

## **Análise térmica de barragens de betão em fase de exploração – aplicação à barragem do Alto Rabagão**

**Castilho, E.<sup>1</sup> Monteiro Azevedo, N.<sup>2</sup> Schclar Leitão, N.<sup>3</sup> Braga Farinha, L.<sup>4</sup> Câmara, R.<sup>5</sup>**

### **RESUMO**

Durante a fase de exploração de uma barragem os efeitos da ação térmica podem ter ordem de grandeza equiparável à das restantes solicitações. Assim, e face às suas características de permanência e repetição, a ação térmica condiciona fortemente o comportamento das barragens, particularmente no que se refere à durabilidade do betão. No presente trabalho descreve-se a análise térmica realizada para a barragem do Alto Rabagão, evidenciando os principais aspetos a ter em conta para a simulação desta solicitação. São abordadas algumas questões relativas à simulação das condições térmicas ambientais, nomeadamente a variação das ações climáticas de acordo com a hora do dia e o dia do ano e a simulação da radiação solar. São analisados os resultados obtidos com diferentes discretizações, com o objetivo de avaliar a adequabilidade do refinamento da malha de elementos finitos para o estudo do efeito em causa.

**Palavras-chave:** Ação térmica, Radiação solar, Barragens de betão, Método de Elementos Finitos

### **1. INTRODUÇÃO**

A solicitação térmica em fase de exploração condiciona fortemente o comportamento de uma barragem pois, em determinadas tipologias e circunstâncias, a incidência dos efeitos térmicos sobre a estrutura tem ordem de grandeza equiparável à das restantes solicitações [1]. Assim, a durabilidade do betão é afetada pela ação térmica, a qual assume elevada importância face às suas características de permanência e repetição.

Uma adequada previsão, ao longo do tempo, da temperatura de uma barragem requer o uso de modelos de cálculo adequados. A utilização de modelos numéricos, nomeadamente os baseados no Método dos Elementos Finitos (FEM), possibilita a determinação da distribuição de temperaturas e dos efeitos estruturais resultantes da solicitação térmica. A precisão numérica dos cálculos daí decorrentes depende em grande medida da discretização efetuada. Por este motivo é essencial a adoção de uma malha com grau de refinamento suficiente para a obtenção de resultados representativos para todas as ações a que a estrutura está sujeita. Em particular, deverá ser avaliada a sensibilidade do modelo ao efeito da onda térmica diária, cujo efeito poderá agravar estados de tensão propensos à fissuração junto aos paramentos. A modelação das ações climáticas da localização da barragem é também de extrema importância no que se refere aos resultados decorrentes desta análise. Nas barragens abóbada a análise tridimensional é fundamental, dada a forma da barragem, permitindo considerar o diferencial de temperatura resultante do efeito assimétrico da radiação solar ao longo da curvatura.

---

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

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

<sup>3</sup>Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Estruturas, Lisboa. Portugal. [nshclar@lnecc.pt](mailto:nshclar@lnecc.pt)

<sup>4</sup>Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Barragens de Betão, Lisboa. Portugal. [lbraga@lnecc.pt](mailto:lbraga@lnecc.pt)

<sup>5</sup>Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Barragens de Betão, Lisboa. Portugal. [romano@lnecc.pt](mailto:romano@lnecc.pt)

## 2. ANÁLISE TÉRMICA DE BARRAGENS

As variações de temperatura numa barragem em fase de exploração estão relacionadas com as ações térmicas ambientais. A resposta da barragem, em termos do campo de temperatura, depende das características térmicas do betão e da sua geometria [2]. Assim, e de acordo com Agulló [3], para uma correta previsão do comportamento da obra em fase de exploração deverá proceder-se à caracterização térmica do ambiente em que se encontra a barragem, à sua caracterização geométrica e da localização (azimute e inclinação do paramento, latitude, *etc.*), e, finalmente, à caracterização térmica do betão.

### 2.1 Equações fundamentais

A equação de condução de calor em regime transiente expressa em coordenadas cartesianas escreve-se:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ k \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ k \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ k \frac{\partial T}{\partial z} \right] + G = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

O problema da condução de calor estará completo se forem definidas as apropriadas condições iniciais e de fronteira. Dado que o tempo aparece associado a derivadas de primeira ordem, para resolver (1) basta conhecer a temperatura de todo o domínio  $\Omega$  num determinado instante de tempo. As condições de fronteira podem ser de 2 tipos:

$$\text{Condições de Dirichlet} \quad T = \bar{T} \text{ em } \Gamma_T \quad (2)$$

$$\text{Condições de Neumann} \quad -k \frac{\partial T}{\partial n} = C \text{ em } \Gamma_q \quad (3)$$

Onde  $\bar{T}$  é a temperatura prescrita na parte  $\Gamma_T$  da fronteira;  $C$  é o fluxo de calor prescrita na parte  $\Gamma_q$  da fronteira e  $\vec{n}$  é o vetor normal exterior à superfície do sólido. No caso particular das barragens,  $\Gamma_T$  representa a interface betão-água e  $\bar{T}$  a temperatura da água da albufeira.  $\Gamma_q$  representa as superfícies expostas e  $C = q_c + q_r + q_s$ , com  $q_c$  o fluxo de calor devido à convecção,  $q_r$  o fluxo de calor devido à radiação e  $q_s$  corresponde ao fluxo da radiação solar.

A velocidade do vento e a temperatura do ar contribuem para a troca de calor, entre a superfície da barragem e o ar, por convecção. Como resultado da diferença de temperatura entre a superfície da barragem e o ar, a superfície da barragem liberta radiação eletromagnética, conhecida como radiação térmica [1]. O efeito da radiação pode ser considerado adicionando  $h_r$ , coeficiente de transferência de calor por radiação, a  $h_c$ , coeficiente de convecção, obtendo-se o coeficiente de transmissão térmica total:  $h_t = h_c + h_r$ , tal que [4]:

$$q_t = q_c + q_r = h_t (T - T_a) \quad (4)$$

Existe um grande número de soluções analíticas para a resolução de problemas de condução de calor. Contudo, em variadas situações práticas, a geometria e as condições de fronteira são de tal forma complexas que inviabilizam a aplicação da solução analítica, surgindo a resolução numérica como única alternativa. O programa PAT\_2[1], utilizado no desenvolvimento deste trabalho, baseia-se na discretização pelo Método dos Elementos Finitos para a obtenção da distribuição espacial de temperaturas, adotando-se uma técnica de Diferenças Finitas, para efetuar a integração temporal.

### 2.2 Simulação das condições ambientais

Os fatores climáticos que se devem considerar numa análise térmica são a temperatura do ar, a velocidade do vento (necessários para o cálculo das trocas de calor por convecção e radiação), a radiação solar e a temperatura da água [5]. É importante referir que as variações diária e sazonal das ações térmicas ambientais são uma das características a ter em conta na sua modelação.

### 2.2.1 Temperatura do ar

Na análise de barragens é habitual representar a variação da temperatura do ar ao longo do tempo como a sobreposição de uma temperatura média com duas funções harmónicas, uma de período anual e outra de período diário:

$$T(t') = T_m + T_a^a \cos\left[\frac{2\pi}{365}(t'-t_o^a)\right] + T_a^d(t') \cos[2\pi(t'-t_o^d)] \quad (5)$$

em que  $t'$  é o tempo, em dias, decorrido desde o início do ano,  $T_m$  a temperatura média anual,  $T_a^a$  a semi-amplitude da onda anual,  $T_a^d(t')$  a semi-amplitude da onda diária,  $t_o^a$  a fase da onda anual e  $t_o^d$  a fase da onda diária. O cálculo dos parâmetros envolvidos nestas funções é realizado, habitualmente, com base nas temperaturas médias diárias do ar observadas no local da barragem, utilizando o método dos mínimos quadrados [1].

### 2.2.2 Temperatura da água

Tal como a temperatura do ar, a temperatura da água da albufeira apresenta uma evolução no tempo de carácter sazonal, com a particularidade de que a temperatura média, a semi-amplitude e a fase variam com a profundidade. Na sua modelação é assumida simplesmente a existência de uma variação anual:

$$T(y, t') = T_m(y) - T_a(y) \cos\left\{\frac{2\pi}{365}[t'-t_o(y)]\right\} \quad (6)$$

em que  $t'$  é o tempo, em dias, decorrido desde o início do ano,  $y$  a profundidade da água,  $T_m(y)$  a temperatura média anual à profundidade  $y$ ,  $T_a(y)$  a semi-amplitude da onda de temperatura à profundidade  $y$  e  $t_o(y)$  a fase da onda de temperatura à profundidade  $y$ . A partir do registo de temperaturas da água para cada uma das cotas determinam-se os valores dos parâmetros  $T_m$ ,  $T_a$  e  $t_o$  utilizando o método dos mínimos quadrados [6].

### 2.2.3 Radiação solar

O conhecimento da radiação solar, bem como das condições de exposição das superfícies da barragem, é fundamental para determinar a elevação de temperatura das superfícies em relação à temperatura do ar. A medição da radiação solar é, em geral, realizada por meio da irradiância global incidente sobre uma superfície horizontal,  $I_h$ . Se a superfície em análise é inclinada, formando um ângulo  $\alpha$  com a direção da radiação, a irradiância sobre essa superfície é dada por [2]:

$$I_\alpha = \frac{I_h}{\cos Z} \cos \alpha \quad (7)$$

sendo  $Z$  o ângulo formado pela linha vertical do local (zénite) e a linha que conecta ao Sol.

## 3. BARRAGEM DO ALTO RABAGÃO

### 3.1 Descrição da obra

A barragem do Alto Rabagão, concluída em 1964, pertence ao desenvolvimento hidroelétrico do rio Cávado e do seu afluente, o Rabagão, na zona Norte de Portugal. A barragem é de construção mista, constituída por uma parte do tipo arco e outra do tipo gravidade (Fig. 1). No vale principal, uma cúpula assimétrica de dupla curvatura apoia-se em encontros artificiais, enquanto que uma gravidade fecha o vale secundário e a margem esquerda do vale principal. O arco tem 94 m de altura, com coroamento à cota 880 m, e a gravidade da margem do lado direito tem 59 m de altura. O comprimento do coroamento de toda a barragem é de 1970 m [7]. Neste trabalho apenas é analisada a parte da barragem correspondente à cúpula.

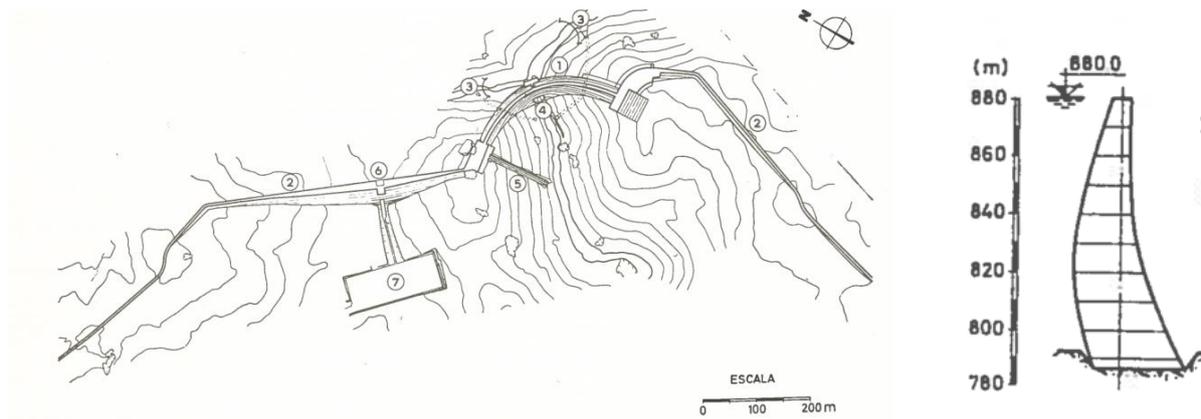


Figura 1. Aproveitamento do Alto Rabagão – Planta e corte pela secção central da abóbada [7].

### 3.2 Sistema de observação

O sistema de observação instalado na barragem possibilita o conhecimento detalhado das solicitações e das respostas estruturais, nomeadamente: níveis da albufeira, temperatura do ar, temperaturas nas fronteiras da estrutura e no interior do betão, deslocamentos planimétricos e altimétricos na barragem e na fundação, movimentos relativos entre blocos, extensões e tensões no interior do betão, subpressões e caudais drenados na fundação. A observação da temperatura do ar é realizada com um termómetro de máxima e mínima instalado próximo da barragem. A medição da evolução das temperaturas no corpo da cúpula é efetuada por termómetros e extensómetros (Fig. 2) distribuídos ao longo da espessura do betão num conjunto de secções radiais.

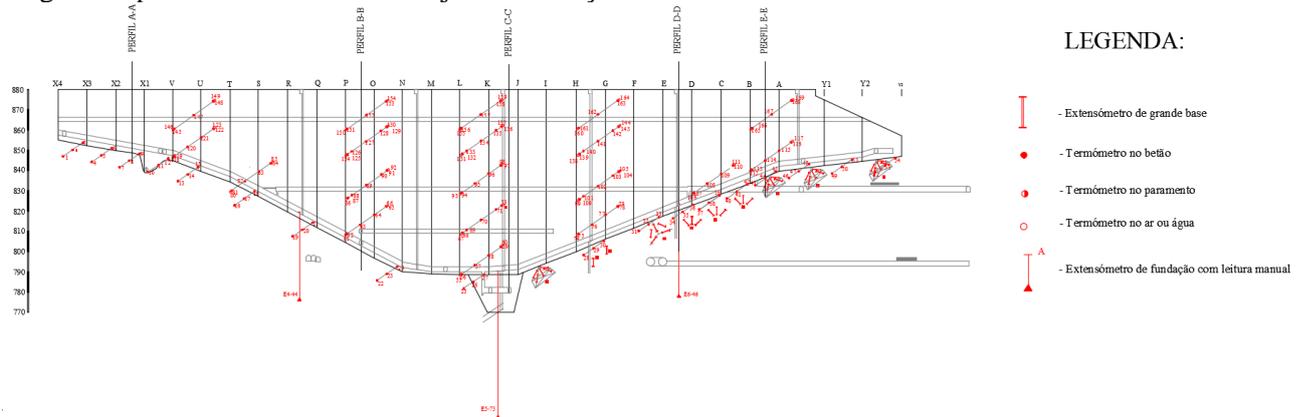


Figura 2. Cúpula da barragem de Alto Rabagão – Sistema de Observação.

### 3.3 Radiação solar

Para esta barragem, e segundo a divisão geográfica apresentada por Silveira [2], o valor de  $I_h$  pode ser estimado a partir dos registos de radiação global obtidos na estação actinométrica do Porto. Com vista à sua implementação, a curva foi aproximada por uma função do tipo:

$$I_t = \frac{I_h}{\cos Z} = q_o \exp(A + B \cos Z) \quad (8)$$

em que  $I$  é a radiação total,  $q_0$  é a constante solar de valor  $1367 \text{ W/m}^2$ ; e  $A$  e  $B$  são constantes, de valor  $-1,1259$  e  $0,957455$ , respetivamente. A simulação deste fluxo implica o conhecimento da latitude e da orientação da barragem. A barragem do Alto Rabagão encontra-se a uma latitude de  $41^\circ 44'$  e o azimute do eixo da sua cúpula, contado a partir do Sul no sentido do movimento dos ponteiros do relógio, é de  $221^\circ$ . O fluxo de radiação assim estimado é considerado na condição de fronteira de Neumann (3), afetado do coeficiente de absorção,  $a$ , que relaciona o fluxo absorvido com o fluxo incidente [8].

### 3.4 Características térmicas dos materiais

No Quadro 1 resumem-se os valores adotados para o cálculo térmico.

Quadro 1. Propriedades adotadas para o modelo térmico.

Parâmetro	Unidade	Valor
<b>FUNDAÇÃO</b>		
Calor específico, $c$	[kJ/(kg K)]	0,920
Condutividade térmica, $k$	[kJ/(m h K)]	8,4
Massa específica, $\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	2500
Coefficiente de absorção, $a$	[-]	0
Coefficiente de transmissão total	[kJ/(hm <sup>2</sup> k)]	90
<b>BETÃO</b>		
Calor específico, $c$	[kJ/(kg K)]	0,879
Condutividade térmica, $k_i$	[kJ/(m h K)]	8,4
Massa específica, $\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	2400
Coefficiente de absorção, $a$	[-]	0,50
Coefficiente de transmissão total	[kJ/(hm <sup>2</sup> k)]	90

O conhecimento da velocidade média do vento num dado local é indispensável para a determinação do coeficiente de transferência de calor por convecção forçada ( $h_{cf}$ ) entre a superfície do betão e o ar. Considerou-se uma velocidade do vento de 4,25m/s ([www.meteoblue.com](http://www.meteoblue.com)). O coeficiente de convecção foi estimado utilizando a expressão [2]:

$$h_c = 0.055 \frac{k_f}{L} \left( \frac{L V \rho_f}{\mu_f} \right)^{0.75} \left[ \frac{W}{m^2 K} \right] \quad (9)$$

onde  $k_f$ ,  $\rho_f$  and  $\mu_f$  são, respectivamente, a condutibilidade térmica, a massa específica e a viscosidade absoluta do ar, a que correspondem os valores de, respectivamente, 0,026 W/(m K), 1,2 kg/m<sup>3</sup> e 1,8x10<sup>-5</sup> kg/(m s),  $V$  é a velocidade média do vento, em m/s, e  $L$  representa a dimensão da superfície plana no sentido da corrente. Para os valores de temperatura que se registam em Portugal, Silveira [2] verificou que o coeficiente de radiação é praticamente constante e tem um valor médio de  $h_r = 5.2$  W/(m<sup>2</sup> K). Considerando o exposto, foi utilizado um coeficiente de transmissão térmica total  $h_t = 25.1$  W/(m<sup>2</sup> K) = 90 kJ/(hm<sup>2</sup>k). Como consequência do isolamento conferido pela vegetação que normalmente existe no maciço de fundação, não são considerados os efeitos da radiação solar nestes elementos. Assim, o respetivo coeficiente de absorção foi considerado nulo.

### 3.5 Cálculo das variações de temperatura

#### 3.5.1 Solução analítica

Considerando que a secção em estudo se encontra suficientemente afastada das fronteiras (coroamento e fundação) para se assumir que, num modelo sem radiação solar (cuja ação é assimétrica), o fluxo térmico é unidirecional, pode recorrer-se à formulação apresentada em [2]. Com esta solução analítica obtêm-se os resultados exibidos na (Fig. 3), para uma placa de espessura de 14 m (correspondente à espessura da barragem à cota 854 m). Nesta figura é possível apreciar as variações diária e anual da temperatura no paramento exposto à temperatura do ar ( $x=0.0$ m), enquanto que o paramento submerso ( $x=14.0$ m) apenas está sujeito a variação anual da temperatura.

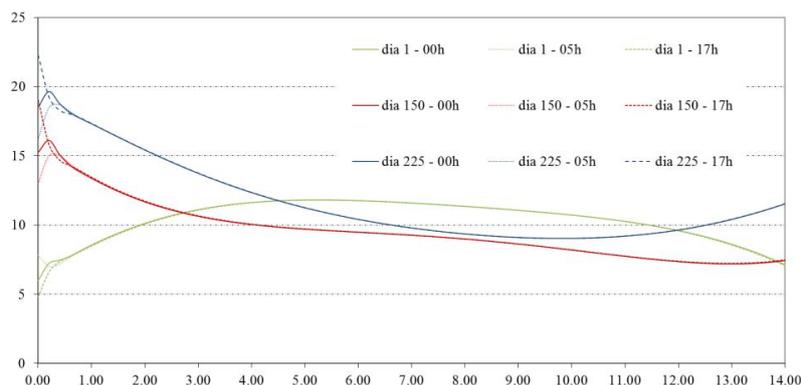


Figura 3. Distribuição da temperatura em espessura – resultado analítico.

### 3.5.2 Modelo de elementos finitos

Na Figura 4 apresenta-se uma vista geral do modelo de elementos finitos adotado na análise. Nesta figura, a azul-escuro encontra-se representado o corpo da cúpula da barragem e respetivos encontros artificiais. As restantes cores correspondem ao maciço de fundação da barragem. De salientar que no cálculo térmico se considera que todos os materiais da fundação têm as mesmas características. A sensibilidade do modelo ao efeito da onda diária da temperatura do ar foi estudada mediante refinamentos sucessivos da malha, tal como descrito em 3.5.3.

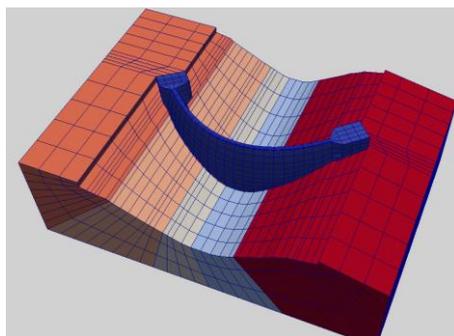


Figura 4. Malha de elementos finitos utilizada no cálculo.

Na análise térmica é requerido o campo de temperatura inicial. Para barragens em fase de exploração este aspeto é resolvido assumindo um valor inicial e aplicando as condições de fronteira durante um período de tempo até que a barragem atinja comportamento cíclico. No caso em estudo foi assumida uma temperatura inicial de 15 °C. Simplificadamente, considerou-se todo o paramento de montante imerso. Quanto à base do maciço, introduziram-se os nós pertencentes a esta fronteira com uma temperatura prescrita de 12°C. Consideraram-se expostas à radiação solar as faces do coroamento e todas as faces viradas a jusante, com exceção das pertencentes aos maciços rochosos, as quais estão protegidas pela cobertura vegetal. Quanto às faces com trocas de calor por convecção e radiação, consideraram-se expostas todas as que não estão submersas. Os bordos laterais do modelo foram considerados fronteiras adiabáticas.

### 3.5.3 Estudo da discretização

Pela análise da Fig. 3 percebe-se que, ao contrário da onda térmica anual (a qual, para esta cota, afeta toda a espessura da barragem), a onda diária tem um efeito muito concentrado, atingindo apenas uma zona de profundidade de cerca de 0,5 m a 0,8 m junto aos paramentos expostos ao ar.

- Malha com 2 elementos na espessura do corpo da barragem:

Inicialmente utilizou-se uma malha de elementos finitos com apenas 2 elementos, igualmente distribuídos, na espessura da barragem (Fig. 5). A malha assim definida é constituída por 1 752 elementos e 9 485 nós. Na Fig. 6 apresentam-se os valores calculados de temperatura no paramento de

jusante, ao longo de um ano, para as 24 horas do dia, contrastados com os valores registados de temperatura na mesma secção (medidos em horas dispersas ao longo do dia) e com a função da temperatura média do ar. Devido à escala utilizada, a variação térmica diária reflete-se como uma maior banda da onda térmica anual. Verifica-se que as temperaturas obtidas no modelo não alcançam as observadas, sendo possível constatar a dificuldade do modelo na representação da onda diária da temperatura do ar. Observa-se, inclusivamente, que a banda da onda térmica anual obtida no cálculo para as várias horas do dia está essencialmente relacionada com o efeito da radiação (a qual provoca um aumento de temperatura da superfície em relação à temperatura do ar) e não tanto com a onda térmica diária.



Figura 5. Discretização corpo barragem: 2 elementos em espessura.

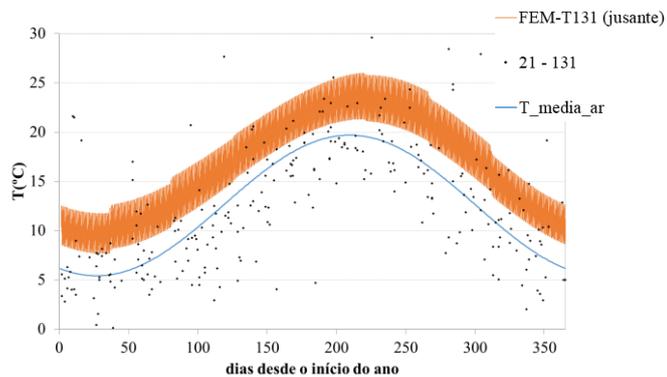


Figura 6. Temperaturas no bloco K-L, a  $\frac{3}{4}$  altura – Jusante Termómetro T131 (2 elemnts. esp.).

- Malha com 4 elementos na espessura do corpo da barragem:

Analisando os resultados obtidos com a discretização anterior, revelou-se necessário refinar a malha, pelo que se dividiu em 2 cada elemento (pertencente à barragem) da malha anterior (Fig. 7). Obteve-se um modelo constituído por 2 364 elementos e 12 165 nós. Na Fig.8 observa-se que, não obstante a melhoria face à discretização anterior, a qualidade dos resultados é ainda insuficiente quanto à amplitude da onda diária da temperatura, dado que os valores observados continuam distantes da banda de valores calculados.

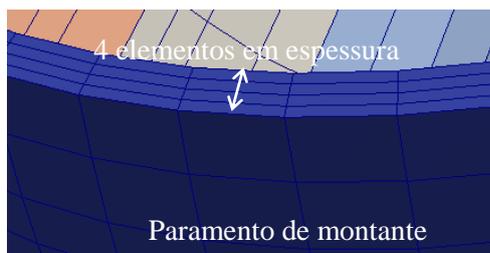


Figura 7. Discretização corpo barragem: 4 elem. em espessura.

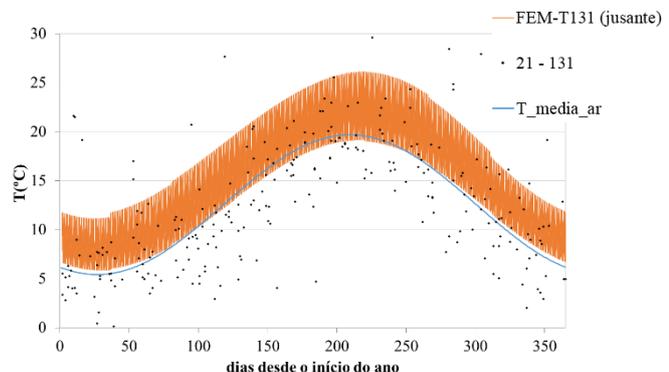


Figura 8. Temperaturas no bloco K-L, a  $\frac{3}{4}$  altura – Jusante Termómetro T131 (4 elemnts. esp.)

- Malha com 6 elementos na espessura do corpo da barragem:

Na sequência do exposto, houve necessidade de aumentar o grau de refinamento da malha de elementos finitos. Tendo em conta que o maior erro das discretizações anteriores se verifica na zona exposta ao ar, optou-se por refinar somente junto aos paramentos (de jusante e de montante, preparando já a malha para uma futura análise de primeiro enchimento). Assim, dividiu-se em 2 cada elemento pertencente aos paramentos, com a particularidade de que o novo elemento exposto tem uma espessura fixa de 1 m (Fig. 9). Obteve-se um modelo constituído por 2 976 elementos e 14 845 nós. Realça-se o facto de que, com este critério, se obtêm elementos muito esbeltos em altura. Contudo, dado que na direção vertical não existe variação significativa da temperatura, a esbelteza dos

elementos não se reflete em perda de qualidade dos resultados. A análise da Fig. 10 permite verificar melhoria dos resultados relativamente à discretização anterior, dada a sensibilidade ao efeito da amplitude diária da temperatura do ar. Efetivamente, o modelo responde ao efeito da onda diária da temperatura do ar. O facto de as temperaturas observadas estarem no limite inferior dos valores calculados é um indicio de que o seu registo terá ocorrido à hora de menor calor do dia



Figura 9. Discretização corpo barragem: 6 elem. em espessura

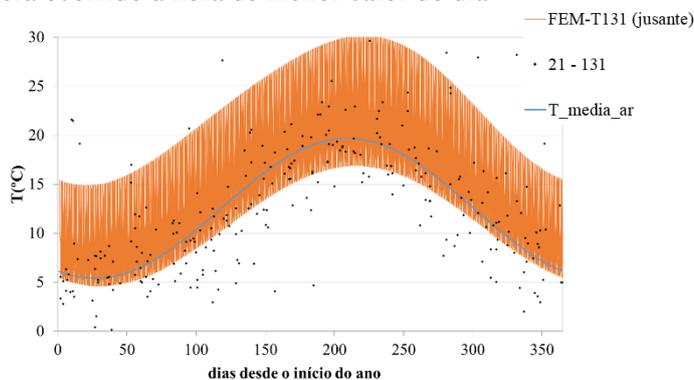


Figura 10. Temperaturas no bloco K-L, a  $\frac{3}{4}$  altura – Jusante Termómetro T131 (6 elemts. esp.).

Analisando os resultados obtidos com as diferentes malhas testadas identifica-se que discretizações menos refinadas resultam num modelo muito “rígido”, incapaz de representar os efeitos que ocorrem localmente, em específico junto ao paramento de jusante das barragens. O refinamento da malha com 6 elementos em espessura é suficiente para a representação da resposta da barragem às ações a que está sujeita, pelo que este modelo foi utilizado na análise da fase de exploração, com resultados apresentados na subsecção 3.6.

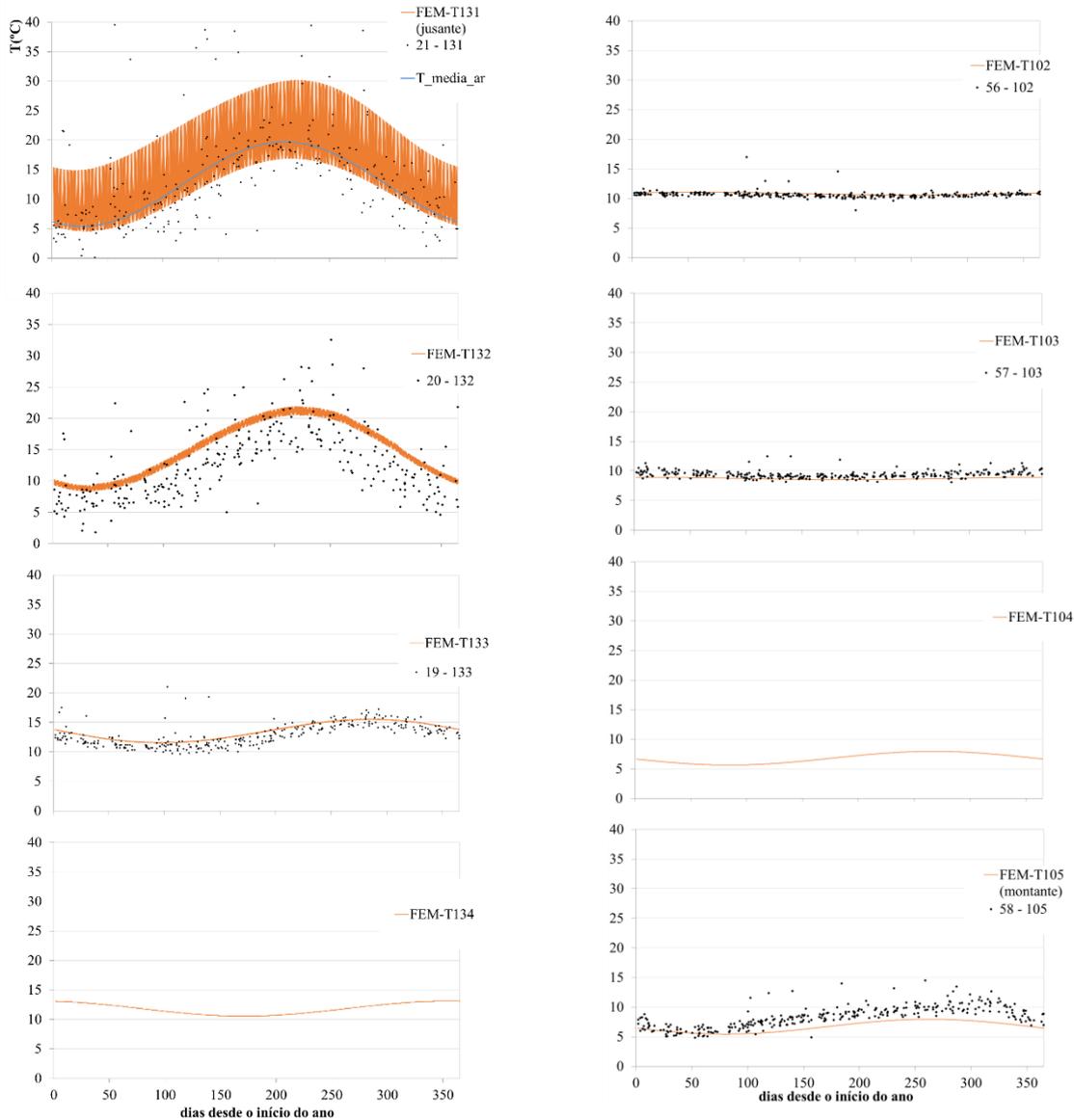
### 3.6 Resultados obtidos

#### 3.6.1 Validação de resultados

Para validar os resultados obtidos recolheu-se a temperatura em secções onde se encontram instalados termómetros de resistência (Fig. 2). Neste trabalho apresentam-se apenas alguns resultados representativos, às cotas 832,00m (bloco G-H) e 854,00m (bloco K-L). Observa-se que o cálculo térmico em fase de exploração se refere a um cálculo de comportamento médio, tal como se demonstrou na secção 2.2. Na Fig. 11 estão representadas as temperaturas observadas e as temperaturas calculadas (das 0h às 24h) em pontos próximos do coroamento (Fig. 11a) e da base da cúpula (Fig. 11b).

Analisando os resultados, e tal como já se referiu, aprecia-se que, face à escala utilizada na representação, o efeito da onda diária se reflete como uma maior banda da onda térmica anual. É evidente a diminuição da sua amplitude à medida que aumenta a distância ao paramento exposto. Verifica-se também que nas zonas mais próximas do coroamento (Fig. 11a), a meia espessura, é visível o efeito da onda térmica anual, com o máximo desfasado da temperatura do ar, comprovando a localização interior dos nós estudados. Em secções mais próximas da base (Fig. 11b), a amplitude da onda térmica anual é praticamente impercetível a meia espessura, dada a elevada espessura da barragem a esta cota, pelo que os nós internos estão muito afastados das faces expostas, e por isso bastante isolados pelo betão que os envolve.

No paramento de montante, a temperatura determinada pelo cálculo corresponde à temperatura prescrita aplicada aos nós submersos, verificando-se que a função utilizada para simular a temperatura da água aproxima bastante bem o seu comportamento real. Tal como seria de prever, a temperatura da água mantém-se praticamente constante ao longo do dia, e, na sua variação anual, encontra-se desfasada em relação à onda da temperatura do ar. Da análise das várias secções estudadas para a realização deste trabalho verifica-se que os efeitos, na temperatura da água, da temperatura do ar e da radiação solar, perdem significado à medida que aumenta a profundidade.



(a): Temperaturas no bloco K-L, a  $\frac{3}{4}$  de altura:  
ar (T131), jusante (T132),  
 $\frac{1}{4}$  de espessura (T133) e  $\frac{1}{2}$  espessura (T134)

(b): Temperaturas no bloco G-H, a  $\frac{1}{4}$  de altura:  
 $\frac{1}{2}$  espessura (T102),  $\frac{3}{4}$  de espessura (T103);  
montante (T104) e água (T105)

Figura 11. Validação de resultados.

### 3.6.2 Confirmação da localização dos termómetros

A existência de um modelo numérico como suporte à interpretação do comportamento das barragens reveste-se de importância, não só pela quantidade de informação que é extraída em qualquer nó da malha, mas também pela legitimação da localização da instrumentação no interior da barragem. Efetivamente, e especialmente quando se trata de barragens antigas (como no caso em análise), a informação que consta do plano de observação poder não corresponder ao que está materializado na obra. Assim, a apreciação dos dados registados *in situ* deverá ser suportada pela comparação com os resultados numéricos. Desta comparação resultou a constatação de que, nas secções em que há 7 termómetros em espessura (localizadas a  $\frac{1}{4}$  e a  $\frac{3}{4}$  de altura da barragem), os 3º e 5º termómetros não se encontram localizados em conformidade com o previsto no relatório de 1961, Quadro I (ar; paramento de jusante; a 1m de jusante; meia espessura; a 1m de montante; paramento de montante; água) [9]. A conclusão surge após a verificação de que, em todas as secções com esta configuração de instrumentação, os resultados numéricos encontram-se desfasados das leituras quando considerando os termómetros a 1m do paramento (Fig. 11a). Em contrapartida, em todas estas secções se identifica o comportamento registado, se se considerarem os termómetros a  $\frac{1}{4}$  e a  $\frac{3}{4}$  de espessura (Fig. 11b). A

correspondência perfeita para esta localização dos termómetros é indicativo que posicionamento real deverá ser a  $\frac{1}{4}$  e  $\frac{3}{4}$  de espessura da barragem.

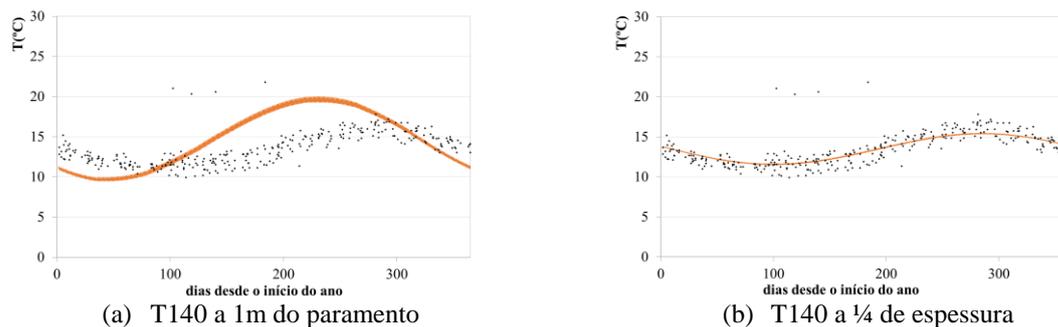


Figura 12. Temperaturas no bloco G-H, a  $\frac{3}{4}$  de altura: 3º termómetro (T140).

#### 4. CONCLUSÕES

Este trabalho evidencia que é possível, recorrendo ao Método dos Elementos Finitos, obter estimativas bastante credíveis das variações de temperatura de barragens durante a fase de exploração. Para isso é necessário modelar adequadamente as ações climáticas características da localização da barragem. É também fundamental que a malha de elementos finitos seja refinada junto aos paramentos expostos, para que a resposta seja sensível a todas as ações a que a barragem está sujeita, nomeadamente ao efeito local da variação diária da temperatura do ar. Paralelamente, verificou-se que os resultados numéricos permitem ainda validar a informação existente relativamente ao sistema de observação, possibilitando a deteção de dados incorretos. Tendo em conta que o resultado da análise térmica será utilizado como ação na posterior análise mecânica, percebe-se a importância destes modelos, que permitem realizar cálculos cada vez mais fidedignos ao nível dos efeitos estruturais resultantes da ação térmica.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à EDP – Gestão da Produção de Energia, S. A. a permissão para publicar dados da observação relativos à barragem do Alto Rabagão.

#### Referências

- [1] Leitão, N.S. (2012). Análise térmica de barragens de betão - Ações térmicas ambientais. Relatório LNEC 185/2012-DBB/NMMF.
- [2] Silveira, A.F. (1961). As variações de temperatura nas barragens. Lisboa: LNEC.
- [3] Agulló, L.; Mirambell, A.A.E. (1996). Comportamiento y seguridad de presas existentes. Riesgos Aceptables - Comportamiento térmico en explotación: Instrumentación térmica de presas de hormigón, Proc. of V Jornadas Españolas de Presas., pp. 317–330.
- [4] Cengel, Y.A. (2003). Heat Transfer: A Practical Approach. Mc Graw-Hill.
- [5] Castilho, E. (2013). Análise térmica de barragens de betão durante a construção - aplicação à barragem de Alqueva. Instituto Superior Técnico, Dissertação de Mestrado.
- [6] Bofang, Z. (1997). Prediction of water temperature in deep reservoirs, DAM Eng., Vol. 8, N. 1, pp. 13–26.
- [7] Rocha, M.; Silveira, A.F.; Azevedo, M.C.C.; Lopes, J.B. (1967). Influence of a very high deformability of the foundation on the conception and behaviour of an arch dam, Proc. of Neuvième Congrès des Grands Barrages, pp. 441–461.
- [8] Castilho, E.; Schclar, N.; Tiago, C.; Farinha, L. (2018) FEA model for the simulation of the hydration process and temperature evolution during the concreting of an arch dam, Eng. Struct., (accepted for publication). doi: 10.1016/j.engstruct.2018.07.065.
- [9] LNEC (1961), Plano de Observação da Barragem do Alto Rabagão (Zona em cúpula).