

Avaliação da probabilidade de fendilhação devido à ação térmica anual. Aplicação à barragem de Alqueva

Carlos Serra

Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, cserra@lnec.pt

Resumo

As barragens são estruturas com grande risco associado, devido principalmente aos seus danos potenciais. Em geral, o projeto de uma barragem de betão assenta no pressuposto da definição de uma forma que garanta um estado de tensão sem trações ou com trações reduzidas. A definição a ação térmica está frequentemente associada às variações de temperatura entre os cenários de verão e de inverno. Apesar disso, diversas variáveis têm influência no desenvolvimento de tensões de tração devido a ações térmicas em uma barragem, por exemplo, as dosagens de cimento através da geração de calor em cada colocação, os processos construtivos que determinam a temperatura de colocação e a dissipação de calor ao longo do tempo e, por conseguinte, o desenvolvimento de tensões iniciais, o arrefecimento forçado usado para injetar juntas de construção e as condições ambientais locais.

Este estudo apresenta uma metodologia para avaliar a probabilidade de fissuração do betão de uma barragem de betão, considerando o efeito das variações anuais de temperatura. Com base nas temperaturas observadas no interior do betão ao longo dos anos, foi possível reproduzir uma série de registos do estado térmico da barragem, considerando a aleatoriedade associada à variação térmica anual. Recorrendo a um modelo de elementos finitos do sistema barragem-fundação, obteve-se o campo de tensões considerando a variabilidade da ação térmica anual, desde uma época de referência (injeção das juntas de contração).

Com os resultados dos ensaios laboratoriais do betão é possível definir a distribuição que representa a resistência à tração do betão que, quando comparada com a distribuição de tensões calculada, permite o cálculo da probabilidade de fendilhação devido a esta ação específica.

Apresenta-se também uma aplicação desta metodologia à barragem de Alqueva, recorrendo às temperaturas observadas durante um período de 10 anos e aos resultados dos ensaios laboratoriais do betão obtidos durante a construção.

Palavras-chave: Barragem de betão; Ação térmica anual; Variabilidade da ação térmica; Probabilidade de fendilhação

1 METODOLOGIA

1.1 Abordagem para a determinação da probabilidade de fendilhação em barragens devida à ação térmica anual

A primeira parte da metodologia consiste na extrapolação dos registos de temperatura em determinados pontos da estrutura para os nós de uma malha de elementos finitos. Esta extrapolação permite ter uma aproximação dos valores médios de temperatura nos pontos da malha e, através de cálculo estrutural, uma estimativa dos valores médios das tensões nos pontos de *Gauss* de cada elemento finito para essa ação específica. Ao introduzir a variabilidade destas temperaturas ao longo do tempo, é possível também inferir sobre a função distribuição das tensões e a probabilidade de ocorrência de tensões de tração. A partir da análise das séries temporais resulta uma estimativa do valor médio da temperatura e a respetiva aleatoriedade, através do desvio padrão dos resíduos. O desvio padrão permite obter uma série de valores de temperatura gerados aleatoriamente ao longo do tempo e, por sua vez, as tensões a partir das variações de temperatura entre duas épocas.

Do ponto de vista da resistência, a caracterização estatística da resistência à tração é feita a partir dos resultados de ensaios à flexão obtidos em laboratório. A avaliação da probabilidade de fendilhação é obtida a partir da comparação direta da função distribuição de tensões calculada e a distribuição da resistência à tração. A Fig. 1 apresenta um esquema ilustrativo da abordagem adotada para a determinação da probabilidade de fendilhação associada à variabilidade das ações térmicas anuais.

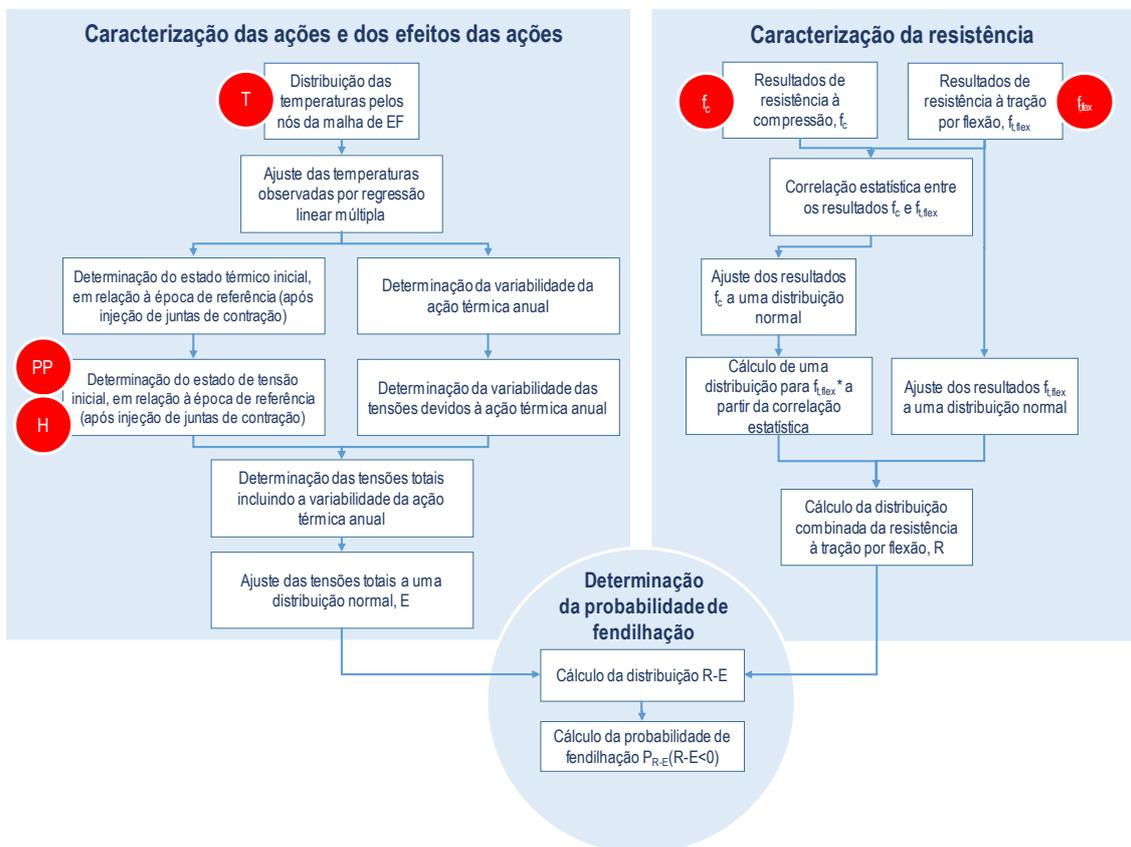


Figura 1. Esquema ilustrativo da abordagem adotada para a determinação da probabilidade de fendilhação associada à variabilidade das ações térmicas anuais

1.2 Aplicação da metodologia à barragem de Alqueva

A barragem de Alqueva está implantada no rio Guadiana, criando uma albufeira de cerca de 4150 milhões de metros cúbicos de água. A barragem, constituída por uma abóbada espessa de dupla curvatura e dois encontros artificiais, tem uma altura máxima de 96 m acima da fundação e um desenvolvimento de 348 m ao nível do coroamento (cota 154,0 m).

A construção da obra teve início em finais de 1997, com a execução das escavações. O corpo da barragem foi betonado entre maio de 1998 e dezembro de 2001. O primeiro enchimento iniciou-se em fevereiro de 2002, mas o nível de pleno armazenamento (NPA), à cota 152,00 m, só foi atingido em janeiro de 2010.

Neste trabalho uma das hipóteses adotadas foi a consideração da instalação instantânea do estado de tensão devido à totalidade do peso próprio e tomando o modelo estrutural sem juntas de contração. Este tipo de consideração constitui uma das limitações da análise uma vez que ignora o processo construtivo.

O estudo considerou dois cenários: o caso “albufeira cheia” com o nível a montante à cota 148,0m (caso corrente) e o caso “albufeira vazia” tomando o nível a montante o nível mínimo de exploração (NME), à cota 135,0m. No caso da barragem de Alqueva, o cenário de “albufeira cheia” pode-se considerar adequada à realidade dado que, a partir de 2004 a cota da albufeira a montante manteve-se por volta dos 148,0 m.

Adicionalmente, considerou-se o efeito da refrigeração através da variação de temperatura entre o momento de finalização da refrigeração (a partir do qual se fez a injeção das juntas e em que a estrutura é considerada contínua) e um mês de janeiro “médio” (tendo em conta os registos de 10 anos).

O estado de tensão inicial foi determinado somando linearmente aos efeitos do peso próprio, do nível a montante e das variações de temperatura desde a refrigeração. O estado de tensão final, corresponde à soma das tensões iniciais e das tensões devidas à componente de variabilidade dada apenas pela parcela devida à ação térmica anual, obtida a partir dos registos de observação.

1.3 Descrição do modelo numérico de elementos finitos

A análise estrutural da barragem foi realizada utilizando um programa de cálculo automático, baseado no método dos elementos finitos, desenvolvido no LNEC, que permite a consideração de elementos finitos de volume tridimensionais isoparamétricos do segundo grau com 20 nós.

Considerou-se um comportamento elástico linear isotrópico para os materiais do maciço rochoso de fundação e para o betão. O modelo estrutural foi considerado contínuo, não tendo sido representadas as juntas de contração da barragem nem as descontinuidades do maciço rochoso (foram considerados os valores dos módulos de deformabilidade ajustados aos resultados das observações [1], admitindo a hipótese de modelo contínuo equivalente).

O modelo estrutural tridimensional é representativo do conjunto barragem-fundação, tomando como hipótese simplificativa de continuidade entre o betão e o maciço de fundação. No zonamento da barragem foi considerado o mesmo tipo de betão com as propriedades indicadas na Fig. 2. A fundação

foi dividida em três zonas com diferentes deformabilidades: a margem esquerda, a falha 22 e a margem direita/fundo do vale. No que diz respeito às condições de fronteira, os deslocamentos dos nós extremos da fundação foram considerados nulos.

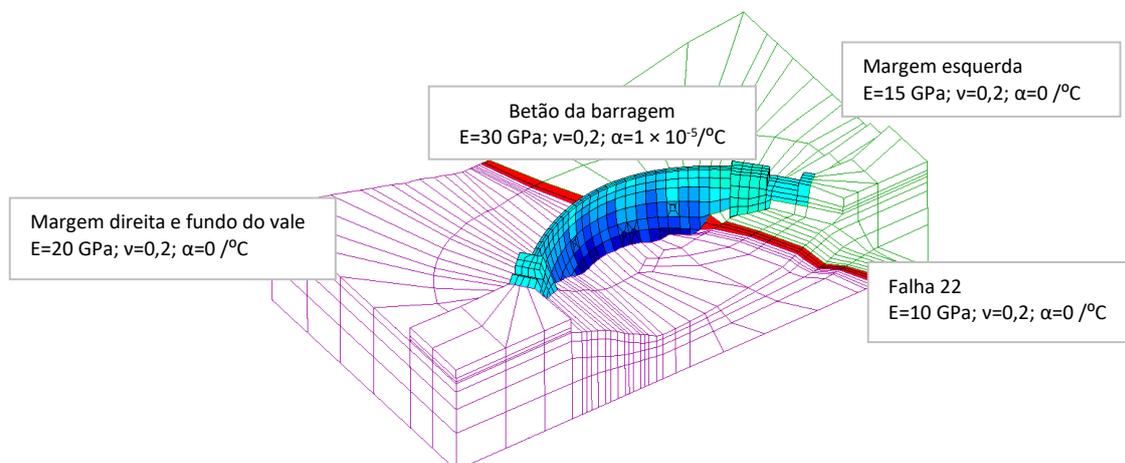


Figura 2. Malha de elementos finitos da barragem de Alqueva e do maciço de fundação e respetivas propriedades mecânicas

2 DETERMINAÇÃO DO ESTADO DE TENSÃO INICIAL E CARACTERIZAÇÃO ESTATÍSTICA DA AÇÃO TÉRMICA ANUAL

2.1 Distribuição espacial das temperaturas observadas

A distribuição espacial do campo térmico é dada pelo registo desde 2002 até 2012 das temperaturas observadas em determinados pontos da barragem. O registo de temperaturas é feito através de termómetros e extensómetros embebidos em determinados locais da estrutura [2].

As variações de temperatura consideradas no modelo de elementos finitos foram estimadas a partir das temperaturas observadas em termómetros e extensómetros de resistência elétrica embebidos no corpo da barragem tendo em consideração o fluxo térmico predominante no sentido radial e recorrendo a um método de interpolação na espessura da barragem e ao longo de planos de referência (folhetos) [3].

A análise das temperaturas observadas consistiu, numa primeira fase, em agrupar os instrumentos que medem temperatura no betão em diferentes seções térmicas para caracterizar o perfil térmico ao longo do tempo. De seguida, para cada data em análise, interpolaram-se os valores de temperatura ao longo da espessura da barragem. Tendo em consideração que a malha de elementos finitos é constituída por 9 folhetos na espessura da barragem, para cada um dos folhetos foram determinadas as temperaturas nos nós da malha de elementos finitos em função da distância entre o nó e cada uma das seções térmicas.

2.2 Determinação do estado térmico e do estado de tensão iniciais

Tomando como data de referência março de 2002, data de finalização da refrigeração e da injeção de juntas de dilatação, ou seja, momento a partir do qual a estrutura responde como um sistema

estrutural contínuo, calculou-se a variação do estado térmico entre a data de referência e as épocas de janeiro de cada ano, por forma a obter um estado térmico médio no início de cada ano.

Verifica-se que a variação do estado térmico desde o período de referência consiste num aquecimento generalizado, em especial, no interior da abóbada. De facto, a refrigeração da barragem de Alqueva resultou num estado térmico com temperaturas médias por volta dos 10 °C, no interior da barragem. Deste modo, a diferença registada entre essa data e um mês de janeiro “médio”, consiste num aquecimento e, conseqüentemente, num estado de compressão generalizado (após a injeção das juntas de dilatação). No entanto, verifica-se também que o efeito da refrigeração apesar de contemplar toda a barragem tem menor efeito nos paramentos onde a temperatura observada continuou próxima da temperatura ambiente durante a refrigeração, superior à temperatura no interior da barragem. A consequência deste facto resulta num diferencial térmico entre o interior e os paramentos. Em termos de tensões iniciais, verifica-se que, como consequência dessa diferença, geram-se trações significativas nos paramentos de montante e de jusante (Fig. 3).

Assim, considerou-se que o estado de tensão inicial corresponde ao somatório das tensões obtidas devido ao peso próprio ao efeito do nível da albufeira e à distribuição do estado térmico resultante das variações de temperatura registadas entre março de 2002 e a média registada em vários meses de janeiro.

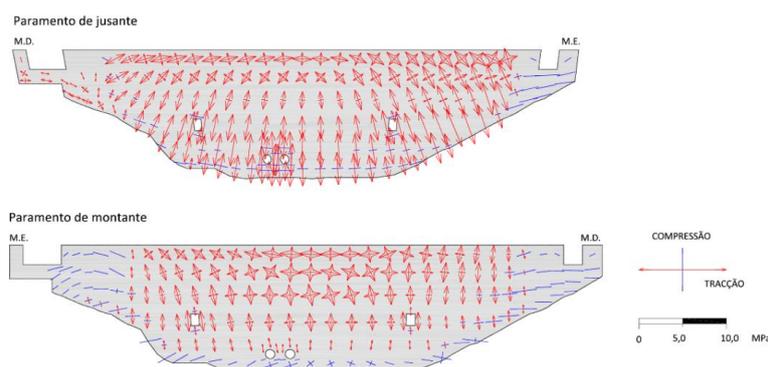


Figura 3. Distribuição das tensões principais nos paramentos de montante e jusante devidas à variação de temperatura desde a data de referência

2.3 Estado térmico anual e variabilidade da ação térmica

Após a distribuição espacial das temperaturas observadas pela malha de elementos finitos é possível aproximar as temperaturas ao longo do tempo por uma expressão representativa de variações de temperatura no interior da barragem decorrentes da dissipação de calor resultante do processo de hidratação, da refrigeração e do efeito da onda térmica anual da temperatura exterior. O valor médio da temperatura pode ser obtido a partir de uma regressão linear múltipla que se ajusta aos resultados obtidos para o período em análise e permite estimar a variabilidade de ano para ano, através das funções sinusoidais (Eq. (1)). A parcela logarítmica permite ter em consideração outros efeitos térmicos, nomeadamente o efeito pós-refrigeração em que se demorou anos a atingir uma situação de equilíbrio térmico, em regime estável ao longo do tempo.

$$T_i(t) = a_{1,i} \cos\left(\frac{2\pi s}{365}\right) + a_{2,i} \sin\left(\frac{2\pi s}{365}\right) + c_i \log(t - t_0 + 0,1) + k_i \quad (1)$$

Em que T_i corresponde à temperatura estimada para o nó i , s é o número de dias desde o primeiro dia do ano, $t-t_0$ é o tempo decorrido desde o início dos registos. Os coeficientes $a_{1,i}$, $a_{2,i}$, c_i e k_i correspondem àqueles que minimizam o somatório da raiz quadrada da diferença entre cada uma das observações e a aproximação obtida, isto é, os resíduos.

A partir da regressão linear múltipla é possível estimar a variabilidade da temperatura através da determinação do desvio padrão dos resíduos, σ_i , para cada nó da malha de elementos finitos. Verificou-se que a diferença de dispersão dos valores de temperatura observada entre o paramento de montante e jusante, onde a amplitude térmica é bastante mais significativa, e a diferença entre a dispersão de temperaturas entre o encontro da margem esquerda e a margem direita, onde a existe maior incidência solar.

Para a modelação numérica da variabilidade temporal das temperaturas observadas no interior da barragem de Alqueva foi adotado o método da transformada de Fourier rápida que, para cada nó da malha de elementos finitos e tendo em consideração o desvio padrão estimado anteriormente, permite obter uma série de valores aleatórios, mas autocorrelacionados no tempo.

O método da transformada de Fourier rápida permite construir uma sequência de valores aleatórios associados a um espectro de energia da função aleatória obtido a partir do modelo de covariância [4; 5; 6]. A Fig. 4 apresenta um exemplo desta abordagem para um nó da malha, sendo que, no gráfico, representam-se os pontos referentes às observações, a linha preta ao ajuste dos valores médios ao longo do tempo, as linhas a verde representam as várias realizações (N) ao longo do tempo e as linhas a vermelho são os limites máximos e mínimos dessas realizações.

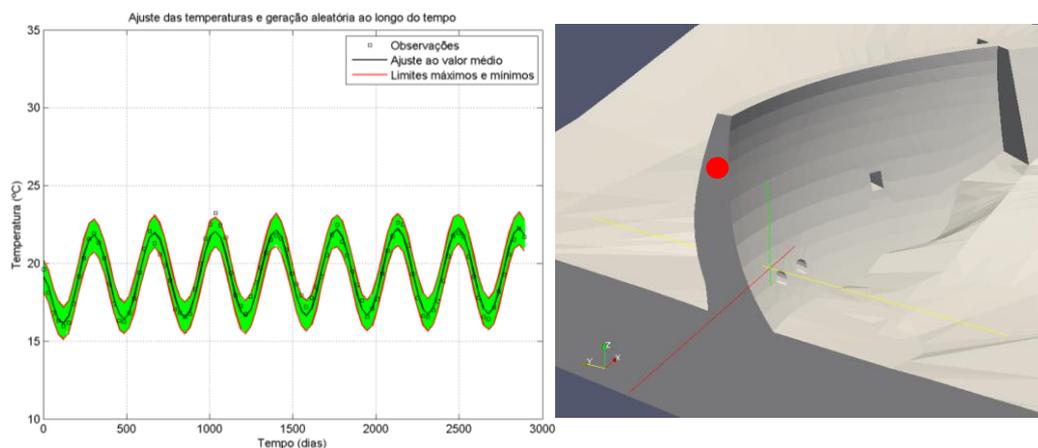


Figura 4. Ilustração da variabilidade associada à ação térmica num ponto da barragem obtida recorrendo a 500 realizações (N)

Através do modelo de elementos finitos referido anteriormente foi possível calcular as tensões principais nos paramentos para cada realização. Na Fig. 5 apresentam-se dois casos que evidenciam, sob os alçados planificados, a dispersão das tensões devidas à variabilidade térmica entre março e abril.

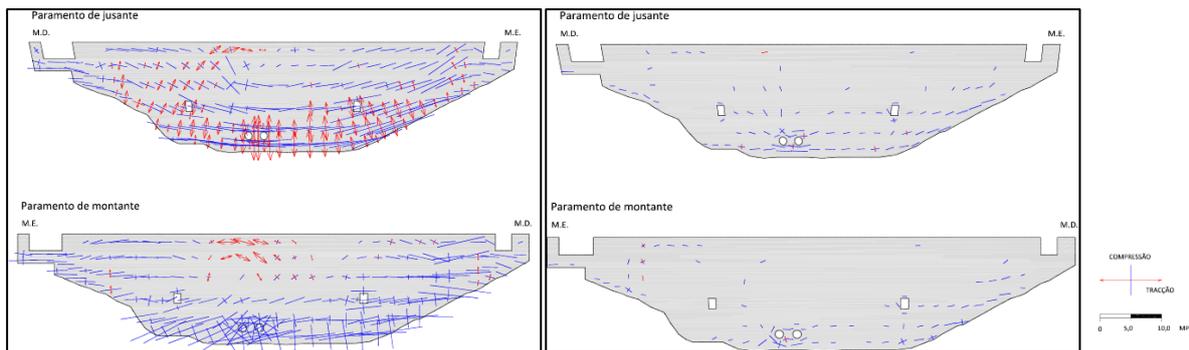


Figura 5. Exemplos da distribuição das tensões principais nos paramentos de montante e jusante para duas realizações distintas (esq. e dir.) correspondentes a uma variação de temperatura entre março e abril

3 CARACTERIZAÇÃO ESTATÍSTICA DA RESISTÊNCIA À TRACÇÃO

3.1 Aspetos gerais

No caso de barragens de betão é comum a utilização de diferentes tipos de betão a utilizar em zonas específicas da estrutura. Os dois tipos de betão mais relevantes correspondem ao betão utilizado nos paramentos de montante e de jusante e o betão colocado no interior da barragem. Dado que as maiores tensões de tração ocorrem junto aos paramentos, será este o tipo de betão utilizado neste estudo. O betão utilizado nos paramentos tem uma maior dosagem de cimento para conferir maior resistência nas zonas mais solicitadas em termos de tensões. No caso da barragem de Alqueva, o betão dos paramentos é composto por uma dosagem de cimento de 240 kg/m³ e dimensão máxima do agregado igual a 75 mm.

3.2 Correlação entre os resultados de resistência à compressão e resistência à tração

A caracterização estatística da resistência à tração baseou-se nos resultados dos ensaios de determinação da resistência à flexão em vigas e nos resultados dos ensaios de determinação da resistência à compressão em cubos.

Uma vez que os ensaios de determinação da resistência à flexão fazem-se, usualmente, em menor número recorreu-se à correlação entre a resistência à tração e a resistência à compressão para contar com maior base estatística. Assim, considerou-se que a relação entre a resistência à tração do betão, f_t , e a resistência à compressão, f_c , medida em cubos segue a função apresentada na Eq. (2) [7], em que K e β são coeficientes a ajustar. Com base nos resultados laboratoriais ajustou-se a Eq. (2) através de regressão não linear por forma a obter os coeficientes K e β que minimizam o somatório da raiz quadrada dos desvios entre os resultados experimentais e a função ajustada. A regressão não linear apresenta uma distribuição de resíduos com média nula e desvio padrão igual a 353 kPa.

$$f_c = K f_t^\beta \rightarrow f_c = 5,02 f_t^{1,26} \Leftrightarrow f_t = \sqrt[1,26]{\frac{f_c}{5,02}} \quad (2)$$

3.3 Ajuste dos resultados de resistência à tração a uma distribuição estatística

O tratamento estatístico dos resultados laboratoriais consiste na determinação dos parâmetros da distribuição que caracterizam a probabilidade de ocorrência de cada valor de resistência à tração do betão. Devido ao facto de os resultados de resistência à tração utilizados serem calculados a partir dos resultados de resistência à compressão através da Eq. (2) decidiu-se incorporar esse efeito nos valores da função a ajustar, através da consideração da distribuição dos resíduos da correlação (Tabela 1).

Tabela 1. Cálculo das distribuições da resistência à tração do betão dos paramentos da barragem

Distribuição da amostra	Distribuição dos resíduos da regressão linear da correlação	Distribuição final
$f_{\text{normal}}(\mu, \sigma) = f_{\text{normal}}(4627; 549)$	$f_{\text{normal}}(0; 353)$	$f_{\text{normal}}(4627; (353^2 + 549^2)^{1/2}) = f_{\text{normal}}(4627; 653)$

4 DETERMINAÇÃO DA PROBABILIDADE DE FENDILHAÇÃO

De seguida apresentam-se os resultados globais dos cálculos de determinação das tensões, considerando, como referido, o efeito do peso próprio, o efeito do nível da albufeira, o efeito da variação de temperatura entre o momento de refrigeração e um mês de janeiro “médio” e o efeito das variações de temperatura entre cada mês do ano, incluindo a variabilidade térmica em cada nó da malha de elementos finitos. Verifica-se que existem zonas da barragem, nomeadamente a envolvente das descargas de fundo e meio-fundo, em que se desenvolvem trações elevadas (Fig. 6). O restante paramento de jusante e o pé de montante estão sujeitos, por sua vez, a níveis de tração inferiores, mas com desvios padrão significativamente superiores (Fig. 6).

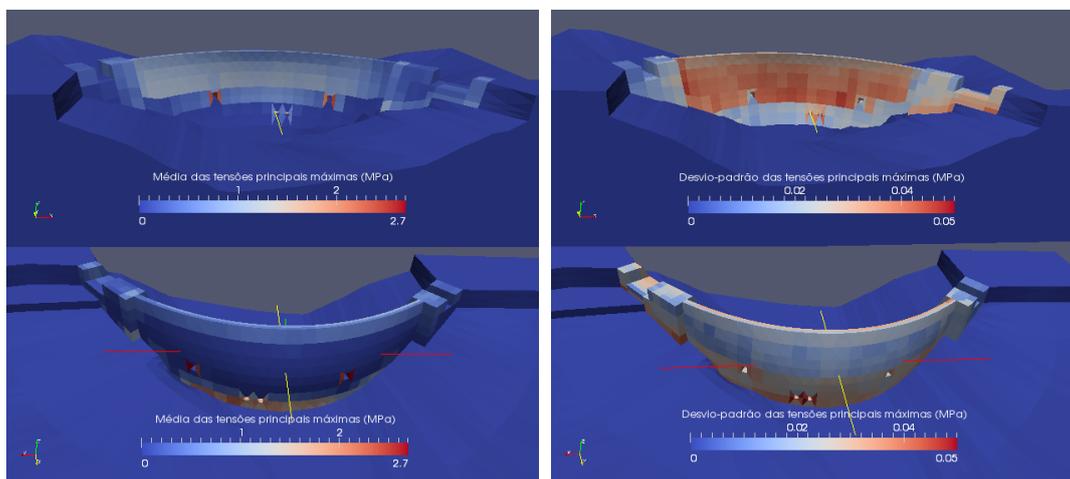


Figura 6. Distribuição da média (esq.) e desvio padrão (dir.) das tensões principais máximas em cada elemento para as variações de temperatura geradas aleatoriamente entre janeiro e fevereiro, considerando o cenário “albufeira cheia”

A rotura ocorre, em termos médios, quando a resistência (R) é inferior à ação (E). Neste caso, a probabilidade de ocorrência de fendilhação é calculada a partir da distribuição de $R-E$ para $R-E < 0$, ou seja, $P_{R-E}(R-E < 0)$. Os resultados apresentados na Tabela 2 dizem respeito aos elementos que, em geral, apresentam valores máximos de tensão principal superiores, para o cenário de “albufeira cheia”.

A Fig. 7 mostra a evolução ao longo do ano das probabilidades de fendilhação em alguns elementos da malha (Elem. 190 – Pé de montante, Elem. 290 – Descarga de meio-fundo, Elem. 95 –Paramento de jusante, Elem. 135 – Descarga de meio-fundo).

Tabela 2. Resultados do cálculo da probabilidade de fendilhação para o cenário “albufeira cheia”

Cenário	Elem.	Mês	$\mu(E)$ (kPa)	$\sigma(E)$ (kPa)	$\mu(R)$ (kPa)	$\sigma(R)$ (kPa)	$\mu(R-E)$ (kPa)	$\sigma(R-E)$ (kPa)	$P_{R-E}(R-E)<0$
Albufeira cheia	Elem. 190 – Pé de montante	jan.	1634	31	4627	653	2999	644	1.60×10^{-6}
		fev.	1608	31					1.25×10^{-6}
		mar.	1572	31					8.44×10^{-7}
		abr.	1494	31					6.53×10^{-7}
		mai.	1414	30					2.30×10^{-7}
		jun.	1352	31					2.50×10^{-7}
		jul.	1319	32					2.02×10^{-7}
		ago.	1330	30					2.89×10^{-7}
		set.	1384	33					1.34×10^{-7}
		out.	1456	32					7.45×10^{-7}
		nov.	1538	31					1.00×10^{-6}
		dez.	1601	32					2.84×10^{-6}
	Elem. 290 – Descarga de meio-fundo	jan.	2706	35	1872	688	3.27×10^{-3}		
		fev.	2627	34			9.52×10^{-4}		
		mar.	2551	34			4.80×10^{-4}		
		abr.	2484	36			5.72×10^{-4}		
		mai.	2449	37			4.52×10^{-4}		
		jun.	2461	36			3.15×10^{-4}		
		jul.	2508	37			4.45×10^{-4}		
		ago.	2588	36			8.27×10^{-4}		
		set.	2668	35			1.48×10^{-3}		
		out.	2737	38			1.44×10^{-3}		
		nov.	2764	36			1.78×10^{-3}		
		dez.	2762	34			1.34×10^{-3}		

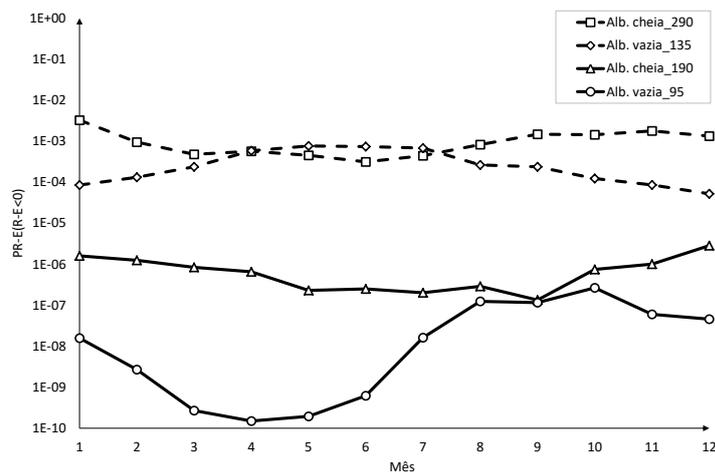


Figura 7. Evolução ao longo do ano da probabilidade de fendilhação ($P_{R-E}(R-E)<0$) para alguns elementos da malha

Verifica-se que, em geral, existem dois conjuntos de valores de probabilidade de fendilhação no caso da barragem de Alqueva. O primeiro, com valores de probabilidade de ocorrência bastante elevados (1×10^{-3}) ocorre em zonas muito particulares da obra, em singularidades da estrutura como é o caso

das descargas de fundo. O segundo conjunto diz respeito a zonas mais distribuídas, com maior incidência ao longo da estrutura, mas valores absolutos inferiores e com probabilidades de ocorrência dentro dos valores expectáveis para o caso de rotura, isto é, inferiores a 1×10^{-6} .

5 CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta uma metodologia para a determinação da probabilidade de fendilhação do betão de uma barragem devido à variabilidade térmica anual, obtida de registos de temperatura no interior da barragem. Apresenta-se também a aplicação desta metodologia a um caso de estudo, a barragem de Alqueva.

Tendo em consideração, por um lado, as distribuições dos efeitos das ações predominantes, nomeadamente o peso próprio, do nível de água a montante, das variações de temperatura deste o momento da refrigeração e das variações de temperatura anuais, e, por outro lado, a distribuição da resistência à tração foi possível determinar, para cada zona da barragem, a probabilidade de fendilhação da estrutura. Este tipo de análise pode ser útil para identificar as zonas mais vulneráveis em termos estruturais e de durabilidade.

AGRADECIMENTOS

Agradece-se à EDIA pela autorização para publicação de dados relativos à monitorização da barragem de Alqueva.

REFERÊNCIAS

- [1] Tavares de Castro, A., Batista, A. L., Serra, C. (2011) Analysis and interpretation of the structural behaviour of Alqueva dam during the first filling. 6th International Conference on Dam Engineering.
- [2] LNEC (1997) Plano de observação do escalão de Alqueva. Barragem, fundação, maciço envolvente, albufeira e obras anexas. Relatório 244/97-NO, Lisboa: LNEC.
- [3] 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. Application to arch dams, Third International Dam World Conference.
- [4] Miranda, L. (2011) Influência da variabilidade geotécnica na subsidência devida à escavação de túneis urbanos. Tese de Mestrado. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.
- [5] Yao, T. (1998) Conditional Spectral Simulation with Phase Identification. *Mathematical Geology*, 30(3), pp. 285-308.
- [6] Bracewell, R. (1986) *The Fourier Transform and its application*. McGraw Hill, Inc., Singapore.
- [7] Coutinho, A. (1994) *Fabrico e propriedades do betão*. LNEC. Lisboa.