



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

PARTE 1 – CARACTERIZAÇÃO DO ESTADO DA OBRA

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,

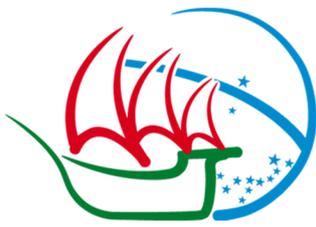
³Departamento de Barragens de Betão, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, jrsilva@Inec.pt

RESUMO

Apresenta-se, nesta primeira parte do estudo de avaliação dos efeitos do processo de deterioração do betão da barragem de Fagilde, a caracterização do estado atual da obra, considerando os resultados de ensaios laboratoriais (petrográficos, químicos e físicos) para avaliação do processo expansivo e afetação das propriedades do betão, os resultados do levantamento da fendilhação efetuada em 2004 e os resultados fornecidos pelo sistema de observação no que respeita às principais ações e efeitos estruturais e hidráulicos. Trata-se de uma barragem construída entre 1982 e 1983, cujo betão está sujeito a um processo de deterioração devido ao desenvolvimento de reações expansivas, que já alcançou deformações irreversíveis de valor muito significativo. O primeiro registo da existência de um número significativo de fendas foi feito na inspeção anual de janeiro de 2001, contudo os resultados da observação já indiciavam a existência de um processo de deterioração do betão pela ocorrência de deslocamentos horizontais progressivos para montante e de empolamento do coroamento.

Na segunda parte do presente estudo apresenta-se a análise e interpretação dos deslocamentos observados ao longo do tempo, com vista à obtenção de estimativas das deformações estruturais induzidas pelo processo expansivo do betão, e tecem-se algumas considerações sobre as medidas futuras de mitigação desta patologia.

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



1. DESCRIÇÃO DA BARRAGEM

A barragem de Fagilde, localizada no rio Dão, no centro de Portugal, a cerca de 15 Km da cidade de Viseu, foi construída entre agosto de 1982 e fins de 1983. Trata-se de uma estrutura de betão constituída por uma parte central do tipo descarregador com contrafortes, ladeada por duas abóbadas cilíndricas (Hidroprojecto 1979). 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, 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 coroamento situa-se à cota 312,50 m, o nível de pleno armazenamento (NPA) da albufeira está à cota 310,00 m e o nível de máxima cheia (NMC) situa-se à cota 311,60 m. O volume da albufeira, no NPA, é de cerca de 2,8 hm³. O descarregador principal é de meio fundo, sendo controlado através de comportas segmento. O descarregador secundário é de superfície, localiza-se a cotas superiores e é livre. O primeiro enchimento da albufeira iniciou-se em junho de 1985 e terminou em janeiro de 1987.



Fig. 1 – Vista de jusante da barragem de Fagilde.

2. DETEÇÃO DE ANOMALIAS

Na inspeção anual de janeiro de 2001 foi pela primeira vez registada a existência de 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, do tipo *map cracking*, em algumas zonas da obra, e também pela ocorrência de deslocamentos horizontais progressivos para montante e de



empolamento do coroamento, indícios geralmente associados à ocorrência de reações expansivas (LNEC 2001).

Face à deterioração progressiva da obra foi, de seguida, definida uma metodologia para a caracterização do processo expansivo do betão (LNEC 2003), compreendendo o levantamento do estado de fendilhação dos paramentos (LNEC 2006), o estudo da fluência do betão (LNEC 2007), a caracterização petrográfica, física e química do processo expansivo do betão (FCUP 2006, LNEC 2010) e a instrumentação complementar da barragem (LNEC, 2008).

3. LEVANTAMENTO DA FENDILHAÇÃO

Em 2004 foi realizado um levantamento da fendilhação superficial, com vista ao estabelecimento de um estado de referência. Foram caracterizadas as fendas existentes nos paramentos de montante e de jusante, bem como nas faces dos contrafortes e no coroamento, através da sua numeração, localização, valor da sua abertura, desenvolvimento e orientação média. Em determinados casos foram também registadas outras características, nomeadamente o tipo de padrão de fendilhação e de preenchimento das fendas. Nas Figs. 2 e 3 apresentam-se representações gráficas dos resultados do levantamento da fendilhação dos paramentos de montante e de jusante, respetivamente.

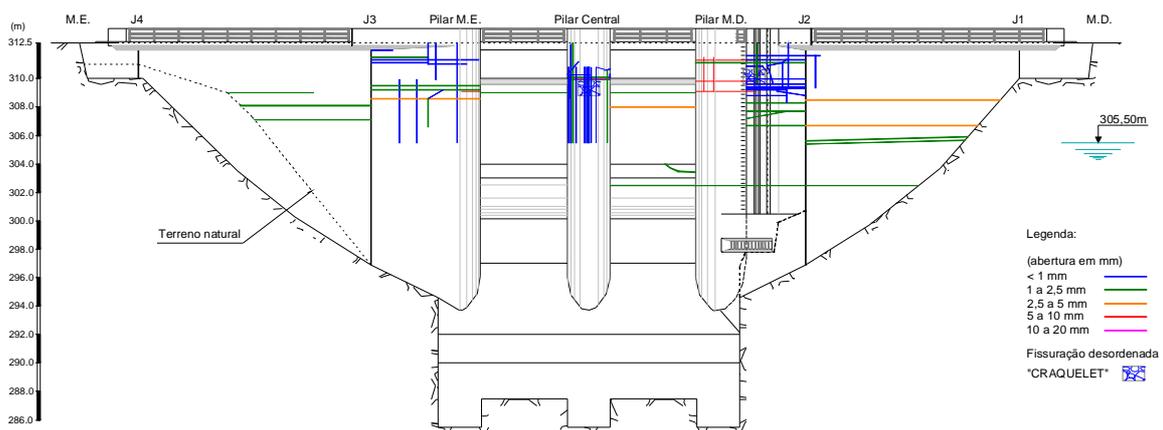
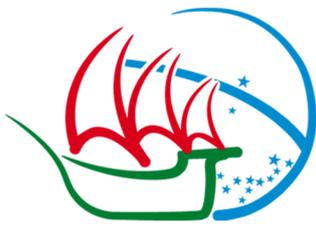


Fig. 2 – Levantamento da fendilhação do paramento de montante, efetuado em outubro de 2004.



IIº Encontro Luso-Brasileiro de Degradação de Estruturas de Betão

Lisboa • LNEC • 27 a 29 de setembro de 2016



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

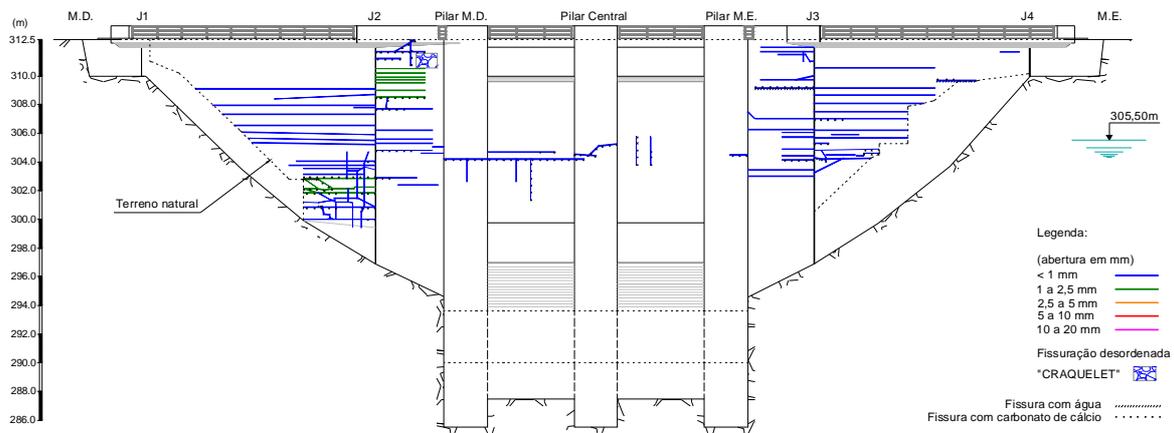


Fig. 3 – Levantamento da fendilhação do paramento de jusante, efetuado em outubro de 2004.

Nas Figs. 4 e 5 apresentam-se fotografias, obtidas respetivamente em 2015 e 2016, de zonas da obra onde é visível o avançado estado de deterioração do betão.



Fig. 4 – Vistas de jusante da parte inferior da abóbada direita (à esquerda) e da parte superior da abóbada esquerda (à direita), em 2015.



Fig. 5 – Vistas geral (à esquerda) e de pormenor (à direita) do contraforte central, em 2016.



IIº Encontro Luso-Brasileiro de Degradação de Estruturas de Betão

Lisboa • LNEC • 27 a 29 de setembro de 2016



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

4. PROPRIEDADES DO BETÃO

No projeto da obra, elaborado em 1979 (Hidroprojecto 1979), estava definida a utilização de betão da classe B225 em todos os elementos estruturais da barragem. Na construção foi utilizado betão pronto, com uma dosagem de 360 kg de cimento Portland normal por metro cúbico, agregado grosso constituído principalmente por rocha calcária e agregados finos formados por areão e areia siliciosos das regiões de Mortágua e de Mira. No Quadro 1 apresenta-se a composição do betão e no Quadro 2 indicam-se as tensões de rotura à compressão do betão em ensaios destrutivos efetuados sobre provetes cúbicos de 20 cm de aresta a várias idades (LNEC 2001).

Quadro 1 – Composição do betão da barragem

Componentes (max. dimensão em mm)	Dosagem dos 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
Relação A/C	0,44	

**Quadro 2 – Resultados dos ensaios de rotura à compressão simples
(provetes cúbicos de 20 cm de aresta)**

Idade (dias) (nº. espécimes)	σ_{bm} (MPa)	Δ (MPa)	σ_{bk} (MPa)
7 (24)	34,0	4,6	26,7
14 (24)	38,8	4,1	31,8
28 (77)	40,5	4,1	33,8

σ_{bm} – Tensão de rotura média

Δ – Desvio padrão

σ_{bk} – Tensão de rotura característica

O valor característico da tensão de rotura à compressão, obtido nos ensaios realizados durante a construção para controlo da qualidade do betão, foi de 33,8 MPa, que se pode considerar um valor elevado face à classe prescrita (B225). A maturação do betão foi



IIº Encontro Luso-Brasileiro de Degradação de Estruturas de Betão

Lisboa • LNEC • 27 a 29 de setembro de 2016



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

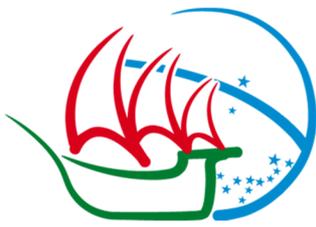
relativamente rápida (ver Quadro 2), o que não é adequado para as estruturas de betão em massa das barragens.

As betonagens foram realizadas sem controlo específico das temperaturas do betão. Sendo consideráveis a dosagem de cimento utilizada na estrutura da barragem e a espessura dos elementos betonados, é provável que as temperaturas do betão tenham atingido valores elevados, propiciando condições para o desenvolvimento da reação sulfática interna (LNEC 2010).

Em 2008 foram realizados 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. Sobre os tarolos recolhidos foram realizados diversos ensaios laboratoriais, designadamente para: i) determinação do teor em álcalis solúveis; ii) determinação do teor em sulfatos; iii) caracterização microestrutural do betão por observação ao MEV/EDS; iv) avaliação da reatividade residual aos álcalis dos agregados do betão; e v) avaliação da reatividade residual aos sulfatos internos do betão (LNEC 2010). Este estudo concluiu que o agregado grosso continha maioritariamente 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 reações do tipo álcalis-sílica era reduzido, o potencial expansivo por reações sulfáticas internas era superior e o teor em sulfatos interno era suficiente para a continuação do processo expansivo. Sugeriu-se ainda a monitorização do teor em sulfatos da água da albufeira.

A avaliação das propriedades mecânicas do betão estrutural foi realizada sobre provetes retirados de quatro carotes curtas de 150 mm de diâmetro, extraídas nas abóbadas e nos contrafortes laterais, tendo consistido na determinação da resistência à compressão simples e à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade e função de fluência.

Os ensaios à compressão simples e à compressão diametral foram realizados segundo a especificação E 226: 1968, do LNEC, sobre provetes cilíndricos de 150 mm de diâmetro e 150 mm de altura. Os resultados mostraram uma resistência à compressão elevada nos 14 provetes, com um valor da resistência média, referida a cubos de 20 cm de aresta, de 33,7 MPa, e uma resistência mínima de 21,1 MPa, o que de acordo com o projeto de norma europeia prEN 13791 permitiria considerar a classe de resistência C20/25 para o betão, superior à definida no projeto. No entanto, face aos resultados obtidos durante a construção, considerou-se a existência de uma depreciação da resistência à compressão devido ao processo de deterioração. Em relação à resistência à tração por compressão diametral,



IIº Encontro Luso-Brasileiro de Degradação de Estruturas de Betão

Lisboa • LNEC • 27 a 29 de setembro de 2016



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

obteve-se um valor médio da resistência de 3,0 MPa e um valor mínimo de 2,25 MPa, o que para um betão da classe C20/25 pressupõe uma perda da resistência à tração de muito reduzido valor.

O módulo de elasticidade foi determinado em 4 provetes cilíndricos com 150 mm de diâmetro e 600 mm de altura, com base na especificação E 399: 1993, do LNEC, tendo-se obtido resultados compreendidos entre 24,5 GPa e 19,1 GPa, que puseram em evidência o baixo valor do módulo de elasticidade para um betão desta classe de resistência, apenas justificável pelo facto do betão se encontrar microfissurado devido às reações expansivas ocorridas.

5. SISTEMA DE OBSERVAÇÃO

O sistema de observação da barragem integra dispositivos que permitem avaliar as ações (nível de água na albufeira, temperatura do ar e subpressões na fundação, através de piezómetros instalados na galeria de drenagem) e observar a resposta da estrutura através da medição das seguintes grandezas: i) deslocamentos horizontais e verticais por métodos geodésicos; ii) movimentos de juntas através de bases de alongâmetro; e iii) caudais drenados na fundação, através de drenos instalados na galeria de drenagem e ainda de bicas a jusante.

A linha de nivelamento no coroamento para determinação de deslocamentos verticais, que se encontra esquematizada na Fig. 6, é constituída por doze pontos, quatro de referência, dois em cada margem, cinco pontos objeto materializados por tacos de nivelamento situados no eixo do coroamento e três pontos auxiliares.

A rede de triangulação por jusante, para determinação de deslocamentos horizontais, que se esquematiza na Fig. 7, é constituída por três pontos estação e oito pontos objeto no paramento de jusante, três dos quais a cota muito próxima do coroamento, e um ponto de referência no maciço rochoso que entretanto deixou de ser observado.

Em 2008 foi proposta a reabilitação do sistema de observação existente e o seu reforço, com vista a melhorar-se a caracterização da ação expansiva e dos seus efeitos (LNEC 2008). Alguns dos trabalhos já foram realizados, designadamente os furos para instalação de extensómetros de varas verticais (em 2008), a construção de uma bica exterior (2013) e o melhoramento dos alvos geodésicos (julho de 2016). Contudo, dificuldades de vária ordem têm impossibilitado a conclusão destes trabalhos.



IIº Encontro Luso-Brasileiro de Degradação de Estruturas de Betão

Lisboa • LNEC • 27 a 29 de setembro de 2016



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

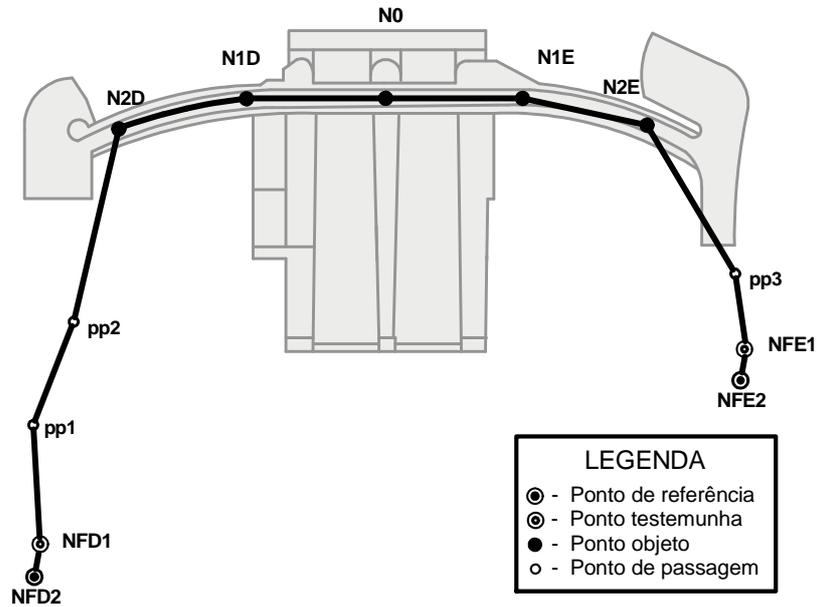


Fig. 6 – Localização dos pontos objeto da linha de nivelamento do coroamento.

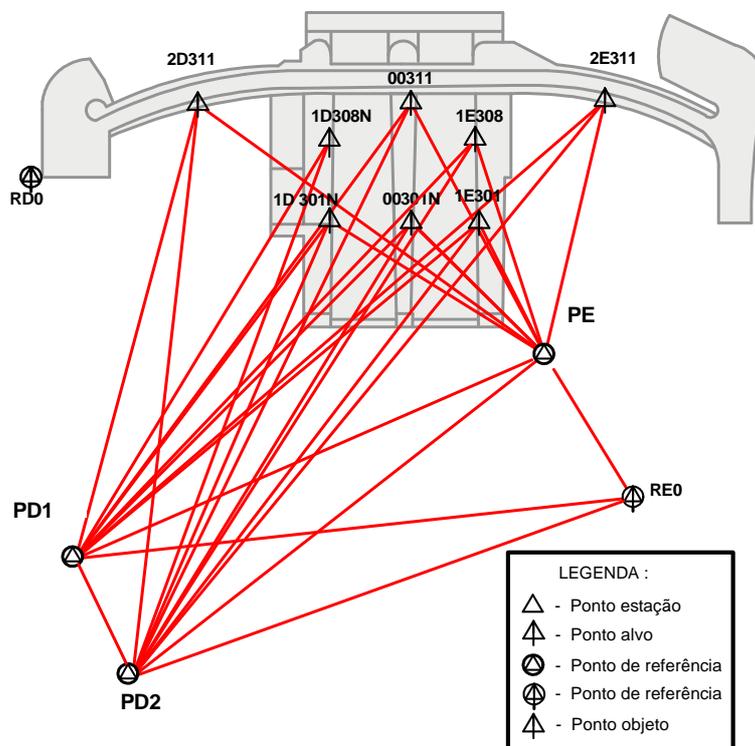


Fig. 7 – Esquema da rede de triangulação por jusante.



6. EVOLUÇÃO DAS AÇÕES E DAS RESPOSTAS

6.1. Ações externas

Não existem registos do nível de água na albufeira no primeiro período de exploração da obra, apenas estão disponíveis valores pontuais aquando da realização das campanhas de observação geodésica. Registos diários contínuos do nível de água começam em 29 de dezembro de 2001, após o segundo galgamento da barragem ocorrido em janeiro de 2001, mas estão interrompidos em dois períodos, o primeiro entre 9 de fevereiro de 2006 e 11 de agosto de 2007 e o segundo entre 1 de janeiro de 2013 e 25 de outubro de 2014. Os registos da temperatura do ar também têm grandes interrupções, como é notório na Fig. 8. Contudo, com a informação existente foi possível ajustar uma curva sinusoidal representativa da onda térmica anual no ar, com a temperatura média de 14,2 °C, a semi-amplitude de 8,0 °C e a fase de 204 dias.

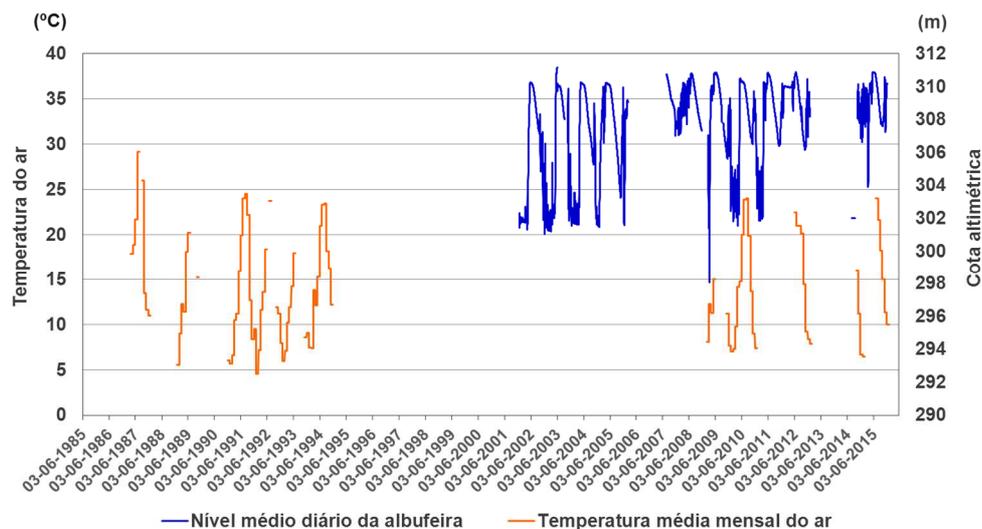


Fig. 8 – Registos de níveis de água na albufeira e da temperatura do ar.

6.2. Ações internas

As ações internas, devidas ao processo expansivo do betão, são analisadas e quantificadas na segunda parte do presente trabalho.

6.3. Deslocamentos horizontais e verticais

Os deslocamentos horizontais e verticais observados por métodos geodésicos constituem uma informação fundamental para a análise do comportamento da obra. Por essa razão serão objeto de tratamento detalhado na segunda parte do trabalho.



6.4. Caudais drenados e infiltrados

Na galeria geral de drenagem foram instalados, no final de 1984, 20 drenos curtos com o objetivo de drenar a zona de ligação entre a estrutura de betão e o maciço rochoso de fundação. Contudo, estes dispositivos não foram, nos primeiros anos de exploração, objeto dos cuidados de manutenção necessários, pelo que se degradaram. A rede de drenagem foi recuperada em 2001 e os drenos têm, desde então, drenado caudais de muito reduzido valor. Em 2001 o sistema de controlo de caudais infiltrados pela fundação também foi reformulado, passando a existir uma bica na margem direita (bica 1 – MD) e uma bica na margem esquerda (bica 1 – ME). Na inspeção efetuada em maio de 2013 foi detetada uma ressurgência a jusante da barragem, entre a base do contraforte da margem esquerda e o maciço rochoso, tendo-se então aí construído uma nova bica, que recebeu a designação de bica 2 – ME.

Na Fig. 9 apresentam-se os diagramas de evolução dos caudais observados nas três bicas, desde janeiro de 2008, podendo inferir-se que os caudais medidos são naturalmente influenciados pela variação do nível de água na albufeira. Contudo, os caudais em apreço são genericamente baixos, com valores pontuais máximos de 10 l/min.

Deve referir-se que as zonas mais fendilhadas do paramento de jusante, designadamente nas abóbadas, apenas têm apresentado manchas de humidade.

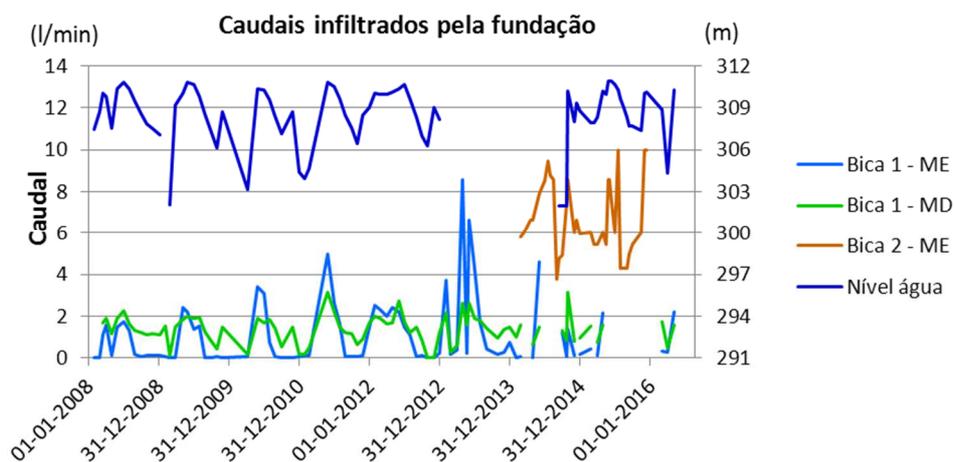
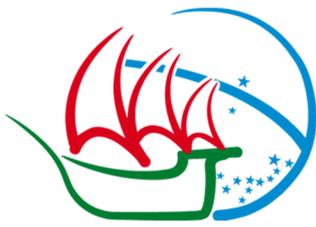


Fig. 9 – Evolução do nível de água na albufeira e dos caudais medidos nas bicas existentes na barragem, entre janeiro de 2008 e maio de 2016.



IIº Encontro Luso-Brasileiro de Degradação de Estruturas de Betão

Lisboa • LNEC • 27 a 29 de setembro de 2016



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A barragem de Fagilde apresenta várias anomalias de comportamento, decorrentes do processo expansivo de origem interna do betão, principalmente devido às reações sulfáticas internas.

Nos ensaios realizados confirmou-se a afetação das propriedades mecânicas do betão, designadamente através redução dos valores de resistência à tração e do módulo de elasticidade, ainda que a resistência à compressão se mantenha dentro dos limites expetáveis para um betão da classe de resistência C20/25. Esta redução de algumas propriedades do betão deve-se essencialmente ao dano interno, por fissuração/fendilhação, provocado pela expansão do betão.

Na segunda parte do trabalho complementa-se o estudo através da análise e interpretação quantitativa dos deslocamentos observados através de métodos geodésicos, com vista à obtenção de estimativas das deformações estruturais provocadas pelas expansões de origem interna do betão. A análise dos deslocamentos verticais e horizontais, considerando a separação dos efeitos do nível da água, térmico e do tempo, a a subsequente obtenção de deformações, é crucial para uma melhor compreensão da evolução do processo de deterioração e, conseqüentemente, para a elaboração de recomendações relativas a medidas de mitigação desse processo.

8. AGRADECIMENTOS

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

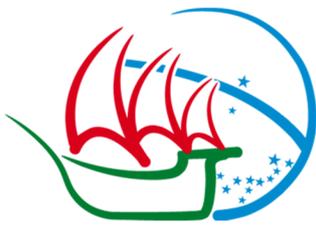
9. REFERÊNCIAS

FCUP 2006. Barragem de Fagilde. Análise petrográfica do betão. Relatório, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Departamento de Geologia.

Hidroprojecto 1979. Barragem de Fagilde. Projeto de execução. Lisboa

LNEC 2001. Estudo do comportamento da barragem de Fagilde entre 1985 e 2001. Relatório 289/2001 – DBB/NO.

LNEC 2003. Barragem de Fagilde. Metodologia para a caracterização do processo expansivo do betão. Relatório 12/2003 – DBB/NO.



IIº Encontro Luso-Brasileiro de Degradação de Estruturas de Betão

Lisboa • LNEC • 27 a 29 de setembro de 2016



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

LNEC 2006. Barragem de Fagilde. Levantamento do estado de fendilhação efetuado em 2004. Nota técnica 58/2006 – DBB/NO.

LNEC 2007. Barragem de Fagilde. Estudo da fluência do betão. Relatório 15/2007 – DM/NB.

LNEC 2008. Barragem de Fagilde. Plano da instrumentação complementar ao sistema de observação. Relatório 111/2008 – DBB/NO.

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

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