



AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DO PROCESSO DE DETERIORAÇÃO DO BETÃO DA BARRAGEM DE FAGILDE

PARTE 2 – ANÁLISE DO COMPORTAMENTO OBSERVADO E RECOMENDAÇÕES DE MITIGAÇÃO

José Piteira Gomes¹, António Lopes Batista², João Conde Silva³

¹Departamento de Barragens de Betão, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, pgomes@Inec.pt,

²Departamento de Barragens de Betão, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, a.l.batista@Inec.pt,

³Departamento de Barragens de Betão, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, jrsilva@Inec.pt

RESUMO

Na segunda parte do estudo de avaliação dos efeitos do processo de deterioração do betão da barragem de Fagilde apresentam-se os resultados da análise do comportamento, considerando a utilização de um modelo estatístico de interpretação quantitativa dos deslocamentos observados. Apresentam-se as funções adotadas para representar as respostas estruturais e faz-se a análise dos resultados da monitorização contínua da obra entre 1985 e 2015, por métodos geodésicos. Avalia-se o estado atual do processo de deterioração nos diferentes elementos de obra, bem como a velocidade com que se processou. Estimam-se os efeitos acumulados das expansões, indicam-se as atuais taxas anuais de expansão nos diferentes elementos e apresentam-se recomendações para mitigar o desenvolvimento do processo de deterioração do betão.

Palavras-chave: Barragem de Fagilde / Degradação / Betão / Reações Expansivas / Fendilhação Difusa / Sistema de Observação / Monitorização



1. ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DO COMPORTAMENTO OBSERVADO

1.1. Modelo estatístico adotado

A análise e a interpretação do comportamento observado da barragem de Fagilde foram efetuadas através da utilização de um modelo estatístico de interpretação quantitativa dos deslocamentos obtidos, ao longo do tempo, por métodos geodésicos.

A interpretação quantitativa consiste na análise de um modelo matemático de comportamento pelo qual é estabelecida uma relação funcional entre as grandezas ou efeitos observados e as ações que o originam. Admitiu-se o princípio da sobreposição dos efeitos, considerando que as ações correspondentes às pressões hidrostáticas e às variações sazonais de temperatura provocam efeitos reversíveis e que os efeitos irreversíveis, devidos a fenómenos não elásticos, dependem apenas do tempo (Batista *et al.* 2002). No modelo estatístico adotou-se uma função do tipo,

$$E_{calc}(h, t', t) = \sum_{i=1}^N a_i h^i + b_1 \cos \frac{2\pi t'}{365} + b_2 \sin \frac{2\pi t'}{365} + \sum_{j=1}^M c_j t^j + d \left(1 - e^{-\frac{t^n}{\beta}} \right) + k \quad (1)$$

em que E_{calc} representa a resposta calculada, h é a diferença de cota entre os níveis de água a montante e a jusante, t' é o número de dias desde o início do ano e t é o número de dias contados a partir da data da observação inicial. Os parâmetros a_i , b_1 , b_2 , c_j , d e k são calculados por regressão linear, efetuada pelo método dos mínimos quadrados. N e M representam o grau dos polinómios utilizados para representar os efeitos da pressão hidrostática e do tempo, respetivamente, os termos em seno e cosseno pretendem representar o efeito da onda térmica anual, considera-se uma expressão polinomial para reproduzir efeitos do tempo e adota-se um termo exponencial para representar os efeitos da ação expansiva.

As diferenças entre os valores observados no protótipo e os valores calculados pelo modelo estatístico são os resíduos r , definidos pela expressão,

$$r = E_{obs}(h, t', t) - E_{calc}(h, t', t) \quad (2)$$

O coeficiente de determinação R^2 de uma interpretação quantitativa, que avalia a significância da regressão, é expresso pela equação,

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_{calc}(h, t', t) - E_{obs}(h, t', t))^2}{\sum_{i=1}^n (E_{obs}(h, t', t) - \bar{E}_{obs}(h, t', t))^2} \quad (3)$$



IIº Encontro Luso-Brasileiro de Degradação de Estruturas de Betão

Lisboa • LNEC • 27 a 29 de setembro de 2016



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

em que n é o número de observações e $\bar{E}_{obs}(h, t', t)$ é a média dos valores observados. Quanto mais próximo de 1 for o valor de R^2 , mais o modelo se ajusta aos valores observados. Contudo, quando se pretende comparar a significância de interpretações quantitativas efetuadas com diferente número de observações e/ou diferente número de parâmetros, é preferível recorrer-se ao coeficiente de determinação ajustado R_{aj}^2 que, seguindo o princípio da parcimónia, penaliza a inclusão de parâmetros com pouco poder explicativo sobre o modelo e tem em conta a dimensão da amostra. Este ajustamento deve ser efetuado de acordo com a seguinte expressão,

$$R_{aj}^2 = 1 - \frac{n-1}{n-(p+1)} (1 - R^2) \quad (4)$$

sendo n número de observações e p o número de parâmetros utilizados na interpretação quantitativa, não considerando o termo independente k .

1.2. Resultados das interpretações quantitativas

Desde o início do primeiro enchimento da albufeira, em junho de 1985, até dezembro de 2015, foram realizadas 35 campanhas de observação geodésica, com uma distribuição temporal que se pode considerar adequada, e com o nível de água a variar entre 293,00 m e 310,80 m. Como referido na primeira parte, o sistema de observação permite medir os deslocamentos verticais em 5 pontos do coroamento e os deslocamentos horizontais em 3 pontos do paramento de jusante, muito próximos do coroamento, possibilitando a análise e a interpretação do comportamento estrutural da barragem ao longo do tempo.

Assim, recorrendo ao modelo atrás apresentado, foram feitas diversas interpretações quantitativas (IQ) com o propósito de construir uma sucessão de padrões que mostrem a evolução do processo de deterioração de betão ao longo do tempo. Assim, foi feito um primeiro grupo de IQ cobrindo os primeiros 10 anos, depois um segundo grupo abrangendo os primeiros 15 anos, um terceiro grupo incluindo os primeiros 20 anos, um quarto grupo contendo os primeiros 25 anos e por fim, um grupo compreendendo os 30 anos de vida da barragem, desde 1985 até 2015.

Os efeitos da pressão hidrostática foram representados através de um polinómio do 4º. grau, com termo não nulo apenas em h^4 , os efeitos da onda térmica anual foram simulados através da soma de uma função seno com uma função cosseno e os efeitos do tempo foram representados recorrendo, inicialmente, a um polinómio completo do 2º. grau, que se admitiu representar apenas os efeitos devidos à ação expansiva. Esta escolha de funções mostrou-se adequada em quase todas as interpretações quantitativas efetuadas, exceto no ponto 1D



IIº Encontro Luso-Brasileiro de Degradação de Estruturas de Betão

Lisboa • LNEC • 27 a 29 de setembro de 2016



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

da abóbada da margem direita, onde se registou uma atenuação significativa dos deslocamentos medidos nos últimos 10 anos, pelo que, nas interpretações quantitativas relativas aos períodos mais recentes, 1985-2010 e 1985-2015, adotou-se, apenas no ponto 1D, uma função exponencial para ter em conta os efeitos do tempo, assumindo que o ponto de inflexão ocorre decorridos 6500 dias.

No Quadro 1 apresentam-se os resultados das interpretações quantitativas efetuadas para os deslocamentos verticais obtidos por nivelamento geométrico, em termos dos valores dos parâmetros das funções escolhidas, nomeadamente os valores máximos dos efeitos da pressão hidrostática (PH), da onda térmica anual (T) e do tempo (time) e ainda o coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}), indicador da qualidade do ajuste do modelo estatístico aos valores observados. Pode constatar-se que o aumento da informação não alterou significativamente os parâmetros das funções de resposta a cada um dos diferentes efeitos e que o coeficiente de determinação ajustado teve sempre valores elevados.

Quadro 1 – Resumo dos resultados obtidos nas interpretações quantitativas dos deslocamentos verticais observados

	1985-2015				1985-2010				1985-2005			
	PH (mm)	T (mm)	time (mm)	R^2_{aj}	PH (mm)	T (mm)	Time (mm)	R^2_{aj}	PH (mm)	T (mm)	time (mm)	R^2_{aj}
2D	0,0	0,6	8,3	0,974	-0,2	0,7	7,5	0,978	-0,2	0,7	6,6	0,974
1D	-0,2	0,8	25,3	0,994	-0,3	1	24,1	0,993	-0,4	1,2	22,2	0,989
0	-0,2	1,1	16,6	0,988	-0,3	1,2	14,5	0,988	-0,3	1,2	12,2	0,988
1E	-0,1	0,8	16,3	0,988	-0,2	0,8	12,4	0,987	-0,1	0,9	8,6	0,974
2E	-0,1	0,4	6,7	0,962	-0,2	0,6	5,4	0,967	-0,2	0,6	4,4	0,952

	1985-2000				1985-1995			
	PH (mm)	T (mm)	time (mm)	R^2_{aj}	PH (mm)	T (mm)	time (mm)	R^2_{aj}
2D	-0,2	0,7	5,3	0,968	0,0	0,8	2,8	0,919
1D	0,0	1,0	12,3	0,982	-0,1	1,1	4,2	0,921
0	-0,3	1,2	8,8	0,980	-0,1	1,3	4,6	0,938
1E	-0,3	1,0	5,5	0,953	-0,1	1,2	2,6	0,889
2E	-0,2	0,7	2,9	0,917	-0,1	0,8	1,4	0,852

Os valores assinalados a cinzento são os únicos que foram obtidos com a utilização da função exponencial na parcela devida ao tempo, com ponto de inflexão, como referido, aos 6500 dias.



IIº Encontro Luso-Brasileiro de Degradação de Estruturas de Betão

Lisboa • LNEC • 27 a 29 de setembro de 2016



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

Na Fig. 1 apresentam-se os resultados do modelo estatístico para os deslocamentos verticais observados no ponto 1E, na abóbada da margem esquerda, próximo da junta com o contraforte lateral da margem esquerda, no período 1985-2015.

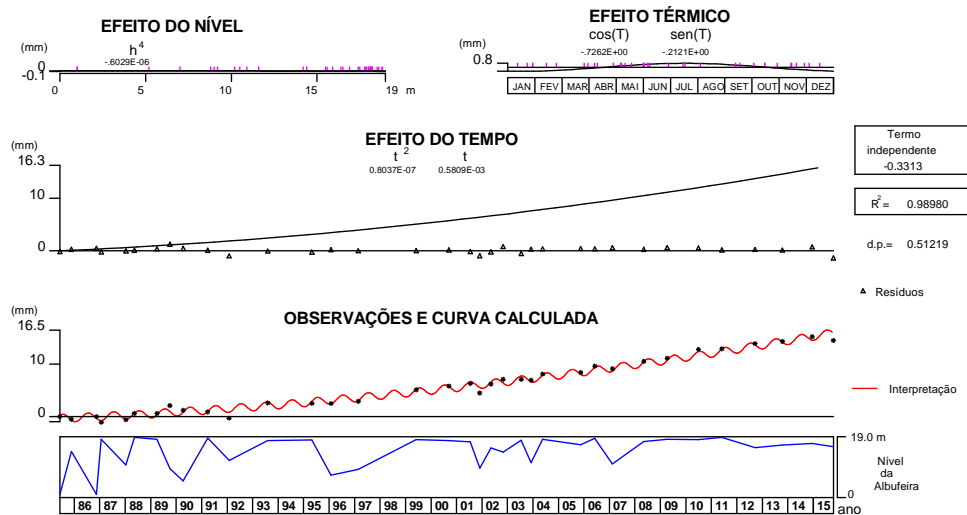


Fig. 1 – Resultados da interpretação quantitativa dos deslocamentos verticais no ponto 1E, no coroamento, no período entre 1985 e 2015.

Na Fig. 2 apresentam-se os resultados do modelo estatístico para os deslocamentos verticais observados no ponto 1D, na abóbada da margem direita, próximo da junta com o contraforte lateral da margem direita.

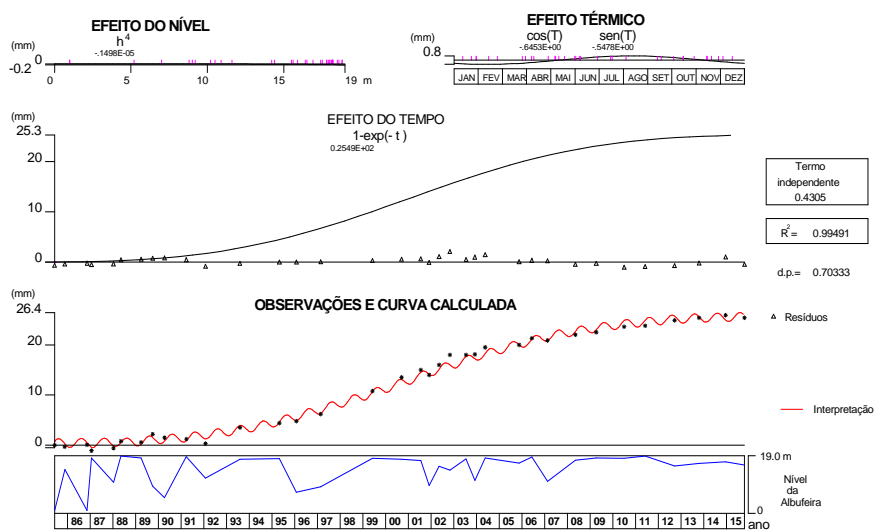


Fig. 2 – Resultados da interpretação quantitativa dos deslocamentos verticais no ponto 1D, no coroamento, no período entre 1985 e 2015.



IIº Encontro Luso-Brasileiro de Degradação de Estruturas de Betão

Lisboa • LNEC • 27 a 29 de setembro de 2016



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

Na Fig. 3 apresentam-se os resultados do modelo estatístico para os deslocamentos radiais no ponto 2E, próximo do centro da abóbada da margem esquerda, no período 1985-2015.

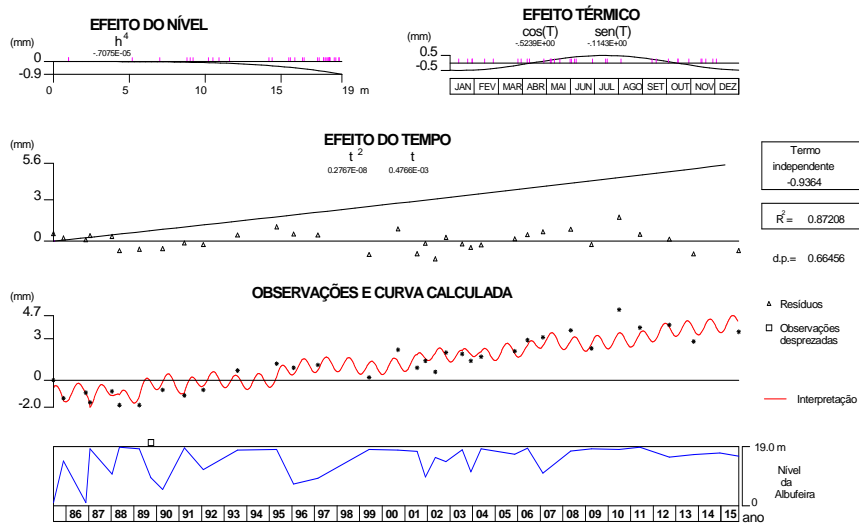


Fig. 3 – Resultados da interpretação quantitativa dos deslocamentos radiais no ponto 2E, na abóbada esquerda à cota 311,0 m, no período entre 1985 e 2015.

Na Fig. 4 apresentam-se os resultados do modelo estatístico para os deslocamentos radiais no ponto 2D, próximo do centro da abóbada da margem direita, no período 1985-2015.

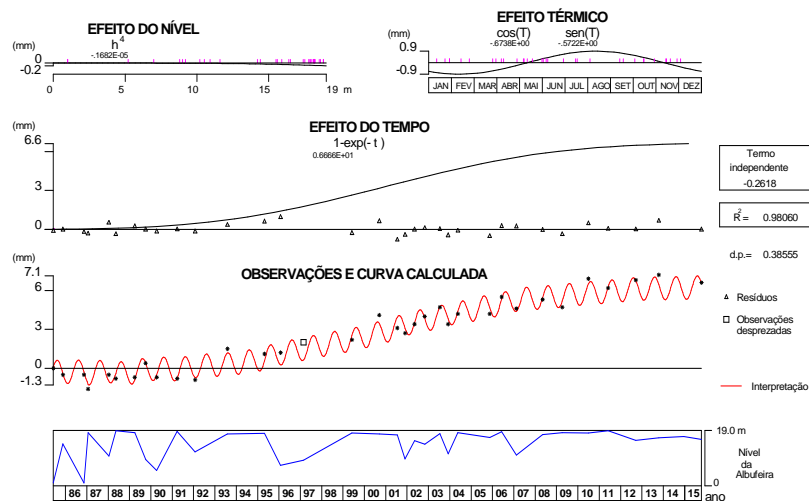


Fig. 4 – Resultados da interpretação quantitativa dos deslocamentos radiais no ponto 2D, na abóbada direita à cota 311,0 m, no período entre 1985 e 2015.



2. EVOLUÇÃO DO PROCESSO EXPANSIVO

A aplicação do modelo estatístico a vários períodos (1985-1995, 1985-2000, 1985-2005, 1985-2010 e 1985-2015) revelou as zonas da barragem mais afetadas e também as diferentes taxas a que o processo expansivo se tem desenvolvido. A análise dos deslocamentos verticais dos pontos do coroamento da barragem (Fig. 5): i) mostra maiores deslocamentos irreversíveis na zona central, principalmente na abóbada da margem direita, mas também que as maiores taxas neste elemento estrutural ocorreram no período entre 1995 e 2005; ii) indica que na abóbada da margem esquerda os deslocamentos irreversíveis têm sido da mesma ordem de grandeza nos períodos analisados; e iii) mostra que a taxa de aumento dos deslocamentos verticais irreversíveis no contraforte central abrandou na última década. A análise dos deslocamentos radiais (Fig. 6): i) mostra a ocorrência de deslocamentos irreversíveis das abóbadas no sentido de montante, mais expressivos na abóbada direita; e ii) mostra também que o contraforte central, que começou por apresentar deslocamentos no sentido de montante, parece, depois de setembro de 2000, ter deslocamentos no sentido de jusante, embora de reduzido valor, deslocamentos que são compatíveis com a ocorrência de expansões diferenciais, mais expressivas na cabeça do contraforte.

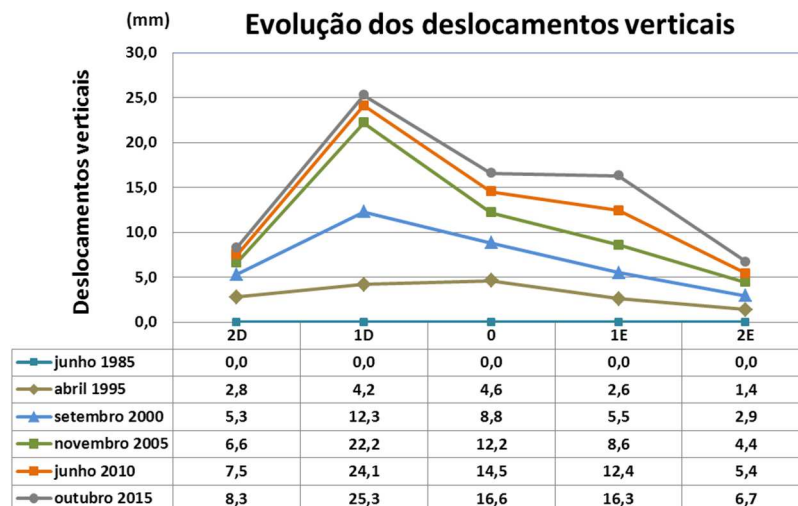


Fig. 5 – Resumo dos resultados das análises de evolução dos deslocamentos verticais dos pontos do coroamento, no período entre 1985 e 2015.



IIº Encontro Luso-Brasileiro de Degradação de Estruturas de Betão

Lisboa • LNEC • 27 a 29 de setembro de 2016



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

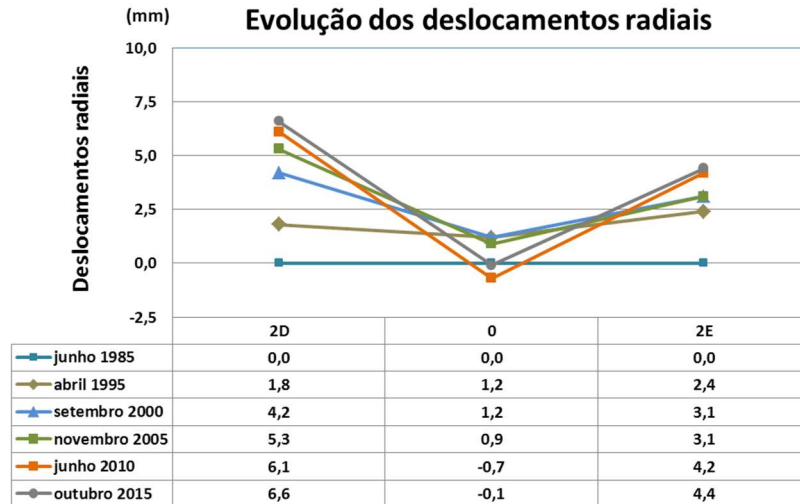


Fig. 6 – Resumo dos resultados das análises de evolução dos deslocamentos radiais dos pontos do coroamento, no período entre 1985 e 2015.

Na Fig. 7 resumem-se as extensões verticais calculadas nos diferentes elementos de obra nos cinco períodos considerados, que se atribuem ao processo de deterioração do betão por desenvolvimento de reações expansivas. São valores médios em altura, que incluem a fendilhação já desenvolvida. Mostram a ocorrência de deformações acumuladas elevadas nas abóbadas, principalmente nas zonas próximas dos encontros, mas parecem existir expansões médias acumuladas muito menores no contraforte central.

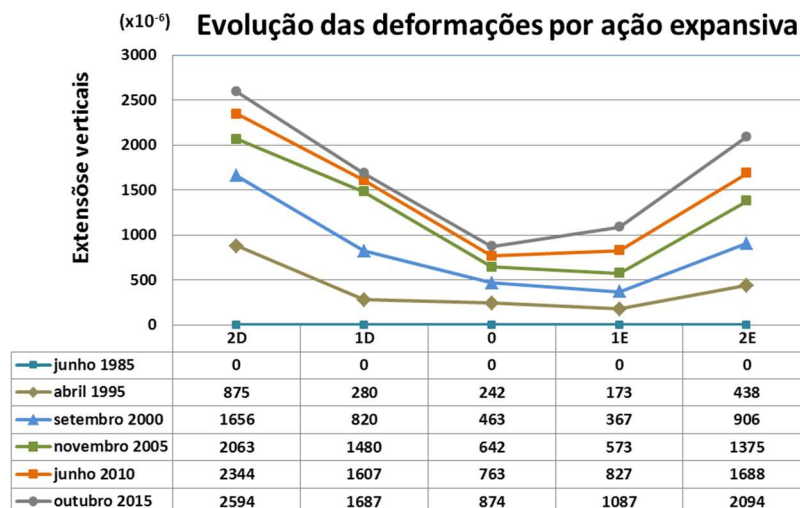


Fig. 7 – Evolução das deformações verticais devidas às expansões, estimadas a partir dos deslocamentos observados no período entre 1985 e 2015.



IIº Encontro Luso-Brasileiro de Degradação de Estruturas de Betão

Lisboa • LNEC • 27 a 29 de setembro de 2016



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

As expansões médias acumuladas nas abóbadas são muito elevadas, pelo que podem ser responsáveis pela redução significativa das propriedades mecânicas do betão. Pela análise da Fig. 8 pode também concluir-se que a taxa anual de evolução das expansões teve variações significativas ao longo do tempo nos diferentes elementos estruturais de obra (Quadro 2).

Quadro 2 – Taxas anuais de variação das deformações verticais devidas às expansões, estimadas a partir dos deslocamentos observados em diferentes períodos

BLOCO	junho 1985 a abril 1995	abril 1995 a setembro 2000	setembro 2000 a novembro 2005	novembro 2005 a junho 2010	junho 2010 a outubro 2015
2D	88×10^{-6}	156×10^{-6}	81×10^{-6}	56×10^{-6}	50×10^{-6}
1D	28×10^{-6}	108×10^{-6}	132×10^{-6}	25×10^{-6}	16×10^{-6}
0	24×10^{-6}	44×10^{-6}	36×10^{-6}	24×10^{-6}	22×10^{-6}
1E	17×10^{-6}	39×10^{-6}	41×10^{-6}	51×10^{-6}	52×10^{-6}
2E	44×10^{-6}	94×10^{-6}	94×10^{-6}	63×10^{-6}	81×10^{-6}

Deve ser assinalado que os valores mais elevados das taxas anuais de expansão ocorreram entre abril de 1995 e novembro de 2005, em todos os pontos observados, com exceção do ponto 1E.

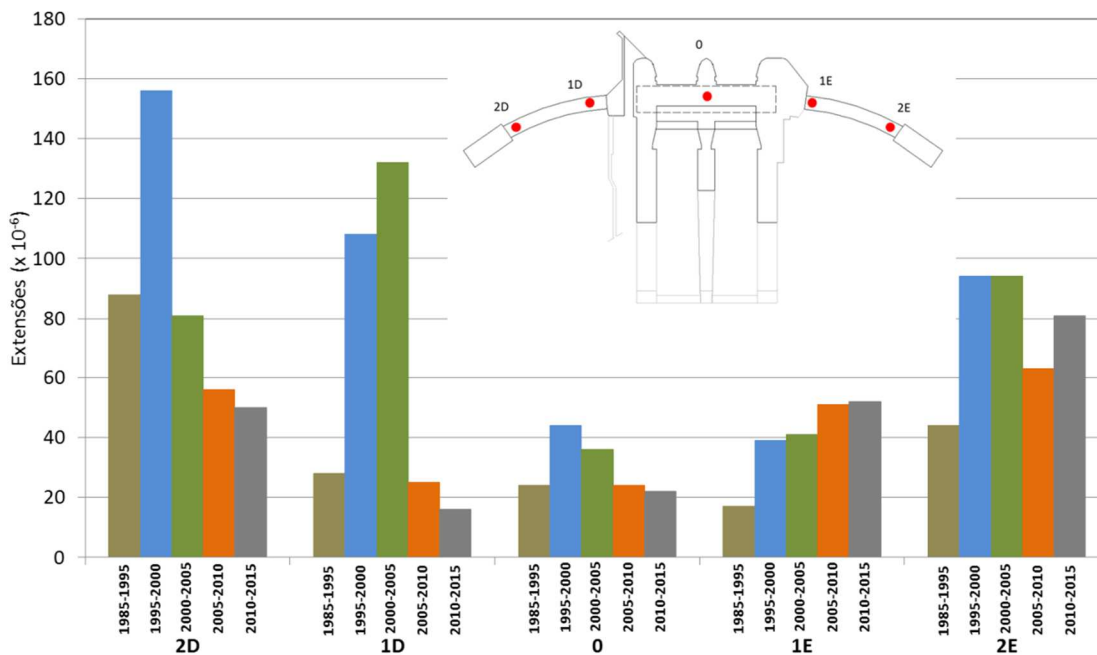


Fig. 8 – Evolução das deformações verticais devidas às expansões nos cinco períodos considerados.



IIº Encontro Luso-Brasileiro de Degradação de Estruturas de Betão

Lisboa • LNEC • 27 a 29 de setembro de 2016



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

3. RECOMENDAÇÕES PARA MITIGAÇÃO DO PROCESSO DE DETERIORAÇÃO

A análise atrás apresentada revela que o processo expansivo já induziu deformações acumuladas elevadas e que as taxas anuais médias também são muito elevadas, pelo que se deve intervir na obra a curto prazo, implementando medidas que permitam a redução das taxas de expansão, com o propósito de prolongar a vida útil da barragem.

Julga-se que, em primeiro lugar, deverão ser reavaliados os danos internos e as propriedades mecânicas do betão e, em função dos resultados, estudar as soluções mais adequadas. Como foi referido na primeira parte deste trabalho, as propriedades mecânicas do betão e o potencial expansivo foram avaliados há já alguns anos, tendo-se concluído que algumas das propriedades do betão estavam com uma depreciação aceitável em 2005. Contudo, passados mais de 10 anos, é importante voltar a avaliar a afetação das propriedades do betão, em particular no caso das peças mais danificadas, as abóbadas.

A barragem é constituída por elementos de muito diferente rigidez, compreendendo um trecho central mais rígido, composto pelos três contrafortes e pelo descarregador de cheias, e duas zonas laterais (as abóbadas) muito mais flexíveis, onde têm ocorrido as expansões mais elevadas. Assim, nos cenários abaixo propostos considera-se que o trecho central deverá ser mantido, embora deva ser objeto de intervenção. Relativamente às abóbadas, dever-se-á ter em conta o grau de deterioração existente no betão, nomeadamente avaliando os parâmetros de resistência e deformabilidade atuais, mas também através de uma apreciação do dano interno, através da realização de testes de correlação da rigidez com o dano (*stiffness damage teste* – *SDT*) e ainda do potencial expansivo relativamente a cada uma das reações presentes. Importa definir valores limite que justifiquem a manutenção das abóbadas e a implementação de um tipo de intervenção nestes elementos estruturais, mais ligeira, nomeadamente para impedir o seu contacto com a água.

Se for viável a manutenção das abóbadas, considera-se essencial a injeção individualizada das fendas de maior abertura com material polimérico ou cimentício, o tratamento em massa do betão e a instalação de uma membrana de impermeabilização no paramento de montante, adotando-se assim uma solução muito semelhante à considerada na reabilitação da barragem de Pracana (Silva Matos *et al.* 1995), realizada há cerca de 20 anos com sucesso. Na implementação desta solução existem várias alternativas que deverão ser consideradas numa fase mais adiantada dos estudos, designadamente no que respeita ao tipo de membrana e ao modo da sua fixação ao paramento de montante.



IIº Encontro Luso-Brasileiro de Degradação de Estruturas de Betão

Lisboa • LNEC • 27 a 29 de setembro de 2016



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

Se o betão das abóbadas se encontrar irremediavelmente degradado, sugere-se a sua demolição e a construção de novas abóbadas, utilizando betão estudado por forma a serem evitadas futuras reações expansivas.

4. CONCLUSÕES

A monitorização de deslocamentos efetuada com o sistema de observação geodésica da barragem de Fagilde tem permitido avaliar a evolução do processo de deterioração do betão da obra, que se encontra sujeito a reações sulfáticas. Os resultados obtidos referem-se a valores médios nos pontos de observação, que mostram terem ocorrido, entre 1985 e 2015, deformações médias acumuladas muito elevadas, cerca de 2140×10^{-6} na abóbada direita, 1590×10^{-6} na abóbada esquerda e 870×10^{-6} no contraforte central. Contudo, salienta-se que o valor referido para o contraforte central inclui uma maior deformação que ocorre na sua parte superior. Os resultados obtidos com o modelo estatístico mostram também uma atenuação significativa da taxa de expansão na abóbada direita nos últimos 10 anos e um menor abrandamento no contraforte central. Estas reduções poderão não estar associadas à progressão das reações sulfáticas mas à existência de mais caminhos de saída (lixiviação) dos produtos de reação, pelo que seria importante averiguar a existência de produtos resultantes das reações no paramento de jusante. A análise dos deslocamentos radiais mostra o desenvolvimento de expansões diferenciais no contraforte central, mais expressivas a montante, como é comum neste tipo de peças estruturais.

As taxas de deformação anuais, médias dos resultados dos últimos cinco anos, são ainda elevadas, com valores compreendidos entre 50×10^{-6} e 16×10^{-6} na abóbada direita, 80×10^{-6} e 50×10^{-6} na abóbada esquerda e 20×10^{-6} no contraforte central. São valores elevados que podem comprometer a segurança da barragem a médio prazo, pelo que é muito importante a consideração, a breve trecho, de medidas de mitigação do processo de expansão, por poderem contribuir para o prolongamento da vida útil da barragem.

Por fim refere-se que o modelo estatístico utilizado revelou-se adequado, tendo-se obtido coeficientes de determinação elevados e pequenas variações dos parâmetros das funções representativas dos efeitos da pressão hidrostática e da temperatura. Contudo, os resultados do estudo evidenciam a necessidade de realização de ensaios laboratoriais de reavaliação das propriedades mecânicas do betão, principalmente da resistência e da deformabilidade, que poderão, para estes níveis de expansão acumulada, estar significativamente depreciadas. Importa ainda referir o interesse de efetuar a análise e



IIº Encontro Luso-Brasileiro de Degradação de Estruturas de Betão

Lisboa • LNEC • 27 a 29 de setembro de 2016



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

interpretação do comportamento da barragem utilizando modelação estrutural com adequada representação dos fenómenos físicos envolvidos (Piteira Gomes, 2007).

5. AGRADECIMENTOS

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

6. REFERÊNCIAS

LNEC 2010. Caracterização da ação expansiva do betão da barragem de Fagilde. Relatório 119/2010 – NB/NMM.

Batista, A.L., Mora Ramos, J., Oliveira, S.B., Piteira Gomes, J., 2002. Models for safety control of concrete dams. 3th International Conference on Dam Engineering, Singapore, March 2002, 8p.

Piteira Gomes, J., 2007. Modelação estrutural de barragens de betão sujeitas a reações expansivas. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

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. IIº Encontro Luso-Brasileiro de Degradação de Estruturas de Betão, LNEC, Lisboa.

Silva Matos, D., Silva, H., Pinho, J., Camelo, A., 1995. Deterioration of Pracana dam due to ASR. Main features and repair works. 2th International Conference on Alkali Aggregate Reactions in Hydroelectric Plants and Dams. Chattanooga, Tennessee, USA.