



Observação e análise dos efeitos estruturais das expansões do betão na barragem de Fagilde

José Piteira Gomes

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

António Lopes Batista

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

Samuel Sousa

Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa (FCT/UNL), Portugal, sp.sousa@campus.fct.unl.pt

Resumo

A barragem de Fagilde está afetada por expansões do betão, devidas à reação sulfática interna (RSI), que têm provocado a deterioração progressiva da barragem. Há amplas zonas da obra com intensa fendilhação.

Nesta comunicação é apresentada uma primeira abordagem da análise estrutural da barragem, com o objetivo de identificar os padrões do desenvolvimento heterogéneo da expansão nos diferentes elementos estruturais da obra, bem como estimativas de parâmetros a serem usados em estudos subsequentes. O comportamento da barragem foi simulado através de modelação térmica, higrométrica e estrutural, com base no método dos elementos finitos. Foi considerada a evolução no tempo das principais ações (pressão hidrostática, variações de temperatura e expansões) e das propriedades do betão.

A definição das expansões livres do betão foi realizada a partir de alguns resultados da observação e de ensaios laboratoriais, e considerou a humidade interna e a temperatura no betão. As expansões estruturais tiveram em conta os efeitos do confinamento proporcionado pelas tensões de compressão. A análise estrutural foi efetuada por um modelo viscoelástico, para ter em consideração a fluência e a relaxação do betão. Tratando-se de uma primeira abordagem de modelação do comportamento da obra, não foi simulada a fendilhação do betão.

Os resultados obtidos mostram que os efeitos das expansões são largamente dominantes no comportamento da obra, mas as suas condições de funcionalidade e segurança estrutural são ainda satisfatórias.

Palavras-chave: Barragem de Fagilde; Reações expansivas; Fluência e relaxação; Modelos estrutural e térmico

1 INTRODUÇÃO

Em Portugal há cerca de seis dezenas de grandes barragens de betão com acompanhamento regular. Cerca de um terço delas estão afetadas por reações expansivas de origem interna do betão. Uma delas, a barragem do Alto Ceira, foi mesmo substituída em 2013, já que a fendilhação generalizada do betão em toda a obra tornou inviável a sua reabilitação. Atualmente, as barragens de Pracana, Santa Luzia e Fagilde são as que apresentam valores médios das extensões acumuladas no tempo superiores a 1000×10^{-6} . A barragem de Pracana sofreu importantes obras de reabilitação entre 1988 e 1992, apresentando desde então um comportamento satisfatório. Na barragem de Santa Luzia as taxas anuais de expansão têm vindo a diminuir nas últimas duas décadas, pelo que o processo químico parece estar a esgotar-se. A barragem de Fagilde é a que apresenta taxas de expansão mais elevadas da ordem de 50×10^{-6} /ano. Nas outras barragens afetadas, os processos de deterioração são ainda de pequena a moderada magnitude. Em todas estas obras foram utilizados betões fabricados com agregados grossos graníticos e quartzíticos, muito abundantes no nosso país, exceto na barragem de Fagilde, onde foram usados calcários micríticos.

Apresentam-se os resultados relevantes do estudo de análise e interpretação do comportamento observado da barragem de Fagilde, realizado no âmbito de uma dissertação de mestrado [1]. Utilizou-se um modelo termo-químico-mecânico desenvolvido no LNEC, que considera o potencial expansivo do betão e as influências da humidade interna e da temperatura no desenvolvimento das expansões [2]. As variações de temperatura no corpo da barragem foram calculadas com um modelo térmico que teve em consideração as temperaturas do ar e da água nas superfícies exteriores da barragem e os efeitos da radiação solar. As variações da humidade interna do betão foram calculadas com o modelo hidrométrico do tipo difusivo. O modelo estrutural considerou a evolução no tempo das principais ações (pressão hidrostática, variações de temperatura e expansões) e das propriedades do betão, tendo sido analisado em regime viscoelástico, para ter em consideração a fluência e a relaxação do betão. O potencial expansivo do betão foi estimado a partir dos resultados da monitorização e de ensaios laboratoriais.

2 CARACTERÍSTICAS DA BARRAGEM E DO PROCESSO EXPANSIVO DO BETÃO

2.1 Características da barragem

A barragem de Fagilde, localizada no rio Dão, nas proximidades de Viseu, foi construída entre agosto de 1982 e o final de 1983. Trata-se de uma estrutura de betão constituída por uma parte central com contrafortes, ladeada por duas abóbadas cilíndricas que fecham as margens. O maciço rochoso de fundação é granítico. A estrutura central tem uma altura máxima acima da fundação de 26,6 m e compreende três contrafortes, entre os quais se inserem dois descarregadores (um de superfície e outro de meio fundo), cada um com dois vãos. As duas abóbadas cilíndricas têm espessura variável, paramento de montante vertical e uma altura máxima de 18,0 m, estando apoiadas nos contrafortes laterais e em encontros artificiais (Fig. 1). O primeiro enchimento da albufeira iniciou-se em junho de 1985 e terminou em janeiro de 1987.



Figura 1. Vista de jusante da barragem de Fagilde

Na construção da obra foi utilizado betão pronto, da classe B225, com uma dosagem de cimento Portland normal de 360 kg/m^3 , agregado grosso constituído principalmente por rocha calcária britada e agregados finos formados por areão e areia siliciosos (Tabela 1).

Tabela 1. Composição do betão da obra

Componentes (máxima dimensão em mm)	Dosagem de agregados (%)	Composição do betão (kg/m^3)
Brita 38,1 – 25,4	35	661
Brita 25,4 – 9,5	15	283
Brita 9,5 – 4,8	12	227
Areão	27	510
Areia	11	208
Cimento	-	360
Água	-	160
Razão água / cimento	0,44	

Os valores característicos da tensão de rotura à compressão, obtidos nos ensaios realizados durante a construção para controlo da qualidade do betão, usando provetes cúbicos de 20 cm de aresta, foram de 26,7 MPa, 31,8 MPa e 33,8 MPa aos 7, 14 e 28 dias de idade, respetivamente [3]. A maturação do betão foi rápida, pelo que aos 28 dias de idade foi obtido um valor elevado face à classe de resistência prescrita (B225). Atendendo à dosagem de cimento utilizada e à espessura dos elementos betonados, é provável que as temperaturas do betão tenham atingido valores elevados, propiciando condições para o desenvolvimento da RSI [8].

O sistema de observação da barragem permite a avaliação das principais ações e das respostas estrutural e hidráulica. Os deslocamentos absolutos (horizontais e verticais) são observados por métodos geodésicos e os movimentos de juntas através de bases de alongâmetro. Em 2008 foi proposta a sua reabilitação, com vista a melhorar a caracterização da ação expansiva e dos seus efeitos [7]. Alguns dos trabalhos já foram realizados, designadamente os furos para instalação de extensómetros de varas verticais, em 2008 (devido a dificuldades de vária ordem ainda não foram instalados), e o melhoramento dos alvos geodésicos, em julho de 2016.

2.2 Acompanhamento do processo expansivo do betão

Na inspeção anual do LNEC de janeiro de 2001 foi, pela primeira vez, registado um número significativo de fendas nos paramentos da barragem. No entanto, os resultados da observação já indiciavam a existência de um processo de deterioração do betão pela presença de fendilhação difusa em algumas zonas da obra, e também pela ocorrência de deslocamentos horizontais progressivos para montante e de empolamento do coroamento [3].

Face à deterioração progressiva da obra, o seu acompanhamento passou a ser ainda mais cuidado e foram realizados, sucessivamente, os seguintes estudos: i) caracterização do processo expansivo do betão, segundo um plano previamente definido [4], compreendendo o levantamento do estado de fendilhação dos paramentos [5], o estudo da fluência do betão [6] e a caracterização petrográfica, física e química do betão [8,9]; ii) a instrumentação complementar da barragem [7]; a análise detalhada dos resultados da observação continuada da obra [10,11]; e iv) a análise e a interpretação do comportamento observado, usando modelação matemática [1,12].

Em 2004 foi realizado um mapeamento da fendilhação superficial, com vista ao estabelecimento de um estado de referência. Foram caracterizadas as principais fendas existentes nas superfícies aparentes (paramentos de montante e de jusante, faces dos contrafortes e coroamento), através da sua numeração, localização, abertura, desenvolvimento e orientação média. Em determinados casos foram também registadas outras características, nomeadamente o tipo de fendilhação e de preenchimento das fendas. Na Fig. 2 apresenta-se o mapeamento da fendilhação do paramento de jusante, incluindo as novas fendas detetadas na atualização do levantamento realizada em 2009. A fendilhação das superfícies em 2004 era considerável, tendo a maior parte das fendas abertura inferior a 1 mm, mas um número reduzido de fendas (as mais expressivas) tinha maior abertura, mas sempre inferior a 10 mm. Na Fig. 3 apresentam-se fotografias, obtidas em 2015 e 2016, de zonas da obra onde existia um estado mais avançado de deterioração do betão.

Em 2008 foram realizados pelo LNEC 7 furos profundos, com recolha de amostra desde o coroamento até à zona de ligação betão-rocha, com 76 mm de diâmetro, com o objetivo de instalar, em alguns deles, extensómetros de varas. As carotes recolhidas foram utilizadas para a realização dos seguintes ensaios laboratoriais: i) determinação do teor de álcalis solúveis; ii) determinação do teor de sulfatos; iii) caracterização microestrutural do betão por observação ao MEV/EDS; iv) avaliação da reatividade residual aos álcalis dos agregados; e v) avaliação da reatividade residual aos sulfatos internos [8]. Este estudo concluiu que o agregado grosso era constituído, maioritariamente, por rocha calcária, mas também continha granito, xisto e seixo silicioso. Concluiu-se também que, embora o teor em álcalis solúveis fosse elevado, o potencial expansivo por RAS era reduzido, o potencial expansivo por reações sulfáticas internas era maior e o teor de sulfatos internos era suficiente para a continuação do processo expansivo. Sugeriu-se ainda a monitorização do teor de sulfatos da água da albufeira.

A avaliação das propriedades mecânicas do betão estrutural foi realizada sobre provetes obtidos a partir de quatro carotes curtas de 150 mm de diâmetro, extraídas nas abóbadas e nos contrafortes laterais. Os ensaios à compressão simples mostraram uma resistência à compressão elevada, com um valor médio, referido a cubos de 20 cm de aresta, de 33,7 MPa, e uma resistência mínima de 21,1 MPa. Face aos resultados obtidos nos ensaios realizados durante a construção, considerou-se a existência de uma pequena depreciação da resistência à compressão devido ao processo de deterioração. Em relação à resistência à tração por compressão diametral, obtiveram-se um valor médio de 3,0 MPa e

um valor mínimo de 2,25 MPa, o que pressupõe uma perda da resistência à tração de reduzido valor. Quanto ao módulo de elasticidade, foram obtidos valores compreendidos entre 19,1 GPa e 24,5 GPa, que se podem considerar baixos para o betão em apreço, podendo ser justificados pelo facto de se encontrar microfissurado devido às reações expansivas.

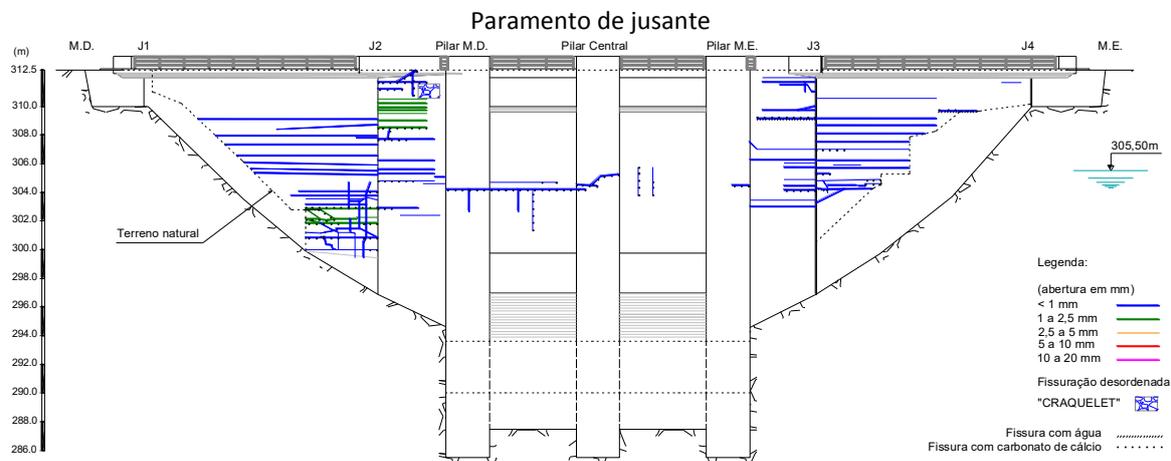


Figura 2. Resultados do mapeamento da fendilhação do paramento de jusante realizado em outubro de 2004 e novas fendas detetadas em 2009 (cor verde)

Trecho inferior da abóbada direita em 2005



Trecho superior da abóbada esquerda em 2015



Contraforte central (vista geral em 2016)



Contraforte central (pormenor em 2016)



Figura 3. Vistas de jusante de trechos das abóbadas direita (em cima, à esquerda) e esquerda (em cima, à direita) e do contraforte central (em baixo), em 2015

2.3 Deslocamentos verticais observados

A Fig. 4 sintetiza os resultados obtidos na interpretação quantitativa dos deslocamentos verticais observados entre 1985 e 2015, assim como as correspondentes extensões verticais [11]. Entre 1985 e 2015 ocorreram deformações médias acumuladas muito elevadas, de cerca de 2140×10^{-6} na abóbada direita, 1590×10^{-6} na abóbada esquerda e 870×10^{-6} no contraforte central.

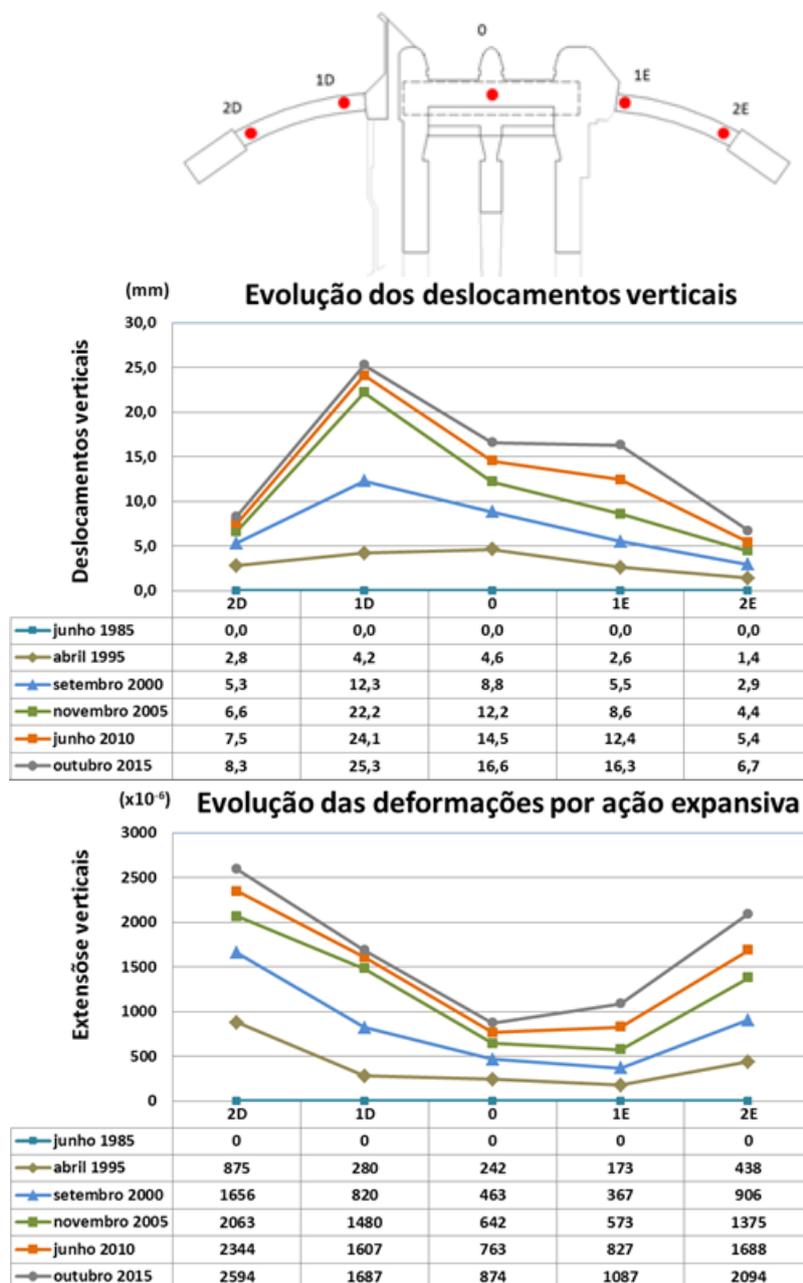


Figura 4. Resultados da interpretação quantitativa dos deslocamentos verticais observados no coroamento através de nivelamentos geométricos de precisão, até 2015, e estimativa das correspondentes extensões verticais [11]

3 ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DO COMPORTAMENTO DA BARRAGEM

3.1 Evolução do nível da água na albufeira

Na fase inicial de vida da obra apenas existem registos pontuais do nível de água na albufeira nas datas das campanhas anuais de observação geodésica, pelo que, nos períodos em que não houve leituras, os níveis de água foram gerados de acordo com os regimes de exploração da albufeira. Na Fig. 5 representa-se a evolução do nível de água na albufeira considerada na análise estrutural, entre 1984 e 2016.

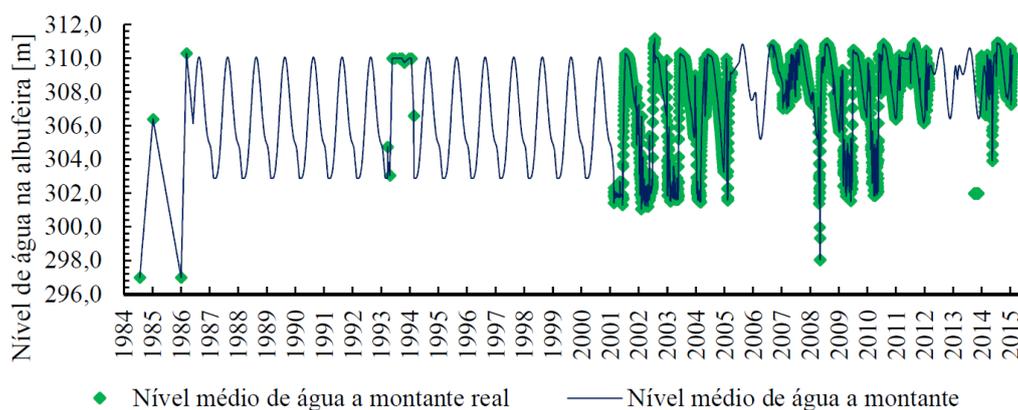


Figura 5. Evolução do nível da água na albufeira considerada na análise estrutural, entre 1984 e 2016

3.2 Temperaturas e humidades relativas nas fronteiras

A partir das temperaturas observadas no ar e na água da albufeira a diferentes cotas, foram ajustadas, através do método dos mínimos quadrados, funções harmónicas de período anual, com a forma,

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

em que T_m é a temperatura média anual, t é o tempo em dias decorrido desde o início do ano e S_a e ϕ são, respetivamente, a semi-amplitude e o número de dias após o início do ano até à data correspondente ao máximo da temperatura anual. Na Tabela 2 apresentam-se os resultados obtidos.

Tabela 2. Temperaturas ajustadas para o ar e para a água da albufeira

Meio	T_m (°C)	S_a (°C)	ϕ (dias)
Ar e água à superfície	14,2	8,0	204
Água (a partir de 5 m de profundidade)	12,2	5,0	204

A variação da humidade relativa do ar foi representada por uma função harmónica do mesmo tipo, com valor médio anual de 77,5%, semi-amplitude anual de 17,5% e defasagem de 29,6 dias.

3.3 Modelo estrutural

A análise e interpretação do comportamento observado da obra foi realizada considerando um modelo de elementos finitos do conjunto barragem-fundação (Fig. 6). Para o betão foi considerado um comportamento viscoelástico com maturação.

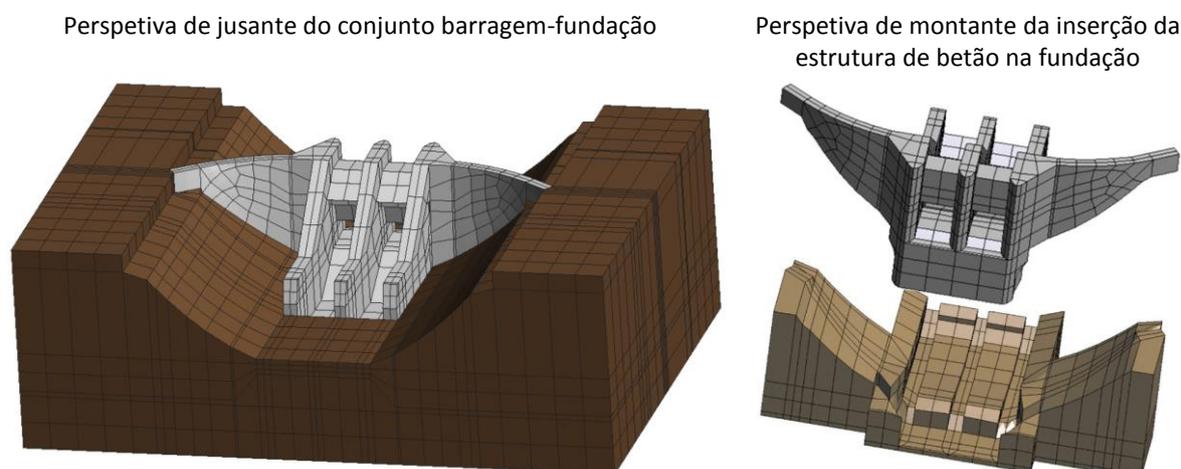


Figura 6. Malha de elementos finitos utilizada nos estudos de interpretação do comportamento observado [1,12]

Foram considerados, para o betão, um coeficiente de Poisson de 0,2 e a seguinte lei de fluência de Bazant e Panula, em que t_0 representa a idade de aplicação das cargas,

$$J(t, t_0) = \frac{1}{30,0} (1 + 3,0 (t_0^{-0,34} + 0,04) (t - t_0)^{0,18}) \quad (GPa^{-1}) \quad (2)$$

O maciço rochoso de fundação foi considerado homogéneo e isotrópico, com comportamento independente do tempo caracterizado por um módulo de deformabilidade de 14 GPa e um coeficiente de Poisson de 0,2.

Considerou-se um coeficiente de dilatação térmica linear do betão de $1,2 \times 10^{-5} \text{ C}^{-1}$.

3.4 Estimativa das expansões livres

A ação expansiva foi definida considerando um desenvolvimento exponencial no tempo, do tipo sigmóide, com um valor a longo prazo de 2750×10^{-6} , mas distinguindo-se duas zonas, uma correspondente aos contrafortes e arco da margem esquerda e outra relativa ao arco da margem direita, na qual a cinética da reação tem sido mais rápida. Nestas duas zonas foram considerados tempos de latência e característicos correspondentes a um desenvolvimento significativo da reação nas primeiras idades (Tabela 3).

Tabela 3. Parâmetros considerados no desenvolvimento das expansões do betão

Zona	Tempo de latência (dias)	Tempo característico (dias)	Expansão livre a longo prazo
Contrafortes e arco da margem esquerda	145	180	2750×10^{-6}
Arco da margem direita	65	55	

A geração das expansões considerou a influência de temperatura e da humidade interna do betão. As distribuições de temperaturas e de humidades internas no corpo da obra foram determinadas através de análise de modelos de difusão, através do método dos elementos finitos, utilizando a malha das estruturas de betão apresentada na Fig. 6 e considerando as condições de fronteira atrás descritas.

Na Fig. 7 apresentam-se as expansões livres calculadas nas abóbadas e no contraforte central em 1995, 2005 e 2015. As expansões estruturais anisotrópicas foram calculadas considerando os efeitos do confinamento [2].

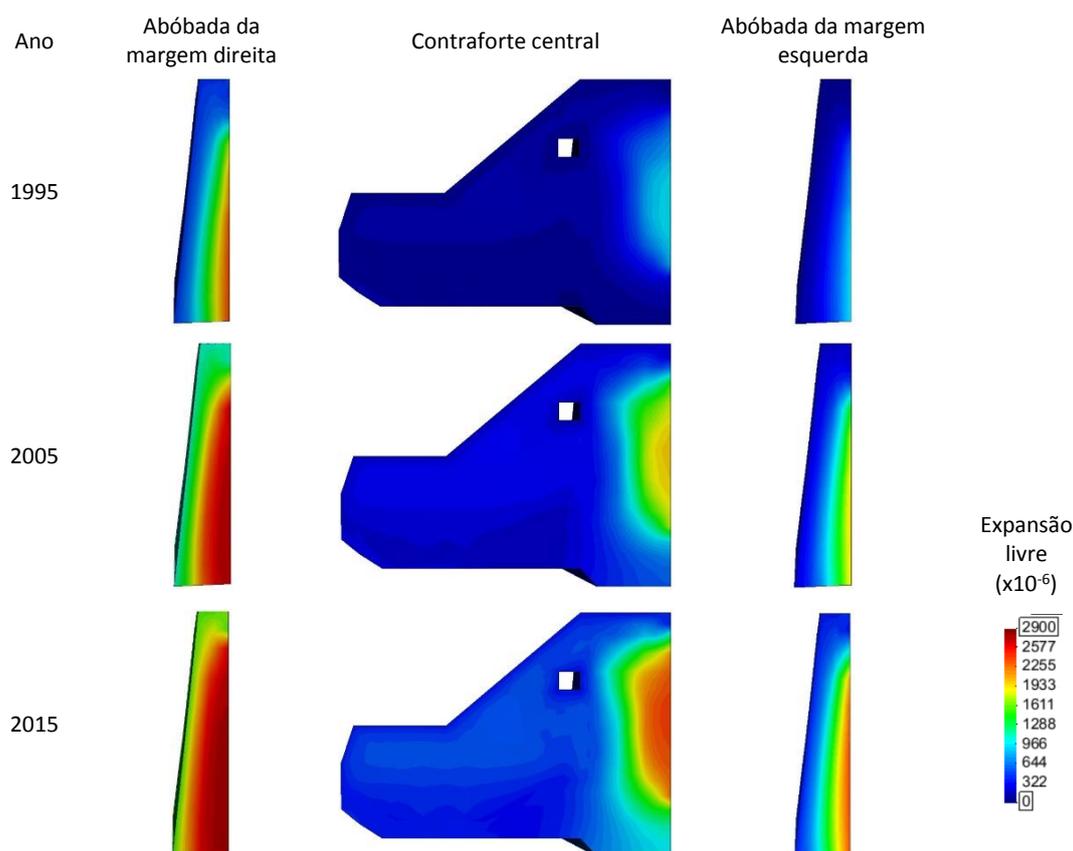


Figura 7. Expansões livres estimadas nas abóbadas e no contraforte central em 1995, 2005 e 2015 [1,12]

3.5 Resultados da análise estrutural

A análise estrutural foi realizada considerando uma discretização no tempo com espaçamento de 15 dias, abrangendo o período de maio de 1984 a dezembro de 2015.

Na Fig. 8 apresenta-se a comparação dos deslocamentos verticais observados e calculados no coroamento da barragem, entre 1985 a 2015, podendo considerar-se razoável o acordo conseguido.

O cálculo de tensões foi realizado sem limitar a resistência do betão à tração. Na Fig. 9 são apresentadas as tensões principais calculadas nos paramentos da barragem em 2015. As tensões máximas de compressão, de cerca de 14 MPa, ocorrem no paramento de jusante, na abóbada da margem direita, junto à superfície de inserção. Ocorreriam tensões de tração superiores a 5 MPa em amplas zonas dos paramentos das duas abóbadas, exceto no paramento de montante da abóbada da margem esquerda (os valores máximos das tensões de tração calculados foram de cerca de 8 MPa).

De facto, o paramento de jusante da abóbada da margem direita está mais fendilhado que o paramento de jusante da abóbada da margem esquerda, sendo maiores as passagens de água pelas fendas na abóbada da margem direita.

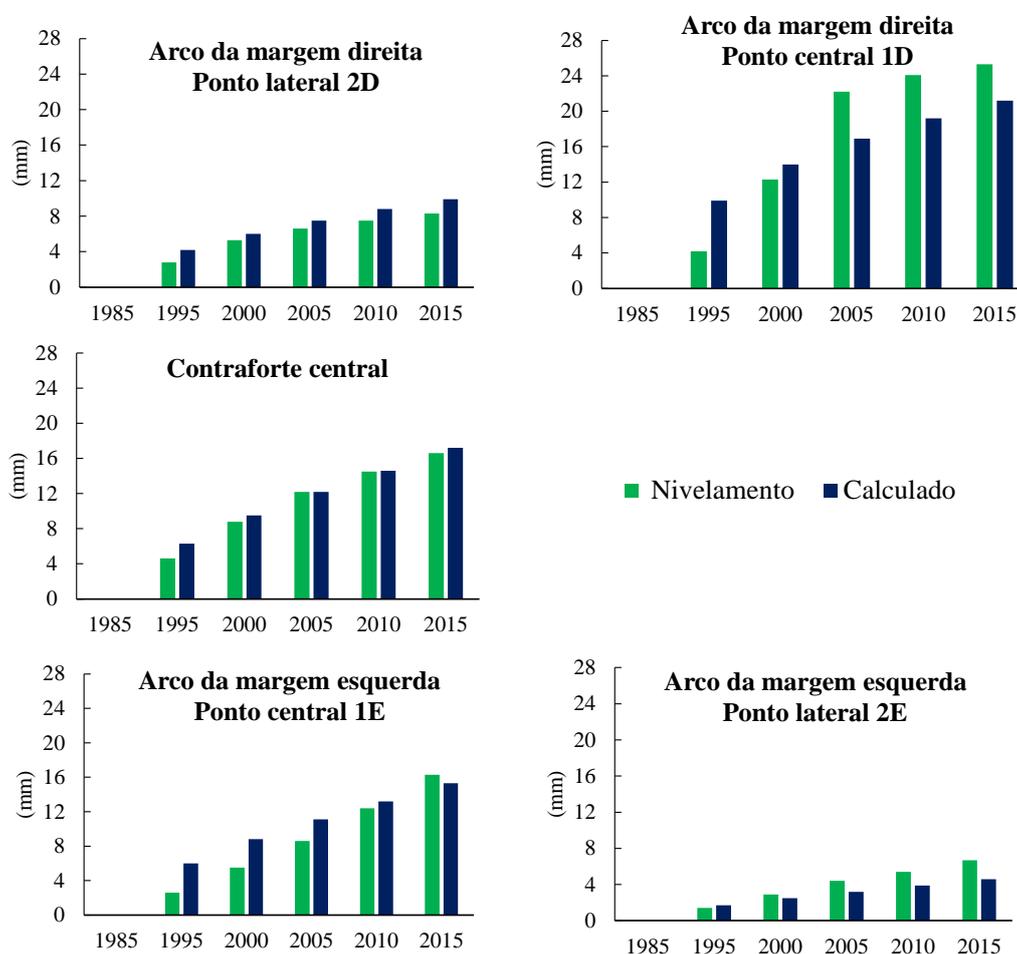


Figura 8. Deslocamentos verticais do coroamento, observados e calculados, entre 1985 e 2015 [1,12]

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados numéricos e da observação, no período de análise compreendido entre maio de 1984 e dezembro de 2015, mostram os relevantes efeitos estruturais do processo expansivo do betão da obras, em particular nas abóbadas laterais. Os deslocamentos verticais calculados apresentam um bom acordo com os resultados dos nivelamentos geométricos de precisão do coroamento. Calcularam-se tensões de tração em locais onde efetivamente ocorrem fendas subhorizontais, em particular no paramento de jusante da abóbada da margem direita. A modelação mostrou ainda que, a partir de 2000, ocorre uma atenuação das expansões na abóbada da margem direita, que é compatível com os resultados obtidos nos modelos estatísticos de separação de efeitos.

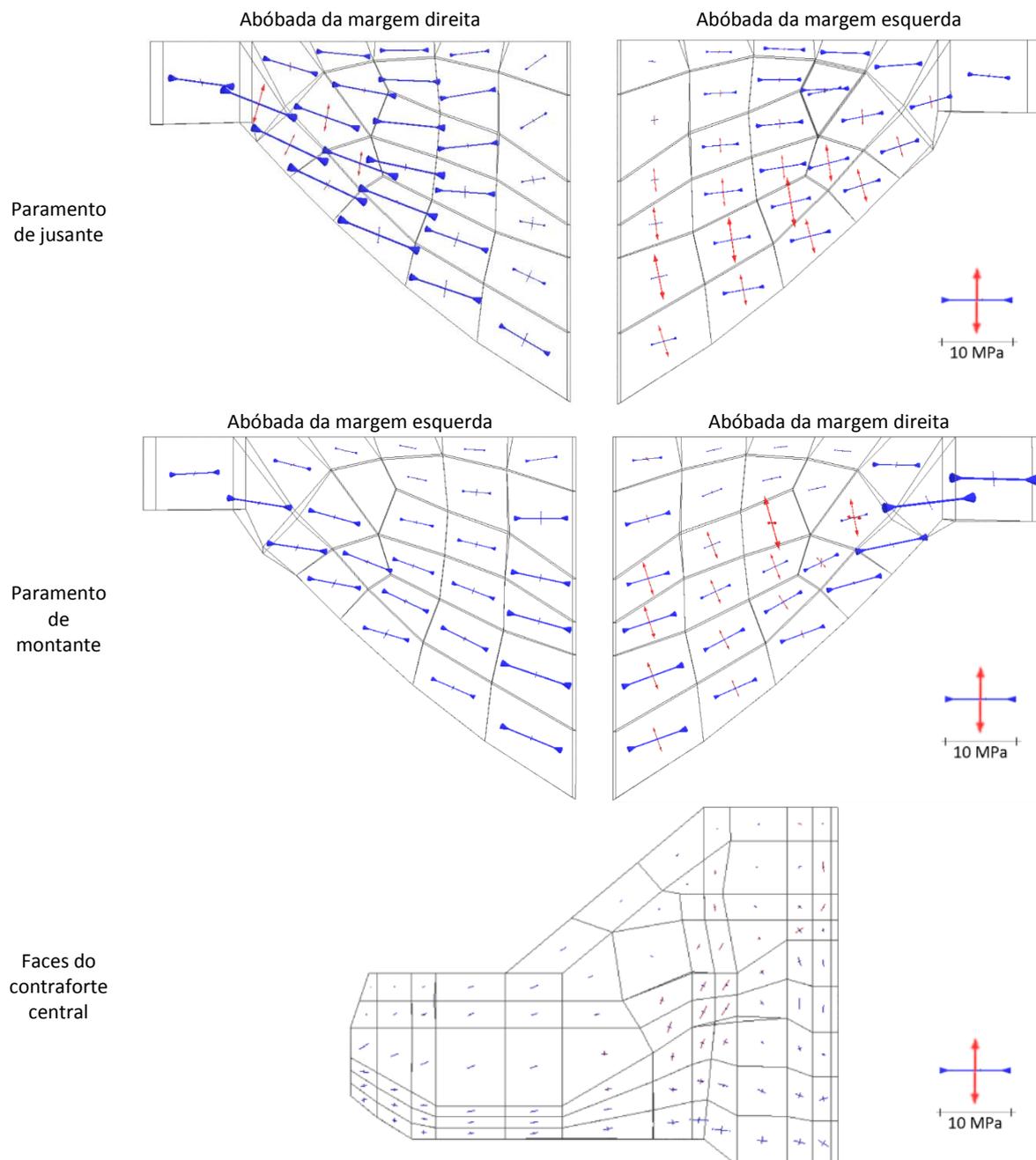


Figura 9. Tensões principais nos paramentos da barragem calculadas em 2015 [1,12]

Dado o estado de degradação estrutural da obra, a Agência Portuguesa do Ambiente (APA) solicitou ao LNEC uma análise preliminar sobre as alternativas de intervenção na barragem, tendo sido apontadas as três seguintes: i) a impermeabilização do paramento de montante e a injeção de fendas nas abóbadas; ii) a substituição das duas abóbadas; e iii) a substituição da própria barragem. As duas primeiras alternativas obrigarão à realização de estudos detalhados sobre o comportamento da obra nas suas novas condições estruturais. Contudo, devido à limitada capacidade da albufeira para abastecimento de água aos municípios de Viseu, Nelas e Mangualde na estiagem, a APA está a ponderar a substituição da barragem por uma nova, localizada numa secção adequada do rio umas centenas de metros a jusante.

AGRADECIMENTOS

Agradece-se à Agência Portuguesa do Ambiente (APA) a autorização concedida para a publicação de elementos da observação da barragem.

REFERÊNCIAS

- [1] Sousa, S.P.A. (2016). Análise do comportamento estrutural de barragens afetadas por expansões do betão. Aplicação à barragem de Fagilde. Tese de mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- [2] Piteira Gomes, J. (2007). Modelação do comportamento estrutural de barragens de betão sujeitas a reacções expansivas. Tese de doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- [3] LNEC (2001). Estudo do comportamento da barragem de Fagilde entre 1985 e 2001. Relatório 289/2001, DBB/NO, Lisboa.
- [4] LNEC (2003). Barragem de Fagilde. Metodologia para a caracterização do processo expansivo do betão. Relatório 12/2003, DBB/NO, Lisboa.
- [5] LNEC (2006). Barragem de Fagilde. Levantamento do estado de fendilhação efetuado em 2004. Nota técnica 58/2006, DBB/NO, Lisboa.
- [6] LNEC (2007). Barragem de Fagilde. Estudo da fluência do betão. Relatório 15/2007, DM/NB, Lisboa.
- [7] LNEC (2008). Barragem de Fagilde. Plano da instrumentação complementar ao sistema de observação. Relatório 111/2008, DBB/NO, Lisboa.
- [8] LNEC (2010). Caracterização da ação expansiva do betão da barragem de Fagilde. Relatório 119/2010, DM/NB/NMM, Lisboa.
- [9] FCUP (2006). Barragem de Fagilde. Análise petrográfica do betão. Relatório, Departamento de Geologia, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Porto.
- [10] Piteira Gomes, J., Batista, A.L., Silva, J.C. (2016). Avaliação dos efeitos do processo de deterioração do betão da barragem de Fagilde - Parte 1 – Caracterização do estado da obra. II Encontro Luso-Brasileiro de Degradação de Estruturas de Betão, LNEC, Lisboa.
- [11] Piteira Gomes, J., Batista, A.L., Silva, J.C. (2016). Avaliação dos efeitos do processo de deterioração do betão da barragem de Fagilde - Parte 2 – Análise do comportamento observado e recomendações de mitigação. II Encontro Luso-Brasileiro de Degradação de Estruturas de Betão, LNEC, Lisboa.
- [12] Piteira Gomes, J.; Batista, A.L.; Sousa, S.P.M. (2017). Swelling effects in Fagilde dam (Portugal). First approach to structural analysis and interpretation. Swelling Concrete in Dams and Hydraulic Structures (DSC 2017), Civil Engineering and geomechanics series, ISTE-Wiley, p. 218-234.