



Metodologia de avaliação da deterioração das alvenarias das barragens provocada pela lixiviação das argamassas de ligação dos blocos de pedra

Bernardo Abecasis Jalles

Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa (FCT/UNL), Lisboa, Portugal,
bmajalles@gmail.com

António Lopes Batista

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

José Vieira de Lemos

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

Resumo

A lixiviação das argamassas de ligação dos blocos das barragens de alvenaria de pedra é uma das principais causas da deterioração deste tipo de obras, pois aumenta a permeabilidade e diminui a resistência mecânica e a rigidez dos materiais, afetando o seu comportamento hidráulico e estrutural.

Apresenta-se uma metodologia de avaliação da deterioração das alvenarias das barragens considerando a lixiviação das argamassas de ligação dos blocos de pedra, a partir dos resultados das análises expeditas das águas realizadas nas inspeções periódicas e dos resultados da observação de deslocamentos e de caudais infiltrados pelo corpo das obras. Considerando os caudais infiltrados, avalia-se a permeabilidade média das alvenarias e estimam-se as perdas de massa associadas à lixiviação. Com os deslocamentos observados, estimam-se os módulos de elasticidade médios das estruturas e estabelece-se uma correlação entre as referidas perdas de massa e a parcela dos deslocamentos atribuída aos efeitos do tempo.

As análises apoiaram-se em modelos planos de percolação e estruturais, representativos do comportamento dos perfis transversais das obras, resolvidos pelo programa FLAC, que se baseia no método das diferenças finitas. Utilizaram-se como casos de estudo as quatro barragens de alvenaria portuguesas para as quais se dispõe dos elementos de observação requeridos, que são as barragens de Guilhofrei, Andorinhas, Freigil e Covão do Ferro.

Os resultados obtidos são prometedores no que respeita à interpretação dos caudais infiltrados e dos deslocamentos que se verificam ao longo do tempo nas obras, considerando a deterioração associada à lixiviação das argamassas de ligação dos blocos das barragens de alvenaria de pedra.

Palavras-chave: Barragens de alvenaria de pedra; Lixiviação das argamassas; Permeabilidade; Deterioração estrutural

1 INTRODUÇÃO

As barragens de alvenaria de pedra são, em regra, estruturas antigas. O acompanhamento do comportamento destas obras é feito através da monitorização e de inspeções regulares, bem como da realização de alguns ensaios expeditos. No sentido de garantir a sua funcionalidade e segurança, estas estruturas são sujeitas periodicamente a obras de beneficiação e reabilitação, essencialmente para recuperar o seu monolitismo estrutural e a impermeabilidade que progressivamente se perdem por diferentes causas, em geral associadas a efeitos térmicos, ações sísmicas e, sobretudo, à lixiviação das argamassas que ligam os blocos de pedra [1]. Esta lixiviação provoca uma degradação progressiva da estrutura, refletindo-se na perda de resistência e da rigidez mecânica, pelo que afeta o seu comportamento estrutural e hidráulico.

Os sistemas de observação destas obras são, em regra, relativamente limitados, mas nas barragens de maiores dimensões são monitorizados os deslocamentos horizontais e verticais por métodos geodésicos, as pressões da água nas estruturas e fundações e os caudais drenados e infiltrados. No que respeita a ensaios expeditos, são efetuados periodicamente análises das águas das albufeiras e das águas drenadas e infiltradas. Os resultados da monitorização, inspeções e ensaios permitem a realização do controlo da segurança e a interpretação do seu comportamento.

Em algumas barragens portuguesas de alvenaria de pedra têm-se verificado deslocamentos progressivos no tempo, de assentamento do coroamento e horizontais no sentido de montante. A magnitude destes deslocamentos progressivos está diretamente relacionada com a altura das obras e com os valores dos caudais infiltrados pelo seu corpo. Para interpretar este tipo de comportamento desenvolveu-se uma metodologia de avaliação dos efeitos estruturais da deterioração das alvenarias das barragens considerando a lixiviação das argamassas de ligação dos blocos, a partir dos resultados da observação e das análises expeditas das águas realizadas nas inspeções periódicas. A metodologia envolve as seguintes etapas: i) a partir do nível médio das albufeiras e dos caudais infiltrados determina-se a permeabilidade média das alvenarias; ii) as perdas de massa associadas à referida lixiviação são estimadas a partir dos resultados das análises químicas das águas das albufeiras e das águas infiltradas; iii) com a parcela dos deslocamentos observados devida à pressão hidrostática estimam-se os módulos de elasticidade médios das estruturas; e iv) estabelece-se uma correlação entre as referidas perdas de massa e a parcela dos deslocamentos atribuída aos efeitos do tempo.

As análises apoiaram-se em modelos planos de percolação e estruturais, representativos do comportamento dos perfis transversais das obras. Utilizaram-se como casos de estudo as quatro barragens de alvenaria portuguesas para as quais se dispõe dos elementos de observação requeridos, que são as barragens de Guilhofrei, Andorinhas, Freigil e Covão do Ferro [2].

2 EFEITOS DA PERCOLAÇÃO NO CORPO DAS BARRAGENS DE ALVENARIA DE PEDRA

2.1 Aspetos gerais

As barragens de alvenaria de pedra são constituídas, em regra, por paramentos de blocos de alvenaria aparelhada, ligados por argamassa, e núcleo de alvenaria irregular, com blocos a granel, também ligados por argamassa. Dado que a permeabilidade da matriz dos blocos de pedra é pequena, a percolação de água através do corpo destas obras ocorrerá, predominantemente, através

do seguinte conjunto de discontinuidades e singularidades: i) juntas estruturais, caso existam; ii) eventuais fendas nos blocos, nas argamassas e na ligação entre eles; iii) irregularidades e defeitos nos blocos e nas argamassas; e iv) argamassas desagregadas e/ou deterioradas. A caracterização do escoamento nos meios descontínuos é muito mais difícil que nos meios contínuos. Face à reduzida dimensão dos blocos de alvenaria quando comparada com as dimensões das obras, afigura-se como razoável a consideração de modelos contínuos para o estudo do escoamento através do corpo destas obras. Assim, nos estudos poderá ser considerada a permeabilidade de meios contínuos equivalentes.

Os escoamentos nestas obras são de natureza tridimensional. Os modelos tridimensionais envolvem, na sua definição e análise, um grande volume de informação, designadamente na geração de dados, no processo de cálculo e na interpretação de resultados [3]. Atendendo à geometria da generalidade das barragens gravidade, os seus perfis transversais constituem os planos preferenciais de percolação da água, pelo que é corrente fazerem-se algumas aproximações para poderem ser usados modelos planos.

Não existem elementos, obtidos em ensaios, sobre a permeabilidade da maioria das barragens de alvenaria de pedra portuguesas. Assim, admitir-se-á que os seus corpos podem ser caracterizados por valores médios globais do respetivo coeficiente de permeabilidade. Este coeficiente pode ser considerado como um elemento classificativo do estado de degradação das respetivas alvenarias.

2.2 Estudo da percolação em meios contínuos

Considere-se um meio poroso homogéneo e isotrópico, saturado de água. No caso unidirecional, a lei de Darcy, que rege o escoamento em regime laminar quando existe uma diferença de pressão Δp (em altura equivalente de água) no comprimento l , é expressa por,

$$v = -k \frac{\Delta p}{l} = -k i = -k \nabla U \quad (1)$$

em que v é a velocidade de percolação da água (corresponde ao volume de água que passa através de uma secção de área unitária por unidade de tempo), k é o coeficiente de permeabilidade do material saturado, i é o gradiente hidráulico e U é o potencial hidráulico ou cota piezométrica (cota z mais a pressão p dividida pelo peso volúmico γ),

$$U = z + \frac{p}{\gamma} \quad (2)$$

A permeabilidade depende apenas das propriedades do meio, isto é, da natureza, forma, dimensões e grau de interligação dos interstícios [3]. Pode variar no tempo devido a numerosas causas, tais como solicitações exteriores, colmatagem, fenómenos erosivos ou físico-químicos, entre os quais os de dissolução de materiais, como é o caso da lixiviação dos materiais cimentícios das argamassas das barragens de alvenaria, após a dissolução dos carbonatos dos ligantes. Uma das consequências da lixiviação destas argamassas é o aumento da permeabilidade e o conseqüente incremento da sua deterioração, designadamente em termos de depreciação das propriedades hidráulicas e mecânicas das alvenarias.

Recorre-se, em regra, a modelos numéricos para a resolução dos escoamentos em meios contínuos, considerando a permeabilidade e as condições de fronteira. Conhecida a geometria dos modelos e os caudais coletados em galerias e a jusante, é possível estimar um valor médio para o coeficiente de permeabilidade das alvenarias de pedra. Utilizou-se o programa FLAC [4], baseado no método das diferenças finitas, que tem a vantagem de resolver, com a mesma malha, os problemas da percolação e estrutural.

2.3 Estimativa da deformabilidade das alvenarias a partir dos deslocamentos observados

A separação de efeitos devidos às principais ações na resposta observada das barragens de alvenaria de pedra pode ser realizada utilizando técnicas de interpretação quantitativa, as quais se baseiam em relações semi-empíricas entre os efeitos observados e as principais ações [5]. Neste tipo de abordagem assumem-se, em regra, as seguintes hipóteses: i) o comportamento da obra, para as ações da água e para as variações sazonais de temperatura, é reversível; ii) todos os efeitos não reversíveis são função da variável tempo; e iii) os valores observados são a soma das parcelas reversível e não reversível. Para uma época de observação j considera-se que a resposta pode ser representada por uma expressão genérica do tipo (3),

$$E_j(h, t', t) = E_h(h_j) + E_T(t'_j) + E_t(t_j) + K + r_j = E_j^{cal}(h, t', t) + r_j \quad (3)$$

onde E_j representa a resposta observada na época j , h é a diferença entre os níveis da água a montante e a jusante, t' é o tempo (em dias) contado desde o início do ano corrente, t é o tempo, também em dias, contabilizado desde o início do processo em análise, E_h , E_T e E_t são, respetivamente, os efeitos calculados devidos à pressão hidrostática, às ações térmicas e do tempo, K é uma constante, que depende dos valores dos efeitos E_h , E_T e E_t na época inicial, e r_j é um resíduo (diferença entre o valor observado e o valor calculado E_j^{cal}).

Para representar o efeito da pressão hidrostática é usual considerar uma função polinomial; os efeitos das variações de temperatura são normalmente simulados por funções sinusoidais, sendo geralmente predominante a de período anual; e os efeitos do tempo são representados, em geral, por uma função polinomial,

$$E_h(h) = \sum_{i=1}^N a_i h^i \quad (4)$$

$$E_T(t') = b_1 \cos \frac{2\pi t'}{365} + b_2 \sin \frac{2\pi t'}{365} = b_1 \cos \theta + b_2 \sin \theta \quad (5)$$

$$E_t(t) = \sum_{i=1}^M c_i t^i \quad (6)$$

sendo N e M os graus dos polinómios relativos aos efeitos da água e do tempo, respetivamente.

Os coeficientes a_i , b_i e c_i podem ser calculados por regressão linear através do método dos mínimos quadrados, minimizando a soma quadrática dos resíduos, o que garante uma solução única para o problema. De facto, o vetor dos resíduos está associado à incerteza associada às grandezas, à falta de fidelidade da relação funcional, à redundância devida ao número de épocas de observação exceder

largamente o número de parâmetros a determinar e a erros de leitura. Admitindo que os resíduos r_j têm uma distribuição normal, ela será caracterizada por um valor médio nulo e por uma dispersão σ^2 , sendo σ o desvio padrão.

Conhecida a parcela dos deslocamentos devida à pressão hidrostática, a utilização de um modelo estrutural permite estimar um valor médio para o módulo de elasticidade das alvenarias de pedra. Considerou-se novamente o programa FLAC [4], utilizando a malha definida para a resolução do problema de percolação, com base em discretizações em elementos quadriláteros com funções de interpolação lineares para os deslocamentos e para o potencial hidráulico.

2.4 Quantificação simplificada da perda de massa por lixiviação das argamassas

A determinação das características físico-químicas da água da albufeira e da água drenada pelo corpo e pela fundação das barragens tem vindo a ser feita pelo LNEC durante as inspeções periódicas, a partir de amostras colhidas para o efeito. Nas campanhas recorre-se, em geral, a uma metodologia simplificada para a determinação dos parâmetros físico-químicos das águas, designadamente a condutividade elétrica, a temperatura, o pH e o pH de saturação (pHs) após o contacto com carbonato de cálcio.

A condutividade elétrica permite estimar o teor de sais dissolvidos (TSD) e inferir sobre o potencial agressivo das águas em termos de capacidade dissolvente. A partir de valores obtidos nas análises das águas de cerca de 40 barragens portuguesas, foi estabelecida a relação $TSD \text{ (mg/l)} = 0,72 C + 6,07$, sendo C a condutividade elétrica expressa em $\mu S/cm$ [6]. Para valores de $TSD \leq 100 \text{ mg/l}$, as águas têm um elevado poder dissolvente; no caso de $100 \text{ mg/l} < TSD \leq 300 \text{ mg/l}$, o potencial agressivo é baixo; para $300 \text{ mg/l} < TSD \leq 800 \text{ mg/l}$, o potencial agressivo é quase nulo; e para $TSD > 800 \text{ mg/l}$, existe uma grande probabilidade de existência de elevados teores de iões agressivos para o betão [6].

A diferença de valores representativos de propriedades da água da albufeira e da água drenada pelo corpo das obras, coletada em drenos nas galerias ou a jusante, permite quantificar a mineralização sofrida durante a percolação pelas alvenarias, designadamente a devida à lixiviação das argamassas. Essa diferença, no que respeita ao TSD, permite estimar a massa lixiviada das argamassas.

Considerando a massa total dissolvida num dado período de tempo e admitindo que a dissolução de sais é proporcional à velocidade (caudal por unidade de superfície), estabeleceu-se uma formulação para a determinação das extensões correspondentes à perda de massa por lixiviação das argamassas [2]. Para um período de N anos, sendo m_a a massa total lixiviada anualmente e m_T a massa total da barragem, a extensão volumétrica média no corpo da barragem, $\varepsilon_{v,med}$, devida à perda de massa, pode ser estimada pela expressão,

$$\varepsilon_{v,med} = \frac{m_a N}{m_T} \quad (7)$$

Admitindo que o processo é isotrópico, em cada direção a extensão média, $\varepsilon_{ii,med}$, será dada por,

$$\varepsilon_{ii,med} = \frac{\varepsilon_{v,med}}{3} \quad (i = 1,2,3) \quad (8)$$

A partir do valor da extensão média global, em cada elemento j (com área A_j e velocidade de escoamento v_j) considerado na discretização plana do perfil, as extensões $\varepsilon_{ii}(j)$ são dadas por,

$$\varepsilon_{ii}(j) = v_j \frac{\sum_{n=1}^M A_n}{\sum_{k=1}^M v_k A_k} \varepsilon_{ii,med} \quad (i = 1,2,3) \quad (9)$$

sendo M o número de elementos da discretização do domínio.

Alguns programas de análise estrutural, entre os quais se inclui o FLAC, não permitem a consideração direta de deformações impostas, mas permitem considerar variações de temperatura. Assim, usou-se o artifício habitual de converter as deformações em temperaturas equivalentes, $\Delta T(j) = \varepsilon_{ii}(j)/\alpha$ (considerou-se um coeficiente de dilatação térmica linear $\alpha=10^{-5}/^{\circ}\text{C}$).

Considerando a formulação anterior, desenvolveu-se um algoritmo para a obtenção das variações de temperatura (negativas, para simular uma diminuição de volume) em cada ponto dos perfis analisados, em função da velocidade de escoamento em cada zona da malha [2]. As variações de temperatura permitem obter os deslocamentos devidos a esta ação, utilizando o modelo estrutural calibrado para a ação da pressão hidrostática.

3 APLICAÇÕES

3.1 Características dos casos de estudo

A metodologia desenvolvida foi aplicada na avaliação da deterioração progressiva das quatro barragens de alvenaria de pedra portuguesas para as quais se dispõe dos elementos de observação requeridos (caudais infiltrados e deslocamentos), que são as barragens de Guilhofrei, Andorinhas, Freigil e Covão do Ferro. Na Tabela 1 apresentam-se algumas características destas quatro obras.

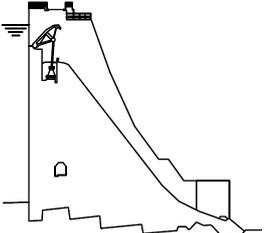
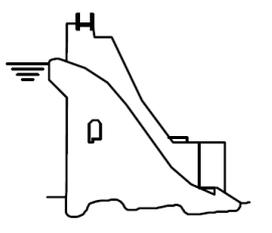
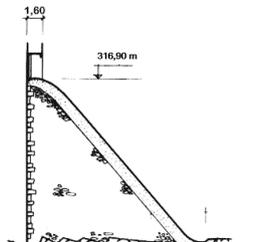
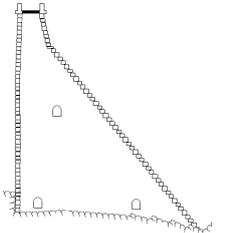
3.2 Dados e resultados da análise de um dos casos de estudo

Apresenta-se a sequência de análise de um dos casos de estudo, relativo à barragem do Covão do Ferro [2], no período entre 1987 e 1993, anterior às grandes obras de reabilitação realizadas nas estagagens entre 2004 e 2006, que incluíram, para além de outras intervenções, a consolidação do corpo da barragem através de injeções de calda de cimento e a instalação de uma membrana de impermeabilização no paramento de montante. Na Fig. 1 apresentam-se: i) uma planta esquemática do corpo principal da obra, com a indicação dos dois perfis analisados (secções 1 e 2); e ii) o modelo plano da secção 2 no programa FLAC, para o qual se apresenta, de seguida, a referida sequência de cálculo.

Na análise da percolação pelo corpo da barragem considerou-se o maciço de fundação impermeável e as alvenarias permeáveis. Foram consideradas as três galerias existentes na barragem (galeria alta, galeria geral de drenagem e galeria baixa).

Para o período de 1987-1993 considerou-se a água a montante a uma cota média de 1575,0 m (o nível de pleno armazenamento da albufeira está à cota 1577,09 m). Foi ainda admitida uma pressão de 1 KPa no coroamento e no paramento de jusante, para simulação das condições climáticas de chuva e neve no local da obra. Foram considerados os caudais totais infiltrados pelo corpo da barragem, recolhidos a jusante pelas bicas totalizadoras, com valor médio de 703 l/min (Fig. 2), para todo o desenvolvimento da obra (290 m).

Tabela 1. Características das barragens analisadas

Barragem	Localização e algumas características	Vista geral da obra	Perfil transversal
Guilhofrei	Rio Ave (concelho de Vieira do Minho) 49 m de altura Construção: 1938		
Andorinhas	Rio Ave (concelho de Vieira do Minho) 25 m de altura Construção: 1945		
Freigil	Rio Cabrum (concelho de Cinfães) 19,7 m de altura Alteamento: 1967 Reabilitação: 1998		
Covão do Ferro	Ribeira da Alforfa (serra da Estrela, Covilhã) 35 m de altura Construção: 1935-1956 Reabilitação: 2004-2006		

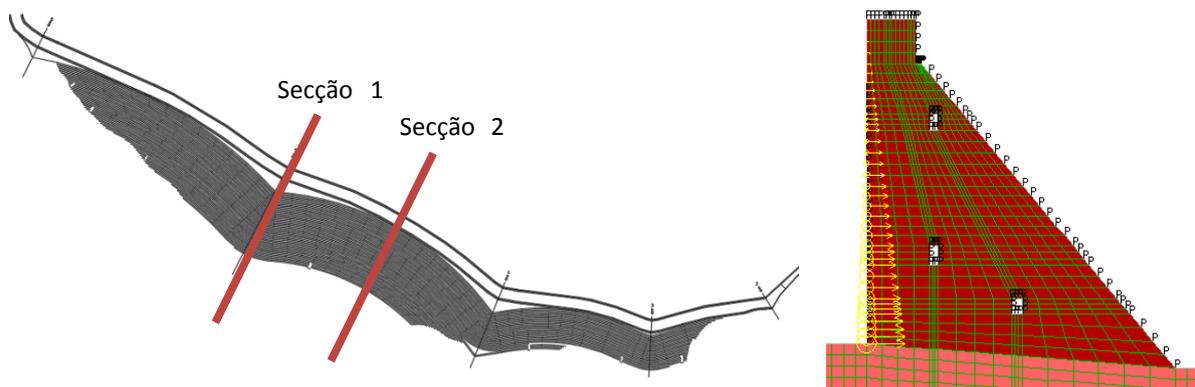


Figura 1. Barragem do Covão do Ferro. Localização em planta dos dois perfis transversais considerados nos estudos (à esquerda) e modelo plano da secção 2 no programa FLAC (à direita)

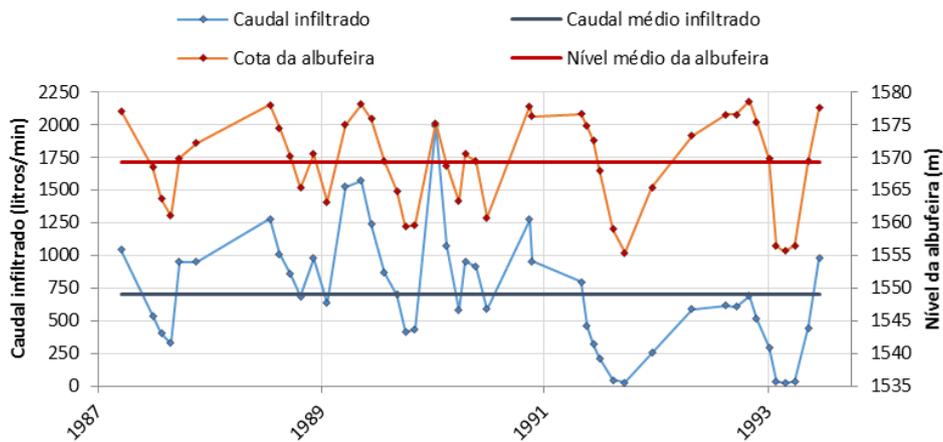


Figura 2. Barragem do Covão do Ferro. Variação do nível da albufeira e caudais totais infiltrados pelo corpo da obra entre 1987 e 1993

Na Fig. 3 apresentam-se, para a secção 2, os resultados da análise do escoamento através do corpo da barragem, para o período em apreço, tendo-se chegado a um valor do coeficiente médio de permeabilidade de $10,7 \times 10^{-7}$ m/s para ajustar o referido caudal observado.

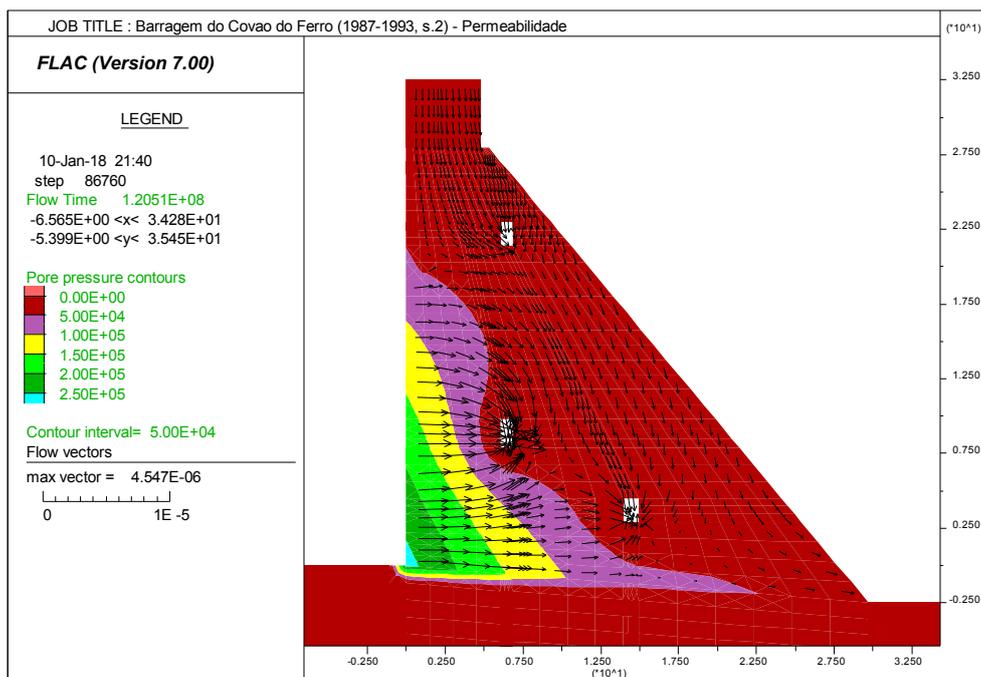


Figura 3. Barragem do Covão do Ferro. Resultados da análise de percolação na secção 2, em termos de velocidades de escoamento e de pressões internas, no período de 1987 a 1993

Considerando o valor médio da diferença do TSD da água infiltrada e da água da albufeira (57 mg/l), a massa dissolvida na obra, devido ao efeito da lixiviação das argamassas de ligação causada apenas pela passagem de água pelo corpo da barragem, é de cerca de 20900 kg/ano. Considerando um valor de massa volúmica de 2400 kg/m^3 e tendo a barragem um volume de alvenaria próximo de 111000 m^3 , a massa total da barragem é de $2,66 \times 10^8 \text{ kg}$, pelo que se estima que a quantidade de material dissolvido em cada ano pelo efeito da lixiviação das argamassas seja aproximadamente de 188 g/m^3 , que corresponde a 0,008% da massa total da barragem.

Apresentam-se na Fig. 4, para a mesma secção, os resultados da análise realizada para ajustar o módulo de elasticidade médio das alvenarias, considerando a parcela dos deslocamentos observados atribuída aos efeitos da pressão hidrostática. Para uma parcela de deslocamento horizontal para jusante de 11,6 mm, junto ao coroamento, estimou-se um valor médio do módulo de elasticidade das alvenarias de 2,2 GPa. A parcela de deslocamento vertical observada devida aos efeitos da pressão hidrostática foi de 2,5 mm (sentido ascendente), sendo o correspondente deslocamento calculado de 2,6 mm.

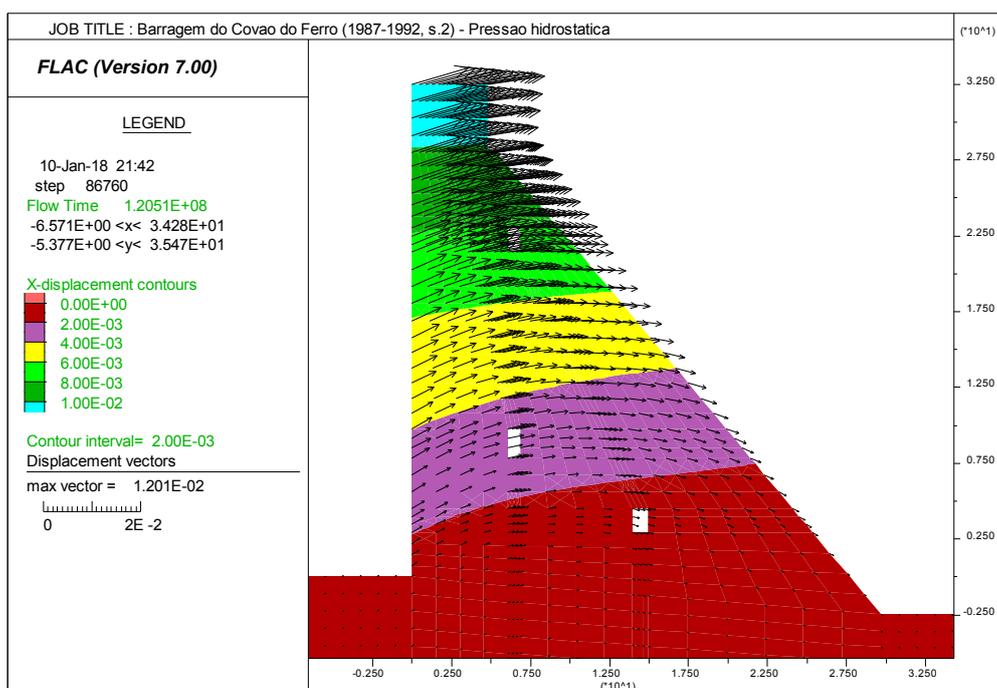


Figura 4. Barragem do Covão do Ferro. Deslocamentos horizontais (a cores) e vetores dos deslocamentos totais devidos à pressão hidrostática na secção 2, no período de 1987 a 1993

As extensões volumétricas médias totais obtidas foram de cerca de -400×10^{-6} no período de 1987 a 1992. Na Fig. 5 apresentam-se os dados (variações de temperaturas equivalentes) e os resultados (deslocamentos) da análise estrutural para os efeitos da perda de massa por lixiviação das argamassas de ligação dos blocos de alvenaria.

Os deslocamentos horizontais calculados foram de 1,5 mm, para montante (a parcela do valor observado, atribuído ao efeito do tempo, foi de 5,9 mm), ao passo que os deslocamentos verticais calculados foram de 4,0 mm, no sentido descendente (a parcela do valor da observação, atribuída ao efeito do tempo, foi de 3,1 mm, no mesmo sentido). Atendendo às várias aproximações envolvidas, pode considerar-se que o acordo conseguido é bom.

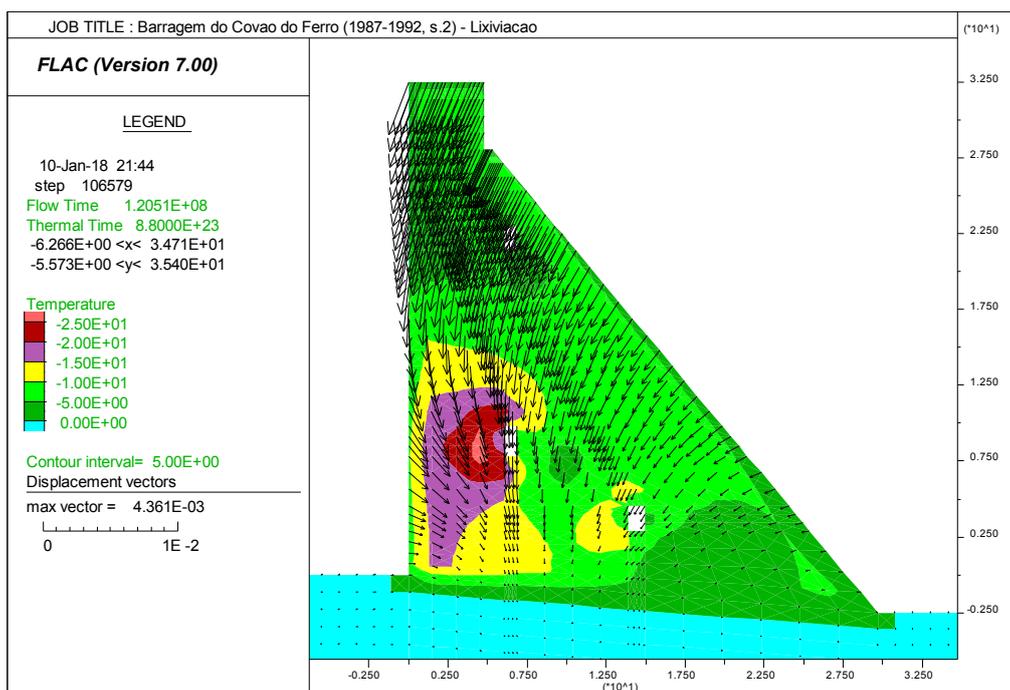


Figura 5. Barragem do Covão do Ferro. Variações de temperatura equivalentes às deformações correspondentes às perdas de massa estimadas por lixiviação das argamassas e vetores dos deslocamentos associados na secção 2, no período de 1987 a 1993

3.3 Síntese de dados e resultados para todos os casos de estudo

Na Tabela 2 apresenta-se uma síntese dos valores estimados para os valores médios dos coeficientes de permeabilidade das alvenarias das quatro barragens portuguesas estudadas (Guilhofrei, Andorinhas, Freigil e Covão do Ferro), através da análise da percolação com modelos numéricos resolvidos com o programa FLAC. Os valores variam entre $1,3 \times 10^{-9}$ m/s, para a barragem de Guilhofrei, que é a menos permeável, e $1,0 \times 10^{-6}$ m/s, para a barragem do Covão do Ferro no período entre 1987 e 1993, cujas alvenarias eram mais permeáveis. Entre estes dois valores existe uma razão de cerca de 800. No caso da barragem do Covão do Ferro estima-se que a permeabilidade das alvenarias do corpo da barragem tenha diminuído, após as obras de reabilitação de 2004-2006, para cerca de 30% do valor correspondente ao período de 1987 a 1993.

Tabela 2. Dados e resultados da determinação do coeficiente médio de permeabilidade das alvenarias das quatro barragens estudadas

Barragem	Ano de construção ou de grande reabilitação	Período de análise	Caudal médio infiltrado pelo corpo da barragem e largura de influência	Coefficiente médio de permeabilidade da estrutura de alvenaria ($\times 10^{-9}$ m/s)
Guilhofrei	1938	2004 a 2013	0,4 l/min em 60 m	1,3
Andorinhas	1945	2004 a 2016	0,9 l/min em 50 m	27
Freigil	1955	2005 a 2015	30 l/min em 63 m	290
Covão do Ferro	1956	1987 a 1993	703 l/min em 290 m	1000 (930 na S1 e 1070 na S2)
	2006	2006 a 2017	71 l/min em 290 m	325 (290 na S1 e 360 na S2)

Nos estudos realizados no âmbito do projeto de reabilitação da barragem da Póvoa (construída em 1928), obteve-se um coeficiente de permeabilidade, através de ensaios “in situ” do tipo Lefranc, de cerca de $5,5 \times 10^{-6}$ m/s [7].

Na Fig. 6 apresentam-se os valores dos coeficientes de permeabilidade das barragens analisadas, em função do ano de construção das obras ou de grandes reabilitações. A figura inclui também os valores médios dos coeficientes de permeabilidade de doze barragens gravidade de alvenaria francesas, obtidos através de ensaios laboratoriais em amostras carotadas [8]. Pode notar-se que os valores estimados para as quatro barragens portuguesas correspondem a estruturas com permeabilidade de ordem de grandeza idêntica às barragens francesas menos permeáveis. A permeabilidade da barragem da Póvoa é a maior das obras portuguesas consideradas.

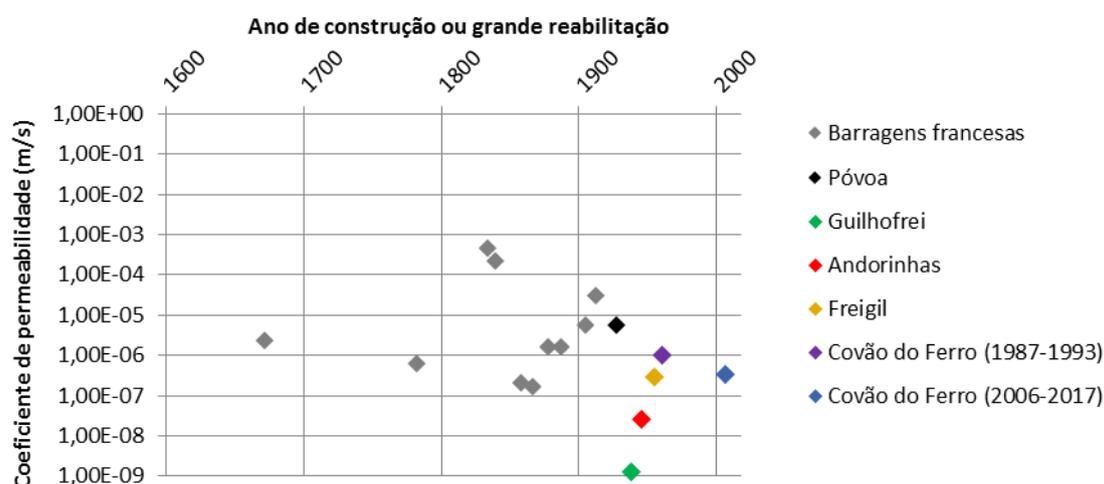


Figura 6. Coeficientes de permeabilidade estimados para as quatro barragens de alvenaria estudadas e obtidos em ensaios em barragens de alvenaria francesas e na barragem da Póvoa

Na Tabela 3 apresenta-se uma síntese dos valores estimados para o módulo de elasticidade médio das alvenarias das quatro barragens estudadas, considerando modelação estrutural e a parcela dos deslocamentos observados devida à pressão hidrostática. Os valores variam entre 17,0 GPa, para a barragem de Guilhofrei, que parece ser a barragem menos deteriorada, e 2,2 GPa para a barragem do Covão do Ferro antes da sua reabilitação.

Tabela 3. Valores estimados para o módulo de elasticidade médio das alvenarias das barragens portuguesas estudadas, considerado a parcela dos deslocamentos observados devida à pressão hidrostática

Barragem	Ano de construção ou de grande reabilitação	Período de análise	Módulo de elasticidade (GPa)
Guilhofrei	1938	2004 a 2013	17,0
Andorinhas	1945	2004 a 2016	7,0
Freigil	1955	2005 a 2015	2,5
Covão do Ferro	1956	1987 a 1993	2,2
	2006	2006 a 2017	2,3

Na Fig. 7 apresentam-se os valores dos módulos de elasticidade estimados para as quatro barragens de alvenaria de pedra portuguesas e os valores médios do módulo de elasticidade de cinco barragens gravidade de alvenaria francesas, obtidos através de ensaios laboratoriais de amostras carotadas [8].

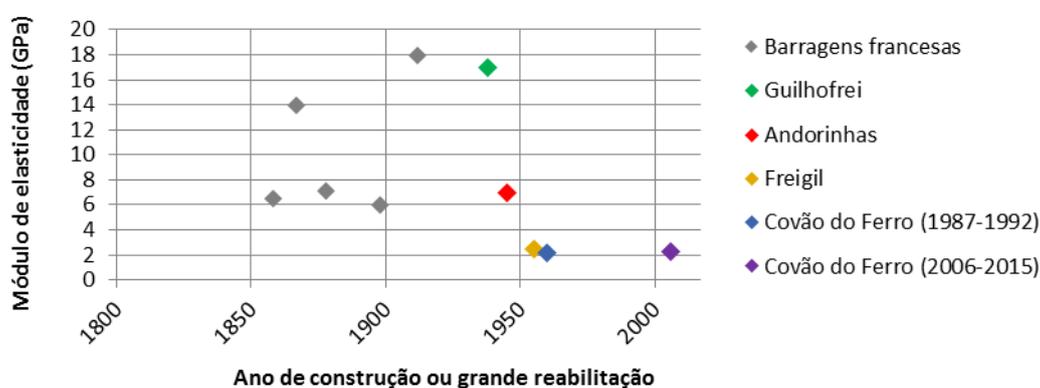


Figura 7. Módulos de elasticidade das quatro barragens portuguesas estudadas (estimados a partir da análise de modelos numéricos) e de seis barragens de alvenaria francesas (obtidos em ensaios de amostras carotadas)

Pode notar-se que os valores estimados do módulo de elasticidade de três barragens portuguesas são menores que os que foram obtidos em ensaios de amostras carotadas das barragens francesas, tendo apenas as barragens de Guilhofrei e Andorinhas valores da mesma ordem de grandeza dessas barragens. Deve referir-se, contudo, que os valores de módulos de elasticidade e de resistência obtidos em ensaios de provetes são, em regra, maiores que os das alvenarias estruturais das obras.

Apresentam-se na Tabela 4 os valores médios estimados para a diferença de TSD das águas da albufeira e infiltradas pelas barragens, bem como a massa dissolvida anualmente por unidade de volume, para as quatro barragens portuguesas estudadas.

Tabela 4. Valores estimados para a diferença de TSD das águas da albufeira e infiltradas pela barragem e para a massa dissolvida por efeito da lixiviação das argamassas de ligação devido apenas ao caudal repassado pelo corpo das obras

Barragem	Ano de construção ou de grande reabilitação	Período de análise	Valores médios da diferença de TSD da águas da albufeira e infiltradas pela barragem	Massa dissolvida (valores médios anuais em g/m ³)
Guilhofrei	1938	2004 a 2013	205 mg/l	1
Andorinhas	1945	2004 a 2016	152 mg/l	15
Freigil	1955	2005 a 2015	65 mg/l	200
Covão do Ferro	1956	1987 a 1993	57 mg/l	190
	2006	2006 a 2017	54 mg/l	20

Na Tabela 5 e nas Figs. 8 e 9 apresentam-se os deslocamentos devidos aos efeitos do tempo, observados e calculados (os valores positivos são no sentido de montante, nos deslocamentos radiais, e no sentido ascendente, nos deslocamentos verticais).

Tabela 5. Parcela dos deslocamentos observados e dos deslocamentos estimados nas quatro barragens portuguesas estudadas, devida aos efeitos da lixiviação das argamassas de ligação dos blocos de pedra das alvenarias

Barragem	Período de análise	Secção analisada	Deslocamentos radiais (mm)		Deslocamentos verticais (mm)	
			Observados	Estimados	Observados	Estimados
Guilhofrei	2004 a 2013	Central	3,1	0,1	-0,6	-0,1
Andorinhas	2004 a 2016	Central	2,0	1,3	0,9	-1,3
Freigil	2005 a 2015	Central	7,0	7,2	-1,6	-11,4
Covão do Ferro	1987 a 1993	1	7,3	1,3	-2,9	-4,1
		2	5,9	1,5	-3,1	-4,0
	2006 a 2017	1	-3,4	-0,4	-0,3	-1,0
		2	-1,4	-0,5	-0,5	-1,1

No que respeita aos deslocamentos radiais, verificaram-se deslocamentos progressivos para montante em todas as obras, exceto na barragem do Covão do Ferro, no período após as obras de reabilitação de 2004-2006. Em todos os casos, os deslocamentos estimados com a modelação numérica foram da mesma ordem de grandeza ou menores que a parcela da observação atribuída aos efeitos irreversíveis.

Os deslocamentos verticais, estimados com os modelos numéricos e obtidos a partir dos resultados da observação, são de assentamento do coroamento em todos os casos, exceto na barragem de Andorinhas, em que a monitorização mostrou um ligeiro empolamento. A concordância entre os resultados da modelação e da observação é boa, exceto na barragem de Freigil.

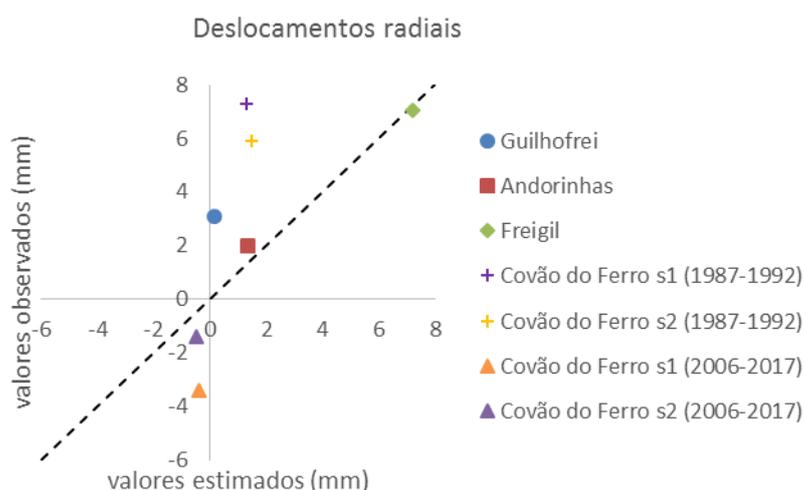


Figura 8. Comparação dos efeitos do tempo determinados a partir da observação com os valores estimados com os modelos numéricos para os efeitos da lixiviação das argamassas de ligação das alvenarias, nos deslocamentos radiais das quatro barragens portuguesas (deslocamentos positivos no sentido de montante)

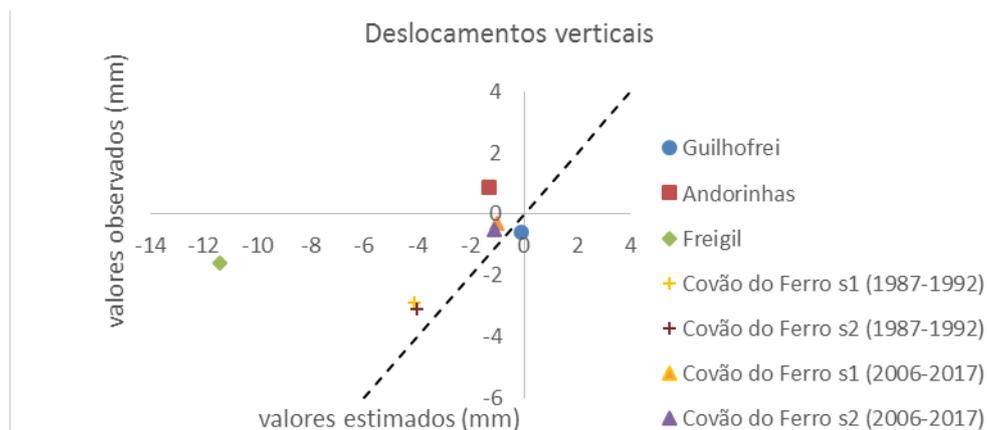


Figura 9. Comparação dos efeitos do tempo determinados a partir da observação com os valores estimados com os modelos numéricos para os efeitos da lixiviação das argamassas de ligação das alvenarias, nos deslocamentos verticais das quatro barragens portuguesas (deslocamentos positivos no sentido ascendente)

Os deslocamentos observados e calculados nas quatro barragens estudadas, apesar dos dados limitados de partida e das simplificações admitidas nas análises, podem ser considerados genericamente coerentes, pelo que a parcela progressiva de deslocamentos no tempo (radiais para montante e verticais de assentamento) pode ser atribuída, em boa medida, à lixiviação das argamassas de ligação das alvenarias, devido às infiltrações da água nas estruturas.

4 CONCLUSÕES

Apresentou-se uma metodologia de avaliação dos efeitos estruturais da deterioração das alvenarias das barragens considerando a lixiviação das argamassas de ligação dos blocos, a partir dos resultados da observação e das análises expeditas das águas realizadas nas inspeções periódicas. A metodologia, que recorre à modelação dos comportamentos hidráulico e estrutural das obras, envolve: i) a determinação da permeabilidade médias das alvenarias a partir do nível médio das albufeiras e dos caudais infiltrados; ii) a estimativa das perdas de massa associadas à referida lixiviação, a partir dos resultados das análises químicas das águas das albufeiras e das águas infiltradas; iii) a determinação dos módulos de elasticidade médios das estruturas a partir da parcela dos deslocamentos observados devida à pressão hidrostática; e iv) a correlação entre as referidas perdas de massa e a parcela dos deslocamentos atribuída aos efeitos do tempo.

Para as barragens de Guilhofrei, Andorinhas, Freigil e Covão do Ferro, os deslocamentos estimados através da metodologia proposta são genericamente coerentes com os deslocamentos observados, mostrando a sua adequação para a análise dos efeitos estruturais da deterioração provocada pela lixiviação das argamassas que ligam os blocos das barragens de alvenaria de pedra. Os resultados obtidos são prometedores no que respeita à estimativa da perda de massa e à interpretação dos deslocamentos que se verificam ao longo do tempo nas obras, sendo que a deterioração das obras parece estar associada, em grande medida, aos caudais repassados pelas suas estruturas.

REFERÊNCIAS

- [1] Ramos, J.M.; Lemos, J.V. (2000). Barragens de alvenaria em exploração em Portugal. Deterioração, modelação, reabilitação. Memória nº 823, LNEC, Lisboa.
- [2] Jalles, B.A. (2017). Avaliação dos efeitos estruturais da lixiviação das argamassas de ligação dos blocos das barragens de alvenaria de pedra. Dissertação de mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
- [3] Mascarenhas, A.T. (1979). Percolação na fundação de barragens de betão. Tese de especialista, LNEC, Lisboa.
- [4] FLAC (2011). FLAC version 7.0 - User's Guide. Itasca Consulting Group Inc., Minneapolis, USA.
- [5] Gomes, A.S. (1981). Automatização das actividades de observação e análise quantitativa de resultados. Tese de especialista, LNEC, Lisboa.
- [6] Silva, H.S. (1992). Estudo do envelhecimento das barragens de betão e de alvenaria. Alteração físico-química dos materiais. Tese de especialista, LNEC, Lisboa.
- [7] Miranda, M.P.; Oliveira, M. (2005). O reforço da segurança estrutural e hidráulico-operacional da barragem da Póvoa. Seminário Barragens - Tecnologia, segurança e interacção com a sociedade, CNPGB, Lisboa.
- [8] Royet, P.; Laugier, F.; Rosin-Corre, N.; Agresti, P.; Salmi, A. (2013). Le parc des barrages Français en maçonnerie: techniques de reconnaissance et de confortement. Colóquio Modernisation des barrages, CFBR, Chambéry (França).

