

ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE UMA BARRAGEM GRAVIDADE ANTIGA DE ALVENARIA DE PEDRA

Eduardo Martins BRETAS

Engenheiro Civil, Doutorado – Bolseiro de Pós-Doutoramento – LNEC, Portugal

António Lopes BATISTA

Engenheiro Civil, Doutorado – Investigador Principal – LNEC, Portugal

José Vieira de LEMOS

Engenheiro Civil, Doutorado – Investigador Coordenador – LNEC, Portugal

RESUMO

Apresenta-se a análise da estabilidade da barragem do Covão do Ferro, uma estrutura de gravidade de alvenaria de pedra argamassada, localizada a elevada altitude na Serra da Estrela, em Portugal, com altura máxima de 32,5 m e um desenvolvimento do coroamento de cerca de 400 m. A barragem foi reabilitada entre 2004 e 2006 com o objetivo de repor as condições de segurança estrutural. As principais obras incluíram a injeção de calda de cimento no corpo da barragem e no maciço de fundação, a instalação de uma geomembrana de PVC no paramento de montante e o reforço do sistema de drenagem através da abertura de novos drenos. A análise estrutural realizada, para as condições existentes antes da reabilitação, permitiu estudar o efeito das pressões internas e da subpressão na estabilidade local e global da barragem bem como os possíveis mecanismos de rotura.

ABSTRACT

The stability analysis of Covão do Ferro dam, a masonry gravity dam, located at high elevation in Serra da Estrela, Portugal, with a maximum height of 32,5 m and a total length of about 400 m, is presented. The dam was rehabilitated between 2004 and 2006 in order to restore the structural stability. The main works included the injection of cement grout into the dam body and the rock mass foundation, the installation of a PVC geomembrane on the upstream face, and the strengthening of the drainage system through the opening of new drains. The structural analysis, considering the dam before its rehabilitation, allows the study of the internal water pressure and the uplift effects in the local and global stability of the dam, as well as the potential failure mechanisms.

1. INTRODUÇÃO

O dimensionamento de barragens com base em pressupostos científicos, com recurso à análise de tensões, surgiu na segunda metade do século XIX. Nesta época a alvenaria de pedra ainda era o principal material de construção utilizado em obras hidráulicas, pois o uso generalizado do betão verificou-se apenas a partir do século XX. A construção destas barragens seguia um modelo em que os paramentos e o coroamento eram executados com alvenaria aparelhada enquanto o interior era preenchido com alvenaria a granel. Na época, a utilização da alvenaria aparelhada, apesar dos custos elevados, permitia a execução de superfícies uniformes e esteticamente bem acabadas, reduzindo assim o número de descontinuidades. De acordo com as técnicas construtivas deste período, a alvenaria a granel deveria ser formada por blocos de grandes dimensões, posicionados de forma a criar imbricamentos nas diversas direções, tendo o cuidado de minimizar o volume de vazios. As argamassas de ligação da alvenaria eram na sua maioria de cimento, porém verificou-se também a utilização de argamassas de cal.

A grande maioria das barragens de alvenaria desta época já sofreu alguma obra de reabilitação. Muitas vezes estas obras estão relacionadas com a necessidade de corrigir deficiências do projeto inicial. Um exemplo é a necessidade de redimensionar a estrutura para as ações da subpressão e para as ações sísmicas, que normalmente não eram tidas em conta quando do projeto inicial. Porém, a principal causa das obras de reabilitação é a efetação das condições de segurança estrutural e hidráulica por envelhecimento da estrutura. Para as barragens de alvenaria, o cenário de deterioração mais relevante relaciona-se com a infiltração de água pelo corpo da barragem. A infiltração ocorre principalmente pelas juntas da alvenaria, mas também por fendas. Muitas dessas fendas são de origem térmica, pois a maioria destas barragens não tem juntas de contração. A água provoca a lixiviação das argamassas de ligação das alvenarias, através da dissolução e transporte da cal hidratada, cuja intensidade é potencializada pelo efeito da erosão, que por sua vez é função da velocidade do escoamento. Este fenómeno reduz as propriedades resistentes da alvenaria, como o módulo de elasticidade, a coesão e as resistências últimas à tração e à compressão. A infiltração de água pelo corpo da barragem provoca também o estabelecimento de pressões internas. Estas pressões internas alteram o estado de equilíbrio da estrutura, podendo mesmo interferir no equilíbrio global da barragem, caso se verifiquem no plano de fundação, onde assumem a forma de subpressões.

2. AS BARRAGENS DE ALVENARIA EM PORTUGAL

Em Portugal existem 11 grandes barragens de alvenaria de pedra em exploração (Quadro 1 e Figura 1). São barragens com altura superior a 15 m, com idade média bastante elevada, cerca de 70 anos, construídas com alvenaria de granito. No Quadro 1 a informação relativa ao ano de construção é apenas indicativa, pois na maioria dos casos a construção foi faseada ao longo de muitos anos, passando por diversos alteamentos até atingir a altura e geometria atuais. Um levantamento anterior [1] indicava ainda a existência das barragens da Margalha e Tapada do Lousal. Entretanto a barragem da Margalha foi abandonada, encontrando-se submergida na albufeira da barragem de Alqueva, no concelho de Mourão. Por sua vez a barragem da Tapada do Lousal, no concelho de Grândola, após a desativação da mina do Lousal, tem servido apenas para atividades de lazer.

As barragens de Andorinhas (Figura 1a) e Guilhofrei (Figura 1e) localizam-se, respetivamente, nos concelhos da Póvoa do Lanhoso e de Vieira do Minho, ambas no distrito de Braga. Estas duas barragens são provavelmente as que apresentam menores danos por envelhecimento e melhores condições estruturais, o que não deverá ser alheio o facto de ambas apresentarem juntas de contração, incluídas nos respetivos projetos iniciais, desenvolvidos por A. Stucky. As barragens do Covão do Ferro (Figura 1c), no concelho da Covilhã, da Lagoa Comprida (Figura 1f), no concelho de Seia, e do Vale do Rossim (Figura 1k), no concelho de Gouveia, localizam-se na serra da Estrela, fechando covões de origem glaciár. A barragem do Covão do Ferro passou por duas grandes obras de reabilitação, sendo a última constituída, entre outras componentes, pela instalação de uma geomembrana de PVC no paramento de montante, cujos detalhes serão apresentados a seguir. As duas últimas barragens citadas, as barragens da Lagoa Comprida e do Vale do Rossim, foram reabilitadas com recurso à construção de uma parede de betão armado ligada ao paramento de montante. A barragem de Freigil (Figura 1d), no concelho de Cinfães, sofreu uma intervenção caracterizada pela aplicação de resinas epoxi nas juntas dos blocos de alvenaria do paramento de montante. A barragem de Penide (Figura 1h), no rio Cávado, no concelho de Barcelos, destaca-se das restantes por ser de betão com revestimento quase total de alvenaria e também por ser uma barragem descarregadora, cujas comportas têm praticamente a altura da barragem. As barragens do Poio (Figura 1i) e Póvoa (Figura 1j), respetivamente nos concelhos de Nisa e de Castelo de Vide, no distrito de Portalegre, aguardam o início das obras de reabilitação, que compreendem, entre outros aspetos, a injeção de calda de cimento nos seus corpos.

Nome / Altura	Ano em que se atingiu a cota atual	Obras de reabilitação / Observações
<i>Andorinhas H= 25 m</i>	<i>1945</i>	<i>Não foram realizadas obras de reabilitação.</i>
<i>Burgães H= 30 m</i>	<i>1940</i>	<i>Não foram realizadas obras de reabilitação.</i>
<i>Covão do Ferro H= 32,5 m</i>	<i>1956</i>	<i>Obras de reabilitação realizadas em 1965 e 2006 (ver texto para mais detalhes).</i>
<i>Freigil H= 17 m</i>	<i>1955</i>	<i>Impermeabilização do paramento montante com resinas do tipo epoxi (1987).</i>
<i>Guilhofrei H= 49 m</i>	<i>1938</i>	<i>Não foram realizadas obras de reabilitação.</i>
<i>Lagoa Comprida H= 29 m</i>	<i>1966</i>	<i>Construção de uma cortina de betão no paramento de montante com juntas de contração, injeção de calda de cimento (barragem e fundação) e reabilitação do sistema de drenagem (1965).</i>
<i>Penedo Redondo H= 21 m</i>	<i>1935</i>	<i>Não foram realizadas obras de reabilitação.</i>
<i>Penide H= 18 m</i>	<i>1951</i>	<i>Não foram realizadas obras de reabilitação.</i>
<i>Poio H= 18 m</i>	<i>1932</i>	<i>Em fase de projeto. Solução proposta inclui injeção de calda de cimento (barragem e fundação) e reforço do sistema de drenagem.</i>
<i>Póvoa H= 32 m</i>	<i>1928</i>	<i>Em fase de projeto. Solução proposta inclui injeção de calda de cimento (barragem e fundação) e reforço do sistema de drenagem.</i>
<i>Vale do Rossim H= 27 m</i>	<i>1956</i>	<i>Construção de uma cortina de betão no paramento de montante com juntas de contração, injeção de calda de cimento (barragem e fundação) e reabilitação do sistema de drenagem.</i>

QUADRO 1 – Lista das grandes barragens portuguesas de alvenaria em exploração

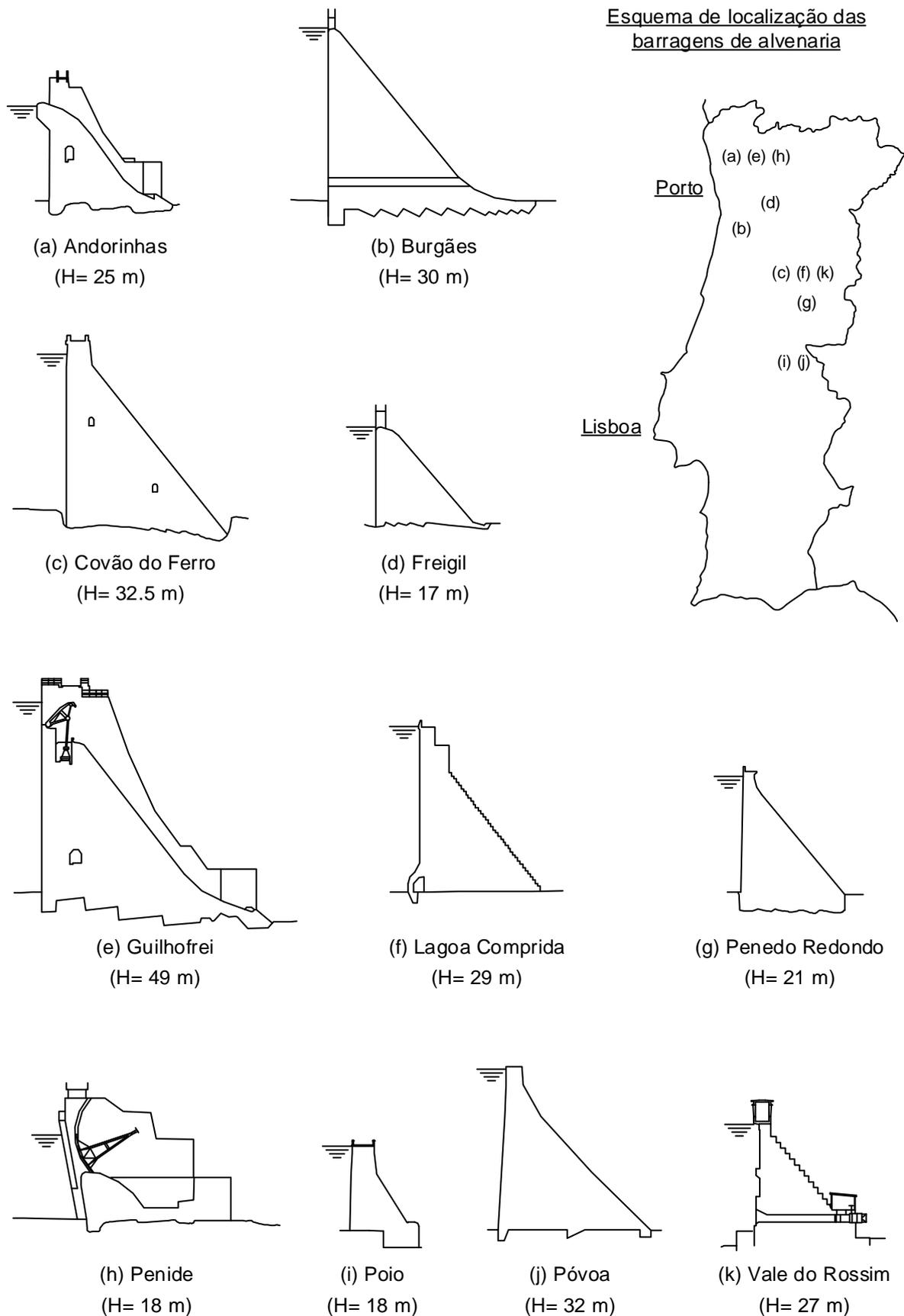


FIGURA 1 – Perfis transversais das grandes barragens portuguesas de alvenaria em exploração

3. A BARRAGEM DO COVÃO DO FERRO

3.1. DESCRIÇÃO GERAL

A barragem do Covão do Ferro localiza-se na ribeira de Alforfa, subafluente do rio Zêzere, na serra da Estrela, em Portugal. A barragem fecha um covão de origem glaciária, formando um reservatório com cerca de $1,1 \times 10^6$ m³. É uma barragem gravidade com altura máxima de 32,5 m acima da fundação (Figura 2). A barragem tem uma planta poligonal, em que cada troço apresenta uma curvatura com a concavidade voltada para jusante (Figura 3). A barragem foi construída entre 1935 e 1956. Este período de construção, bastante extenso, justifica-se pelo processo construtivo, fundamentalmente com recurso ao trabalho manual, e por razões climáticas, que limita o período anual das obras de junho a outubro. Os paramentos de montante e jusante são constituídos por alvenaria aparelhada, assentes com a argamassa de cimento, enquanto o interior é preenchido com alvenaria irregular, ligada por argamassa de cal hidráulica. Nos primeiros 13,5 m do paramento de montante, medidos a partir do coroamento, a barragem é reforçada com uma parede de betão com cerca de 0,30 m de espessura.

A observação da barragem iniciou-se em 1945, através da leitura de deslocamentos planimétricos e altimétricos e a observação dos caudais infiltrados. Durante os anos seguintes assistiu-se a degradação da barragem. Dados de 1963 mostraram um volume muito elevado de águas infiltradas cuja composição química apresentava elevados valores de óxido de cálcio, indicando a ocorrência de um fenómeno de lavagem das argamassas. Estes dados precipitaram a necessidade de serem tomadas medidas corretivas como forma de interromper este processo de degradação e restituir a integridade do corpo da barragem. As intervenções ocorreram entre 1964 e 1967 e incluíram: (i) injeção de calda de cimento pozolânico no corpo da barragem e na fundação, numa faixa de cerca de 4 m de espessura junto ao paramento de montante, num total de 2600 t de calda; (ii) execução de uma galeria de drenagem, próxima do paramento de montante; e (iii) execução de drenos verticais no corpo da barragem, entre a galeria de drenagem e o coroamento, e na zona de contacto barragem-fundação. Essas obras foram responsáveis pela redução significativa do volume de caudais infiltrados, para o nível de pleno armazenamento, de cerca de 6000 m³/dia para 200 m³/dia.

No início da década de 1990 verificou-se novamente a degradação progressiva das condições estruturais da barragem, com o surgimento de fendas e o aumento progressivo dos caudais infiltrados. Foi realizado, em 1986 e 1987, um conjunto de inspeções com o objetivo de avaliar os danos existentes. Foram então identificadas: (i) fissuras verticais e horizontais mais ou menos contínuas, provavelmente devido a efeitos térmicos, dada a inexistência de juntas de contração; e (ii) infiltrações significativas, muitas vezes com pressões elevadas, com formações de jatos, pois o sistema de drenagem existente aparentemente não aliviava estas pressões. Apontou-se para a necessidade de realização de novas obras de reabilitação, com o objetivo de drenar, impermeabilizar e consolidar o corpo da barragem e o maciço rochoso de fundação [2].

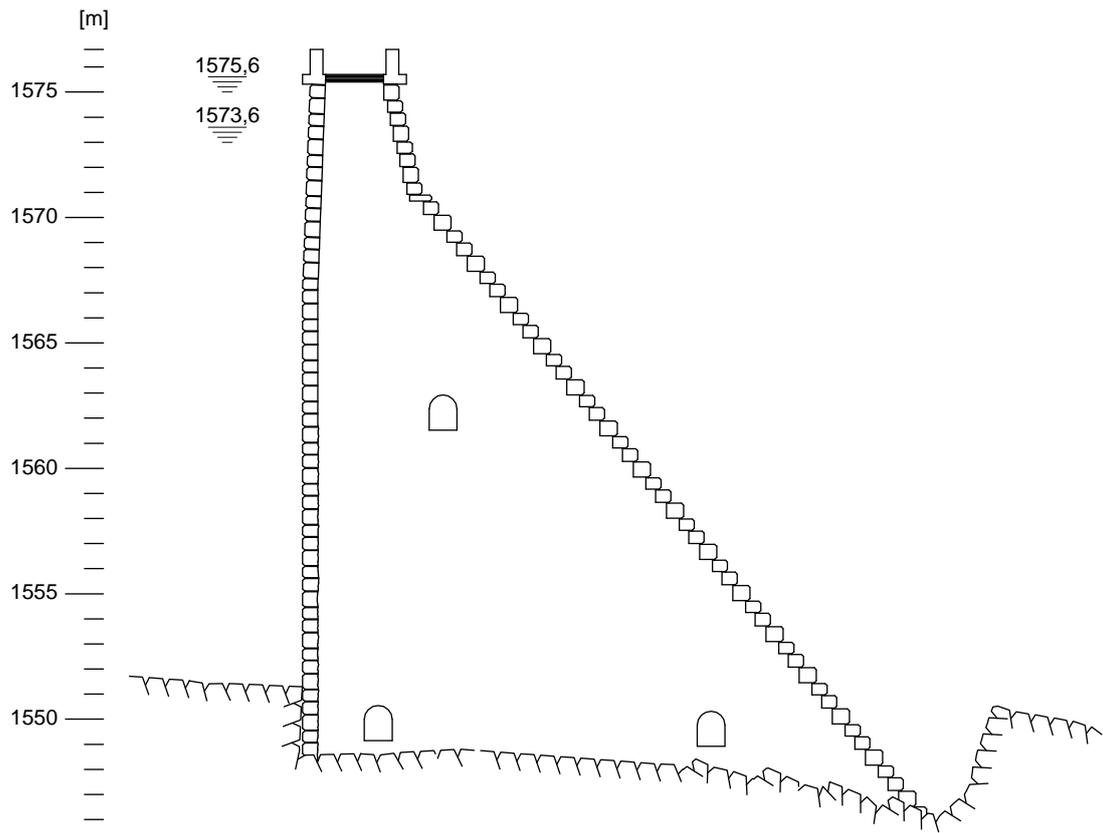


FIGURA 2 – Secção transversal da barragem do Covão do Ferro

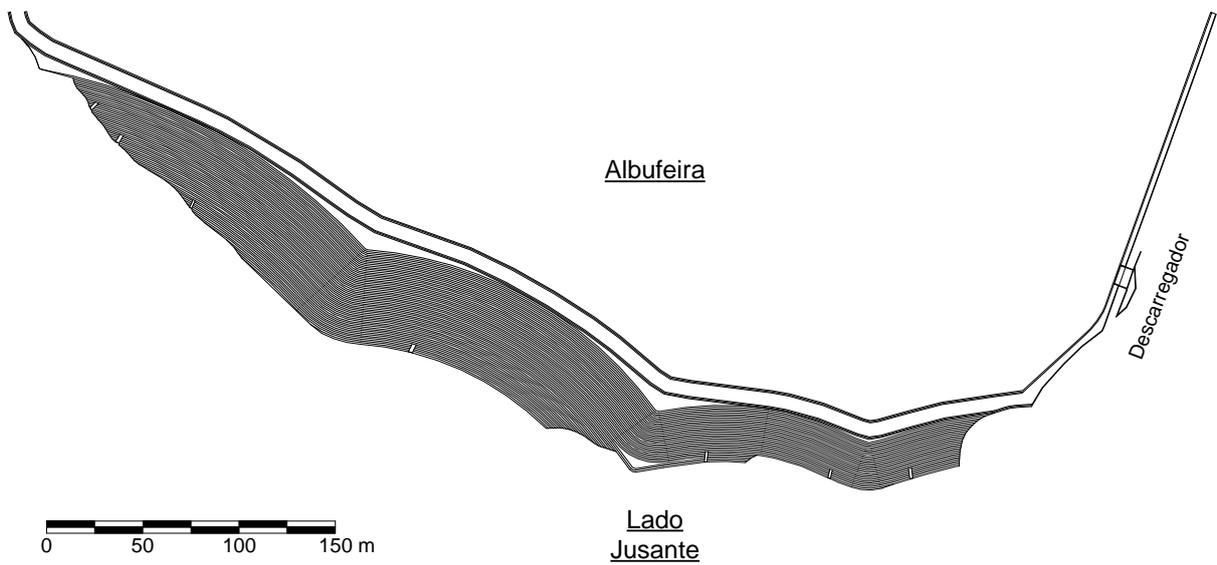


FIGURA 3 – Planta da barragem do Covão do Ferro

3.2. AS ÚLTIMAS OBRAS DE REABILITAÇÃO DA BARRAGEM DO COVÃO DO FERRO

As últimas obras de reabilitação ocorreram entre 2004 e 2006, executadas principalmente entre os meses de maio e outubro, quando as condições climáticas permitiam a realização dos trabalhos. As obras tiveram como principal objetivo a impermeabilização do paramento de montante e a consolidação do corpo da barragem, restituindo a sua massa e coesão, bastante deteriorado devido à lixiviação e à lavagem das argamassas de ligação das alvenarias em consequência da infiltração de água proveniente da albufeira [3].

A impermeabilização do paramento montante foi realizada através da instalação de uma membrana de PVC, com densidade de 500 g/m², sobre uma superfície estimada de 7000 m², mecanicamente fixada em perfis verticais ancorados na alvenaria e num plinto de betão betonado ao longo do pé de montante da barragem. Em conjunto com a geomembrana verificou-se a necessidade de aplicar um geotêxtil adicional, mais denso, com 2000 g/m², para aumentar a resistência ao punçoamento, pois os paramentos de alvenaria revelaram-se demasiadamente irregulares. Esta solução mostrou-se eficaz em outras obras localizadas em climas ainda mais exigentes [4].

As primeiras experiências na utilização de geomembranas em barragens datam da década de 1950. Hoje em dia é utilizada com alguma frequência, tanto em barragens de aterro como em barragens de betão e alvenaria. Em cerca de 40% dos casos trata-se de obras de reabilitação, pois o uso da geomembrana permite o desenvolvimento de soluções mais rápidas e económicas quando comparadas com as soluções tradicionais. A utilização de geomembranas tem vindo a beneficiar da experiência entretanto já acumulada, nomeadamente quanto ao envelhecimento, o aperfeiçoamento da composição e da qualidade do material, e a disponibilidade de ensaios laboratoriais padronizados, para além da tecnologia de instalação e fixação na superfície a proteger. Nas barragens de betão (convencional ou compactado com cilindros) e alvenaria, tanto nos casos de barragens gravidade, abóbada ou contrafortes, a grande maioria das membranas são de PVC. Trata-se da associação entre a membrana de PVC e um geotêxtil capaz de resistir às ações de punçoamento. Em muitos casos, a geomembrana fica exposta após a aplicação, em alternativa ao uso de uma cobertura de proteção [5].

O tratamento do corpo da barragem foi realizado com recurso a injeções de calda de cimento, através de furos realizados no coroamento, distanciados de cerca de 3 m, ao longo do corpo da barragem e através do plano de fundação. Foram injetados cerca de 1200 t de calda de cimento, aplicados num total de 2500 m de furos. Foram ainda realizadas as seguintes obras complementares: (i) cortina de impermeabilização a montante da barragem, junto ao plinto, onde foram injetados cerca de 200 t de calda de cimento, aplicados num total de 1200 m de furos; (ii) reforço do sistema de drenagem da fundação através da abertura de novos drenos na galeria de drenagem; (iii) reforço do sistema de observação através da instalação de um conjunto de piezómetros ao longo da galeria de drenagem, a reabilitação das bicas existentes e do sistema de observação geodésica; (iv) instalação de uma nova descarga de fundo; e (v) a reparação da superfície do descarregador e a sua proteção contra a erosão regressiva.

4. A ANÁLISE DA ESTABILIDADE DA BARRAGEM DO COVÃO DO FERRO

4.1. OBJETIVOS E DESCRIÇÃO DO MODELO

A análise estrutural por meio de modelos numéricos é fundamental para o dimensionamento e compreensão do comportamento de estruturas complexas. No caso específico das barragens, as análises são aplicadas a modelos compostos pela barragem, fundação e albufeira, com o objetivo de dimensionar a estrutura e as suas obras de reabilitação, interpretar o seu comportamento para as condições normais de exploração e prever o seu comportamento para cenários de rotura, como a ocorrência de sismos e cheias [6].

A análise que se apresenta visa a identificação dos possíveis mecanismos de rotura da barragem do Covão do Ferro para o cenário de perda de coesão da alvenaria devido a lavagem das argamassas. Foi utilizada uma aplicação desenvolvida com base no método dos elementos discretos para a avaliação estrutural de barragens de betão e alvenaria [7]. Esta aplicação permite igualmente a análise hidromecânica da barragem com o objetivo de estudar o efeito da infiltração da água do reservatório através do corpo da barragem e do plano de fundação, na superfície de contacto entre a barragem e a fundação, determinando as pressões internas e a subpressão que se estabelecem [8]. Esta ferramenta tem sido utilizada em diversos estudos relativos à análise do comportamento de barragens gravidade de betão e alvenaria [9,10].

O modelo plano do perfil mais alto da barragem e fundação está representado na Figura 4. A discretização dos paramentos montante e jusante é realizada através de blocos quadriláteros. Cada bloco quadrilátero corresponde a um elemento finito com 4 pontos nodais, cujas tensões são determinadas em 4 pontos de Gauss. O interior do corpo da barragem é representado através de elementos Voronoi. Cada elemento Voronoi é discretizado através de elementos triangulares deformáveis, que partilham o ponto central do Voronoi. A dimensão dos elementos não corresponde aos blocos reais, mas é suficiente para permitir o desenvolvimento dos principais modos de deformação e de rotura em análise. A fundação é representada através de um único bloco rígido, pois a análise tem por objetivo o estudo dos mecanismos de rotura que ocorrem no corpo da barragem e no plano de fundação. No paramento de montante foram consideradas 3 potenciais fendas, com um comprimento inicial de 2,5 m, distribuídas uniformemente a 1/4, 1/2 e 3/4 da altura total da barragem (Figura 4). As principais propriedades mecânicas consideradas para os materiais são apresentadas no Quadro 2. As condições de apoio são impostas ao bloco da fundação, cujos graus de liberdade foram restringidos.

4.2. METODOLOGIA DE ANÁLISE E RESULTADOS RELEVANTES

Por se tratar de uma análise não linear, cujo objetivo é a avaliação dos possíveis mecanismos de rotura, as ações foram aplicadas de forma faseada, onde o equilíbrio do modelo, ou a sua rotura, foi verificado após cada fase. A Figura 5 mostra, de forma simplificada, este processo. Após a atribuição das propriedades dos materiais e das condições de fronteira do modelo, é considerado o peso próprio da barragem (modelo M_1), cuja deformada está representada na Figura 6a. De seguida foi aplicada a pressão hidrostática no paramento montante, correspondente ao nível da albufeira à cota do coroamento (modelo M_2), cuja deformada está

representada na Figura 6b. Estas duas solicitações são aplicadas no modelo ainda com propriedades elásticas, ou seja, as juntas entre os blocos, onde se concentra a não linearidade do modelo, apresentam propriedades elásticas.

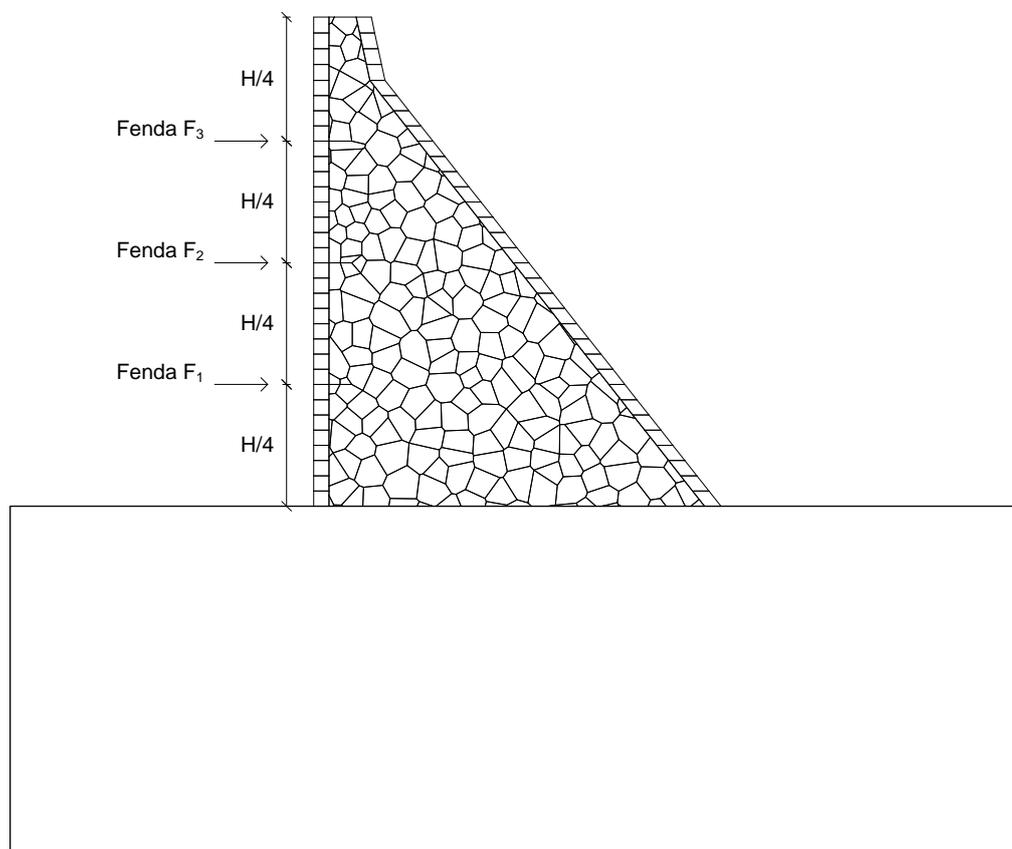


FIGURA 4 – Modelo numérico plano da barragem do Covão do Ferro

Propriedades	Valor
<i>Massa volúmica (barragem e fundação)</i>	2400 kg/m ³
<i>Módulo de elasticidade (barragem)</i>	10 GPa
<i>Coefficiente de Poisson (barragem)</i>	0.2
<i>Resistência à tração (para as juntas dos paramentos, sendo nulo nos restantes casos)</i>	1 MPa
<i>Coesão (para as juntas dos paramentos, sendo nulo nos restantes casos)</i>	2 MPa
<i>Ângulo de atrito (para todas as juntas)</i>	35°

QUADRO 2 – Propriedades mecânicas dos materiais consideradas no modelo da barragem do Covão do Ferro

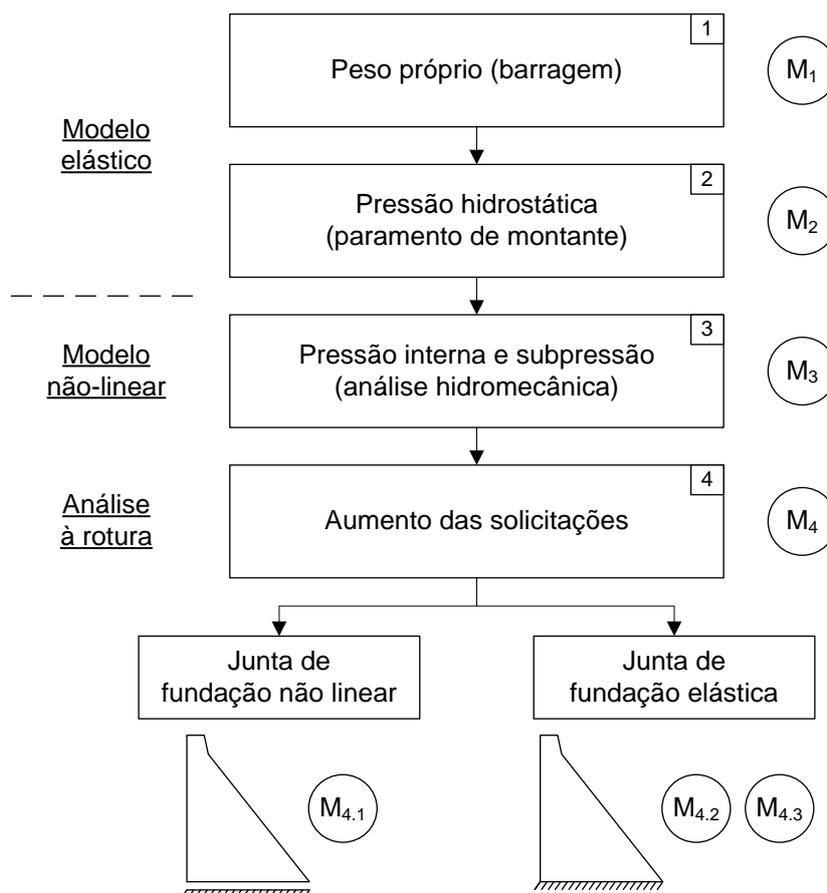


FIGURA 5 – Sequência de aplicação das solicitações nos diferentes modelos

Na fase seguinte foi realizada a análise hidromecânica do corpo da barragem e do plano de fundação, tendo sido determinadas as pressões internas e a subpressão. Nesta última fase, simultaneamente com a aplicação das ações, as propriedades elásticas das juntas dos blocos Voronoi, no interior do corpo da barragem, foram alteradas e passaram a apresentar resistência à tração e coesão nulas (modelo M₃). As três fendas que foram previamente modeladas, que incidem principalmente nos blocos do paramento de montante, são ativadas, através da alteração das propriedades, nomeadamente a resistência à tração e a coesão, que também passaram a assumir valores nulos. No interior destas juntas foi considerada a pressão hidrostática equivalente ao nível da albufeira em cada caso. A estrutura deformada resultante desta análise está representada na Figura 6c, onde é possível observar a abertura das fendas, com destaque para a fenda F₁.

Para as primeiras três fases da análise, designadas por M₁, M₂ e M₃, foram determinadas as tensões verticais no paramento de montante (Figura 7). Para a ação do peso próprio o paramento de montante ficou totalmente em compressão. Após a aplicação da pressão hidrostática, o paramento de montante mantém-se em compressão, exceto junto ao pé de montante, onde ocorreram tensões de tração. No modelo M₃ o paramento de montante apresentou-se menos comprimido. O diagrama de tensões do paramento (modelo M₃) apresentou descontinuidades nos pontos que coincidem com as fendas. Nas fendas F₁ e F₂ os valores das trações foram, respetivamente, de 0,6 MPa e 0,02 MPa, portanto inferiores à resistência máxima à tração de 1 MPa (ver Quadro 2). Na fenda F₃ a tensão foi de compressão, com valor de -0,04 MPa.

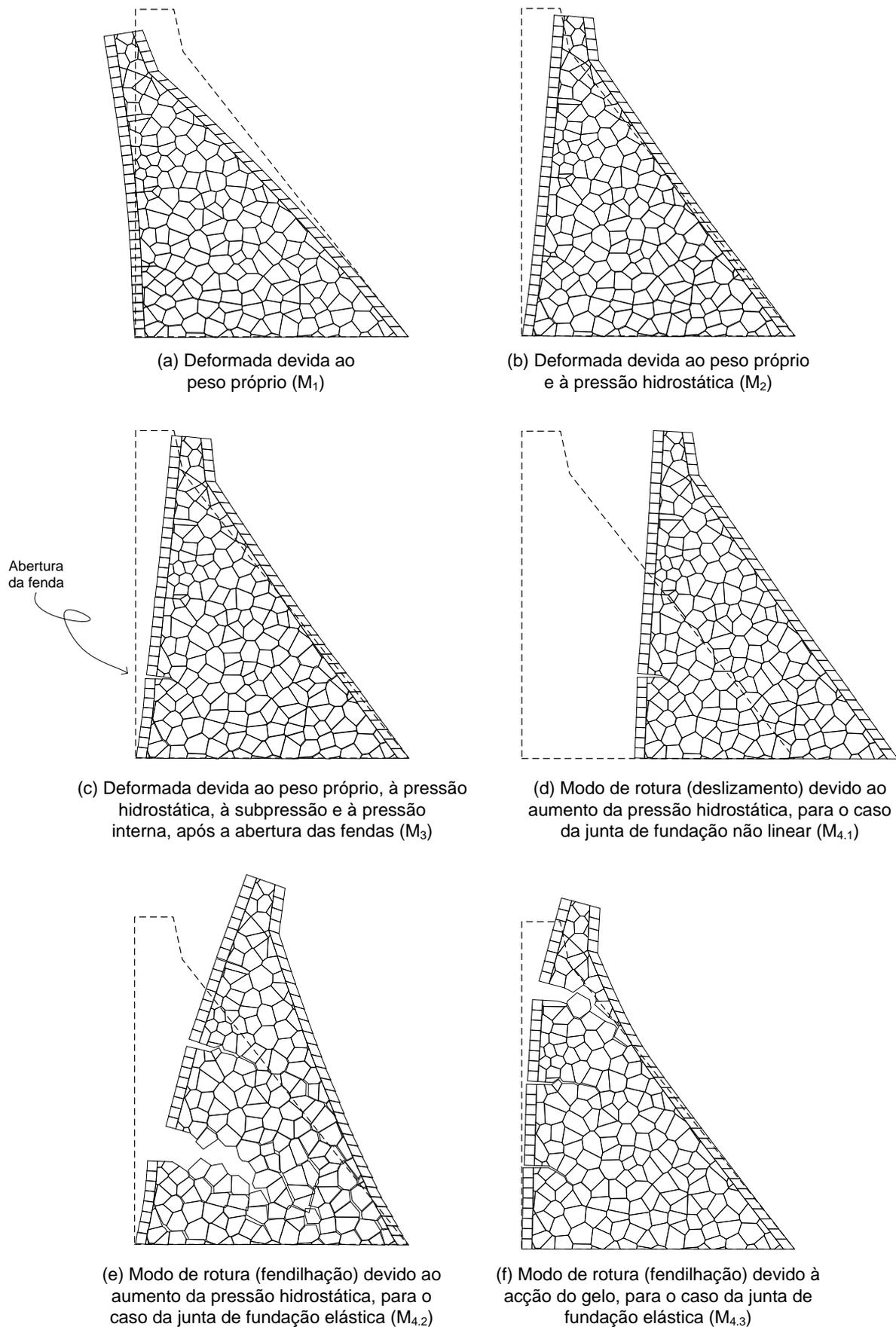


FIGURA 6 – Deformadas (a-c) e mecanismos de rotura (d-f) resultantes da análise da barragem do Covão do Ferro

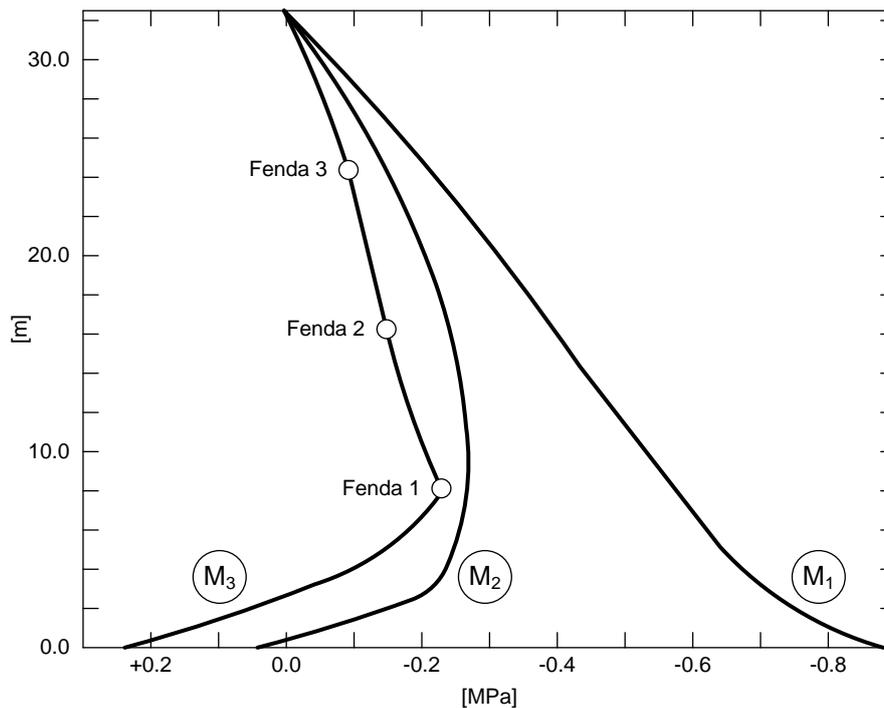


FIGURA 7 – Tensões verticais no paramento de montante da barragem do Covão do Ferro, nos modelos M_1 , M_2 e M_3 (ver Figura 5)

4.3. ANÁLISE DOS MECANISMOS DE ROTURA

Para as solicitações já consideradas o modelo mostrou-se estável, pelo que a barragem não entrará em rotura. Possíveis mecanismos de rotura só irão ocorrer nos casos de alteração das solicitações. Para um aumento da pressão hidrostática, como por exemplo em situação de cheia, verificou-se a possibilidade de ocorrência de dois tipos distintos de rotura. Para o primeiro mecanismo de rotura (modelo $M_{4.1}$) considerou-se a junta barragem-fundação com comportamento não linear. Neste caso a rotura ocorre por deslizamento da barragem sobre o plano de fundação, na direção montante-jusante. Para o segundo mecanismo de rotura (modelo $M_{4.2}$) considerou-se que a junta barragem-fundação tem comportamento elástico, pelo que a rotura ocorre na fenda F_1 . Para o mesmo tipo de junta elástica, considerou-se ainda a ação do gelo. A ação do gelo é modelada por meio de uma força horizontal distribuída segundo o desenvolvimento da placa de gelo e posicionada de acordo o nível da albufeira. Neste caso a rotura ocorre pela Fenda F_3 , junto ao coroamento (modelo $M_{4.3}$).

5. CONCLUSÕES

As barragens de alvenaria em exploração, devido à elevada idade, merecem especial atenção quanto às condições de segurança estrutural e hidráulica. O principal cenário de envelhecimento dessas estruturas caracteriza-se pela perda de coesão da alvenaria em consequência do processo de lixiviação decorrente da infiltração da água pelo corpo da barragem. Excetuando-se os casos de deficiente dimensionamento, este fenómeno não é, na maioria dos casos, suficiente para colocar em causa a segurança última da estrutura. Porém, para ações extremas, o efeito da perda de coesão da alvenaria pode ter uma influência significativa no modo de rotura da barragem. Confirmou-se este aspeto no exemplo relativo à análise da

estabilidade da barragem do Covão do Ferro, apresentado neste trabalho. Consoante os cenários de carga e as propriedades adotadas, a rotura pode ocorrer junto ao coroamento, tratando-se de uma rotura local, ou junto do plano de fundação, caso em que a rotura é global. A possibilidade de simular todos os cenários através de ferramentas numéricas é essencial para a compreensão e aferição das condições de segurança de grandes barragens.

AGRADECIMENTOS

Agradece-se à Pebble Hydro a autorização concedida para a publicação de elementos referentes à barragem do Covão do Ferro.

6. PALAVRAS-CHAVE

Barragens de alvenaria, Controlo da segurança, Método dos Elementos Discretos.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Ramos, J.M., Lemos, J.V. (2000) – “Barragens de alvenaria em exploração em Portugal. Deterioração, modelação, reabilitação”, Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Memória N.º 823, Lisboa.
- [2] LNEC (1987) – “Observação da barragem do Covão do Ferro – Parecer sobre o comportamento da obra”, Relatório NO/DBB, Lisboa.
- [3] Scuero, A., Vale, J., Vaschetti, G., Quintela, A., Ribeiro da Silva, A., Ramos, J.M., Sá da Costa, A. (2007) – “Rehabilitation of Covão do Ferro masonry dam”, 5th International Conference on Dam Engineering, Lisboa.
- [4] Scuero, A., Vaschetti, G. (2009) – “Geomembrane systems for repair of dams in cold climates”, Long term behaviour of dams, Graz.
- [5] ICOLD (2010) – “Geomembrane sealing systems for dams – Design principles and review of experience”, Bulletin 135, Paris.
- [6] ICOLD (2013) – “Guidelines for use of numerical models in dam engineering”. Bulletin 155, Paris.
- [7] Bretas, E.M., Lemos, J.V., Lourenço, P.B. (2014) – “A DEM based tool for the safety analysis of masonry gravity dams”, Engineering Structures, 59(Feb): 248-260.
- [8] Bretas, E.M., Lemos, J.V., Lourenço, P.B. (2013) – “Hydromechanical analysis of masonry gravity dams and their foundations”, Rock Mechanics Rock Engineering, 46(2): 327-339.
- [9] Bretas, E.M., Batista, A.L., Lemos, J.V., Léger, P. (2014) – “Seismic analysis of gravity dams: A comparative study of the common techniques”, EUROODYN 2014, Porto.
- [10] Bretas, E.M., Lemos, J.V., Lourenço, P.B. (2014) – “Numerical modelling of masonry gravity dams”, 9th International Masonry Conference, Guimarães.