Modelos híbridos de separação de efeitos do tipo HSCT-FE para estudo do comportamento de barragens abóbada sob ações expansivas

Hybrid HSCT-FE separation of effects models to study the behaviour of double curvature arch dams under swelling reactions effect

Miguel Rodrigues
Sérgio Oliveira
Jorge Proença

Resumo

Neste artigo é apresentado um modelo de separação de efeitos híbrido do tipo HSCT-FE para análise do comportamento de grandes barragens de betão. Este tipo de modelo permite obter separadamente o efeito elástico da pressão hidrostática (H), o efeito sazonal devido às variações da temperatura (S), o efeito da fluência devido à pressão hidrostática (C) e outros efeitos do tempo (T), como o efeito da fluência devida ao peso próprio e, de grande importância, o efeito patológico das reações expansivas. Considera-se como caso de estudo a barragem do Cabril, uma barragem abóbada de dupla curvatura com 132 m de altura máxima, onde foi identificada a evolução de um processo expansivo. Os modelos híbridos HSCT-FE propostos mostram-se capazes de separar o efeito das reações expansivas, apresentando uma evolução quantitativa coerente com os valores de expansões calculados através de um modelo de elementos finitos de referência validado para a ação das expansões.

Abstract

The present paper presents a hybrid HSCT-FE separation of effects model to analyse the behaviour of large concrete dams. This model separates the hydrostatic pressure elastic effect (H), the seasonal effect from temperature variations (S), the creep effect from the hydrostatic pressure (C) and other time effects (T), like the self-weight creep effect and, most importantly, the swelling reactions pathological effect. Cabril dam was selected as the case study. It is a double curvature arch dam with 132 m of maximum height, where a swelling process evolution had previously been identified. The proposed hybrid HSCT-FE models prove themselves capable of separating the effect of the swelling reactions, where the corresponding quantitative evolution is coherent with the swelling values calculated by a reference finite elements model validated for the swelling reactions load.

Palavras-chave: Barragens de betão / Modelos HSCT-FE / Efeito das reações expansivas / Efeitos da fluência / Efeitos sazonais

Keywords: Concrete dams / HSCT-FE models / Swelling reactions effect / Creep effects / Seasonal effects

Miguel Rodrigues

Laboratório Nacional de Engenharia Civil,
Lisboa, Portugal
miguel.ads.rodrigues@gmail.com

Sérgio Oliveira

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

Jorge Proença

CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa
Lisboa, Portugal
jorge.m.proenca@tecnico.ulisboa.pt

Aviso legal

As opiniões manifestadas na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Legal notice

The views expressed in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.

RODRIGUES, M. [*et al.*] – Modelos híbridos de separação de efeitos do tipo HSCT-FE para estudo do comportamento de barragens abóbada sob ações expansivas. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 18. ISSN 2183-8488. (março 2022) 73-80.

1 Introdução

O controlo da segurança de barragens baseia-se na monitorização da resposta dessas obras ao longo do tempo e na comparação entre resultados observados e previstos através de modelos numéricos. Geralmente são utilizados modelos semiestatísticos na análise direta dos dados observados do tipo HST *(Hydrostatic-Seasonal-Time)*. Os Modelos de Elementos Finitos (MEF), baseados nos princípios físicos da mecânica estrutural são geralmente usados para simular e prever o comportamento estrutural das barragens.

Para a identificação de comportamento anómalo resultante de efeitos patológicos, como, por exemplo, devido ao efeito das reações expansivas do betão, torna-se necessário o uso de modelos robustos de separação de efeitos, capazes de distinguir normais efeitos do tempo, relacionados com a viscoelasticidade, de outros efeitos do tempo, por exemplo, relacionados com as expansões.

Neste estudo é proposto um modelo híbrido HSCT-FE aplicado ao caso de estudo da barragem do Cabril.

2 Modelos de separação de efeitos híbridos do tipo HSCT-FE

O objetivo principal dos modelos de separação de efeitos é o de isolar o efeito de cada ação na estrutura, permitindo assim identificar eventuais comportamentos anómalos ou patológicos.

Os modelos de separação de efeitos adotados são do tipo HSCT *(Hydrostatic-Seasonal-Creep-other Time effects)* e incluem a possibilidade de utilização integrada de resultados do MEF. Com este tipo de modelos é possível a distinção entre o efeito estrutural da fluência [1-3] e os outros efeitos do tempo [4].

Consequentemente, o modelo de regressão adotado é do seguinte tipo:

$$u(h,T_{ar},t)=u_e^{PH}(h)+u_e^{VT}(T_{ar})+u_F^{PH}(h,t)+u_F^{PP}(t)+u^{exp}(t)+k \qquad (1)$$

Nesta equação a variável u representa deslocamentos em milímetros, estando o primeiro membro associado aos deslocamentos observados e o segundo membro às parcelas desse mesmo deslocamento afetas a cada uma das principais ações a que este tipo de obra está sujeita. Neste modelo foram considerados os efeitos das seguintes ações: Pressão Hidrostática (PH), Variação de Temperatura (VT), reações expansivas do betão (exp) e Peso Próprio (PP). Como se pode verificar, cada parcela do segundo membro da equação está identificada pelo sobrescrito correspondente à ação a que se refere. Tendo em conta a natureza das ações consideradas e a grandeza em análise, ou seja, os deslocamentos observados, para além do efeito elástico da ação (e), foi considerado, para a ação da PH e do PP, o correspondente efeito de fluência (F). No segundo membro da equação estes efeitos estão identificados pelos correspondentes subscritos. As variáveis h, T_{ar}, t e k são, respetivamente, a altura de água na albufeira, a temperatura do ar, o tempo (em dias) e o termo independente. Na Tabela 1 são apresentadas as funções de ajuste associadas a cada uma das parcelas da equação de regressão, passando-se de seguida à descrição de cada uma delas.

Como referido, com estes modelos HSCT é possível separar os efeitos

do tempo numa parcela de fluência associada à PH, numa parcela de fluência associada ao PP, e numa parcela referente a outros efeitos do tempo, como por exemplo: expansões, movimentos de fundação, *etc*. Para isolar o efeito da fluência é importante distinguir a fluência do PP da fluência da PH, para o que é útil estimar a componente elástica da resposta para estas duas ações, o que pode ser efetuado com base no MEF.

Tal como é apresentado na Tabela 1, são usadas funções exponenciais para representar a resposta elástica da estrutura à PH. Alternativamente, quando necessário, podem ser utilizados resultados do MEF para definir as funções que melhor representam a resposta elástica às variações da PH. Na formulação, *a* é o coeficiente de regressão e c_f é um coeficiente associado à forma da exponencial, sendo que, geralmente, coeficientes de forma reduzidos ajustam melhor as exponenciais ao comportamento real da ação quando são analisados pontos junto aos encontros, enquanto valores superiores ajustam as exponenciais melhor a pontos localizados nas consolas centrais.

O efeito de fluência da PH é calculado através da aplicação de coeficientes de fluência aos valores do deslocamento elástico calculados para incrementos mensais da altura de água (patamares) e efetuando depois a sua respetiva sobreposição. A Equação (2) representa esse cálculo.

$$u_F^{PH}(h,t)=a\times\left[\sum_{j=1}^{p}\phi\left(t,t_j'\right)\left(e^{h_j/20}-e^{h_{j-1}/20}\right)-\sum_{j=1}^{p'}\phi\left(t_a,t_j'\right)\left(e^{h_j/20}-e^{h_{j-1}/20}\right)\right] \quad (2)$$

Na Equação (2), *h* e *t* são a altura de água na albufeira e o tempo em dias, respetivamente; *a* é o coeficiente de regressão, *p* é número de patamares de carga, *p'* é o número de patamares desde o início do primeiro enchimento até à época t_a, correspondente ao início do período em análise. A variável *t'* corresponde à idade de aplicação da carga. Os coeficientes de fluência ϕ são calculados através das respetivas funções de fluência.

O efeito da temperatura pode ser simulado com base nos valores da temperatura do ar registados no local da obra (é usual aplicar um desfasamento em dias correspondente ao tempo de resposta da barragem à variação da temperatura do ar) ou com base em funções harmónicas de período anual e/ou semestral. Na formulação *b* ou b_1 e b_2 são os coeficientes de regressão e T_{ar} é a temperatura do ar no local.

O efeito de fluência do peso próprio corresponde a uma resposta diferida da barragem à ação do PP. O PP é uma força constante, com o sentido da gravidade, aplicada à estrutura, provocando um efeito de fluência que pode ser estimado com base nos deslocamentos elásticos previstos pelo MEF para a ação do PP, com base no coeficiente de fluência estimado a partir da função de fluência e tendo em conta a idade média do betão da obra.

O desenvolvimento ao longo do tempo da função de ajuste associada ao deslocamento provocado pelas ações expansivas é representado na Figura 4 pelo traço a cor vermelha. A curva resultante é do tipo sigmóide, ou seja, aumenta lentamente ao longo do tempo e quando atinge metade do seu deslocamento muda de curvatura (ponto de inflexão ou de *half-swelling*), passando a tender para a estabilização [7]. Alternativamente, o efeito das reações expansivas pode ser representado através de uma função polinomial. O tipo de função admitida dependerá da que melhor se ajustar aos dados observados. Na formulação proposta, *c* é o coeficiente de regressão.

O termo independente *k* é introduzido para ter em conta que a observação inicial, na primeira época do período em análise, assume um valor descrito por *k*. Os valores desse termo nas épocas subsequentes traduzem variações relativamente ao referido valor inicial.

Com esta formulação, com os dados de observação, com um modelo de elementos finitos e com o recurso ao Método dos Mínimos Quadrados (MMQ), obtém-se uma curva ajustada às observações

Table 2 Funções de ajuste utilizadas em cada uma das parcelas da equação de regressão

Parcela	Efeito	Função de ajuste	
$u_e^{PH}(h)$	Elástico da pressão hidrostática	$a\left(e^{h/c_f}-1\right), 15\lesssim c_f\lesssim 35$	(alternativamente, o valor de *a* pode ser calculado pelo MEF)
$u_e^{VT}(T_{ar})$	Temperatura	bT_{ar} ou $b_1\cos\left(\frac{2\pi\bar{t}}{365{,}25}\right)+b_2\sin\left(\frac{2\pi\bar{t}}{365{,}25}\right), \left(0<\bar{t}<365{,}25 \text{ dias}\right)$ [5]	
$u_F^{PH}(h,t)$	Fluência da pressão hidrostática	$\sum\phi(t)\Delta u_e^{PH}$	
$u_F^{PP}(t)$	Fluência do peso próprio	$\phi(t)u_e^{PP}$	
$u_{exp}(t)$	Expansões	$c\times\left(1-e^{-t^n/\beta}\right)$ onde $\beta=t_{hs}^n\times n/(n-1)$, $n=3{,}258$ e $t_{hs}\simeq 8000$ dias $(hs-half\ swelling)$	
k	Termo independente	–	

efetuadas. Salienta-se que antes de aplicar o MMQ é subtraído ao valor dos deslocamentos observados, a parcela de fluência afeta ao peso próprio.

Para se obterem bons resultados, em termos da separação de efeitos, é conveniente ter observações em quantidade, obtidas com base em medições de qualidade e bem distribuídas ao longo do tempo por forma a ter valores observados em todas as épocas do ano e para valores das cotas de água bem representativos de todos os patamares de enchimento da albufeira.

3 Análise do comportamento da barragem do Cabril usando modelos HSCT-FE

A barragem do Cabril, usada como caso de estudo, foi construída na década de 1950 e é a mais alta barragem abóbada em Portugal. Localizada no rio Zêzere, é uma barragem em forma de abóbada de dupla curvatura, com 132 m de altura máxima. O coroamento, à cota de 297 m, tem um desenvolvimento de cerca de 300 m. A espessura da consola central varia entre os 19 m na base e os 4,5 m pouco abaixo do coroamento. A transição da estrutura para a fundação foi concebida de forma a manter a abóbada simétrica. A barragem está fundada num maciço granítico de boa qualidade. Relativamente à albufeira, o nível da mesma varia entre a cota 240 m (nível mínimo de exploração) e o nível máximo de armazenamento à cota de 294 m (o nível máximo de cheia situa-se aos 296,3 m). Durante o primeiro enchimento da albufeira ocorreu fendilhação numa faixa horizontal, junto ao coroamento, localizada entre as cotas 280 e 290 m. Na década de 1990 foi detetado o desenvolvimento de um processo expansivo. A geometria da barragem do Cabril é apresentada na Figura 1 (vista, alçado, planta e corte).

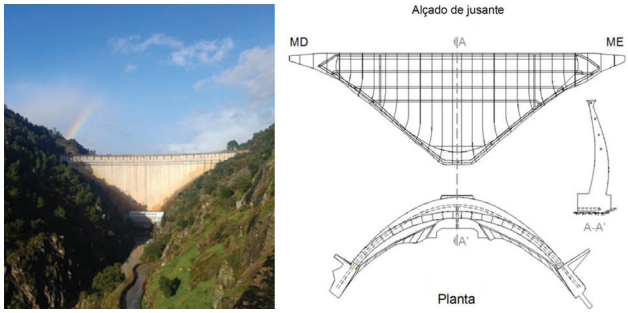

Figura 1 Barragem do Cabril. Vista de jusante, alçado de jusante, planta e corte

Para uso dos modelos híbridos HSCT-FE, são necessários os resultados de um MEF, em particular, são necessários resultados para os efeitos elásticos do peso próprio e da pressão hidrostática. A estimativa dos efeitos de fluência é efetuada através da aplicação, às componentes elásticas do deslocamento, dos coeficientes de fluência [6]. Os resultados do MEF são comparados com resultados dos modelos de separação de efeitos.

Na Figura 2 apresenta-se o modelo de elementos finitos adotado, no qual se consideram elementos isoparamétricos de 20 pontos nodais.

Um dos principais objetivos do trabalho relatado no presente artigo é analisar os resultados observados com vista a obter uma separação de efeitos adequada, que permita, nomeadamente, identificar separadamente o efeito das expansões. A verificação da coerência deste efeito das expansões resultante dos modelos híbridos HSCT-FE é efetuada através da comparação com resultados do MEF. A ação expansiva é calculada para o período entre 1982 e 2018, tendo em conta os dados dos extensómetros corretores. A ação expansiva considerada foi definida para que as extensões impostas fossem compatíveis com as extensões observadas nos extensómetros corretores espalhados pela obra. Na Figura 3, do lado direito, é apresentado o campo de expansões acumuladas adotado no MEF, enquanto do lado esquerdo, são apresentados os valores das expansões acumuladas medidas nos extensómetros corretores instalados no corpo da barragem.

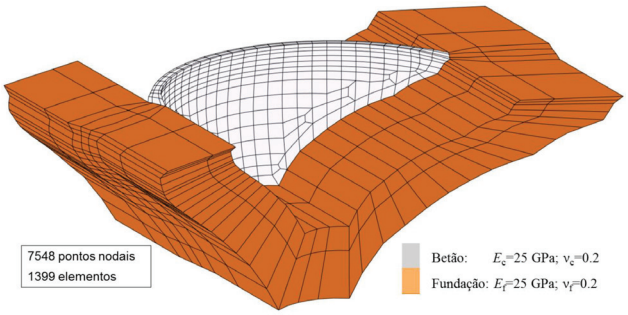

Figura 2 Modelo de elementos finitos da barragem do Cabril

Na Figura 3, mostra-se que o campo de expansões considerado no modelo de elementos finitos é coerente com os valores das extensões medidas nos extensómetros corretores. Por exemplo, verifica-se que no MEF, no paramento de montante, as expansões consideradas são maioritariamente superiores às consideradas no paramento de jusante, tal como foi medido nos extensómetros corretores.

Neste estudo analisa-se a história dos deslocamentos horizontais medidos através de triangulação e a história dos deslocamentos verticais medidos no coroamento por nivelamento de precisão.

Após terem sido testadas múltiplas variantes dos modelos de regressão, o modelo HSCT-FE que apresentou o melhor ajustamento global, envolvendo todos os pontos da barragem observados, tem as seguintes características: (i) para a estimativa do efeito elástico da PH foram consideradas duas funções exponenciais com valores de c_f iguais a 20 e 25, quando considerados deslocamentos radiais, e valores de 15 e 20, quando considerados deslocamentos verticais, o parâmetro *a* é fixo previamente de forma a ser ajustado aos resultados do MEF; (ii) o efeito da temperatura foi estimado através das temperaturas médias diárias do ar observadas, considerando um desfasamento de 22 dias para reproduzir a propagação do calor no interior do betão; (iii) o efeito de fluência da PH é estimado através dos coeficientes de fluência aplicados à resposta elástica, para a discretização mensal em patamares constantes, e considerando um betão com uma lei de fluência de Bazant e Panula [6] com os seguintes parâmetros que definem a forma da sua curva ao longo do tempo, E_0 = 25 GPa, φ_1 = 2,8, β = 0,048, m = 0,42 e n = 0,22, correspondendo à fluência de um betão afetado pelo efeito das

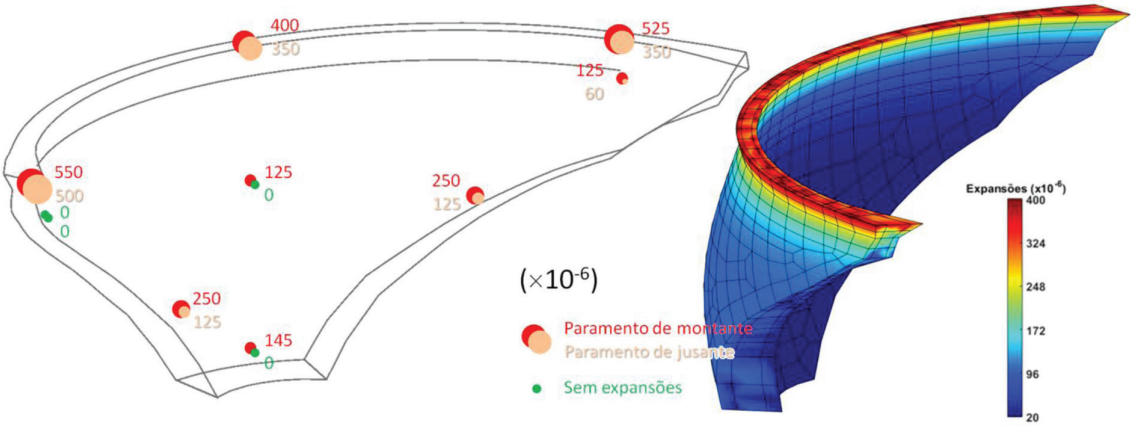

Figura 3 Valores acumulados de expansões desde 1982 até 2018. Do lado esquerdo apresentam se os resultados medidos nos extensómetros corretores instalados no corpo da barragem e do lado direito apresenta-se o campo considerado para o MEF

reações expansivas, que é, neste caso, cerca do dobro da fluência inicialmente estimada para o betão intacto (existem evidências da ocorrência de expansões, visíveis à vista desarmada através de exsudações de gel nas galerias de inspeção superiores); (iv) o efeito de fluência do PP é estimado através dos mesmos coeficientes de fluência aplicados aos deslocamentos elásticos determinados através do MEF para a ação do PP; (v) o efeito do tempo associado às expansões é dado através de uma curva em forma de sigmóide

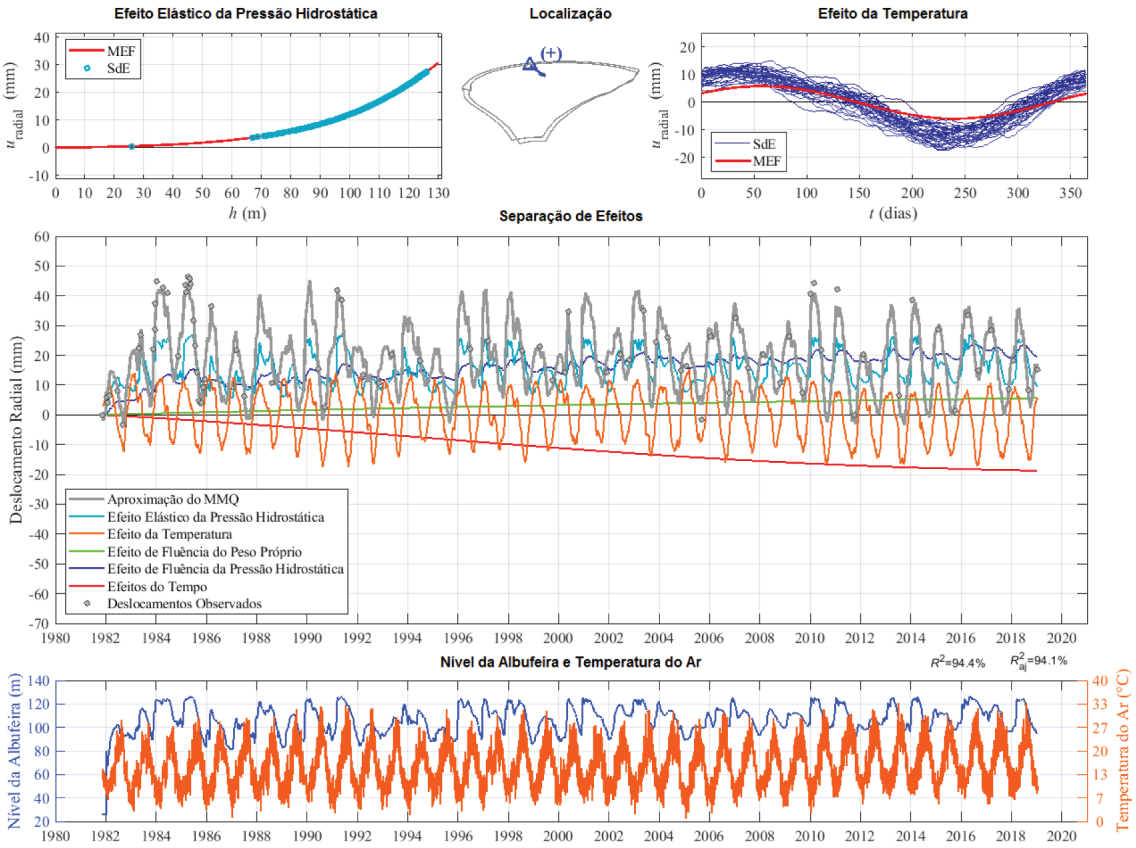

Figura 4 Resultados da separação de efeitos do tipo HSCT-FE: análise da história do deslocamento radial medido por triangulação na marca posicionada no bloco KL à cota 295 m

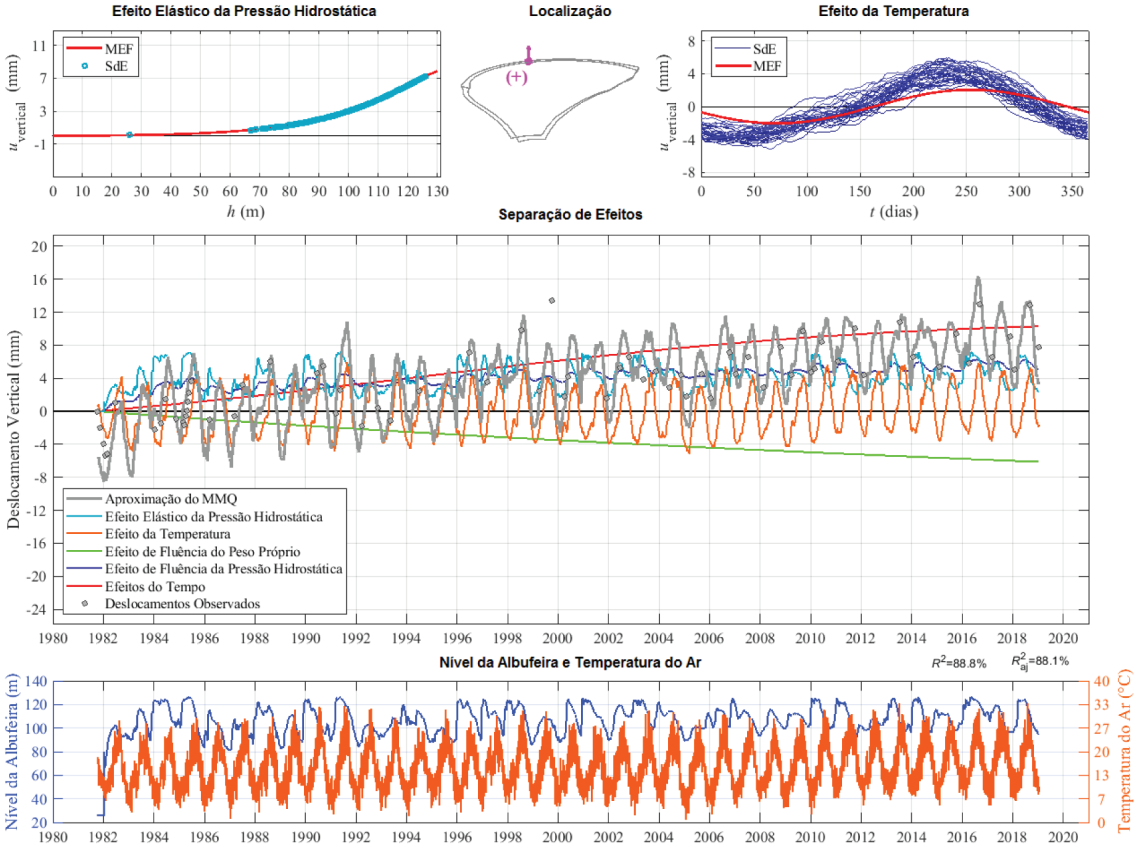

Figura 5 Resultados da separação de efeitos do tipo HSCT-FE: análise da história do deslocamento vertical no topo da consola central

considerando um tempo de *half-swelling* de 15 mil dias (cerca de 40 anos).

A Figura 4 apresenta os resultados dos modelos HSCT-FE para o deslocamento radial na marca de triangulação localizada no topo da consola central. Desta análise é possível verificar o bom ajustamento obtido entre o modelo estatístico (HSCT-FE) e o modelo numérico (MEF) para o efeito elástico da PH e para o efeito da temperatura (gráficos superior esquerdo e direito, respetivamente, da figura). No gráfico referente ao efeito elástico da PH, com o aumento do nível da albufeira, há um aumento do deslocamento radial, com um valor máximo aproximado de cerca de 30 mm. No gráfico referente ao efeito da temperatura, o deslocamento anual máximo, tanto para o arrefecimento do inverno como para aquecimento do verão, é de aproximadamente 12,5 mm no sentido de jusante para o inverno e no sentido oposto no verão, isto no período de tempo considerado na análise. Naturalmente, o efeito da temperatura segue um comportamento harmónico.

No gráfico central de separação de efeitos da Figura 4 é observável, ao longo do tempo, um bom ajustamento entre a aproximação obtida por aplicação do MMQ e as observações. A componente de fluência do PP apresenta, para o período em análise, um valor acumulado reduzido (no início do período da análise o PP já está instalado na estrutura há cerca de 30 anos, portanto, num betão com esta idade, esta ligeira variação devido ao efeito de fluência também era esperada). Relativamente à componente elástica da PH, a mesma segue a variação do nível da albufeira com deslocamentos no sentido de jusante.

A variação da componente de fluência da PH apresenta, tal como esperado, um aumento ao longo do tempo até ao valor máximo de cerca de 25 mm no sentido de jusante. O efeito das expansões está direcionado para montante com um valor máximo acumulado de aproximadamente 20 mm para o período de 1980 até 2018.

Na figura 5 apresentam-se os resultados da análise da história do deslocamento vertical no topo da consola central utilizando o presente modelo de separação de efeitos do tipo HSCT-FE. Como se pode verificar é claramente identificada uma parcela de empolamento progressivo associada às expansões e duas componentes de fluência em sentidos opostos: uma de assentamento progressivo associada ao peso próprio e uma de empolamento associada à pressão hidrostática.

Na Figura 6 analisam-se os deslocamentos devidos às expansões (1982-2018) comparando os resultados da separação de efeitos (modelo HSCT-FE) com os resultados numéricos obtidos com o modelo de elementos finitos. No topo da Figura 6 comparam-se

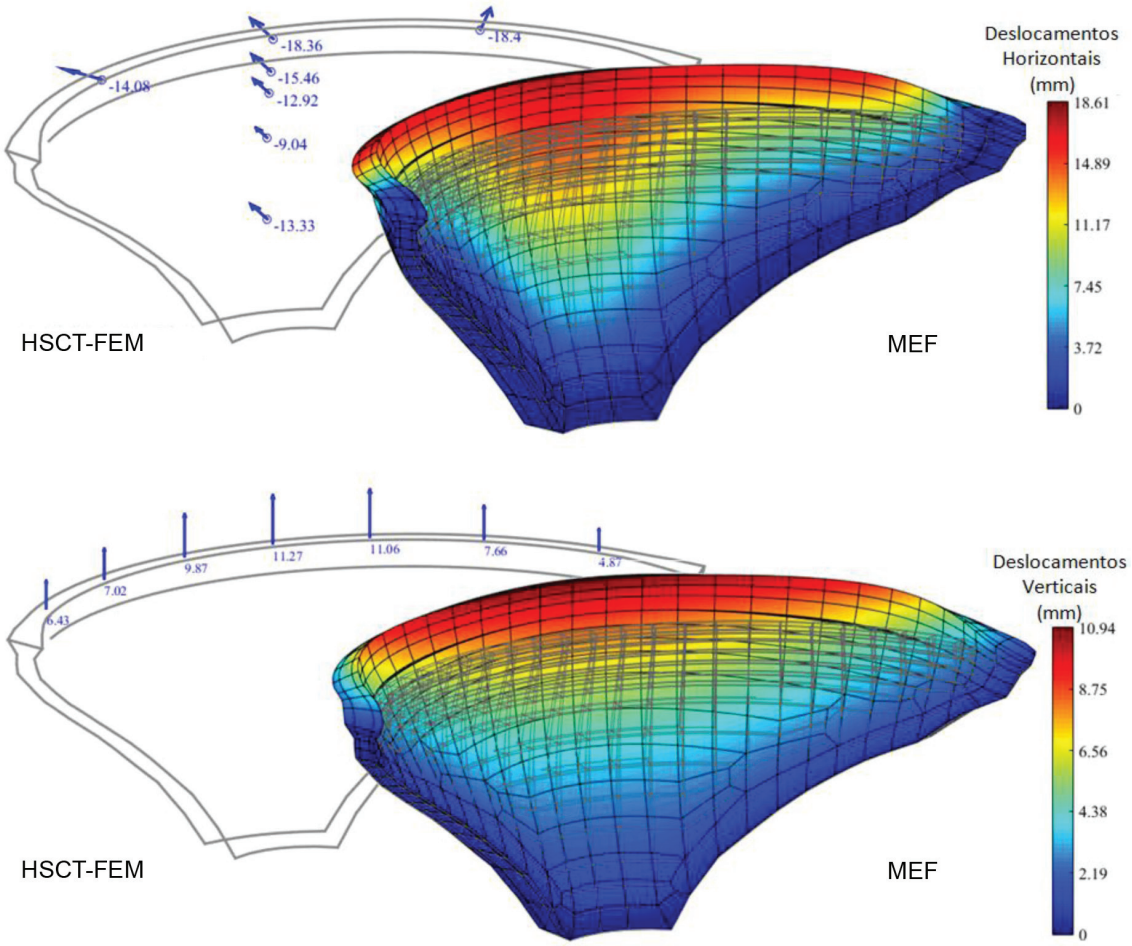

Figura 6 Efeito das expansões. Comparação dos resultados dos modelos HSCT-FE com o MEF. (topo) Deslocamentos radiais. (fundo) Deslocamentos verticais

os resultados referentes aos deslocamentos radiais e no fundo da mesma comparam-se os resultados referentes aos deslocamentos verticais. Como se pode verificar obtém-se um bom acordo entre os resultados do modelo de separação de efeitos e os resultados numéricos do MEF, tanto para a componente radial como para a componente vertical dos deslocamentos, o que é um bom indicador da adequabilidade de ambos os modelos.

Na Figura 6 é possível verificar que, devido às expansões (1982-2018), ocorrem maiores deslocamentos radiais junto ao coroamento, na direção de montante, com valores máximos no topo da consola central, e decrescendo tanto na direção dos encontros como na direção do pé da barragem. Os deslocamentos verticais também apresentam valores máximos no topo da consola central. De forma geral pode-se verificar que existe um bom ajuste global entre os deslocamentos calculados e os identificados por separação de efeitos. Por exemplo, no topo da consola central, o deslocamento radial obtido por separação de efeitos, através dos modelos HSCT-FE, é de cerca de 18 mm, idêntico ao valor obtido através do MEF, na mesma localização. Similarmente, os deslocamentos verticais obtidos por ambos os modelos, na mesma localização, são de aproximadamente 11 mm.

4 Conclusões

A metodologia apresentada, usando modelos híbridos de separação de efeitos do tipo HSCT-FE, aplicada à análise dos deslocamentos observados na barragem do Cabril, permitiu verificar que o campo de deslocamentos devido à ação expansiva (1982-2018) obtido por separação de efeitos é coerente com o respetivo campo de deslocamentos calculado numericamente com o modelo de elementos finitos validado da barragem, quer em termos das componentes radiais quer em termos das componentes verticais. No modelo de elementos finitos foi considerada uma ação expansiva compatível com os valores das extensões medidas nos extensómetros corretores, de forma a validar os seus resultados. O bom acordo obtido exigiu que, no modelo de separação de efeitos, fossem consideradas separadamente as parcelas de fluência do peso próprio e da pressão hidrostática e que fosse utilizada uma função

de fluência corrigida, maior do que a inicialmente prevista para o betão intacto. Ou seja, foi necessário considerar que, sendo o betão afetado por reações expansivas, a respetiva fluência é cerca do dobro da inicialmente estimada para o betão intacto.

Referências

[1] Ramos M. (1985) – Consideração da reologia do betão no comportamento de barragens, Tese de especialista, LNEC.

[2] Ramos, M.: Pinho, J. (1987) – A new method for quantitative analysis of dam displacements. In: III Int. Conf. on Computational Methods and Experimental Measurements. Porto.

[3] Batista, A.; Ramos, J.; Oliveira, S.; Gomes, P. (2002) – Models for safety control of concrete dams. In: 3rd International Conference on Dam Engineering: pp. 1:8. CI Premier. Singapura.

[4] Oliveira, S. (2000) – Modelos para análise do comportamento de barragens de betão considerando a fissuração e os efeitos do tempo. Formulações de dano, Tese de doutoramento, FEUP.

[5] Willm, G.; Beaujoint, N. (1967) – Les méthodes de surveillance des barrages au service de la Production Hidraulique d'Electricité de France; Problèmes anciens e solutions nouvelles. In the Proceedings of the IX ICOLD Congress, Istambul, R.30, Q.34.

[6] Bazant, Z.P.; Panula, L. (1979) – Practical prediction of time dependent deformations of concrete. Materials & Structures.

[7] Larive, G. (1997) – Apports combinés de l'expérimentation et de la modélisation à la compréhension de l'alcali-réaction et de ses effets mécaniques. Tese de doutoramento, École Nacional de Ponts et Chaussées.