragem é de cerca de 34200 m<sup>3</sup>. O maciço rochoso de fundação é constituído por xistos ardosíferos. A construção foi realizada, entre 2006 e 2008, pela empresa Mota-Engil.

A barragem de Olgas, na ribeira do Arroio (junto à confluência da ribeira de Olgas), tem 35,75 m de altura e coroamento com 122,5 de desenvolvimento, à cota teórica de 385,00 m. É formada por 10 blocos (Fig. 3). O volume de betão da barragem é de cerca de 30300 m<sup>3</sup>. O maciço rochoso de fundação é constituído por uma alternância de camadas de filitos (xistos) e de metagrauvaques. A construção foi realizada, entre finais de 2006 e o início de 2009, pelo consórcio Conduril - Ramalho Rosa Cobetar.

Os sistemas de observação instalados nas barragens permitem a monitorização de: i) nível da água na albufeira; ii) temperatura e humidade relativa do ar; iii) deslocamentos horizontais na zona central, com fios de prumo; iv) deslocamentos verticais (nivelamento do coroamento e extensómetros de fundação); v) movimentos das juntas entre blocos, em bases tridimensionais; e vi) subpressões, em piezómetros de câmara única. Os caudais drenados e infiltrados são quantificados em drenos da fundação e bicas totalizadoras [3,4].

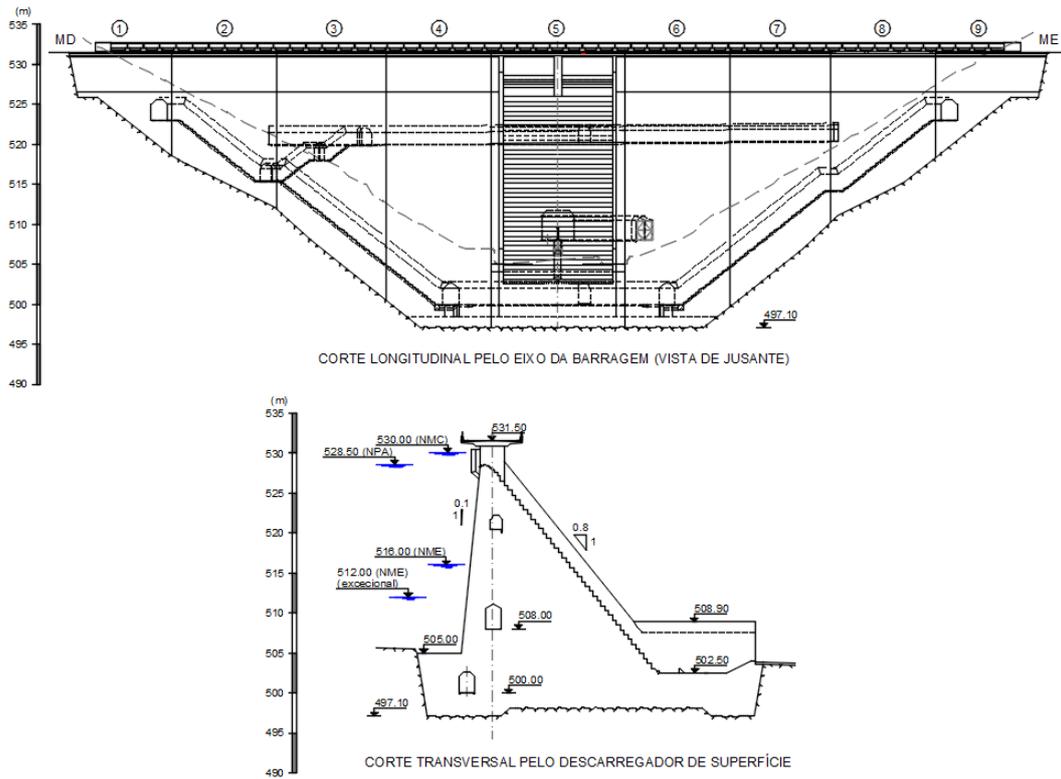


Figura 2. Barragem da Ferradosa. Alçado planificado de jusante e corte transversal pelo descarregador de superfície

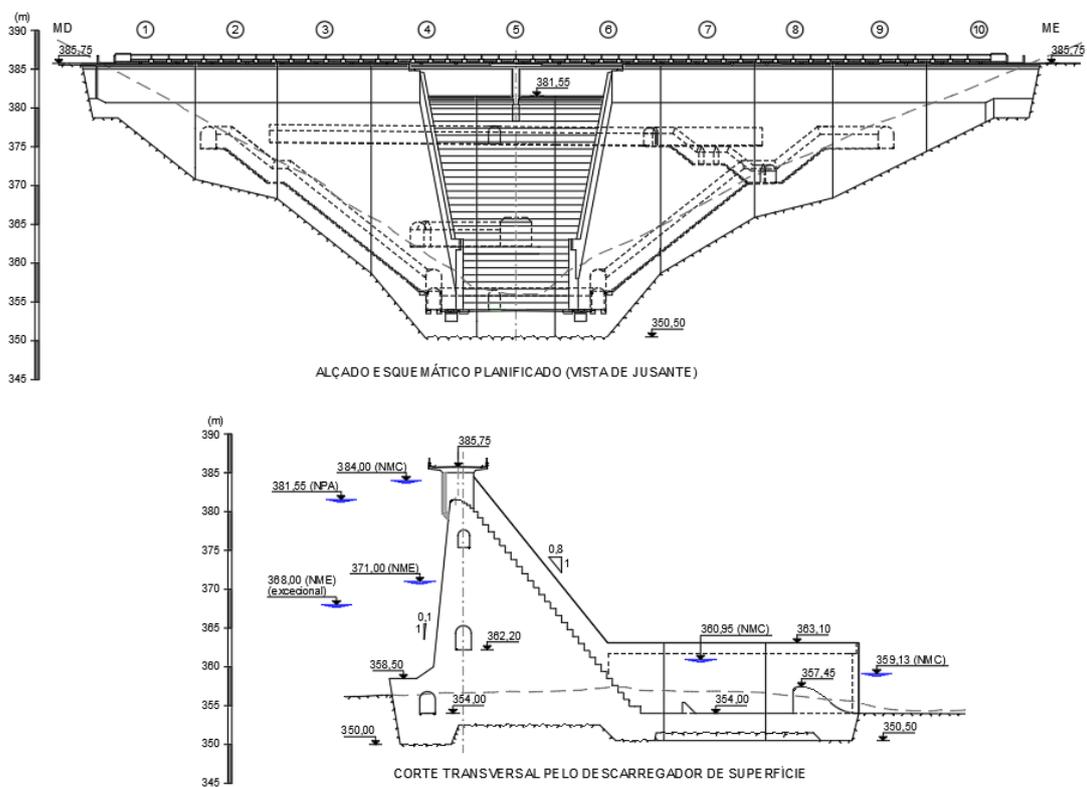


Figura 3. Barragem de Olgas. Alçado planificado de jusante e corte transversal pelo descarregador de superfície

## 2 ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DO COMPORTAMENTO OBSERVADO

### 2.1 Modelos de elementos finitos

A interpretação do comportamento observado das barragens foi realizada com o apoio de modelos numéricos de elementos finitos do conjunto barragem-fundação [5,6], tanto na vertente térmica como na estrutural.

Tendo em conta que a curvatura das barragens em planta é pequena e que as ações têm efeitos predominantes no plano do perfil, a análise estrutural foi realizada considerando os modelos em estado plano de deformação do troço central das obras, tendo o pilar do descarregador de superfície sido considerado em estado plano de tensão. A análise térmica foi também realizada no plano do perfil da obra, considerando os gradientes térmicos na direção montante-jusante.

Na Fig. 4 apresentam-se perspectivas das malhas de elementos finitos utilizadas nas análises térmicas e estruturais. As discretizações foram realizadas considerando elementos finitos tridimensionais do tipo cubo, isoparamétricos do segundo grau, com 20 pontos nodais nos vértices e a meio das arestas. A malha da barragem da Ferradosa é constituída por 2052 pontos nodais e 262 elementos finitos, sendo 117 relativos ao perfil gravidade, 17 do pilar do descarregador e 128 do maciço de fundação. No caso da barragem de Olgas, a malha é formada por 1726 pontos nodais e 219 elementos finitos, sendo 99 do perfil gravidade, 15 do pilar do descarregador e 105 do maciço de fundação.

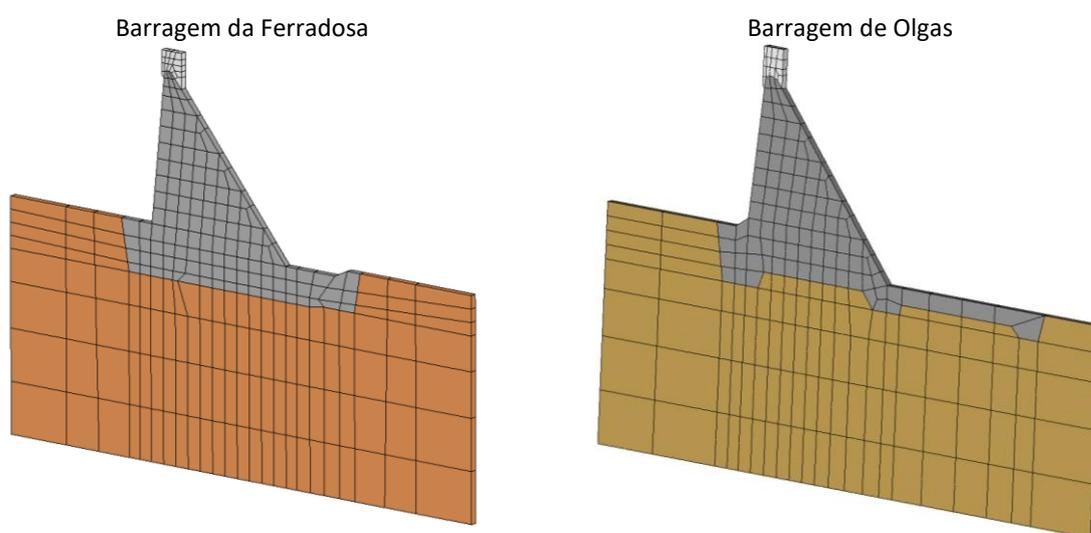


Figura 4. Barragens da Ferradosa e de Olgas. Perspetiva das malhas de elementos finitos (elementos da fundação a castanho, elementos do perfil gravidade a cinzento escuro e elementos do pilar do descarregador a cinzento claro)

#### 2.1.1 Modelação térmica

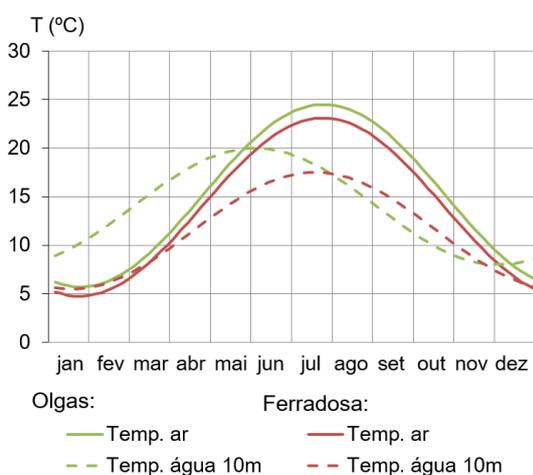
Os modelos térmicos foram analisados em regime transiente, tendo sido utilizado um programa de análise térmica desenvolvido no LNEC [7], baseado no método de elementos finitos, que permitiu obter a distribuição de temperaturas no corpo das barragens, ao longo do tempo, de acordo com a discretização quinzenal adotada.

As ações térmicas foram representadas no modelo através de funções harmónicas de período anual, com a forma da equação (1), tendo os parâmetros das curvas sido ajustados, através do método dos mínimos quadrados, a partir das temperaturas observadas no local das obras.

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

Na equação anterior  $T_m$  representa a temperatura média anual,  $t$  é o tempo em dias decorrido desde o início do ano e  $S_a$  e  $\phi$  são, respetivamente, a semi-amplitude e o número de dias após o início do ano até à data correspondente ao máximo da temperatura anual.

Na Fig. 5 apresentam-se as curvas obtidas para a temperatura do ar e da água a 10 m de profundidade, verificando-se que na barragem de Olgas, que está implantada a uma cota inferior, as temperaturas médias e as semi-amplitudes são ligeiramente superiores.



Barragem	Meio	$T_m$ (°C)	$S_a$ (°C)	$\phi$ (dias)
Olgas	Ar	15,1	9,4	206,7
	Água (10 m)	14,0	6,0	155,0
Ferradosa	Ar	13,9	9,2	206,1
	Água (10 m)	11,5	5,9	200,0

Figura 5. Ondas térmicas anuais consideradas no cálculo térmico, para o ar e para a água a 10 m de profundidade

Nas superfícies exteriores das barragens em contacto com o ar foram consideradas transferências de calor sob a forma de convecção (condições de Neumann), enquanto que aos pontos nodais das superfícies em contacto com a água foi atribuída diretamente a temperatura da água (condições de fronteira de Dirichlet).

A estimativa da difusibilidade térmica do betão foi feita a partir da média ponderada dos valores de referência da mesma grandeza para os seus constituintes, tendo sido obtido o valor de  $0,13 \text{ m}^2\text{dia}^{-1}$  para os betões das duas barragens. O coeficiente de convecção foi considerado igual a  $25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .

### 2.1.2 Modelação estrutural

Para garantir as condições de estado plano de deformação do corpo das barragens e das respetivas fundações, foram impedidos os deslocamentos normais nas duas superfícies verticais de fronteira, paralelas ao perfil das barragens. O pilar do descarregador foi deixado livre, para simular o estado plano de tensão. Nas restantes fronteiras planas, que limitam lateralmente e inferiormente os modelos, foram impostos deslocamentos nulos na direção normal às duas fronteiras verticais perpendiculares aos perfis das barragens e nas três direções na fronteira horizontal inferior.

Os modelos estruturais foram resolvidos com um programa de cálculo automático desenvolvido no LNEC [8], tendo sido consideradas na análise ao longo do tempo as ações correspondentes ao peso próprio do betão, à pressão hidrostática sobre os paramentos de montante, de acordo com nível de água nas albufeiras (Figs 8 e 11), e as distribuições de temperatura no corpo das barragens, calculadas com os modelos térmicos.

Para ter em consideração os efeitos diferidos do betão foi usado um modelo constitutivo viscoelástico, considerando a lei de fluência de Bazant e Panula [9],

$$J(t, t_0) = \frac{1}{E_0} (1 + \varphi_1(t_0^{-m} + \alpha)(t - t_0)^n) \quad (GPa^{-1}) \quad (1)$$

em que  $t_0$  representa o tempo de aplicação das cargas e  $E_0$ ,  $\varphi_1$ ,  $m$ ,  $\alpha$  e  $n$  são parâmetros dependentes das características intrínsecas do betão (Tabela 1), que foram estimados a partir do valor da resistência à compressão dos betões [4,5]. Para o coeficiente de Poisson foi usado um valor 0,2 para o betão de ambas as barragens.

Tabela 1. Parâmetros da função de fluência de Bazant e Panula

Barragem	$E_0$	$\varphi_1$	$\alpha$	$m$	$n$
Ferradosa	45	4,2	0,04	0,39	0,12
Olgas	55	2,9	0,05	0,33	0,13

Na Fig. 6 representa-se graficamente as funções de fluência para duas idades de carga (6 meses e 5 anos), a evolução do módulo de elasticidade estimada e os resultados dos ensaios para determinação do módulo de elasticidade em compressão realizados no LNEC, verificando-se que o betão aplicado na barragem de Olgas é mais rígido do que o usado na barragem da Ferradosa.

Os maciços rochosos de fundação das barragens foram considerados homogêneos e isotrópicos, com comportamento elástico linear caracterizado pelo módulo de elasticidade estático  $E_f = 20$  GPa e pelo coeficiente de Poisson  $\nu_f = 0,2$ .

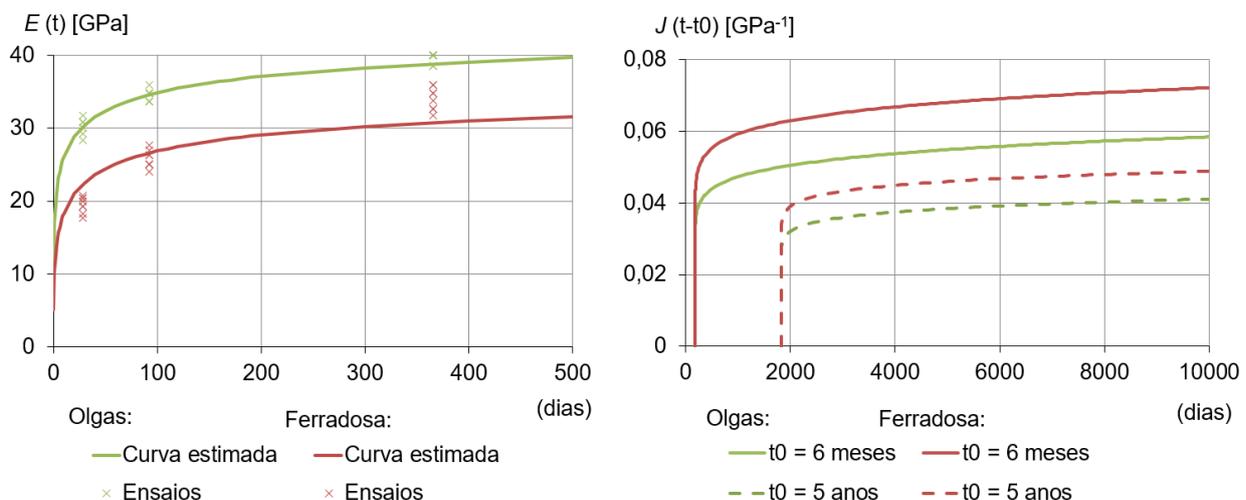


Figura 6. Evolução estimada dos módulos de elasticidade e resultados dos ensaios laboratoriais (à esquerda) e funções de fluência de Bazant e Panula (à direita)

## 2.2 Resultados da análise da barragem da Ferradosa

### 2.2.1 Análise térmica

A distribuição de temperatura no corpo da barragem foi calculada quinzenalmente desde julho de 2008 a junho de 2018. Na Fig. 7 apresentam-se as distribuições de temperatura obtidas em épocas fria e quente, a 15 de janeiro e 15 de julho de 2017, respetivamente.

Verifica-se, genericamente, que as zonas próximas do núcleo da barragem, devido à sua inércia térmica, têm temperaturas que variam pouco ao longo do tempo, sendo próximas da temperatura média anual do ar (13,9 °C), enquanto que as zonas mais próximas dos paramentos sofrem grandes gradientes térmicos ao longo do ano, acompanhando as ondas térmicas do ar e da água. O paramento de montante, estando submerso durante a maior parte do ano, sofre variações de temperatura menos acentuadas que o de jusante.

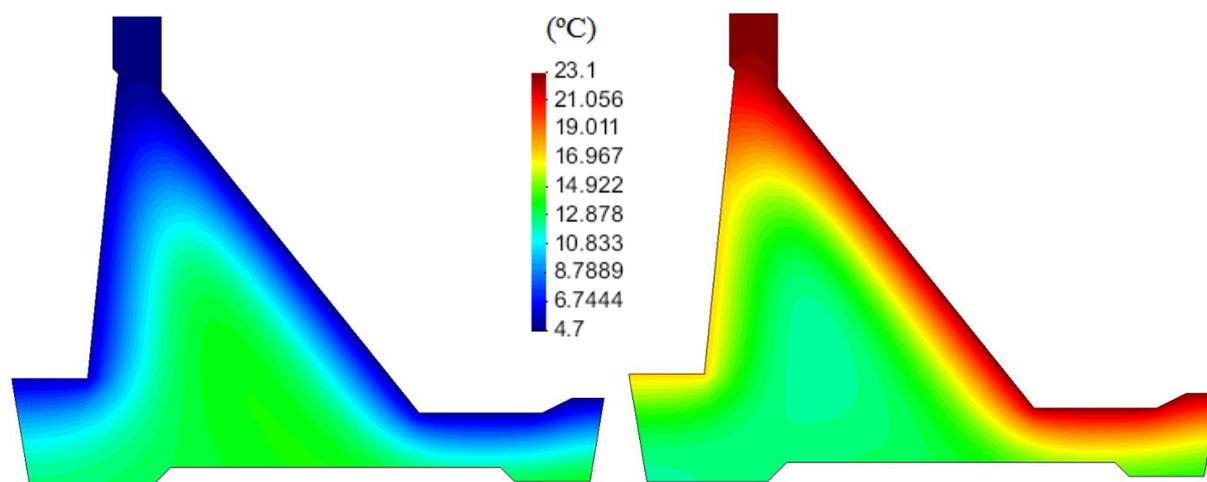


Figura 7. Barragem da Ferradosa. Distribuição de temperaturas no perfil da barragem em 15 de janeiro de 2017 (à esquerda) e em 15 de julho de 2017 (à direita)

### 2.2.2 Análise estrutural

Na Fig. 8 apresentam-se a evolução do nível da albufeira e os deslocamentos horizontais na direção montante-jusante, calculados e observados, no ponto correspondente à fixação do fio de prumo à cota 531,00 m, entre meados de agosto de 2008, data de entrada em funcionamento do fio de prumo, e maio de 2018, fazendo-se também a representação separada dos vários efeitos.

Verifica-se que existe, globalmente, um bom ajuste entre os valores observados e calculados, sendo que em algumas épocas os valores calculados são ligeiramente inferiores aos observados. Esta diferença pode dever-se à ocorrência, em alguns períodos de tempo, de temperaturas maiores no verão e menores no inverno do que as simuladas pelas ondas térmicas anuais do ar e da água.

Os deslocamentos devidos às variações térmicas são a parcela dominante, com uma amplitude de cerca de 4,8 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 0,33 mm no final de maio de 2018.

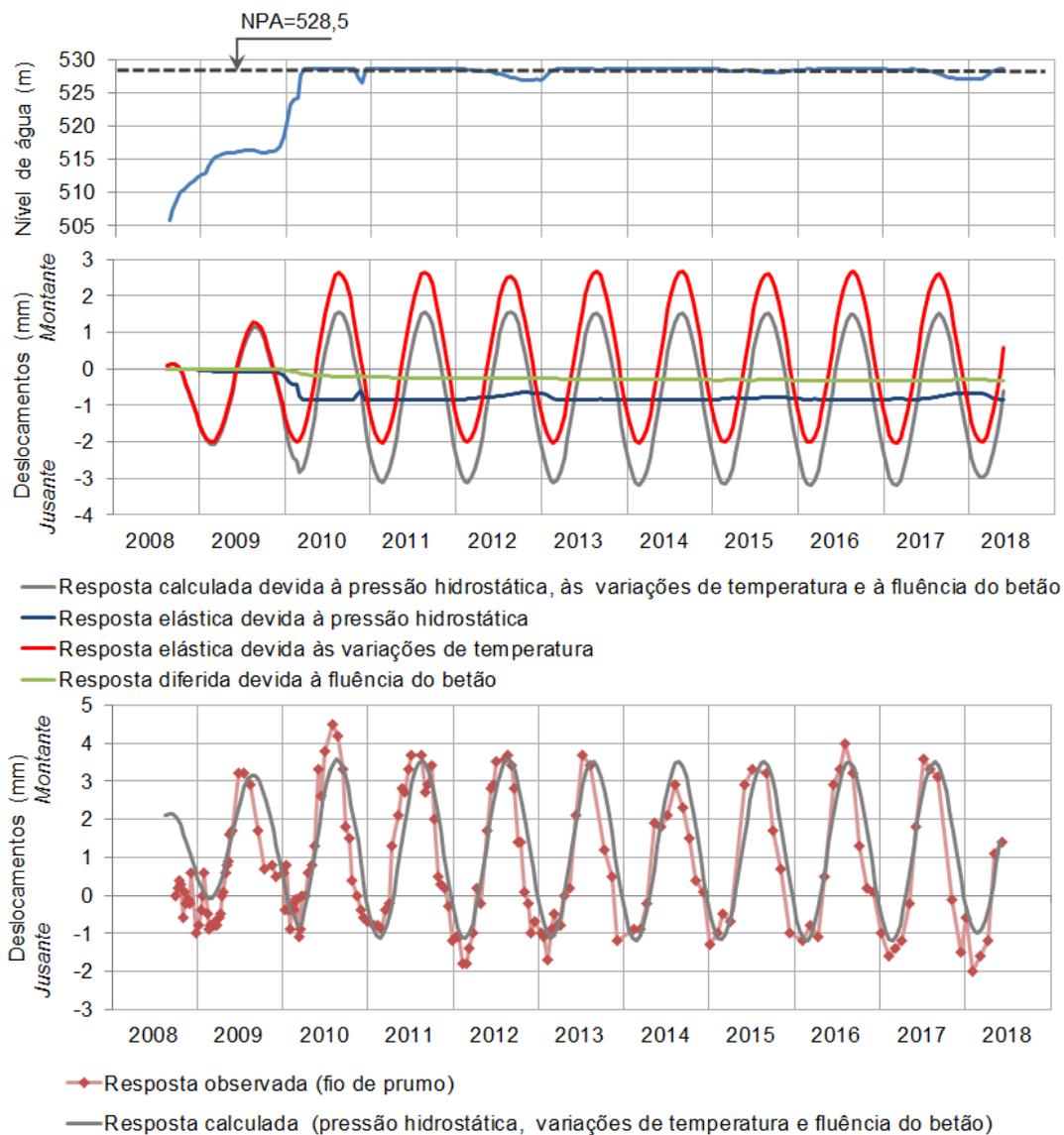


Figura 8. Barragem da Ferradosa. Deslocamentos horizontais calculados e observados na direção montante-jusante no ponto correspondente à fixação do fio de prumo direito à cota 531,00 m

Na Fig. 9 representam-se as tensões principais na barragem devidas às ações do peso próprio do betão, pressão hidrostática ( $h=528,50$  m) e às variações de temperatura anuais máximas positivas. Refere-se que a componente devida às variações térmicas é dominante.

Verifica-se que os paramentos se encontram comprimidos e o núcleo tracionado. No núcleo as tensões de tração máximas são aproximadamente verticais, com valores de cerca 1,7 MPa, enquanto junto aos paramentos as tensões de compressão são aproximadamente paralelas aos paramentos, com valores máximos de 4,8 MPa e 3,0 MPa junto ao pé de jusante e de montante, respetivamente. Na direção do desenvolvimento da obra (perpendicularmente ao perfil da barragem) geram-se tensões de compressão horizontais, uma vez que os deslocamentos estão impedidos nesta direção, que têm valores significativos junto aos paramentos, tendo valores máximos de cerca de 5,2 MPa junto ao pé de jusante e também junto à superfície do descarregador (a magnitude das tensões perpendiculares ao plano do perfil é representada, esquematicamente, pelo tamanho dos círculos).

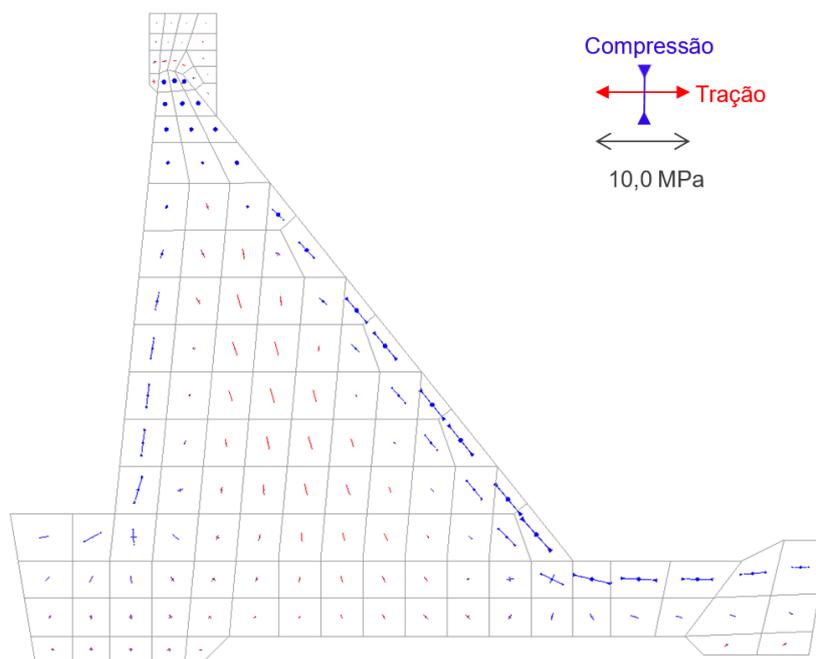


Figura 9. Barragem da Ferradosa. Tensões principais devidas às ações do peso próprio do betão, pressão hidrostática (h=528,50 m) e às variações de temperatura anuais máximas positivas

## 2.3 Resultados da análise da barragem de Olgas

### 2.3.1 Análise térmica

Na Fig. 10 apresentam-se as distribuições de temperatura obtidas em épocas fria e quente, em 15 de janeiro de 2017 e 15 de julho de 2017, respetivamente.

Tal como no caso da barragem da Ferradosa, verifica-se que as temperaturas do núcleo da barragem variam pouco ao longo do tempo, sendo próximas da temperatura média anual do ar (15,1 °C), enquanto que juntos dos paramentos os gradientes térmicos são significativos, acompanhando as ondas térmicas do ar e da água.

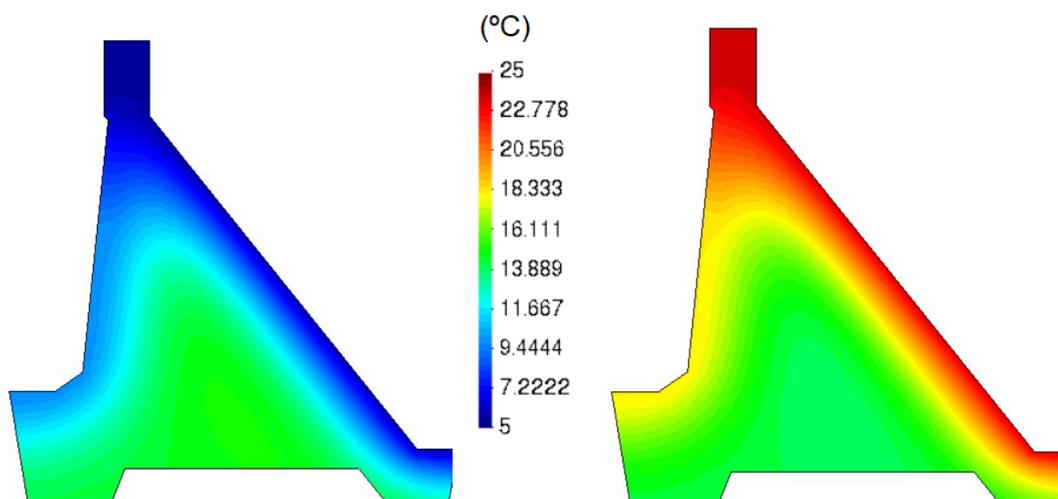


Figura 10. Barragem da Olgas. Distribuição de temperaturas no perfil da barragem em 15 de janeiro de 2017 (à esquerda) e em 15 de julho de 2017 (à direita)

### 2.3.2 Análise estrutural

Na Fig. 11 representam-se os deslocamentos radiais observados e calculados no ponto correspondente à fixação do fio de prumo à cota 385,50 m, entre fevereiro de 2009, data de entrada em funcionamento do fio de prumo, e outubro de 2018, fazendo-se também a representação separada dos vários efeitos e do nível de água da albufeira.

A comparação entre os valores calculados com o modelo e os observados na obra mostra uma boa concordância, sendo os deslocamentos devidos às variações térmicas a parcela dominante, com uma amplitude de cerca de 5,2 mm, seguida dos efeitos elásticos devidos à pressão hidrostática, com cerca de 0,6 mm de deslocamento para jusante, em situação de albufeira cheia. A resposta diferida é de cerca de 0,20 mm, no final de outubro de 2018.

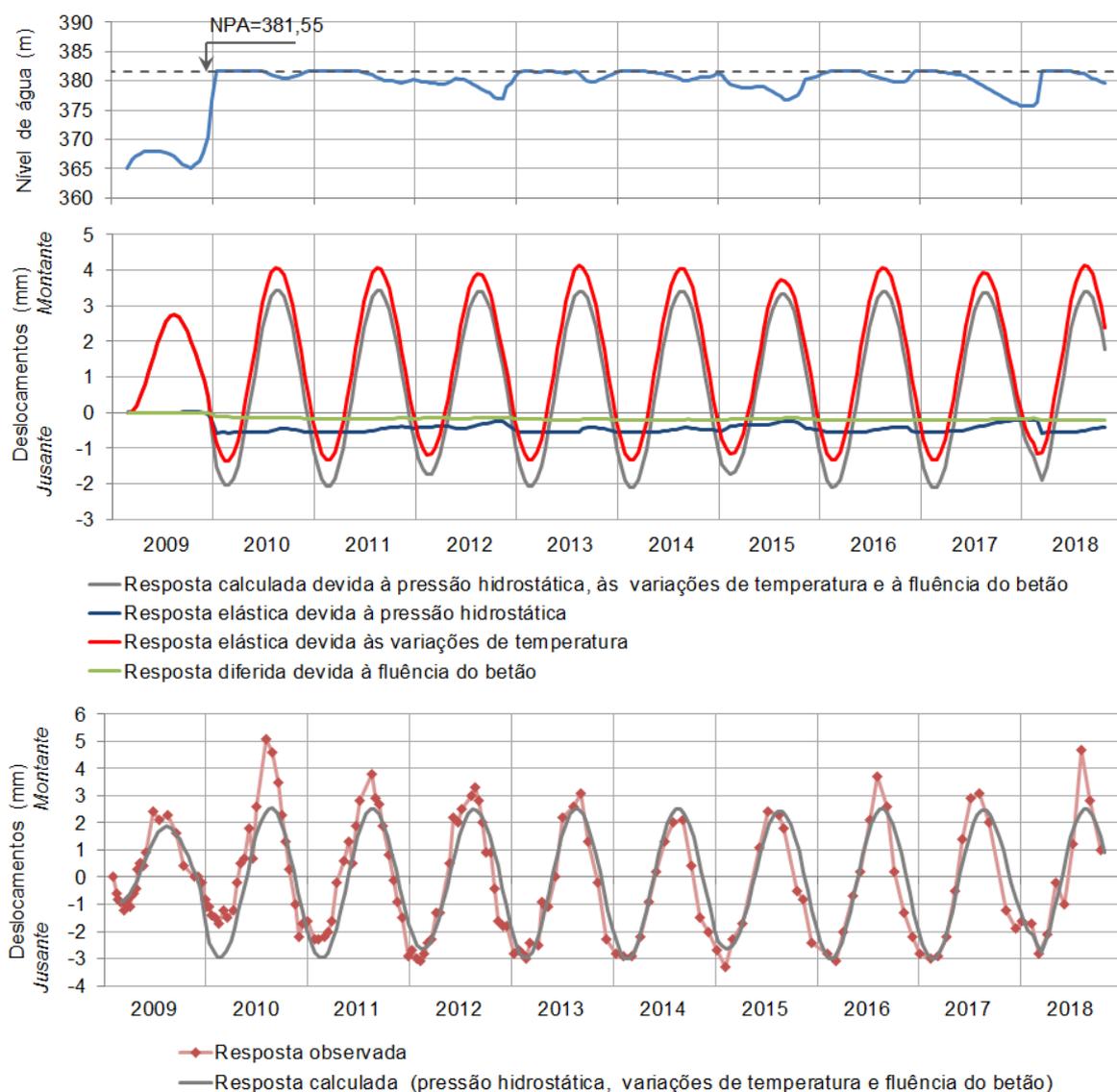


Figura 11. Barragem de Olgas. Deslocamentos horizontais calculados e observados na direção montante-jusante no ponto correspondente à fixação do fio de prumo direito à cota 385,50 m

Na Fig. 12 representam-se as tensões principais na barragem devidas às ações do peso próprio do betão, pressão hidrostática ( $h=381,55$  m) e variações de temperatura anuais máximas positivas.

No núcleo as tensões de tração máximas calculadas são aproximadamente verticais, com valores de cerca 2,0 MPa, enquanto junto aos paramentos as tensões de compressão são aproximadamente paralelas aos paramentos, com valores máximos de 5,3 MPa e 2,9 MPa junto ao pé de jusante e de montante, respetivamente. Na direção do desenvolvimento da obra existem tensões de compressão horizontais que têm valores significativos juntos aos paramentos, sendo máximas junto ao pé de jusante e também junto à superfície do descarregador, com valores de cerca de 6,4 MPa.

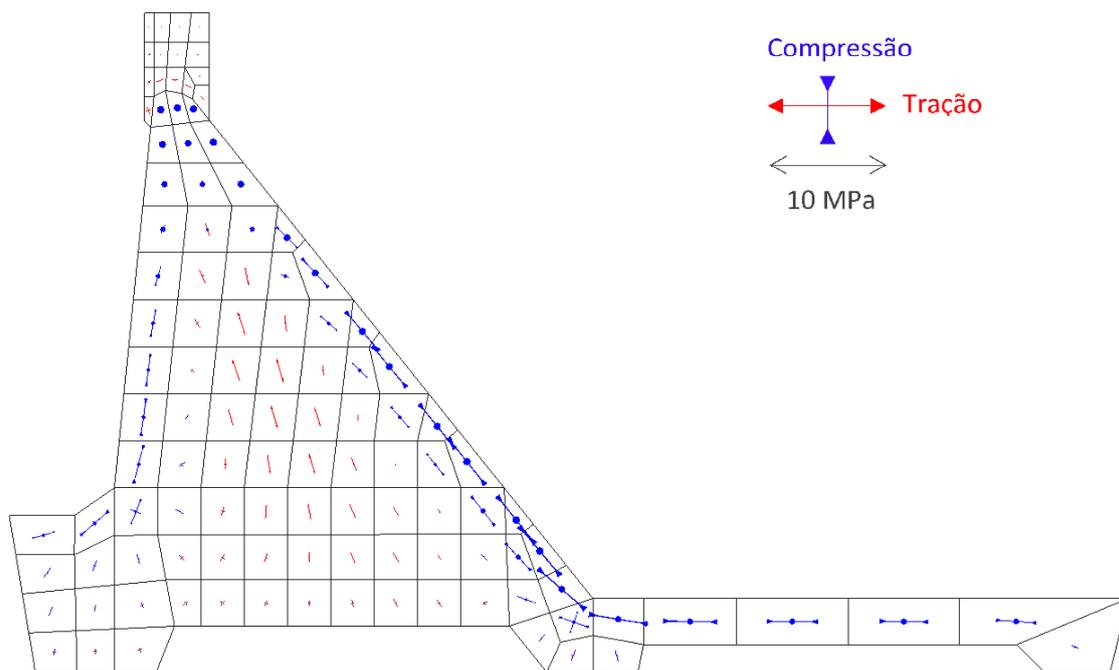


Figura 12. Tensões principais no perfil da barragem devidas às ações do peso próprio do betão, pressão hidrostática ( $h=381,55$  m) e às variações de temperatura anuais máximas positivas

### 3 CONCLUSÕES

As barragens da Ferradosa e Olgas têm vindo a ser exploradas pelo dono de obra, a empresa Águas do Norte, com o apoio do LNEC nos aspetos relacionados com a segurança estrutural.

Os resultados da observação das duas barragens, durante o primeiro enchimento da albufeira e nos dez anos seguintes de exploração, interpretados com apoio em modelos matemáticos desenvolvidos e calibrados para o efeito, permitiram concluir que o comportamento das obras foi globalmente satisfatório, existindo uma boa concordância entre grandezas observadas nas obras e calculadas com os modelos.

Devido às semelhanças geométricas e estruturais das barragens e das principais ações, o comportamento das duas obras é, qualitativamente e quantitativamente, muito semelhante, sendo condicionado, essencialmente, pelas ações térmicas ambientais, tanto em termos dos campos de deslocamentos como dos campos de tensões.

Os deslocamentos observados e calculados no topo dos pilares dos descarregadores têm amplitudes da ordem de 5 mm em ambas as barragens. A parcela devida à pressão hidrostática é menor na barragem da Olgas (cerca de 0,6 mm) do que na barragem da Ferradosa (cerca de 1,0 mm), o que se deve, em grande parte, à maior rigidez do betão da barragem de Olgas. Pela mesma razão, os valores das tensões máximas de compressão são maiores na barragem de Olgas (6,4 MPa) que na barragem da Ferradosa (5,2 MPa). Estas tensões são cerca de um quinto da resistência dos betões à compressão (cerca de 36 MPa e 25 MPa, aos 90 dias de idade, nas barragens de Olgas e Ferradosa, respetivamente) [5,6].

## REFERÊNCIAS

- [1] CENOR (2005). Barragem da Ferradosa. Projecto de execução. Trabalho elaborado para a ATMAD, Lisboa.
- [2] CENOR (2006). Barragem de Olgas. Projecto de execução. Trabalho elaborado para a ATMAD, Lisboa.
- [3] LNEC (2007). Barragem da Ferradosa. Planos de observação e de primeiro enchimento da albufeira. Relatório 212/2007 – DBB/NO.
- [4] LNEC (2007). Barragem de Olgas. Planos de observação e de primeiro enchimento da albufeira. Relatório 318/2007 – DBB/NO.
- [5] LNEC (2018). Barragem da Ferradosa. Análise e interpretação do comportamento observado durante o primeiro enchimento da albufeira e o primeiro período de exploração. Relatório 339/2018 – DBB/NO.
- [6] LNEC (2019). Barragem de Olgas. Análise e interpretação do comportamento observado durante o primeiro enchimento da albufeira e o primeiro período de exploração. Relatório 352/2019 – DBB/NO.
- [7] LNEC (2012). Análise térmica de barragens de betão. Ações térmicas ambientais. Relatório 185/2012 – DBB/NMMF.
- [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, Porto.
- [9] Bazant, Z. P.; Panula, L. (1978). Practical prediction of time-dependent deformations of concrete. *Matériaux et Construction*, 11(5): 307-316.