



Observação e análise de extensões e tensões na barragem de Cahora Bassa

Miguel Rodrigues

Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, miguel.ads.rodriques@gmail.com

Sérgio Oliveira

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

Jorge Proença

IST, Lisboa, Portugal, jorge.m.proenca@tecnico.ulisboa.pt

Ezequiel Carvalho

HCB, Songo, Moçambique, ezequiel. carvalho@hcb.co.mz

Paulo Mendes

ISEL, Lisboa, Portugal, pmendes@dec.isel.ipl.pt

Resumo

Em barragens de betão, a determinação do estado de tensão num dado ponto a partir das extensões observadas através de grupos de extensómetros elétricos requer uma boa caracterização dos parâmetros viscoelásticos do betão. Neste trabalho apresenta-se uma metodologia de separação de efeitos para interpretação de extensões observadas ao longo do tempo com vista à determinação das correspondentes tensões instaladas, separando o efeito pressão hidrostática de outros efeitos, nomeadamente do efeito elástico das variações de temperatura anuais e do efeito associado à progressão das expansões ao longo do tempo. Esta metodologia foi aplicada na análise dos dados de alguns grupos de extensómetros da barragem do Cahora Bassa (em Moçambique), uma barragem abóbada de dupla curvatura com 170 m de altura. Após implementação computacional (em MATLAB) a referida metodologia é aplicada na análise dos dados de alguns grupos de extensómetros planos. São estimadas as tensões principais e respetivas direções para a ação da pressão hidrostática e efetua-se a comparação com as tensões principais calculadas numericamente por intermédio de um modelo de elementos finitos tridimensionais (EF3D). Analisa-se igualmente a parcela das tensões associada às variações de temperatura assim como a parcela das tensões associadas à progressão do processo expansivo, tendo em conta a relaxação, comparando com os correspondentes valores calculados com o modelo EF3D.

Palavras-chave: Barragens de betão; Extensões e tensões; Modelos de separação de efeitos; Expansão do betão; Fluência e relaxação; Modelos de elementos finitos

1 INTRODUÇÃO

No âmbito das atividades de controlo da segurança de barragens de betão são observadas correntemente diversas grandezas sendo as extensões, observadas em grupos de extensómetros, as que apresentam maiores dificuldades de análise devido ao seu carácter tensorial e à forma como são influenciadas pela viscoelasticidade do betão. Nas grandes barragens de betão as extensões são medidas em vários grupos de extensómetros [1] (unidimensionais, bidimensionais ou tridimensionais), distribuídos pelo corpo das obras, com o objetivo de caracterizar os campos de deformações e de tensões que se instalam nas barragens ao longo da sua vida. A análise destas grandezas ao longo do tempo exige a utilização de modelos estatísticos de separação de efeitos que permitam considerar coerentemente o seu carácter tensorial e a influência dos efeitos viscoelásticos característicos do betão, nomeadamente: fluência sob forças aplicadas, como é o caso da pressão hidrostática, e relaxação sob deformações impostas, como é o caso, por ex., das expansões. Neste trabalho utiliza-se um modelo de separação de efeitos desenvolvido com o objetivo de analisar histórias de extensões observadas em barragens de betão com vista à respetiva conversão em tensões [2,3,4]. Este modelo, que requer o prévio conhecimento da função de fluência do betão, é aplicado na análise das extensões observadas na barragem de Cahora Bassa. As tensões obtidas a partir da interpretação quantitativa das histórias das extensões observadas, são comparadas com as tensões determinadas numericamente pelo método dos elementos finitos, admitindo que o betão tem um comportamento viscoelástico.

2 MODELOS HSCT PARA ANÁLISE DE EXTENSÕES E DETERMINAÇÃO DE TENSÕES

Para analisar a evolução das tensões entre épocas afastadas no tempo, tendo em conta que a parcela diferida das extensões devidas à pressão hidrostática não provoca aumento de tensões e que as deformações impostas provocam tensões que ficam sujeitas a relaxação, foi desenvolvida uma metodologia que se apresenta de seguida.

A hipótese fundamental do modelo adotado para interpretação quantitativa de extensões e conversão em tensões, consiste em admitir que a história de extensões observadas $\epsilon(t)$ pode ser decomposta numa parcela devida a forças aplicadas (impulso hidrostático) $\epsilon^H(t)$ e noutra devida a deformações impostas $\epsilon^D(t)$ [2,3]. A parcela $\epsilon^H(t)$ pode decompor-se ainda numa parcela elástica $\epsilon_e^H(t)$ e numa parcela diferida $\epsilon_f^H(t)$. A parcela $\epsilon^D(t)$ inclui as extensões devidas às restrições estruturais $\epsilon^{Dr}(t)$ e as medidas no corretor $\epsilon^0(t)$. Como esta parcela $\epsilon^0(t)$ pode ser medida usando extensómetros corretores é adequado escrever a equação de separação de efeitos na forma seguinte

$$\epsilon(t) - \epsilon^0(t) = \epsilon_e^H(t) + \epsilon_f^H(t) + \epsilon^{Dr}(t) \quad (1)$$

As tensões correspondentes à parcela $\epsilon^{Dr}(t) = \epsilon^D(t) - \epsilon^0(t)$ relaxam ao longo do tempo enquanto as tensões associadas à parcela elástica $\epsilon_e^H(t)$ não relaxam e mantêm a sua dependência exclusiva das ações, não dependendo do tempo; a parcela diferida $\epsilon_f^H(t)$ não origina tensões. Assim, obtida a decomposição anterior, a história de tensões relativa ao período de exploração normal, para estados tridimensionais de tensão, é dada, por

$$\underline{\sigma}(t) = \underline{D}\underline{\varepsilon}_e^H(t) + \int_{t'=t_0}^t \underline{C}^{-1}R(t, t') d(\underline{\varepsilon}^D(t') - \underline{\varepsilon}^0(t')) \quad (2)$$

em que \underline{D} é a usual matriz de elasticidade, $\underline{C} = E\underline{D}^{-1}$ sendo E o módulo de elasticidade do material e $R(t, t')$ é a função de relaxação [5]. É ainda de referir que a parcela $\underline{\varepsilon}^{Dr}(t)$ pode ser decomposta numa parcela sinusoidal $\underline{\varepsilon}_S^{Dr}(t)$ (associada, p.ex., a variações termo-higrométricas sazonais) e numa parcela não-sinusoidal $\underline{\varepsilon}_{NS}^{Dr}(t)$ (associada, p.ex., a expansões, movimentos de fundação, a redistribuições devidas a uma eventual heterogeneidade das características viscoelásticas ou ao efeito das ações anteriores ao início do período em análise).

Com base nas técnicas de separação de efeitos usadas habitualmente (que admitem, por simplificação, que as parcelas elástica e de fluência devidas ao nível da água são independentes) não é possível separar adequadamente as parcelas $\underline{\varepsilon}_f^H(t)$ e $\underline{\varepsilon}_{NS}^{Dr}(t)$ relacionadas com os efeitos de tempo. Para conseguir uma separação adequada destas parcelas pode ser usada a formulação proposta em [2,3] que parte do conhecimento físico da correlação entre as parcelas elástica $\underline{\varepsilon}_e^H(t)$ e diferida $\underline{\varepsilon}_f^H(t)$ e permite separar a fluência dos restantes efeitos do tempo. Esta técnica recorre à discretização do nível da água em patamares de carga constantes e à aplicação do princípio da sobreposição dos efeitos para obter a resposta diferida como o somatório das respostas correspondentes aos diversos patamares usando o coeficiente de fluência $\Phi(t, t')$. Assim pode obter-se uma equação de separação de efeitos como a seguinte

$$\varepsilon(t) - \varepsilon^0(t) = a \left(h^4(t) + \sum_{t'=t_0}^t \Phi(t, t') [h_F^4(t') - h_I^4(t')] \right) + bT + ct + k \quad (3)$$

ou, para estados planos de tensão (grupos de extensómetros planos, colocados junto às faces)

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11}(t) \\ \varepsilon_{22}(t) \\ \gamma_{12}(t) \end{bmatrix} = [a_1 \ a_2 \ a_3] \begin{bmatrix} I_{11}(t) & I_{12}(t) & 0 \\ I_{21}(t) & I_{22}(t) & 0 \\ 0 & 0 & I_{33}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} T + \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{bmatrix} .t + \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$I_{11} = I_{22} = \left[\frac{h^4(t)}{E(t)} + \sum_{t'=t_0}^t \Phi(t, t') (h_F^4(t') - h_I^4(t')) \right], \quad I_{12} = I_{21} = -\nu I_{11}, \quad I_{33}(t) = 2(1 + \nu)I_{11} \quad (5)$$

Assim, com as hipóteses adotadas é estabelecido um sistema de $3 \times N$ equações (se existirem N épocas de observação) e 12 incógnitas. Após a resolução deste sistema de equações pelo MMQ é necessário discretizar a parcela calculada $\underline{\varepsilon}^{Dr}(t)$ para obter finalmente a história de tensões

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11}(t) \\ \sigma_{22}(t) \\ \sigma_{12}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix}^T \underline{D} h^4(t) + \begin{bmatrix} 1 & -\nu & 0 \\ -\nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2(1 + \nu) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum_{t'=t_0}^t R(t, t') \Delta \varepsilon_{11}^{Dr}(t') \\ \sum_{t'=t_0}^t R(t, t') \Delta \varepsilon_{22}^{Dr}(t') \\ \sum_{t'=t_0}^t R(t, t') \Delta \gamma_{12}^{Dr}(t') \end{bmatrix} \quad (6)$$

3 BARRAGEM DE CAHORA BASSA. CARACTERIZAÇÃO E ANÁLISE DE DESLOCAMENTOS

3.1 Características da barragem

A barragem de Cahora Bassa (Fig.1), localizada perto de Songo, no rio Zambeze, foi construída no final de 1974. É uma barragem abóbada de dupla curvatura com 170 m de altura, assente numa fundação granítica de muito boa qualidade. O coroamento, à cota 331 m, tem um comprimento da ordem de 300 m. A secção central tem 23 m de largura na base e 4 m de largura no coroamento. Na década de 1980, foi detetado um processo expansivo. Numa inspeção visual, em meados de 2017 foi registado o estado do coroamento que se apresenta na Fig.1b a qual mostra um padrão de fissuração tipo “craquelet” característico de obras com expansões. Neste caso é interessante notar que a fissuração é mais acentuada na faixa de montante devido à geometria da zona superior da obra, caracterizada por um coroamento vazado a jusante, até meia espessura.

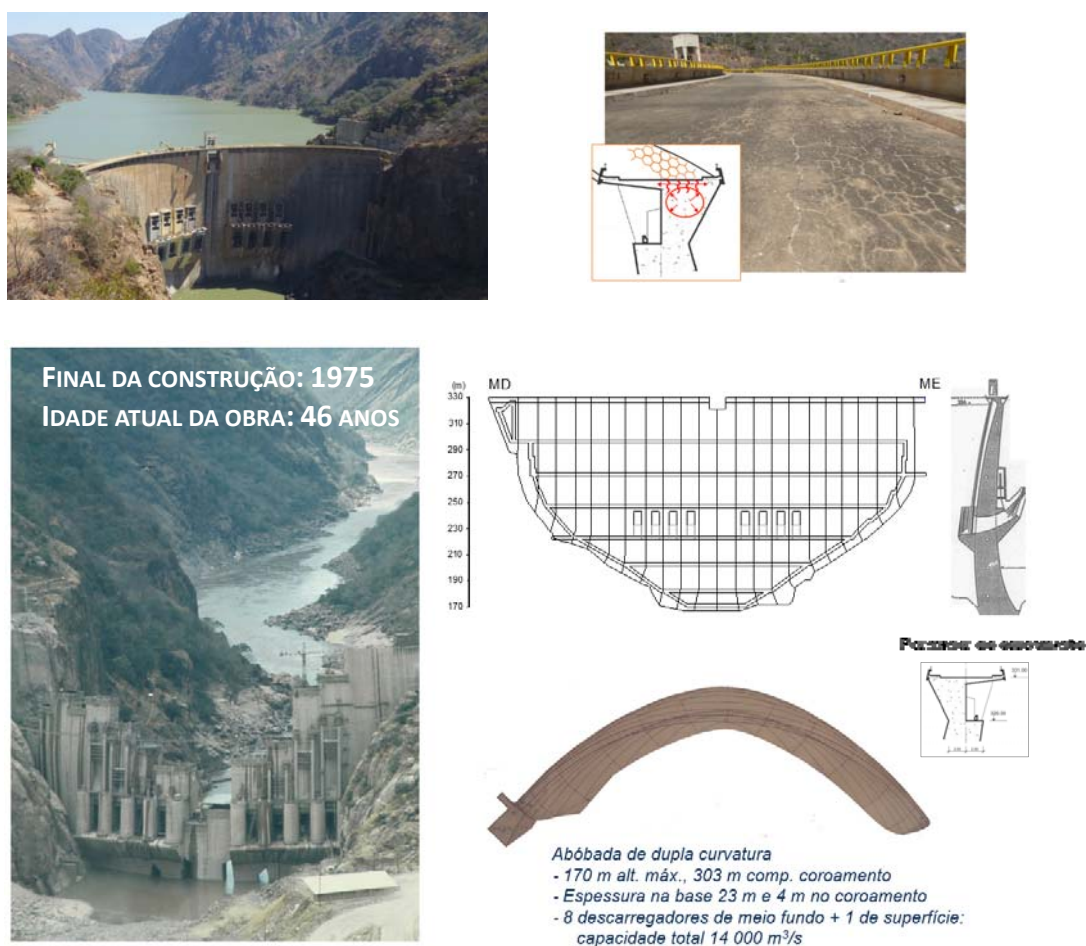


Figura 1. Barragem de Cahora Bassa. a) Vista da barragem; b) Fissuração no coroamento; c) Fase de construção. d) Geometria da obra: alçado, consola central e planta.

Na figura 2a apresentam-se as extensões livres medidas em todos os corretores sendo de notar um aumento progressivo entre 1975 e 2021 com valores totais acumulados variando entre 300e-6 e 1000e-6. Na figura 2b apresentam-se os deslocamentos verticais observados entre galerias com os extensómetros de varas instalados em 2006. Pode-se constatar que os valores acumulados ao longo do tempo indicam valores de expansão significativamente mais acentuados na zona superior da obra.

Na Fig.3 apresenta-se o MEF utilizado no apoio à interpretação dos resultados da análise das extensões observadas recorrendo ao modelo de separação de efeitos apresentado; apresenta-se também a função de fluência adotada [6] e o campo de expansões considerado, o qual foi calibrado por forma a simular a evolução observada da parcela dos deslocamentos devidos às expansões (obtida por separação de efeitos com base num modelo do tipo HSCT).

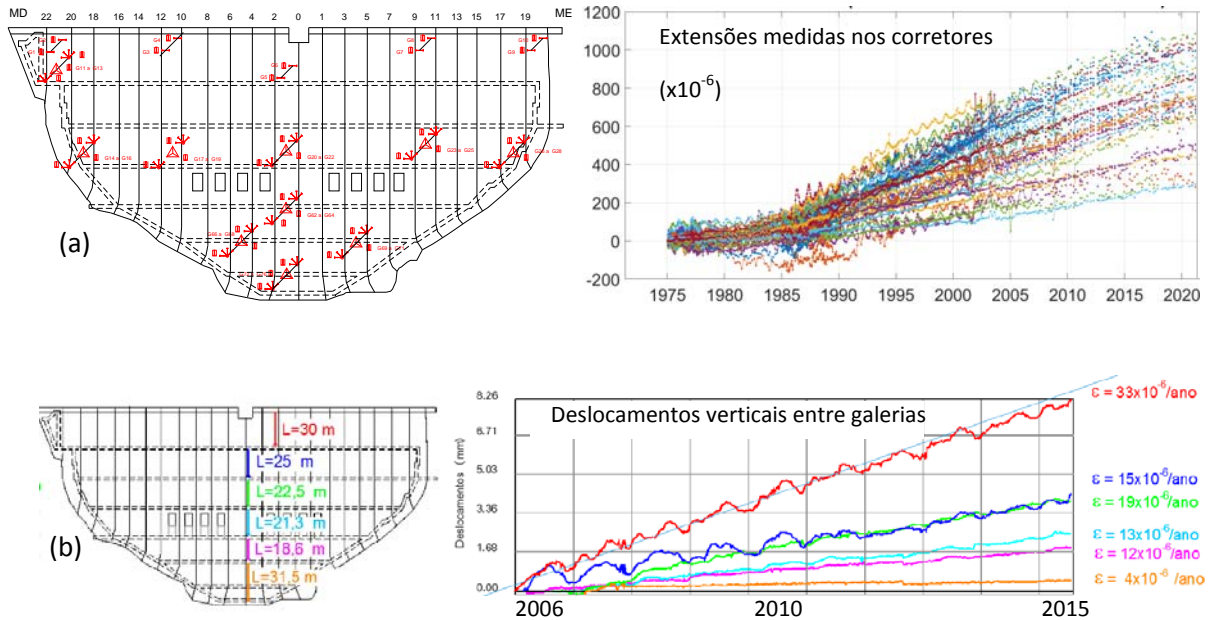


Figura 2 - Caracterização da ação expansiva. Extensões medidas em alguns extensómetros corretores e calculadas a partir de extensómetros de varas

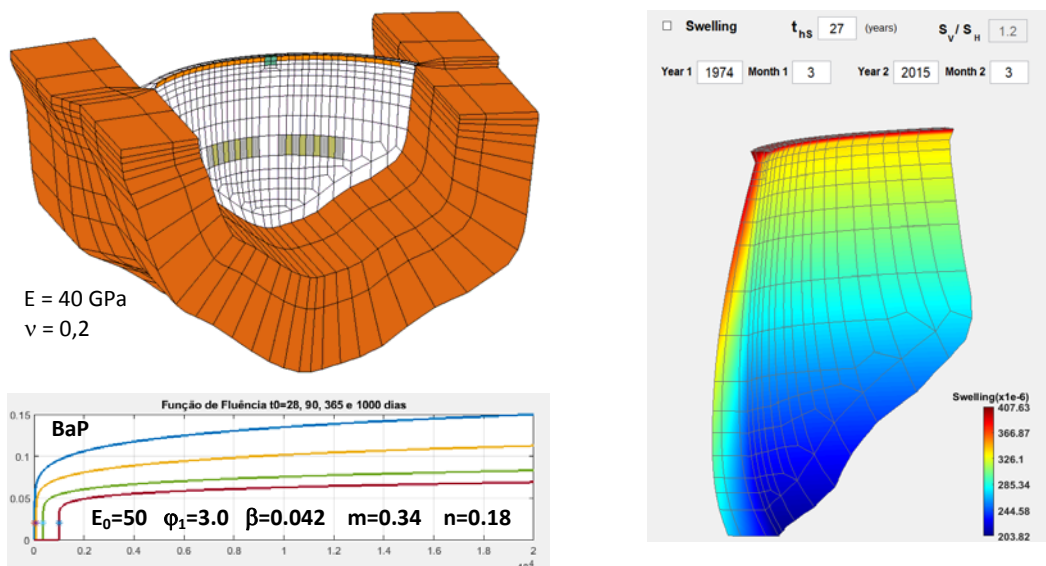


Figura 3 – Modelo de EF3D. Ação expansiva calibrada para simular os deslocamentos observados

3.2 Análise de deslocamentos horizontais e verticais

Na figura 4 mostra-se que o deslocamento no topo da secção central (componente radial e vertical) devido ao efeito das expansões entre 1975 e 2017 (valores identificados com o modelo HSCT atrás referido) é coerente com o desenvolvimento de um processo expansivo, apresentando valores acumulados para montante e para cima, da ordem de 55 mm e 45 mm, respetivamente. Na figura 5 mostra-se que, nos vários pontos observados, os deslocamentos radiais para montante (fios de prumo) e verticais para cima (nivelamento, no coroamento), acumulados devido ao efeito das expansões até 2017 (valores identificados com o modelo HSCT atrás referido) são coerentes com os calculados numericamente com o MEF de referência admitindo valores das expansões da ordem de metade dos valores registados nos extensómetros corretores (em “cones” livres, de betão crivado).

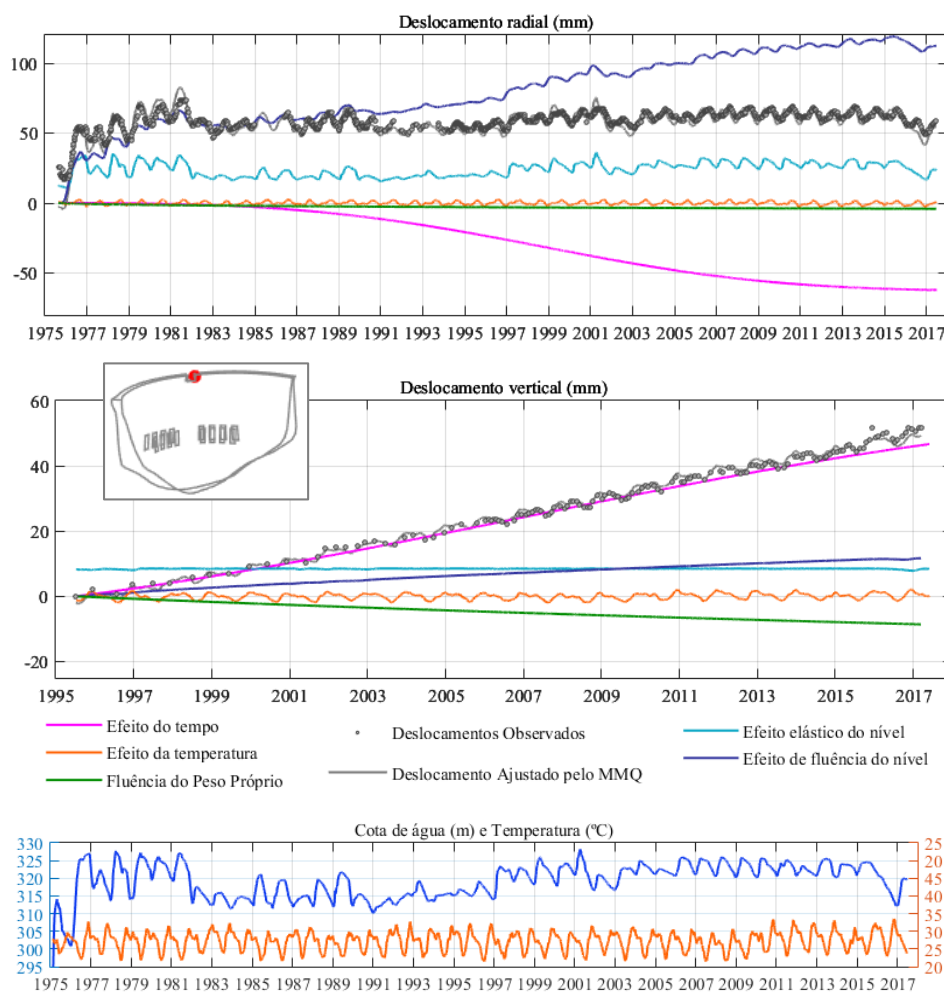


Figura 4 – Deslocamento radial e vertical no topo da secção central. Análise por separação de efeitos com um modelo HSCT.

Efeito das expansões 1975-2017. Comparação de resultados do MSE e do MEF

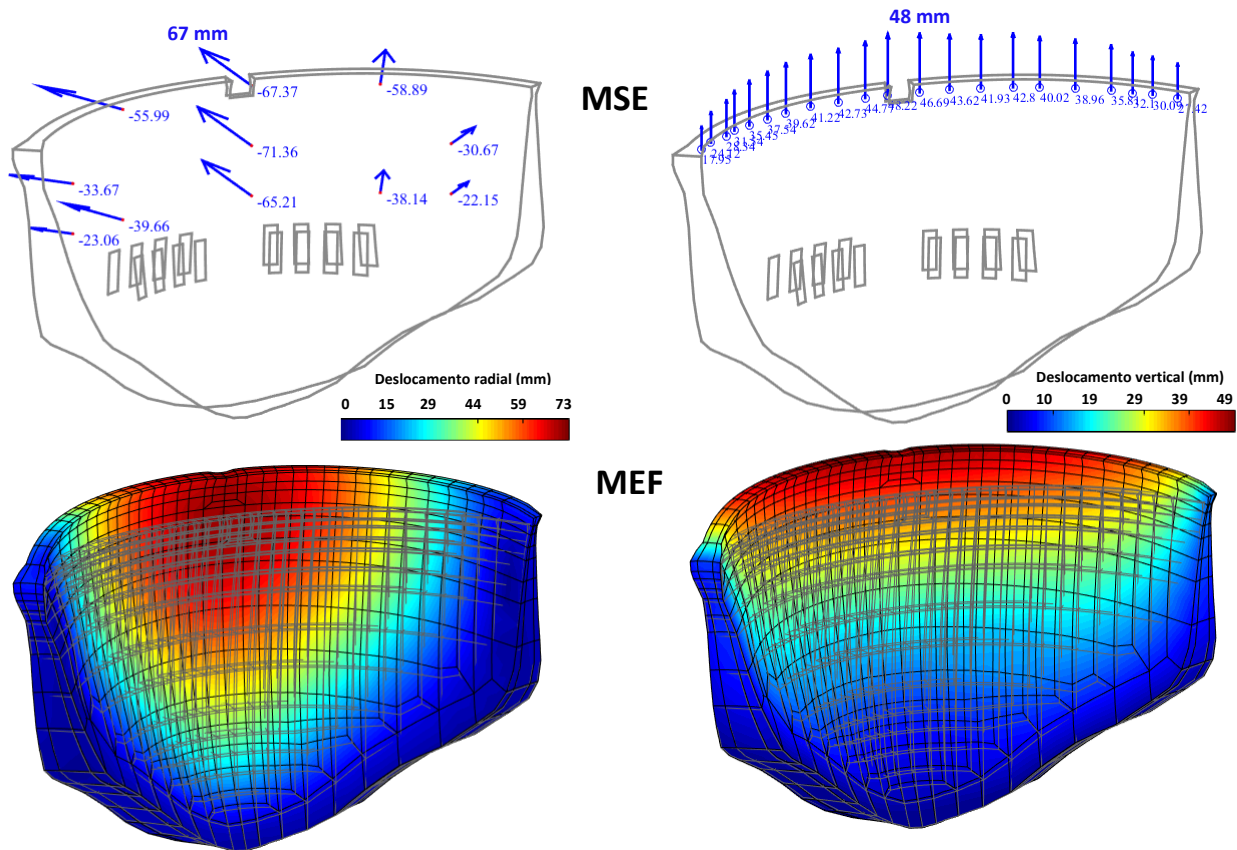


Figura 5 - Deslocamentos radiais (fios de prumo) e verticais (nivelamento). Efeito das expansões 1975-2017 estimado com base num modelo de separação de efeitos HSCT e comparação com valores previstos pelo MEF.

4 ANÁLISE DE EXTENSÕES E CONVERSÃO EM TENSÕES

Na figura 6 apresenta-se o resultado da aplicação ao grupo de extensómetros plano 20J (paramento de jusante) do modelo de separação de efeitos adotado para análise de extensões e conversão em tensões. Como referido, este modelo de separação de efeitos permite ter em conta o carácter tensorial das tensões e das extensões e permite considerar o efeito de relaxação de tensões associadas à expansão e o aumento das extensões devido ao efeito de fluência associada à pressão hidrostática. Quanto à parcela elástica devida à pressão hidrostática foi identificada, neste ponto (grupo 20J), uma tensão σ_{11} de compressão, aproximadamente horizontal, e uma tensão σ_{22} de tração, aproximadamente vertical. Relativamente à parcela de tensões devida à expansão foram identificadas, no período em análise, tensões acumuladas de compressão da ordem de 3,5 MPa na horizontal e 2 MPa na vertical.

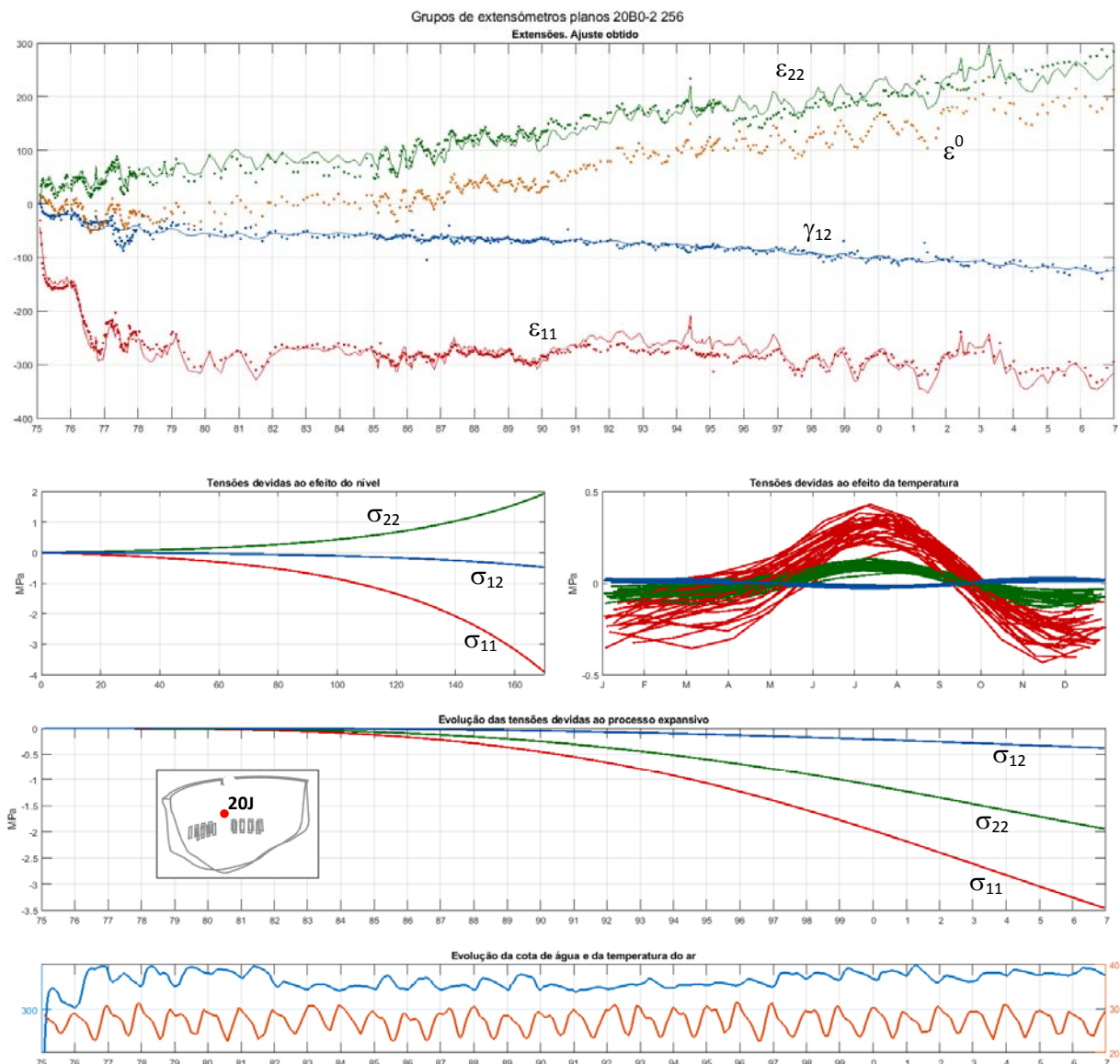


Figura 6. Grupo 20 (Jusante). Modelo de separação de efeitos considerando o carácter tensorial das tensões e extensões e a viscoelasticidade.

Na figura 7 comparam-se as tensões calculadas numericamente na secção central através do modelo de EF3D (MEF) com as identificadas a partir dos dados da observação nos grupos 20J, 22M e 62J recorrendo ao modelo de separação de efeitos atrás referido, sendo notório o bom acordo entre os resultados do MEF e os do modelo de separação de efeitos.

Na figura 8 mostram-se as tensões identificadas por separação de efeitos no grupo 62J. Neste ponto o modelo de separação de efeitos aponta para a existência de tensões de compressão acumuladas devidas à expansão no período em análise (1975-2021), da ordem de 14 MPa na direção horizontal e de 9 MPa na direção vertical, o que é coerente com os resultados do MEF também apresentados na mesma figura.

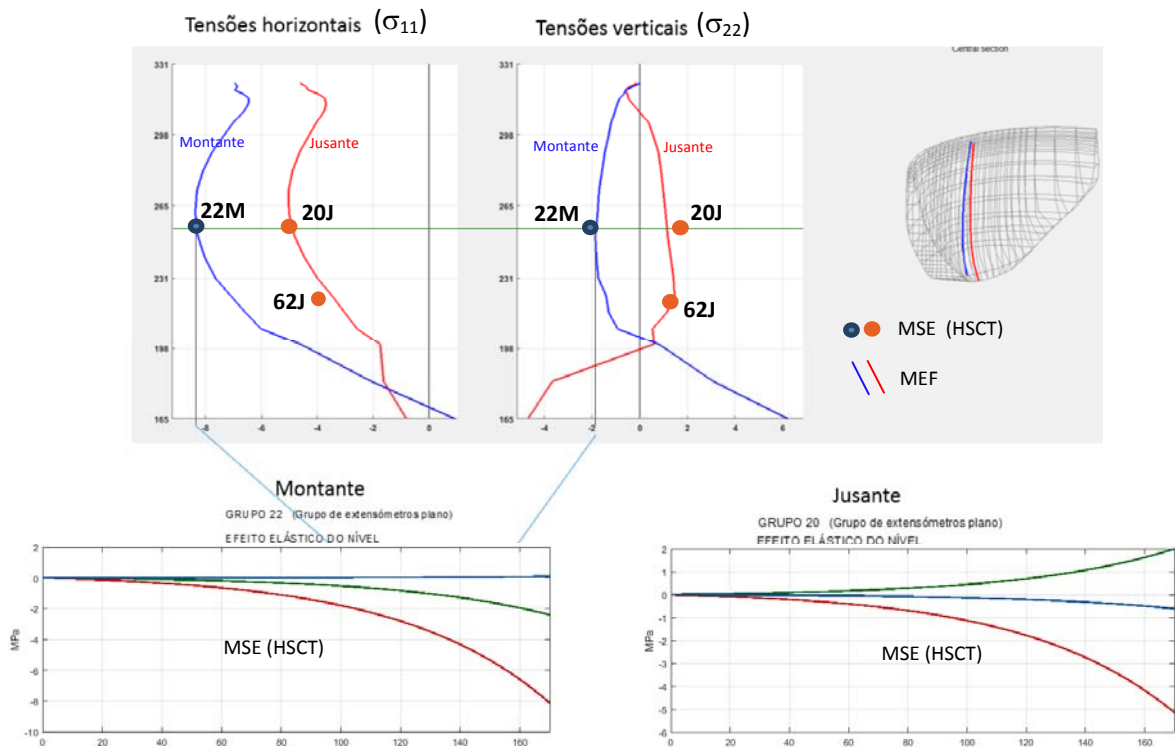


Figura 7. Tensões na secção central devidas à pressão hidrostática. Comparação entre resultados do modelo de separação de efeitos e resultados calculados com o MEF.

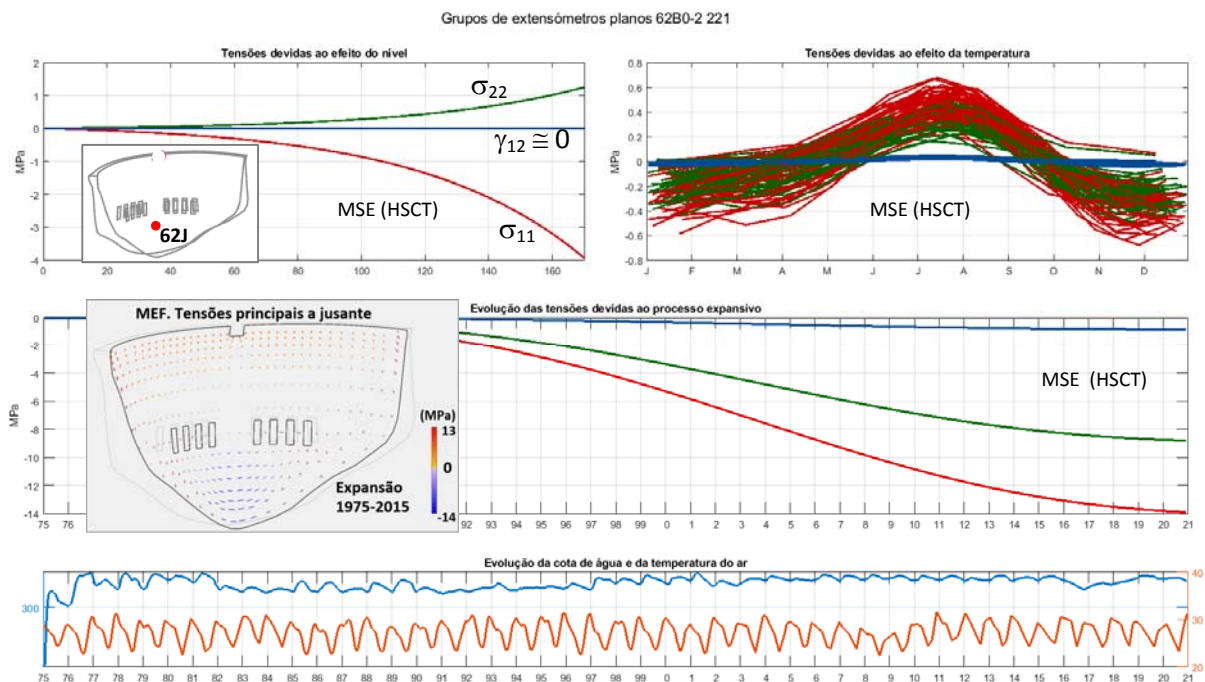


Figura 8. Evolução das tensões devidas à ação expansiva num ponto da zona central inferior, a jusante: zona em compressão devida às expansões. Comparação entre resultados do modelo de separação de efeitos e resultados calculados com o MEF.

5 CONCLUSÕES

Com a formulação apresentada para análise por separação de efeitos das extensões observadas em barragens de betão mostrou-se, com o exemplo da barragem de Cahora Bassa, que é possível obter a separação de efeitos das tensões a partir das extensões observadas nos grupos de extensómetros, tendo em conta o carácter tensorial das tensões e das deformações e a viscoelasticidade do betão. Em particular, os resultados da comparação entre resultados do modelo de separação de efeitos (MSE) e resultados numéricos de um modelo de EF, mostraram que, como o MSE adotado: i) é possível avaliar o efeito diferido da fluência associada à pressão hidrostática ao nível das componentes de deformação e assim calcular as correspondentes tensões elásticas instantâneas após a separação da parcela diferida das deformações que, como se sabe, não origina tensões; e ii) é possível determinar as componentes de tensão associadas aos efeitos das principais ações, como a PH e as VT, e, em particular, é possível determinar a parcela das tensões devidas às expansões tendo em conta o efeito de relaxação.

A adequabilidade do modelo de separação de efeitos adotado neste trabalho para análise de extensões e tensões, confirmada no caso da aplicação à análise do campo de tensões da barragem do Cahora Bassa, deve continuar a ser verificada através da aplicação a outras obras pelo que foi desenvolvido um novo módulo computacional, em MATLAB, que permite uma fácil utilização do modelo proposto, com várias saídas gráficas, entre as quais se destacam as que permitem visualizar a comparação das tensões determinadas através do modelo de separação de efeitos com as calculadas através de modelos de EF3D.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Hidroelétrica de Cahora Bassa (HCB) todo o apoio fornecido.

REFERÊNCIAS

- [1] Castro, A. T. (1988). Determinação de estados de tensão tridimensionais com extensómetros embebidos, LNEC, Lisboa, 20p.
- [2] Oliveira, S.; Ramos, M.; Florentino, C. (1998). Determinação e análise de tensões a partir das extensões observadas em barragens de betão, JPÉE98, LNEC, Lisboa, p.557-566.
- [3] 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. Porto, p. 27-40.
- [4] Farinha, L. B. (2000). Extensões e tensões observadas em barragens de betão, Tese de Mestrado, IST, Lisboa, p.20-35.
- [5] Bazant, Z. P. (1972). Numerical determination of long-range stress history from strain- history in concrete. Materials and Structures, Vol.5 Nº27, RILEM, Paris, p.135-141.
- [6] Ramos, M. (1985). Consideração da reologia do betão no comportamento de barragens. Tese de Especialista, LNEC, Lisboa, p.175-208.