

ENQUADRAMENTO DOS RELATÓRIOS DE ANÁLISE DO COMPORTAMENTO OBSERVADO NO ÂMBITO DAS ATIVIDADES DE CONTROLO DA SEGURANÇA DE BARRAGENS. EXEMPLO DA BARRAGEM DA LAGOA COMPRIDA, EM PORTUGAL

Eduardo Martins BRETAS

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

António Lopes BATISTA

Engenheiro Civil, Doutorado – Investigador Principal – LNEC, Portugal

RESUMO

A regulamentação portuguesa de segurança de barragens define um conjunto de atividades a desenvolver com o objetivo de prevenir ou detetar atempadamente comportamentos anómalos ou processos de deterioração que possam colocar em causa a operacionalidade e segurança das estruturas. No que diz respeito à fase de serviço das obras, é de importância relevante a elaboração periódica de relatórios de análise do comportamento observado e de avaliação da segurança estrutural. Nestes estudos são estabelecidos os parâmetros definidores do comportamento da obra, que poderão ser utilizados na previsão do comportamento no período subsequente e em caso de ocorrências excecionais. Neste trabalho é apresentado o exemplo da barragem da Lagoa Comprida, uma obra de alvenaria de pedra granítica com cerca de 100 anos de idade, que sofreu várias intervenções ao longo da sua vida, e para a qual foi elaborado recentemente um relatório de análise do comportamento observado e da avaliação da segurança estrutural.

ABSTRACT

The Portuguese regulation of dam safety defines a set of activities to be developed in order to prevent or timely detect anomalous behaviours or deterioration processes which may affect the serviceability and safety of the structures. Regarding to the normal dam exploitation period is essential to publish reports about the behaviour analysis and the evaluation of the structural safety. In these studies are established the dam behaviour parameters, that can be used for the prediction of the behaviour in the next period and the response for exceptional events. This paper presents the example of Lagoa Comprida dam, a granite masonry structure of about 100 years old, subject of multiple repairs throughout its life, whose report about the behaviour analysis and the assessment of the structural safety, was recently concluded.

1. INTRODUÇÃO

Entende-se por barragem o conjunto constituído pela sua estrutura, fundação, órgãos de segurança e de exploração, albufeira e respetivas margens e vale a jusante. As exigências em relação ao seu comportamento [1] (Figura 1) dizem respeito à fiabilidade da estrutura, que engloba as questões de segurança, relacionada com a não ocorrência de acidentes, e de funcionalidade, associada à não ocorrência de incidentes.

Estes aspetos devem ser controlados em todas as fases de vida da obra, nomeadamente na fase de (i) construção, (ii) primeiro enchimento da albufeira, (iii) primeiro período da exploração, (vi) período da exploração normal e, por fim, (v) a fase de abandono e demolição. Nas três primeiras fases as preocupações devem centrar-se na adequabilidade do projeto, construção e exploração, de forma a evitar a sua deterioração congénita ou das primeiras idades. Nas duas últimas fases, a da exploração normal e de abandono e demolição, as exigências de comportamento são focadas, essencialmente, nos aspetos da durabilidade da estrutura ou do seu envelhecimento, entendido, neste âmbito, como a deterioração adquirida.

O controlo da segurança de barragens compreende um conjunto de atividades a desenvolver durante a vida das obras, englobando aspetos estruturais, hidráulico-operacionais e ambientais, com o objetivo de detetar atempadamente comportamentos anómalos e processos de deterioração que possam levar à ocorrência de incidentes e acidentes que coloquem em causa a operacionalidade e segurança da estrutura, respetivamente.

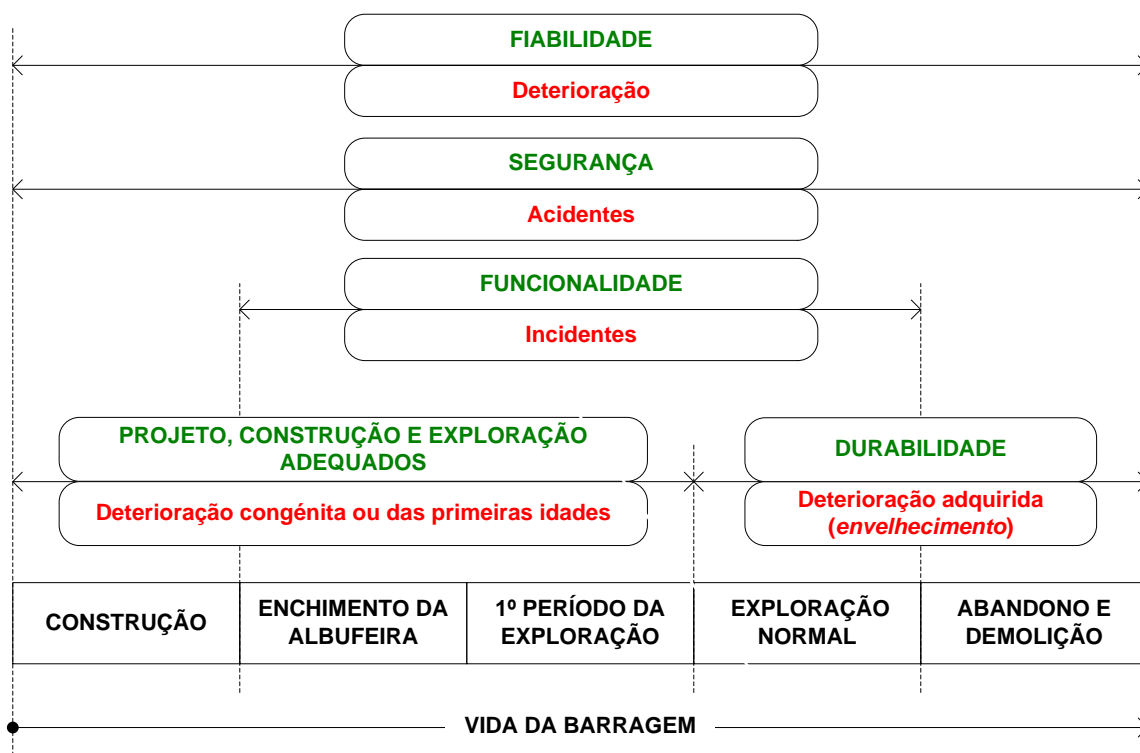


FIGURA 1 – Segurança e funcionalidade ao longo da vida das barragens [1]

2. A REGULAMENTAÇÃO PORTUGUESA SOBRE SEGURANÇA DE BARRAGENS

O Regulamento de Segurança de Barragens (RSB) [2] é, em Portugal, o documento legal que enquadra as atividades e as responsabilidades relativamente ao acompanhamento e ao controlo de segurança das grandes barragens. Com vista à sua boa execução, o RSB dispõe de normas complementares, nomeadamente as Normas de Projeto de Barragens (NPB) [3], as Normas de Construção de Barragens (NCB) [4], as Normas de Observação e Inspeção de Barragens (NOIB) [5] e as Normas de Exploração de Barragens (NEB) [6].

O RSB aplica-se às consideradas grandes barragens, definidas neste regulamento como aquelas que têm uma altura superior a 15 m, ou entre 15 e 10 m, mas que apresentem uma albufeira com volume superior a 0,1 hm³. As barragens de menores dimensões, que não se enquadram em qualquer dos critérios atrás descritos, ficam sujeitas às disposições do Regulamento de Pequenas Barragens [7].

As grandes barragens apresentam, em regra, um risco potencial elevado pois, em caso de acidente, os danos podem ser significativos em relação a vidas humanas, bens materiais e ambientais. No RSB a quantificação do risco depende do nível da ocupação humana do vale a jusante da barragem, avaliado de acordo número de pessoas afetadas em caso de acidente, da existência de aglomerados populacionais, de habitações e equipamentos sociais, de instalações industriais, turísticas, recreativas e de vias de comunicação, para além da afetação de bens ambientais valiosos e da sua capacidade de recuperação. A classificação é realizada consoante o número de residentes afetados ser superior a 25 (Classe I – Risco Elevado), ser inferior a 25 mas que afete bens materiais ou ambientais valiosos ou perigosos (Classe II – Risco Significativo), ou por fim, no caso em que não se verifica a afetação de qualquer ocupação humana (Classe III – Risco Baixo).

A aplicação do RSB é de responsabilidade de um conjunto de entidades, cujas atividades estão claramente definidas. Para além do Dono de Obra, que enquadra também o projetista, o empreiteiro, a fiscalização e outros consultores, há as entidades da administração pública, nomeadamente (i) a Agência Portuguesa do Ambiente (APA), que se assume como a Autoridade Nacional de Segurança de Barragens (Autoridade) e que tem a responsabilidade de assegurar o cumprimento das medidas de prevenção, controlo e mitigação do risco em todas as fases de vida das obras, (ii) o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), que assume a função de consultor da Autoridade em matéria de controlo de segurança de barragens e, por fim, (iii) a Autoridade Nacional de Proteção Civil (ANPC), que atua como entidade orientadora e coordenadora das atividades de proteção civil a nível nacional. Deve ainda referir-se a Comissão de Segurança de Barragens, constituída por representantes das entidades mencionadas e de outras entidades relacionadas com as barragens, de forma a abranger um espetro mais vasto de competências, devendo pronunciar-se sobre normas a aprovar pelo Governo; sobre decisões da Autoridade quando haja recurso do dono de obra; e em assuntos relativos a segurança de barragens na sequência de ocorrências excepcionais. O RSB estabelece que o LNEC deverá ter uma intervenção de carácter sistemático nas barragens da Classe I.

Encontram-se em fase de revisão os regulamentos e as normas atrás referidos, prevendo-se que o RSB seja aplicado, num futuro próximo, apenas às obras com altura superior a 15 m, ou entre 15 e 10 m, mas que apresentem uma albufeira com volume superior a 1 hm³.

3. ACOMPANHAMENTO E OBSERVAÇÃO DO COMPORTAMENTO DAS OBRAS

Em relação às barragens com elevado risco potencial, o LNEC tem uma intervenção de carácter sistemático que compreende, para além do apoio técnico diversificado, o (i) desenvolvimento e manutenção do arquivo de dados e resultados de observação, a (ii) execução de visitas de inspeção de rotina e de especialidade, a (iii) análise e interpretação dos resultados da observação, a (iv) elaboração e revisão de relatórios de comportamento, e a (v) elaboração e revisão de planos de observação.

Os aspetos relevantes do acompanhamento do comportamento das grandes barragens, incluindo as atividades de inspeção, observação e controlo da segurança, em todas as suas fases de vida, estão definidos nas NOIB [5], nomeadamente no que respeita aos aspetos de planeamento das atividades, inspeções visuais, instalação, manutenção e exploração do sistema de observação, análise e interpretação da informação recolhida, bem como aos agentes intervenientes, dando forma, em cada obra, a um plano de observação dedicado.

O plano de observação de uma barragem tem o objetivo de (i) definir um sistema de observação e os critérios para a sua exploração tendo em vista a observação da obra para os diversos cenários considerados, (ii) avaliar as condições de segurança da obra nas diferentes fases da sua vida, isto é, durante a construção, primeiro enchimento, esvaziamentos e reenchantos, e exploração normal, e (iii) interpretar o comportamento estrutural e hidráulico da obra, nas diversas fases da sua vida, por forma a permitir a previsão de comportamentos futuros.

As inspeções, instrumento fundamental de controlo da segurança das obras, devem ser realizadas periodicamente, com o objetivo de efetuar (i) a avaliação do estado dos paramentos, nomeadamente no que toca à fendilhação, através do levantamento sistemático de fendas existentes nas galerias, no paramento de jusante e, sempre que possível, no paramento de montante (deverá ser registada a sua localização, desenvolvimento e abertura, utilizando para tal os meios considerados adequados a cada caso), (ii) a deteção de repasses, ressurgências, infiltrações e incrustações de produtos sólidos (carbonato de cálcio e outros), e (iii) deteção de anomalias no sistema de observação.

No que respeita às inspeções deverão ser consideradas e planeadas (i) a inspeção de rotina, a realizar pela equipa local de observação, com supervisão dos agentes responsáveis pela exploração da obra, com frequência adequada às fases de vida e à importância da obra, (ii) a inspeção de especialidade, a cargo dos responsáveis pela exploração da obra, de especialistas internos e/ou externos e da entidade governamental da tutela, com a frequência adequada, e (iii) as inspeções de carácter excecional, a realizar pelos intervenientes nas inspeções de especialidade, imediatamente após ocorrências excecionais, tais como sismos importantes, grandes cheias, esvaziamentos e enchimentos totais ou quase totais da albufeira.

Cada inspeção de especialidade deve dar origem a um relatório sucinto onde é realizada uma análise global dos resultados observados. Esta análise deve incluir a verificação dos valores limites não ultrapassáveis em condições normais de exploração e a comparação com os valores previstos por modelos de comportamento de base estatística ou estrutural e hidráulica. Em alguns casos, quando são identificados valores que se afastam significativamente dos previstos pelos modelos, devem ser determinadas as possíveis causas e, eventualmente, proposta a reformulação dos modelos.

Após cinco inspeções visuais da especialidade consecutivas e sempre que se considerar necessário, devido a aspetos particulares do comportamento observado, deve ser elaborado um relatório de análise desse comportamento e de avaliação da segurança. Neste documento é feita a análise de todas as observações efetuadas e a determinação dos parâmetros definidores do comportamento da obra, com vista ao controlo de segurança no período subsequente. Qualquer anomalia de comportamento deve ser comunicada à Autoridade, podendo dar origem a propostas de adaptação do plano de observação. Este género de relatório permite estabelecer padrões de comportamento da barragem, com vista a melhorar o controlo da segurança e a avaliação da segurança face a ocorrências excecionais. Com base nos resultados da observação das ações, das propriedades dos materiais e das respostas, é possível, em regra, desenvolver e calibrar modelos numéricos representativos do comportamento da estrutura, com vista à previsão do comportamento futuro da obra, inclusivamente para cenários de rotura (Figura 2).

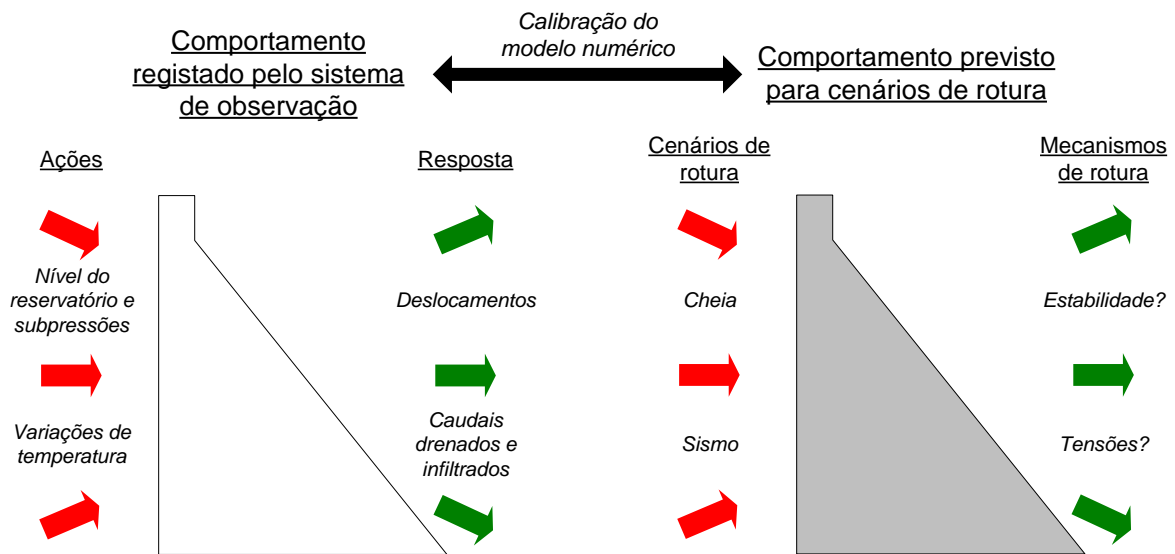


FIGURA 2 – Calibração de modelos numéricos com base nos resultados disponíveis através do sistema de observação

4. ESTRUTURA DOS RELATÓRIOS DE ANÁLISE DO COMPORTAMENTO OBSERVADO E DE AVALIAÇÃO DA SEGURANÇA ESTRUTURAL

Os relatórios de análise do comportamento observado e de avaliação da segurança das obras devem considerar (i) uma descrição circunstanciada da obra atual, incluindo as estruturas, as fundações, os órgãos de segurança e de exploração, a

albufeira e o vale a jusante, (ii) uma história da obra, com referência ao projeto, à construção, às modificações e às reabilitações, (iii) a apresentação e apreciação crítica dos estudos similares anteriores, (iv) uma apresentação do plano de observação em vigor, com referência às suas versões anteriores, com a descrição e a caracterização do sistema de observação instalado, bem como das regras da sua exploração, (v) a apresentação e análise qualitativa dos resultados fornecidos pelo sistema de observação, das inspeções visuais e de ensaios, (vi) a análise quantitativa dos resultados da observação, utilizando modelos empíricos e estatísticos que relacionem as causas e os efeitos, (vii) a interpretação do comportamento observado utilizando modelos numéricos, nas vertentes térmica, estrutural e hidráulica, (viii) a avaliação da segurança para cenários correntes e de rotura, considerando ações estáticas e dinâmicas, e (ix) a apresentação das conclusões dos estudos e de recomendações relativas à exploração da obra, a eventuais intervenções no sistema de observação e na própria obra, ou à necessidade de desenvolvimento de estudos complementares que possam esclarecer aspetos que não foi possível justificar.

Como referido, a análise e a interpretação do comportamento observado envolvem, em regra, o estabelecimento de correlações entre as principais ações e as correspondentes respostas térmicas, estruturais e hidráulicas. Tal pode ser realizado através de modelos empíricos e estatísticos, que não têm em conta a física dos fenómenos em causa, ou por meios de modelos matemáticos, em regra resolvidos por métodos numéricos (elementos finitos, diferenças finitas e elementos discretos, entre outros), que consideram a física dos fenómenos envolvidos.

A avaliação da segurança é feita, em geral, para cenários correntes e de rotura. Nos cenários correntes, em que são representadas as condições limites em serviço das obras, as tensões e as deformações devem obedecer a critérios de elasticidade, considerando os coeficientes de segurança regulamentares, mas aceita-se que possam ocorrer tensões de tração que originem fendilhações localizadas. Para os cenários de rotura, que representam condições extremas de funcionamento das obras, podem verificar-se comportamentos não lineares dos materiais e das próprias estruturas. Os modelos a utilizar nestes casos deverão também ser calibrados, para o domínio elástico, pelos resultados da observação, mas o comportamento dos materiais até à rotura só poderá ser obtido através de ensaios específicos, em geral destrutivos.

Em regra é dado um particular relevo aos aspetos ligados à segurança estrutural, mas não devem ser descurados os aspetos relacionados com a segurança hidráulico-operacional, nomeadamente os relativos à capacidade de vazão e ao estado de conservação e de operacionalidade de descarregadores de cheias e de descargas de fundo, incluindo as respetivas comportas de serviço e de guarda.

5. RELATÓRIO DE ANÁLISE DO COMPORTAMENTO E DA SEGURANÇA ESTRUTURAL DA BARRAGEM DA LAGOA COMPRIDA

5.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

No relatório de análise do comportamento observado e de avaliação da segurança da barragem da Lagoa Comprida [8] utilizaram-se, como elementos base de

trabalho, as características geométricas e dos materiais da barragem e da fundação, os resultados fornecidos pelo sistema de observação desde a sua última reformulação, datada de meados da década de 80 do século passado, e os resultados das inspeções visuais que têm vindo a ser efetuadas regularmente. Nos estudos deu-se particular relevo a aspetos ligados à segurança estrutural, sendo apenas referidas marginalmente as questões do âmbito da segurança hidráulico-operacional. Incluiu-se uma descrição da “história” conhecida da obra, justificada pela sua longevidade e pelos sucessivos alteamentos e reabilitações que sofreu. A análise do comportamento observado da barragem abarcou um período que variou entre um máximo de cerca de vinte e oito anos (caso dos deslocamentos, que são analisados a partir de 1984) e um mínimo de cerca de quinze anos (caso das subpressões monitorizadas com piezómetros, analisadas entre 1997 e 2012). A análise qualitativa incidiu sobre a evolução das principais ações e das correspondentes respostas estruturais e hidráulicas, a que se seguiu a interpretação do comportamento estrutural da barragem, utilizando um modelo de elementos finitos do conjunto barragem-fundação. Fez-se ainda a análise da estabilidade estrutural da barragem para ações estáticas e para ações sísmicas, considerando-se, neste último caso, uma definição das ações de acordo com o Eurocódigo 8 [9].

5.2 CARACTERÍSTICAS GERAIS DA OBRA

A barragem da Lagoa Comprida (Figura 3) situa-se na serra da Estrela, no distrito da Guarda, e tem as ribeiras da Lagoa e da Carriça, afluentes da margem esquerda do rio Alva, como principais cursos de água da sua pequena bacia hidrográfica. Trata-se de uma barragem de alvenaria com perfil gravidade, de planta em forma de M (Figura 4), com coroamento e nível de pleno armazenamento (NPA) à cota 1600,00 m, uma altura máxima acima da fundação de cerca de 28 m e um desenvolvimento total de 1200 m, que fecha o covão glacial onde se formou a maior lagoa da serra da Estrela, a Lagoa Comprida. Presentemente, a barragem da Lagoa Comprida domina uma bacia hidrográfica de cerca de 2 km de comprimento, com uma área de 83 ha, a que corresponde um volume de armazenamento de 13,9 hm³ para o NPA = 1600,00 m.

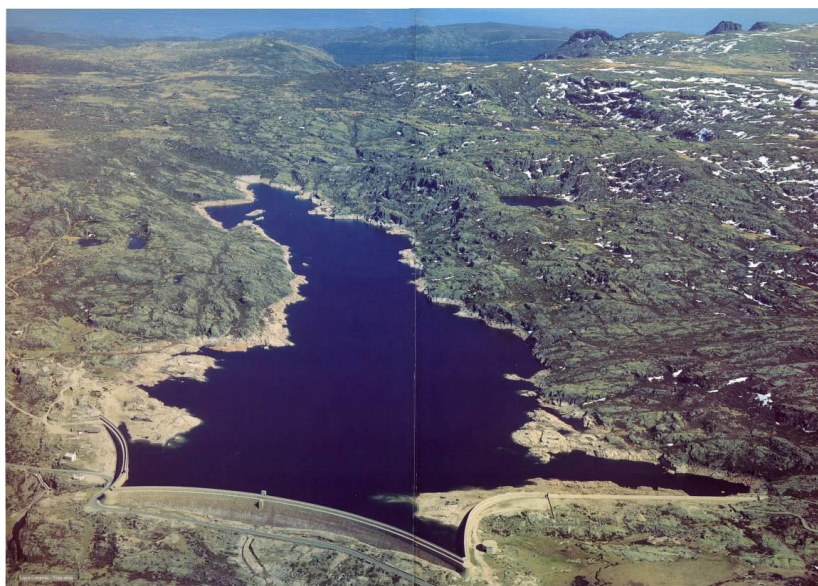


FIGURA 3 – Vista aérea de jusante da barragem da Lagoa Comprida

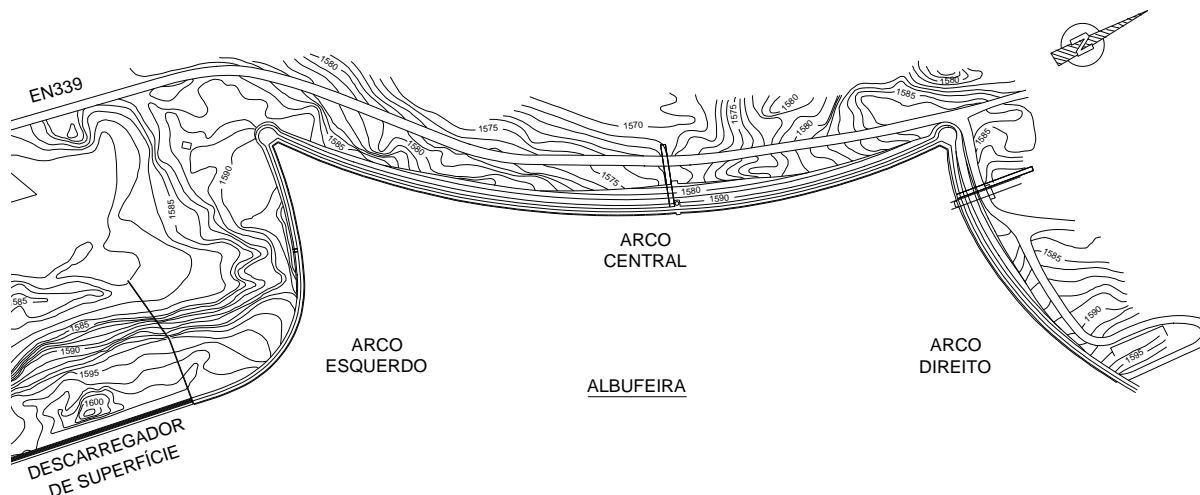


FIGURA 4 – Planta geral da barragem da Lagoa Comprida

A construção da barragem da Lagoa Comprida iniciou-se no verão de 1912, tendo, em 1914, sido atingidos 6 m de altura. Posteriormente a obra foi alteada por diversas vezes, passando por alturas máximas de 15 m em 1934, 22 m em 1940, 23 m em 1947 e 24,5 m em 1948. A altura que hoje tem, de cerca de 28 m, é consequência do último alteamento, efetuado durante as grandes obras de reabilitação levadas a efeito entre 1964 e princípios de 1967 (Figura 5). Em linhas gerais, as obras de reforço da Lagoa Comprida consistiram na construção de uma cortina de betão, para revestimento do paramento de montante, ancorada a este paramento e convenientemente drenada, e na realização de um tratamento de consolidação e de impermeabilização da fundação, acompanhado pela execução de um sistema de drenagem da fundação e do próprio corpo da barragem. Acima do antigo coroamento da barragem (1597 m) a cortina apoia-se num novo maciço de betão, construído sobre o antigo, com uma secção de 2,0 m x 3,0 m.

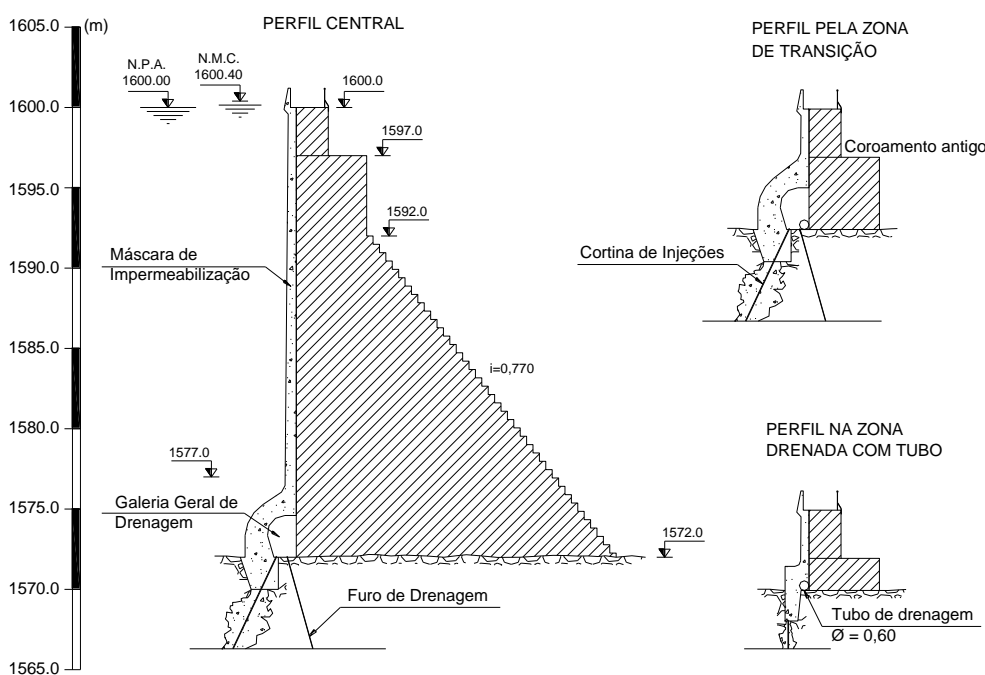


FIGURA 5 – Perfil esquemático das obras de reabilitação e de alteamento realizadas entre 1964 e 1967

O sistema de observação instalado na barragem da Lagoa Comprida (Quadro 1) permite avaliar as principais ações e as respostas térmicas, estruturais e hidráulicas. Quanto às ações, medem-se o nível da albufeira, as subpressões (através de 34 piezômetros) e a temperatura do ar. No que diz respeito à resposta térmica, estrutural e hidráulica, estão monitorizados os deslocamentos relativos (através de 30 bases de alongâmetro) e absolutos (horizontais através de triangulação geodésica e verticais por meio de nivelamento geométrico de precisão) da barragem, os deslocamentos do contacto barragem-fundação (através de 5 extensômetros de fundação), os caudais drenados e infiltrados (através de 124 drenos e bicas totalizadoras) e as temperaturas e as deformações do betão da cortina de impermeabilização de montante (através de 6 extensômetros de resistência elétrica tipo Carlson). A observação é complementada com análises físicas e químicas da água da albufeira e das águas drenadas na fundação.

Tipo de instrumento / Método	Número total de dispositivos	Periodicidade das campanhas de observação
<i>Extensômetros Carlson</i>	<i>6</i>	<i>Mensal</i>
<i>Bases de alongâmetro</i>	<i>30</i>	<i>Mensal</i>
<i>Extensômetros de fundação</i>	<i>5</i>	<i>Mensal</i>
<i>Drenos e bicas totalizadoras</i>	<i>124</i>	<i>Mensal</i>
<i>Piezômetros</i>	<i>34</i>	<i>Mensal</i>
<i>Nivelamentos</i>	<i>-</i>	<i>Anual</i>
<i>Triangulação geodésica</i>	<i>-</i>	<i>Anual</i>
<i>Análise física e química das águas da albufeira e das águas drenadas</i>	<i>-</i>	<i>Bienal</i>

QUADRO 1 – Dispositivos, métodos e periodicidade das campanhas de observação

5.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS FORNECIDOS PELO SISTEMA DE OBSERVAÇÃO

5.3.1 Pressão hidrostática

A evolução do nível da albufeira (Figura 6), entre maio de 1994 e maio de 2012, apresenta três períodos distintos: o primeiro período, entre junho de 1994 e maio de 2000, em que a evolução é sazonal, com um nível médio de 1593 m e variações de cerca de 15 m entre os registos máximo e mínimo; o segundo período, de maio de 2000 a janeiro de 2003, em que ocorreram um esvaziamento completo em setembro de 2000 (nível de 1571,4 m) e um abaixamento significativo em setembro de 2002 (cota de 1578,0 m); e um terceiro período, de janeiro de 2003 a maio de 2012, em que ocorreram variações vincadamente sazonais, com nível médio de 1595 m, um pouco mais elevado que o observado no primeiro período, e variações de cerca de 10 m entre os registos máximos e mínimos anuais. O nível de pleno armazenamento (1600,00 m), ou próximo deste valor, foi atingido por diversas vezes, nomeadamente

em março de 1995, janeiro e maio de 1996, de dezembro de 2000 a março de 2001, janeiro de 2003, dezembro de 2005, março e outubro de 2006, maio de 2008, fevereiro de 2009, janeiro de 2010 e abril de 2011. No período de abril de 2006 a março de 2011 verificou-se uma variação máxima de 11,18 m no nível da albufeira, entre as cotas 1588,92 m e 1600,10 m.

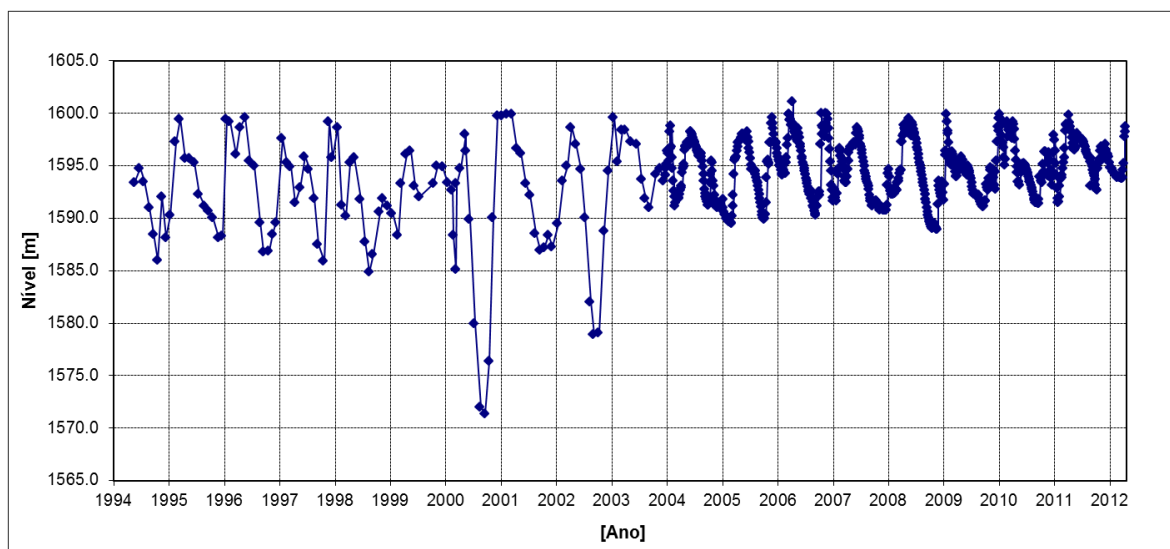


FIGURA 6 – Evolução do nível da água na albufeira entre 1994 e 2012

5.3.2 Subpressões

A análise dos valores das subpressões, entre 1997 e 2012, permite identificar que, entre os 34 dispositivos instalados, apenas 10 piezómetros apresentaram valores de subpressão diferentes de zero: os piezómetros FSC6 e FSC7, localizados a meia encosta do arco central, do lado da margem esquerda; os piezómetros FSD3, FSD4 e FSD5, instalados no arco direito; os piezómetros GTC2 e GTC3, da galeria transversal C; e os piezómetros GTD1, GTD4 e GTD5, da galeria transversal D.

Os valores mais elevados verificam-se no arco direito, nos piezómetros FSD3, FSD4 e FSD5 (Figura 7). O piezómetro FSD4 atingiu um valor máximo de 0,55 bar, correspondente a 45% da carga hidráulica, em junho de 2001, e de 47%, em novembro de 2007. O piezómetro FSD5 atingiu, em setembro de 2001, 0,30 bar, cerca de 59% da carga hidráulica, mas tem vindo a apresentar tendência de redução dos valores, com um valor máximo inferior a 30% após 2004. Já o piezómetro FSD3 apresenta, desde o início dos registos, em 1997, tendência de crescimento dos valores da subpressão, com um máximo de 1,40 bar, que corresponde a uma percentagem de carga hidráulica de 55,2%, verificado em janeiro de 2008.

Estes valores de subpressão, apesar de apresentarem algum significado, podem ser considerados normais. É comum aceitar como normais valores observados no plano piezométrico de cerca de 1/3 da carga hidráulica, quando os piezómetros se situam a jusante da rede de drenagem, aproximadamente a 1/3 da largura da base da barragem, do lado de montante, o que equivale a admitir que o efeito da drenagem é o de reduzir as subpressões em 50%.

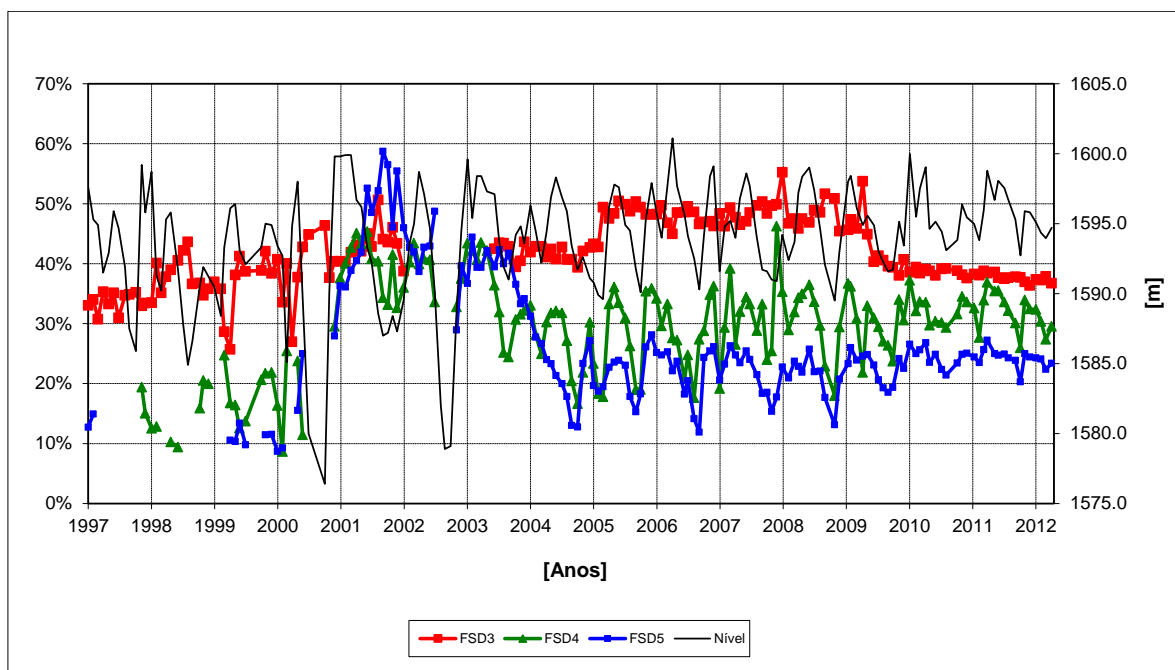


FIGURA 7 – Percentagens de carga hidráulica correspondentes às subpressões observadas na fundação do arco direito, nos piezômetros FSD3, FSD4 e FSD5

5.3.3 Temperaturas observadas nos extensómetros de resistência elétrica instalados na máscara de impermeabilização de montante

Os extensómetros de resistência elétrica tipo Carlson, instalados na cortina de betão, permitem determinar as temperaturas e as deformações. De forma a facilitar a análise, foram calculadas as temperaturas médias mensais a partir das temperaturas registadas. O mês que apresentou a menor temperatura média foi janeiro, com os anos de 1997 e 2009 a registarem o menor valor, de apenas 0,1°C. O mês que teve a temperatura média mais elevada foi agosto, sendo o valor de 18,9°C, em 1998, o máximo calculado. Com os dados disponíveis foi calculada a onda térmica anual média, a partir do método dos mínimos quadrados. A temperatura média anual é de 7,7°C, a semi-amplitude da função sinusoidal é de 5,2°C e a defasagem do valor máximo, relativamente ao início do ano, é de 224,9 dias (Figura 8).

5.3.4 Deslocamentos horizontais da estrutura

Os maiores deslocamentos radiais observados correspondem ao alvo localizado a meio do arco central, designado pela letra G. A partir da análise dos resultados de duas campanhas realizadas com níveis de albufeira semelhantes e temperaturas substancialmente diferentes, nomeadamente as campanhas de 26-06-1996 (n.a.=1594,0m, T=10,5°C) e de 04-05-1999 (n.a.=1597,1 m; T=1,9°C), constata-se que a diferença de temperatura do ar de 8,6°C corresponde uma variação de deslocamento radial de cerca de 3 mm. Em duas campanhas com níveis de albufeira diferentes e temperaturas do ar semelhantes, designadamente as campanhas de 09-10-2000 (n.a.=1571,8m, T=11,1°C) e de 26-06-2001 (n.a.=1593,9 m, T=11,3°C), verifica-se que para uma variação de nível de 22,1 m houve uma variação de

deslocamento radial no topo de cerca de 1,7 mm. Conclui-se assim que as variações sazonais de temperatura provocam maiores variações de deslocamentos planimétricos na barragem que as variações do nível da albufeira. Tal conclusão é confirmada através da análise da Figura 9, onde podem ser observados os deslocamentos radiais do alvo G e as temperaturas registadas entre 1984 e 2004, verificando-se que as duas grandezas estão fortemente correlacionadas.

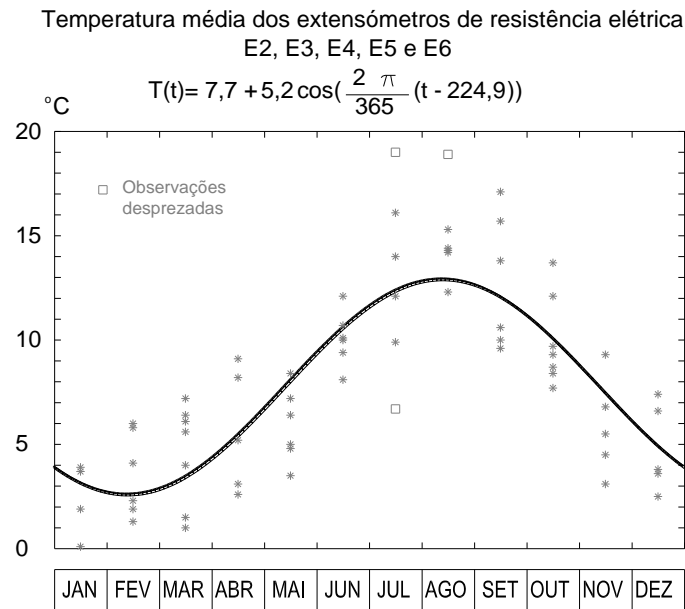


FIGURA 8 – Representação gráfica da onda térmica anual correspondente à temperatura média obtida a partir dos valores observados nos extensómetros de resistência elétrica, calculada pelo método dos mínimos quadrados

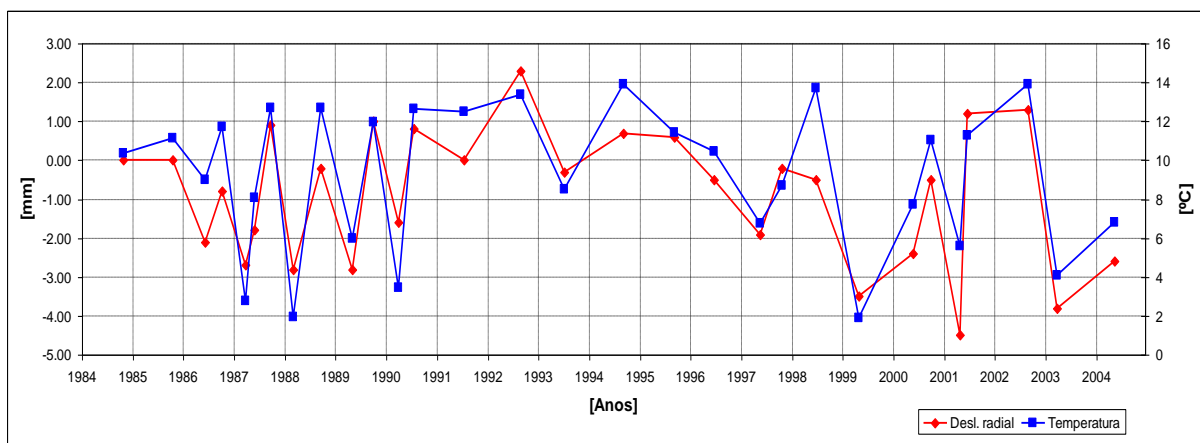


FIGURA 9 – Deslocamentos radiais do alvo G e temperaturas do ar observadas nas campanhas geodésicas realizadas entre 1984 e 2004

O ponto correspondente ao alvo geodésico E, localizado no perfil a meia encosta do arco central, do lado da margem direita, tem vindo a registar os maiores deslocamentos tangenciais. Assim, para as mesmas campanhas analisadas para o alvo G, com níveis de albufeira semelhantes e temperaturas diferentes (26-06-1996, com n.a.=1594,0m e T=10,5°C, e 04-05-1999, com n.a.=1597,1 m e T=1,9°C), foi

possível verificar que à variação térmica de $8,6^{\circ}\text{C}$ corresponde um deslocamento tangencial de $0,8\text{ mm}$. No caso das duas campanhas antes consideradas, com níveis da água substancialmente diferentes e temperaturas do ar semelhantes (09-10-2000, com n.a.=1571,8 m e $T=11,1^{\circ}\text{C}$, e 26-06-2001, com n.a.=1593,9 m e $T=11,3^{\circ}\text{C}$), pode observar-se que à variação do nível de $22,1\text{ m}$ corresponde um deslocamento tangencial de aproximadamente $0,4\text{ mm}$. A Figura 10 representa os deslocamentos tangenciais do alvo E, em conjunto com as temperaturas do ar registadas nas campanhas de 1984 a 2004, podendo notar-se uma menor correlação entre as duas grandezas.

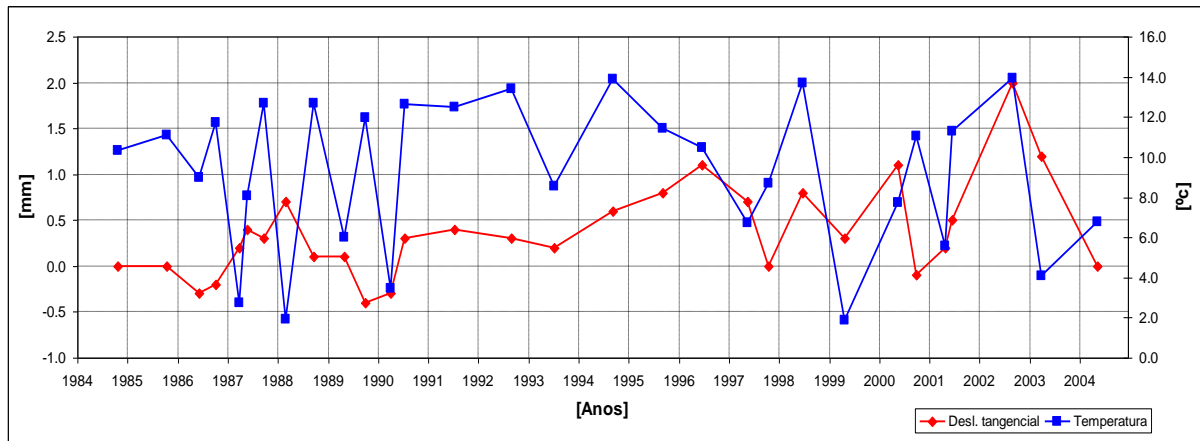


FIGURA 10 – Deslocamentos tangenciais do alvo E e temperaturas do ar registadas nas campanhas de 1984 a 2004

5.3.5. Deslocamentos verticais da estrutura

Entre 1984 e 2004 foram realizadas 30 nivelamentos geométricos de precisão do coroamento. Constam da Figura 11 os resultados das 3 campanhas que apresentaram maiores deslocamentos verticais negativos (assentamentos), efetuadas em 02-03-1988, 04-05-1989 e 04-04-1990, e as 3 campanhas que apresentam maiores deslocamentos verticais positivos (empolamento), realizadas em 01-09-1992, 09-10-2000 e 09-09-2002. A campanha de referência foi realizada em 27-10-1984.

Os valores observados são coerentes com a variação térmica. Faz-se notar que os deslocamentos se relacionam, não diretamente com a temperatura observada no dia da campanha em causa, mas com a média de temperaturas num período anterior, variável com a espessura e a condutividade térmica do corpo das obras. Como seria de esperar, as campanhas em que se observaram empolamentos ocorreram em meses com temperaturas mais elevadas no corpo da obra (setembro e outubro), sendo a campanha de 09-10-2000, com n.a.=1571,8 m e $T=11,1^{\circ}\text{C}$, aquela que apresenta maiores valores dos deslocamentos verticais para cima. As campanhas em que se observaram assentamentos foram realizadas nos meses de março, abril e maio, cujas temperaturas médias são mais baixas, sendo a campanha de 04-04-1990, com n.a.=1571,8 m e $T=3,4^{\circ}\text{C}$, aquela que apresenta maiores valores de assentamento.

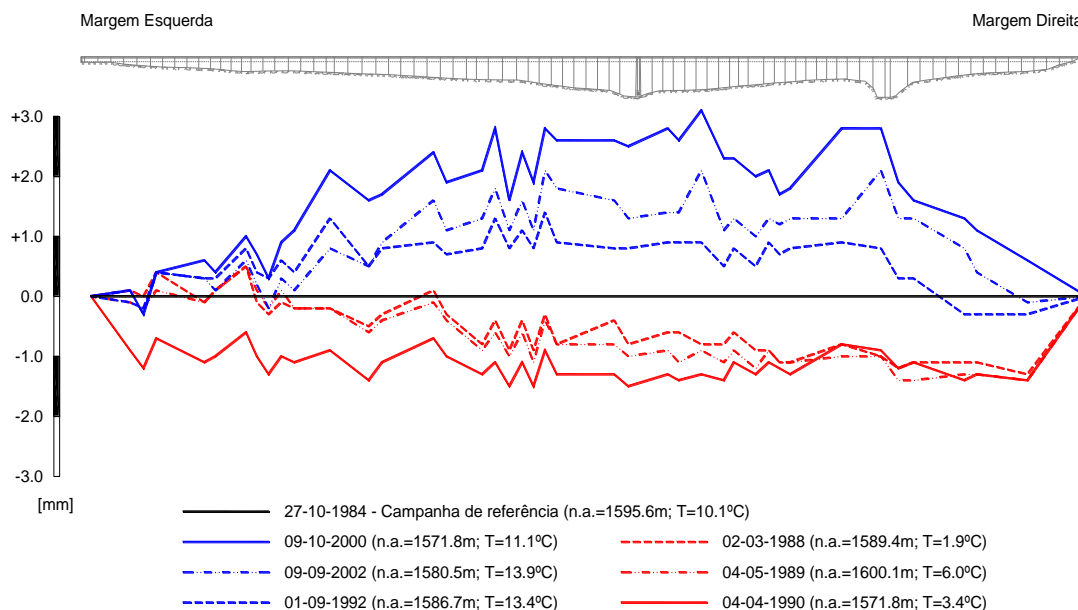


FIGURA 11 – Maiores deslocamentos verticais do coroamento da barragem, observados por nivelamento geométrico de precisão (assentamentos em 02-03-1988, 04-05-1989 e 04-04-1990, e empolamentos em 01-09-1992, 09-10-200 e 09-09-2002)

5.3.6 Caudais drenados e infiltrados

A Figura 12 representa a relação entre o nível da albufeira e os caudais totais em várias campanhas, calculados a partir do somatório dos caudais coletados nos drenos da fundação e infiltrados pela máscara de betão. Os dados indicam a existência de um conjunto de campanhas com caudais elevados, onde o volume dos caudais infiltrados parece ser determinante. Verifica-se que, em média, o volume de caudais infiltrados corresponde a cerca de 91,5% do total de caudais drenados e infiltrados.

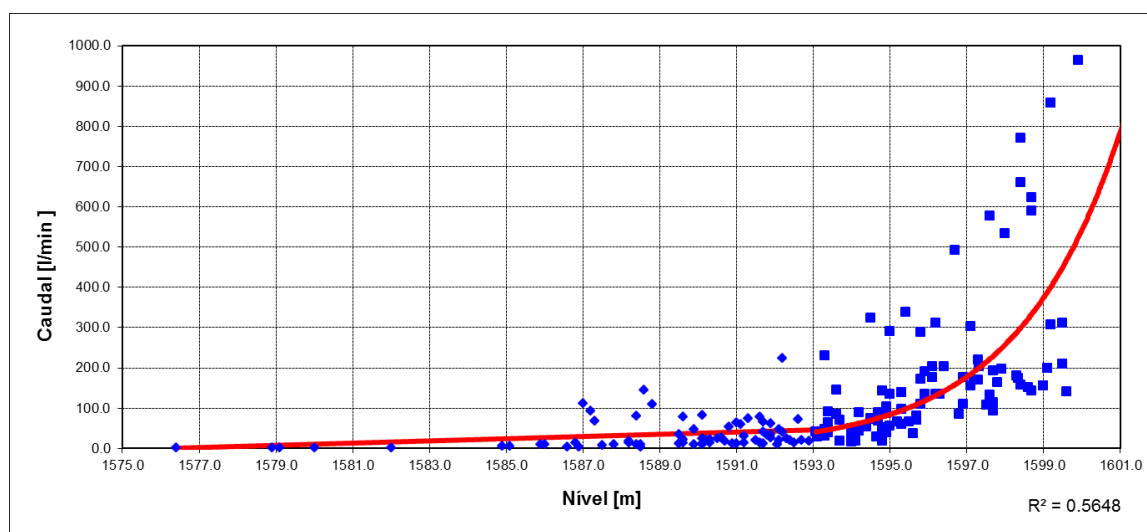


FIGURA 12 – Relação entre o nível da albufeira e o caudal total drenado e infiltrado

5.4 INTERPRETAÇÃO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DA BARRAGEM

A interpretação do comportamento estrutural foi realizada através de um modelo representativo do perfil mais alto da barragem, correspondente à zona intermédia do arco central, em conjunto com a fundação, em regime elástico linear, por meio do método dos elementos finitos. Com base nos resultados obtidos nas campanhas de observação geodésica, nomeadamente os deslocamentos horizontais, foi possível realizar uma calibração dos valores a considerar no modelo, relativamente às propriedades mecânicas dos materiais, para as quais se assumiram os valores de 11 GPa para o módulo de elasticidade da alvenaria, 20 GPa para o módulo de elasticidade do maciço rochoso da fundação e 0,2 para o coeficiente de Poisson de ambos os materiais (Figura 13).

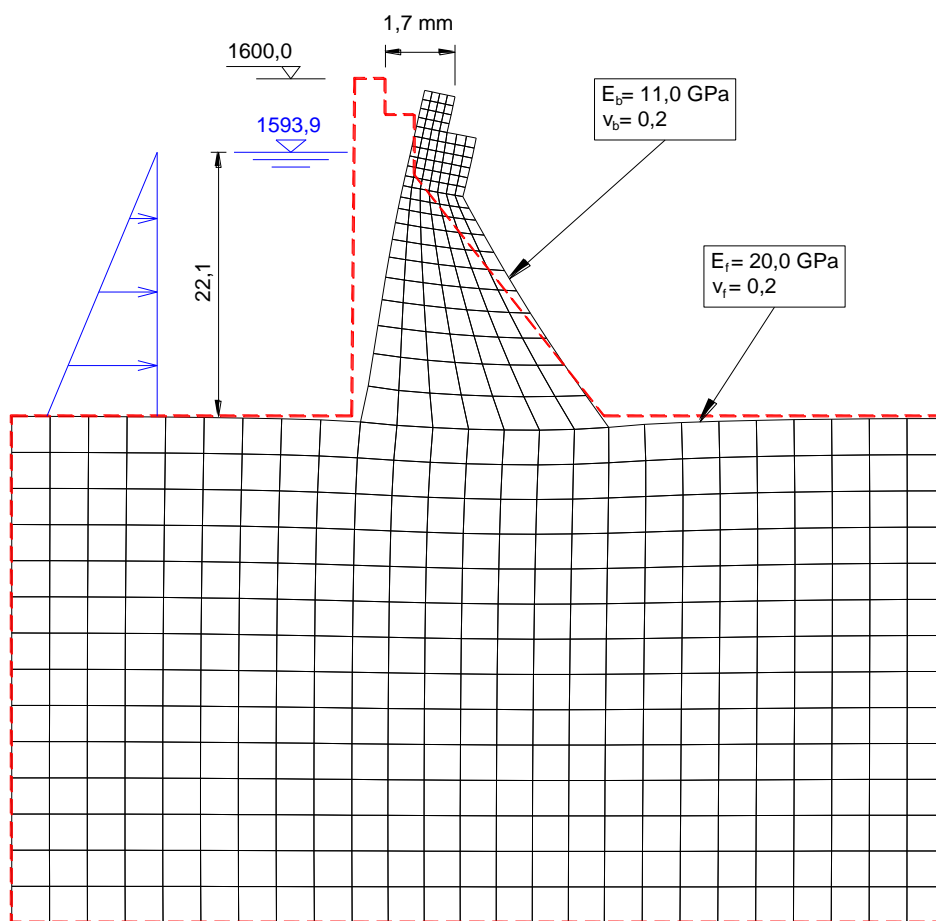


FIGURA 13 – Deslocamento do topo do perfil da barragem localizado a meio do arco central, para a ação da pressão hidrostática, com a albufeira à cota 1593,9 m

Os valores dos deslocamentos do coroamento, para a ação da pressão hidrostática, indiciam que o corpo da barragem tem uma deformabilidade elevada, refletindo-se no reduzido valor (11 GPa, atrás referido) que foi necessário considerar para o módulo de elasticidade. Fazendo variar a altura da água na albufeira calcularam-se, usando o modelo estrutural, os correspondentes deslocamentos horizontais, o que permitiu obter a linha de influência destes deslocamentos, aproximada através de um polinómio do 4º grau (Figura 14).

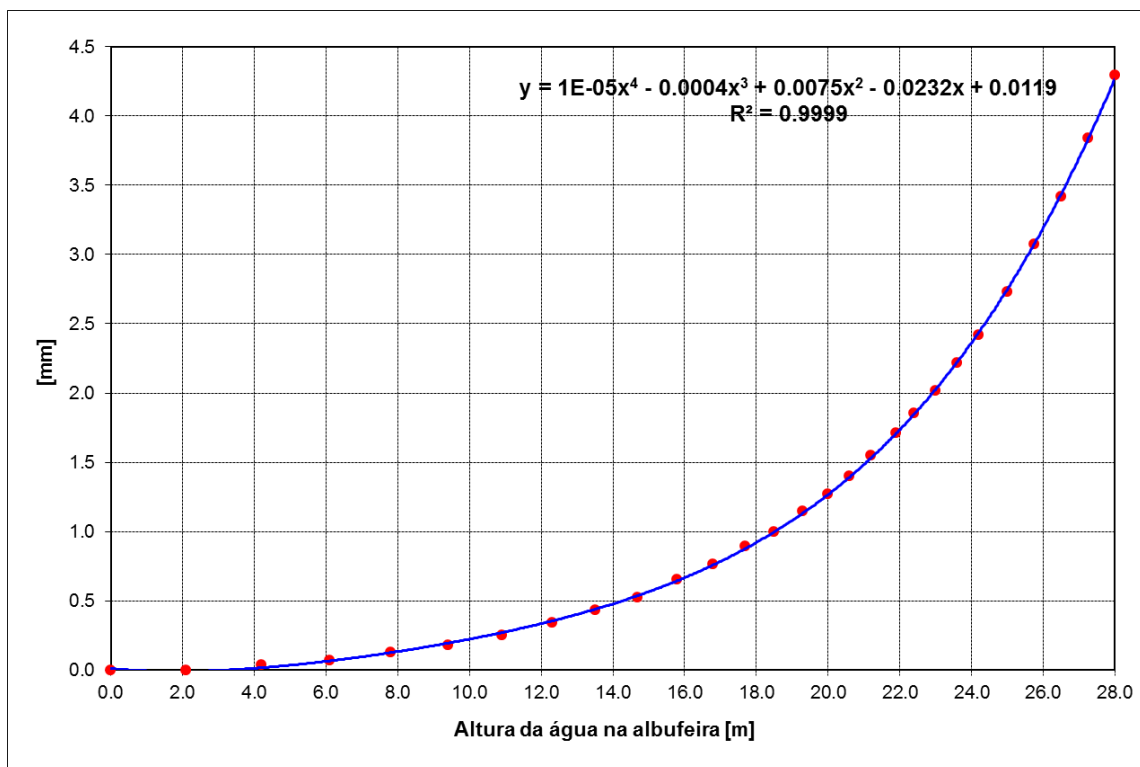


FIGURA 14 – Deslocamentos horizontais do topo do perfil localizado a meio do arco central, calculados em função da altura da água na albufera

5.5 ANÁLISE DA ESTABILIDADE ESTRUTURAL PARA AÇÕES ESTÁTICAS

A análise da estabilidade estrutural da barragem da Lagoa Comprida foi efetuada através de uma metodologia expedita que se baseia no cálculo da resultante estática a partir do diagrama de corpo livre da barragem, ao longo de vários planos horizontais que se admitem como potenciais planos de rotura. Os cenários analisados para cada plano são o deslizamento e o derrubamento. Adotaram-se os pesos específicos de 25 kN/m^3 para o material que constitui a barragem e de 10 kN/m^3 para a água. O modelo de rotura das juntas é do tipo Mohr-Coulomb, com parcela coesiva nula e ângulo de atrito interno de 45° . Consideraram-se distribuições lineares das tensões normais nas secções horizontais, sendo a sua determinação baseada na teoria das peças lineares.

Segundo as NPB [3], a verificação da segurança deve ser realizada para cenários correntes e de rotura. As ações estáticas consideradas foram o peso próprio (PP) a pressão hidrostática (PH) e as subpressões. Para o estudo dos cenários correntes procedeu-se (i) à determinação das tensões verticais totais e efetivas e dos fatores de segurança em relação à base da barragem, e (ii) ao cálculo dos fatores de segurança em relação a planos horizontais definidos ao longo da altura da barragem.

Foi considerada a pressão hidrostática, sobre o paramento de montante, corresponde ao nível de pleno armazenamento (NPA = 1600,0 m). Quanto à subpressão na base da barragem, foi adotado um diagrama triangular, com redução de 60% no pé de montante relativamente ao valor da pressão hidrostática nesse ponto, em correspondência com os valores observados, dado que o sistema de

drenagem, localizado nessa zona, tem-se mostrado eficaz. Na determinação dos fatores de segurança em relação a planos horizontais distribuídos ao longo da altura do perfil foram consideradas duas hipóteses, uma correspondente à ausência de subpressões e outra, desfavorável, adotando diagramas de subpressão triangulares montante-jusante, com um valor a montante correspondente à pressão hidrostática.

No Quadro 2 apresentam-se os valores calculados para as tensões verticais totais e efetivas na base da barragem. São tensões de compressão, exceto a tensão vertical junto ao pé de jusante, para o caso da albufeira vazia, que apresenta um valor de tração de 14,7 kPa. No Quadro 3 apresentam-se os valores dos fatores de segurança calculados em relação ao deslizamento e ao derrubamento. São valores superiores a 1,5, pelo que cumprem os critérios de segurança estabelecidos pelas NPB.

Descrição	Tensões na base [kPa]	
	Pé de montante	Pé de jusante
<i>PP – Tensão vertical total (albufeira vazia)</i>	-713,6	14,7
<i>PP+PH – Tensão vertical total</i>	-210,8	-491,4
<i>PP+PH+Sub – Tensão vertical efetiva</i>	-98,8	-491,4

QUADRO 2 – Tensões verticais totais e efetivas na base do perfil para a ação do peso próprio (PP) e para as ações do peso próprio e da pressão hidrostática (PP+PH+Subpressões)

Descrição	Sem subpressão	Com subpressão
<i>Fator de segurança ao deslizamento</i>	1,9	1,6
<i>Fator de segurança ao derrubamento</i>	2,8	1,9

QUADRO 3 – Fatores de segurança ao deslizamento e ao derrubamento, na base do perfil, para as ações do peso próprio, pressão hidrostática e subpressão

A Figura 15 representa os fatores de segurança relativos a planos horizontais ao longo da altura da barragem. Caso não se considere a subpressão, os fatores de segurança são da ordem de grandeza ou superiores a 2. Considerando uma subpressão total nos planos horizontais (hipótese muito desfavorável, como referido), os fatores de segurança são próximos ou superiores a 1,1.

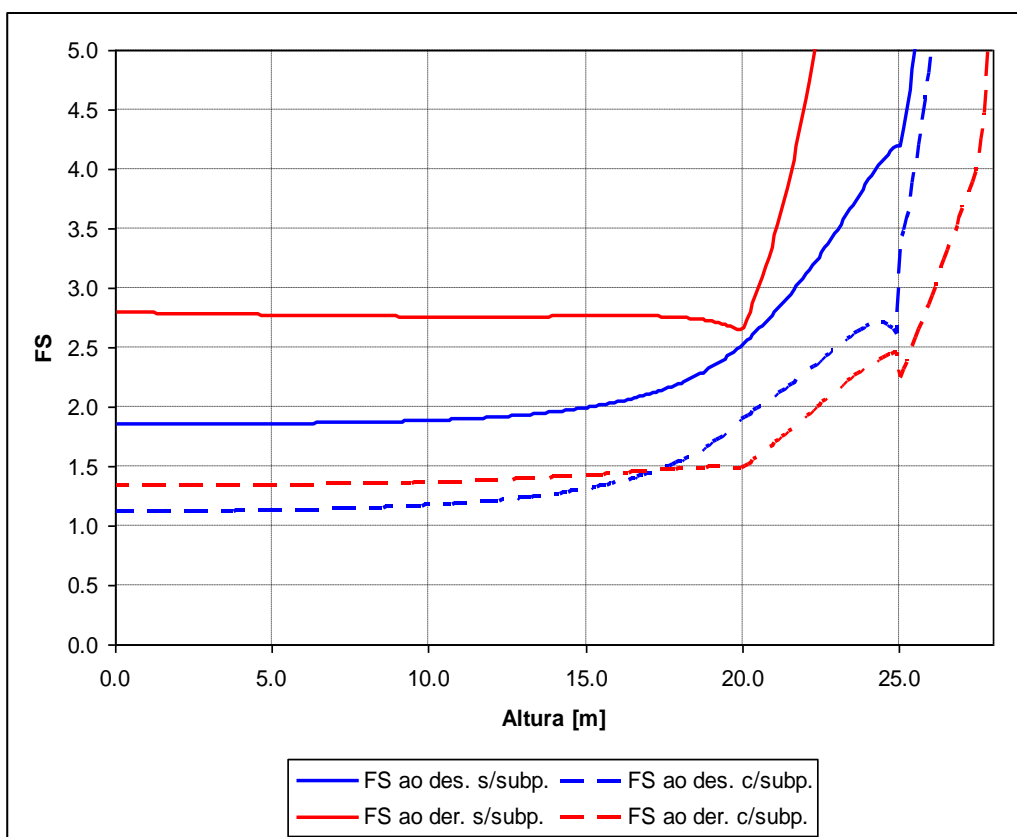


FIGURA 15 – Fatores de segurança ao deslizamento e ao derrubamento, com e sem subpressão, em relação a planos horizontais ao longo da altura da barragem

5.6 ANÁLISE DA ESTABILIDADE ESTRUTURAL PARA AÇÕES SÍSMICAS

Embora a perigosidade sísmica do local da barragem da Lagoa Comprida não seja elevada, considerou-se oportuno incluir a sua análise para este tipo de solicitação dinâmica. Começou-se por caracterizar a ação sísmica, de acordo com o Eurocódigo 8 [9], e realizar uma análise sísmica preliminar através de um método do tipo pseudo-estático. Posteriormente foi efetuada uma análise sísmica não linear, no domínio do tempo, para o sismo máximo de projeto (SMP), através de um modelo elaborado com base em elementos discretos, com o objetivo de avaliar o deslizamento permanente da barragem segundo o seu plano de fundação. Devido à sua extensão, optou-se por não incluir este último estudo no presente documento.

As ações sísmicas a considerar são o sismo base de projeto (SBP), para os cenários correntes, e o sismo máximo de projeto (SMP), para os cenários de rotura. De forma a definir a ação sísmica, foram adotados os períodos de retorno de 145 anos para o SBP e de 1000 anos para o SMP. Segundo o EC8, para a localização da barragem da Lagoa Comprida, no concelho de Seia, o sismo afastado é do tipo 1.6 e o sismo próximo é do tipo 2.4. Tendo em conta as formações do tipo A (maciço rochoso) e os fatores de correção em consequência dos períodos de retorno indicados, foram adotadas acelerações sísmicas de pico de $0,2 \text{ m/s}^2$ e $0,7 \text{ m/s}^2$, respetivamente para o SBP afastado e próximo, e de $0,6 \text{ m/s}^2$ e $1,5 \text{ m/s}^2$, respetivamente para o SMP afastado e próximo.

O método pseudo-estático caracteriza-se por não ter em conta o efeito de amplificação da ação sísmica nem a sua natureza oscilatória, pelo que é adequado ao caso em estudo atendendo à elevada rigidez das barragens gravidade. As forças de inércia são tratadas como invariáveis na análise, sendo contabilizadas para a verificação do equilíbrio global do perfil. Foram consideradas as parcelas horizontal e vertical a partir do produto da massa da estrutura pelas respectivas acelerações de referência. As acelerações de referência são acelerações de pico, adequadas para uma análise de tensões. Para a determinação de fatores de segurança é recomendada a utilização de acelerações reduzidas, através da sua multiplicação por fatores de 0,67, para a componente horizontal, e de $0,67 / 3 \approx 0,2$, para a componente vertical [10]. O impulso hidrodinâmico foi considerado a partir da solução com massas associadas de Westergaard.

A análise foi realizada apenas para os sismos próximos por serem, neste caso, os condicionantes para a verificação da segurança da estrutura. Para o cenário corrente, que envolve o SBP, o fator de segurança ao deslizamento é de 1,4 e o fator de segurança ao derrubamento é de 1,8. As tensões calculadas na superfície de inserção são de compressão, sendo a montante de -0,03 MPa e a jusante de -0,6 MPa. Para o cenário de rotura, que considera o SMP, o fator de segurança ao deslizamento é de 1,2 e o fator de segurança ao derrubamento é de 1,6. As tensões na base do perfil são de tração a montante, com o valor de 0,07 MPa, e de compressão a jusante, com um máximo de -0,7 MPa.

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram apresentados os aspetos relevantes das atividades de observação e de acompanhamento do comportamento das barragens portuguesas, dando-se especial ênfase aos relatórios de análise do comportamento elaborados no âmbito do controlo de segurança. Apresentou-se a análise do comportamento da barragem da Lagoa Comprida, tendo por base os dados coligidos a partir da última reformulação do sistema de observação, datada de meados da década de 80 do século passado, e os resultados das inspeções visuais que têm vindo a ser efetuadas regularmente. Fez-se a análise da evolução das principais ações e das correspondentes respostas estruturais e hidráulicas, e apresentou-se a interpretação do comportamento observado e a análise da estabilidade da barragem, para ações estáticas e para ações sísmicas, utilizando modelação estrutural.

O comportamento da barragem da Lagoa Comprida é considerado globalmente satisfatório, sendo claro que as obras de reabilitação, efetuadas há quase 50 anos, foram extremamente eficazes para a sua durabilidade e segurança, podendo ser encaradas como um bom modelo para reabilitações de obras em situações semelhantes. As análises da estabilidade estática e sísmica destacam a importância da redução das subpressões na base da barragem para a sua segurança, havendo assim que garantir o bom funcionamento da drenagem da fundação. Para impedir a degradação da barragem também é fundamental assegurar um bom funcionamento dos sistemas de impermeabilização do seu corpo, de forma a evitar a lavagem de caldas e argamassas do corpo da estrutura que poderiam induzir a redução da coesão e do ângulo de atrito interno dos materiais que a constituem.

7. AGRADECIMENTOS

Agradece-se à EDP (Energias de Portugal), a autorização concedida para a publicação dos elementos referentes à barragem da Lagoa Comprida. Os autores agradecem igualmente os contributos do Investigador-Coordenador José Mora Ramos, co-autor do relatório da análise do comportamento e da segurança estrutural da barragem da Lagoa Comprida.

8. PALAVRAS-CHAVE

Barragens, Controlo da segurança, Plano de observação, Relatório de análise do comportamento.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] PEDRO, J.O. (2001) – “Segurança e funcionalidade das barragens”, Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Memória N.º 824, Lisboa.
- [2] RSB (2007) – “Regulamento de Segurança de Barragens”, Decreto-Lei n.º 344/2007, Lisboa.
- [3] NPB (1993) – “Normas de Projeto de Barragens”, Portaria n.º 846/93, Lisboa.
- [4] NCB (1998) – “Normas de Construção de Barragens”, Portaria n.º 246/98, Lisboa.
- [5] NOIB (1993) – “Normas de Observação e Inspeção de Barragens”, Portaria n.º 847/93, Lisboa.
- [6] NEB (1998) – “Normas de Exploração de Barragens”, Conselho Superior de Obras Públicas, Projeto de Portaria, Lisboa.
- [7] RPB (1993) – “Regulamento de Pequenas Barragens”, Decreto-Lei n.º 409/93, Lisboa.
- [8] LNEC (2012) – “Barragem da Lagoa Comprida - Análise do comportamento e da segurança estrutural”, Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Relatório NO/DBB, Lisboa.
- [9] EC8 (2010) – “Eurocódigo 8 – Projeto de estruturas para resistência aos sismos. Parte 1: Regras gerais, ações sísmicas e regras para edifícios”, NP-EN 1998-1, Lisboa.
- [10] TINAWI, R., LÉGER, P., LECLERC, M., CIPOLLA, G. (2000) – “Seismic safety of gravity dams: from shake table experiments to numerical analyses”, ASCE J Struct Engng 2000; 126(4)518-29.