

BARRAGEM DE PARADELA- A IMPERMEABILIZAÇÃO DO PARAMENTO DE MONTANTE COM GEOSINTÉTICOS

PARADELA DAM – GEOSYNTHETICS WATERPROOFING OF THE UPSTREAM FACE

Camelo, Armando, *EDP-Gestão da Produção de Energia SA, Porto, Portugal*, acamel@netcabo.pt

Matos, Domingos S., *EDP-Gestão da Produção de Energia SA, Porto, Portugal*, dmsmatos@outlook.com

Plasencia, Nadir, *EDP-Gestão da Produção de Energia SA, Porto, Portugal*, nadir.plasencia@edp.com

Caldeira, Laura, *LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal*, laurac@lnec.pt

Ferreira, Ilídio, *EDP-Gestão da Produção de Energia SA, Porto, Portugal*, ilidio.ferreira@edp.com

RESUMO

A Barragem de Paradela, construída em 1958, é do tipo enrocamento lançado com 110 metros de altura, dispondo a montante de uma cortina em betão armado e de um muro corta águas ao longo da inserção na fundação. A cortina estanque é dividida em lajes de betão armado dispondo de juntas providas com lâmina de cobre coberta por produto betuminoso. Duas fiadas de lajes perimetrais desenvolvem-se paralelamente ao muro corta águas, no sentido de absorver os maiores deslocamentos. Desde o início da exploração verificaram-se diversas roturas das lâminas de cobre, fendas nas lajes de betão e outras patologias, que obrigaram a 5 grandes intervenções com esvaziamento integral da albufeira. Os caudais infiltrados apresentavam boa correlação com os níveis da albufeira, tendo atingido 100.000 l/min para o nível de pleno armazenamento (NPA). No presente artigo apresenta-se o diagnóstico da causa das infiltrações que conduziram à solução adotada de impermeabilização parcial do paramento de montante com um geossintético drenado no seu tardo por georede, assim como a solução definida para o tratamento das patologias encontradas nas juntas das lajes da cortina. Os trabalhos foram realizados em 2019, tendo-se procedido, para o efeito, ao esvaziamento da albufeira e à implementação de um plano de observação específico da barragem durante o abaixamento e reenchimento da albufeira.

ABSTRACT

The Paradela Dam, built in 1958, is a 110 meters-high, concrete face rockfill dam (CFRD) by directed dumped rockfill, with a foundation plinth (cutoff structure). This watertight curtain is divided in reinforced concrete slabs with copper foil joints, covered with a bituminous product. Two rows of perimetral slabs run parallel to the plinth, in order to absorb the large displacements. Since the first filling of the reservoir several ruptures on the copper water-stops, cracks in the concrete slabs and other pathologies were observed, having required 5 major interventions, with complete emptying of the reservoir. The infiltrated flows showed a good correlation with the reservoir levels, reaching 100,000 l / min for the normal water level (NWL). This paper describes the diagnosis of the infiltrations causes, which led to the adopted solution. This solution consisted on the partial waterproofing of the upstream face using a geosynthetic

drained on its back with a geonet, as well as the solution for the treatment of the pathologies found in the joints of the curtain slabs. These works were carried on out in 2019, emptying the reservoir for this purpose and implementing a specific monitoring plan of the dam during the emptying and the refilling of the reservoir.

1. CARACTERÍSTICAS DA BARRAGEM

O aproveitamento de Paradelas na bacia do rio Cávado, foi construído entre 1955 e 1958, após a conclusão dos escalões de Venda Nova, Salamonde e Caniçada no troço do rio Cávado entre as cotas 280 e 740 (Figura 1). O primeiro enchimento da albufeira até à cota (738,80) ficou concluído em julho de 1958.¹

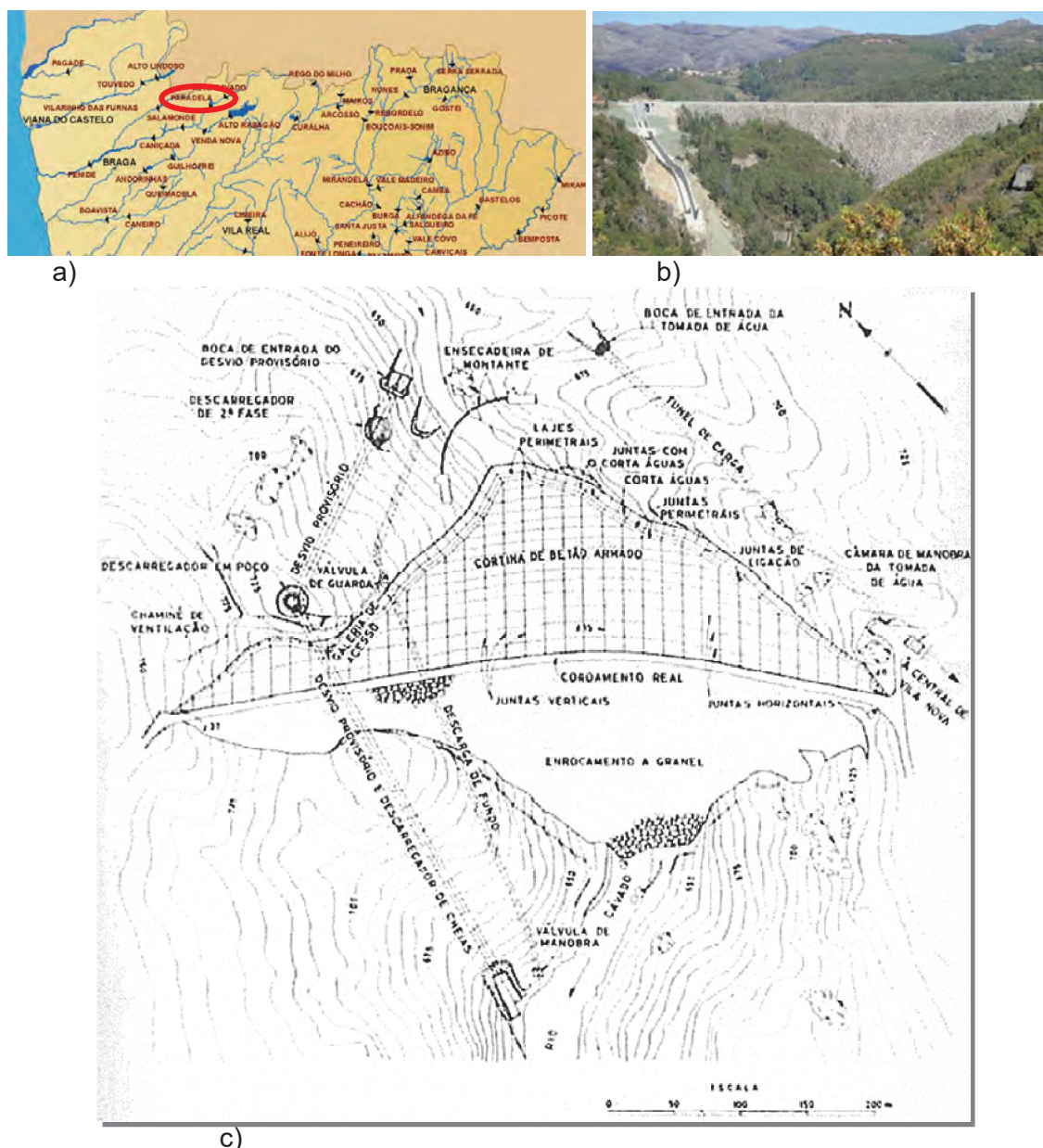


Figura 1 – Barragem de Paradelas (a- Localização; b- vista geral de jusante; c- planta geral)

¹ Todas as cotas referidas neste artigo respeitam o referencial altimétrico do Sistema Cávado-Lima (9,20 m superior ao Referencial Altimétrico Nacional).

A barragem tem 110 metros de altura, do tipo enrocamento lançado com cortina de estanqueidade de betão armado a montante, assente numa almofada de enrocamento arrumado de espessura variável com a profundidade. O coroamento, situado à cota (743,5), tem um comprimento de 540 m, sendo o volume total de enrocamento lançado de $1,973 \times 10^6 \text{ m}^3$ e de enrocamento arrumado de $224,7 \times 10^3 \text{ m}^3$ (Gomes Fernandes, 1957 e 1965). A barragem tem forma curva em planta, definida por uma diretriz horizontal formada por dois ramos de hipérbole tangentes num vértice comum, que coincide com a junta 15 da cortina estanque de montante, concentrando-se a curvatura na zona central (Figura 1). O projeto é da autoria da Hidroeléctrica do Cávado (HICA), uma das empresas que esteve na génese da EDP, e foi inspirado no da barragem de Salt Springs, com 100 m de altura, construída em 1931, na Califórnia, USA (Larson, *et al.*, 2006).

O principal elemento de estanqueidade do corpo da barragem é a cortina de montante em betão, assente no enrocamento arrumado, cobrindo toda a área do paramento e terminando no pé da barragem com uma junta de ligação ao muro corta-águas. A previsão dos assentamentos do enrocamento lançado obrigou a dotar essa cortina de uma elevada flexibilidade, conferida pela sua divisão em lajes separadas por juntas com alguma expressão e com uma lâmina em chapa de cobre para garantia de estanqueidade (Figura 2 e 3).



Figura 2 – Almofada de enrocamento arrumado (junho de 1956)



Figura 3 – Cortina estanque em betão sobre o enrocamento arrumado (agosto de 1957)

As lajes de betão da cortina estanque são armadas em ambas as direções e a sua espessura varia igualmente com a profundidade, tendo na cota mais baixa uma espessura de 1,10 m. O número e organização das juntas entre as lajes da cortina de betão foram definidas de acordo com as regras seguintes (ver Figura 2):

- 14 juntas horizontais, afastadas de 15 metros na área superior do paramento, onde se situam os primeiros 4 alinhamentos das lajes de A a D, e afastadas de 10 metros na parte inferior e central do paramento, onde se situam os 11 alinhamentos das lajes de E a O;
- 37 juntas designadas por ‘verticais’, afastadas de 15 metros entre si;
- 1 junta de ligação com o muro corta-águas;
- 2 juntas perimetrais entre as quais se situam os alinhamentos das lajes P e Q que se desenvolvem paralelamente ao muro corta-águas.

As duas juntas perimetrais destinam-se a prevenir os efeitos dos deslizamentos previsíveis que se admitiu terem maior expressão na vizinhança do muro corta-águas.

A fundação da barragem, constituída por granito heterogeneamente meteorizado principalmente na margem esquerda e com particular incidência em zonas de falha, exigiu zonas de escavações mais profundas, que desaconselhou a adoção de uma estrutura rígida para o corpo da barragem. A solução de enrocamento foi assim a mais adequada pela disponibilidade de material para a sua construção a curta distância associada à envolvente essencialmente granítica.

A impermeabilização no contacto com a fundação foi conseguida através de um muro corta-águas perimetral, localizado no pé de montante da barragem e munido de uma galeria a partir da qual se realizou uma cortina de impermeabilização injetada com calda de cimento, localizada entre duas cortinas auxiliares de contenção, a montante e jusante, mais curtas e injetadas com gel de silício (Figura 4).

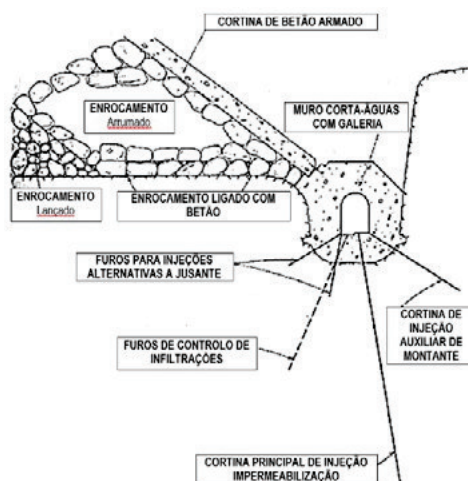


Figura 4 – Geometria do muro corta-águas, da galeria de fundação e das cortinas de injeção

Os caudais dos drenos da fundação da barragem são medidos individualmente no interior da galeria do muro corta-águas e, esgotados para jusante através de uma galeria transversal, no fundo do vale, e que serve de acesso a partir de jusante. Os caudais infiltrados na barragem são lidos a jusante através de um pequeno descarregador construído para o efeito e designado por “descarregador definitivo”.

2. COMPORTAMENTO E REPARAÇÕES DA BARRAGEM

2.1. Período após a construção até 1980

Desde o fim do primeiro enchimento, ocorrido em julho de 1958, observaram-se caudais significativos a jusante. Esses caudais chegaram a atingir cerca de 400 l/s (24.000 l/min). Tendo como objetivo detetar a causa desses caudais anómalos, em meados de outubro desse ano procedeu-se ao esvaziamento da albufeira (Figura 5). Da observação decorrente do primeiro esvaziamento e da ocorrida desde o início do primeiro enchimento, ambas baseadas na leitura, por métodos geodésicos, dos deslocamentos das marcas colocadas nas lajes de montante, foi possível concluir que os deslocamentos absolutos atingiram valores da ordem de 1,80 m nas juntas horizontais das lajes B e C à cota (727,25), tendo-se verificado ainda que:

- a maioria das lajes apresentava fendas, com aberturas inferiores a 1 mm;
- as juntas verticais da zona central da barragem registaram fechos que atingiram 70 mm, pelo que as lajes contíguas se encontravam unidas;
- no sentido das margens esses fechos diminuíam, verificando-se até ligeiras aberturas;
- o fecho de grande parte das juntas abaixo da cota (690,50) originou destaques do betão adjacente;
- em 3 pontos isolados das juntas perimetrais verificava-se um descolamento da lâmina de cobre, facto a que se atribuiu a ocorrência de grande parte dos caudais infiltrados;
- ao longo de toda a junta perimetral que liga as lajes Q às suas contíguas, a selagem estava destacada, observando-se ainda um deslocamento ascensional em relação ao suporte de enrocamento arrumado.

No período de exploração entre 1958 e 1971, estes tipos de patologias foram sendo reparadas com trabalhos que incluíam, entre outros:

- o alargamento de juntas “verticais” e horizontais;
- reparações pontuais nas lajes, designadamente fendas e algumas substituições integrais de lajes da cortina;
- a substituição de lâminas de cobre e/ou reparações pontuais nestas lâminas;
- a reposição do produto betuminoso sobre as lâminas de cobre (polybreal).

Na realidade a barragem foi, neste período, objeto de intervenções constantes desde a sua construção, devidas aos elevados caudais infiltrados que atingiram, em 1964, valores superiores a 100 000 l/min, sendo de registar as seguintes:

- 1958 - Imediatamente após o primeiro enchimento (esvaziamento total da albufeira);
- 1959 - Segunda intervenção após um ano (com condicionamento de cota);
- 1962 - Intervenção entre setembro e dezembro (com esvaziamento da albufeira);
- 1964 - Intervenção entre setembro e dezembro (com albufeira à cota 675);
- 1965 - Intervenção entre julho e novembro (com esvaziamento total da albufeira);
- 1971 - Intervenção entre outubro e dezembro (esvaziamento total da albufeira);
- 1972 – Intervenção entre agosto e outubro (albufeira à cota 675);
- 1973 – Intervenção entre outubro e dezembro (albufeira à cota 700);
- 1975 – Intervenção entre outubro e dezembro (albufeira à cota 695).

2.2. Período 1980-2018

2.2.1. Reparação de 1980

Dado o aumento contínuo dos caudais infiltrados, em 1980 a EDP decidiu aplicar no paramento de montante uma impermeabilização integral com membrana designada por “Cesacryl” (Figura 5), obtida por impregnação de um geotêxtil com um “hydrogel” impermeabilizante, com propriedades de expansão na presença da água, e com maior espessura abaixo da cota (696,00) onde foram aplicadas duas camadas de membrana (Sousa *et al.*, 1985).



Figura 5 – Duas fases da aplicação da membrana

A aplicação da membrana foi precedida da regularização das lajes de betão, para evitar danificar o geotêxtil, e do enchimento das juntas entre lajes com uma argamassa plástica cimentícia. Foi levado a efeito também, a remoção e a contenção de diversos blocos graníticos de grandes dimensões nas encostas, tendo em vista evitar a sua queda e a consequente danificação da membrana. A intervenção incluiu ainda injeções de resina epóxi nalgumas juntas do muro corta-águas, reforço localizado do tratamento das fundações por injeções de cimento e de monitorização da fundação com instalação de drenos adicionais e piezómetros.

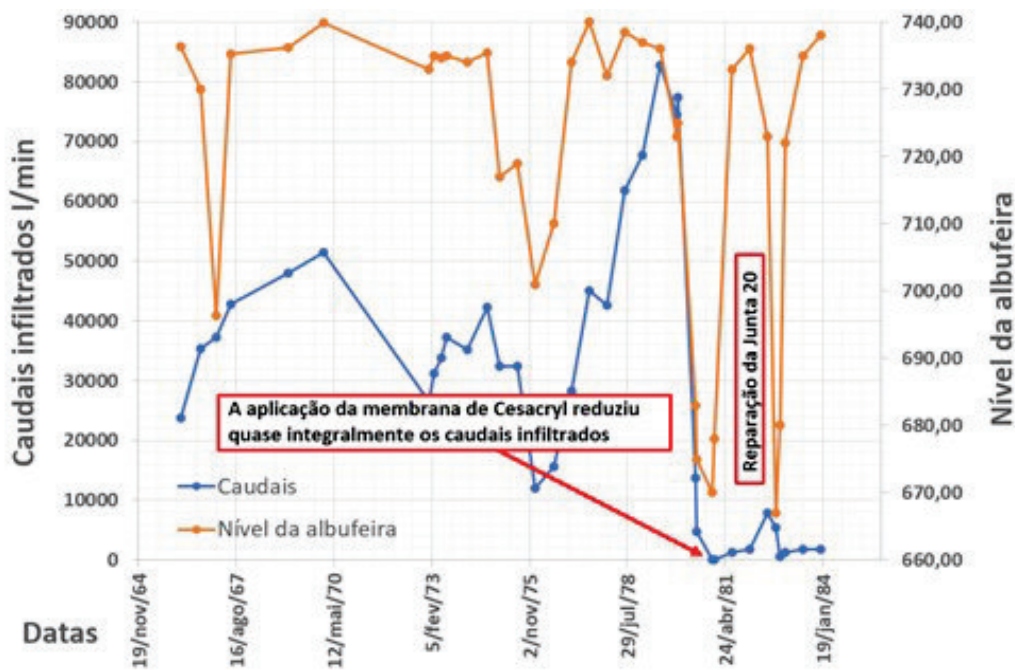


Figura 6 – Evolução da cota da albufeira e dos caudais drenados e infiltrados 1964-1984

Esta reparação teve um grau elevado de sucesso, já que conduziu praticamente à eliminação dos caudais infiltrados, conforme se pode observar na figura 6.

2.2.2. Comportamento da obra entre 1980 e 2018

Os caudais mantiveram valores entre 1200 a 4200 l/min até 1987, período no qual se reparou a J20 (1982), aproveitando o novo esvaziamento para substituição de equipamento da descarga de fundo. No entanto, entre abril de 1987 e fevereiro de 1988, os caudais aumentaram sucessivamente, até atingirem um valor da ordem dos

250 l/s (15 000 l/min), havendo sempre uma relação direta entre as cotas da albufera e os caudais infiltrados.

Em 1993 e 1995 foi tentada a utilização de sistemas de inspeção automáticos, sem sucesso, pelo que em 1995 uma inspeção subaquática por mergulhadores detetou infiltrações que foram objeto de reparação imediata, mas provisória. Em finais de 2007 e janeiro 2008 foi efetuada nova inspeção por mergulhadores, tendo sido detetada uma zona importante de infiltração no alinhamento da J15 com as juntas perimetrais e uma área do fundo do vale com ruídos de passagem de água (Figura 7 e 8).

Os caudais infiltrados mantiveram a tendência de incremento e de constante histerese no tempo chegando a valores em 2018 que ultrapassaram os 100 000 l/min (Figura 9).

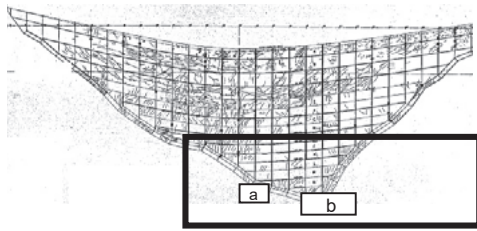


Figura 7 – Inspeção em 2007 -
a) forte infiltração;
b) zona de ruídos de passagem de água



Figura 8 – Locais identificados durante o esvaziamento da albufera

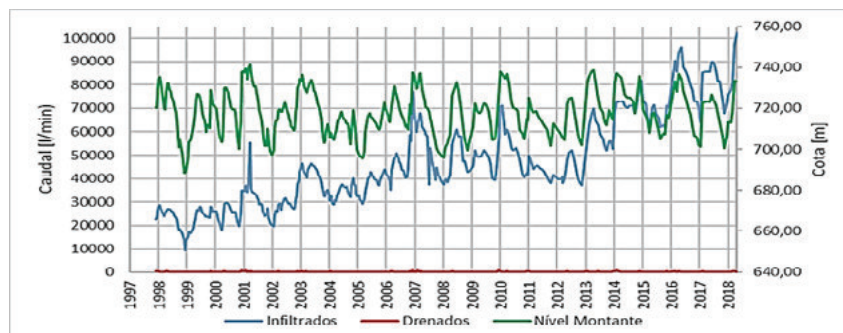


Figura 9 - Evolução dos caudais infiltrados totais e dos caudais drenados de 1997 a 2018

3. ESTUDOS DE DIAGNÓSTICO DAS INFILTRAÇÕES

Atendendo que os caudais provenientes dos drenos de fundação e infiltrações da galeria têm registado valores residuais em consonância com os níveis da albufera e sem grandes alterações, e ainda que o muro corta-águas não apresenta infiltrações em toda a sua extensão, as percolações lidas a jusante da barragem, só podem provir das patologias da cortina de montante, embora variáveis por influência da pluviosidade.

Assim, para auxílio do diagnóstico foi realizado um levantamento batimétrico da cortina de betão, do fundo vale entre a barragem e a ensecadeira da obra ainda existente e ainda numa área na vizinhança da fundação da barragem para montante. Este levantamento permitiu verificar não existirem deformações diferenciais relevantes entre lajes contíguas e no muro corta-águas, verificando-se, contudo, umas pequenas variações de cotas ao longo das lajes perimetrais.

No sentido de caracterizar a evolução dos caudais infiltrados, procedeu-se à sua análise estatística com um modelo de separação de efeitos adotando-se uma expressão do tipo

$$Q = a H^2 + b T^2 + K$$

em que se admitiu o efeito da ação hidrostática variável com a potência quadrática da altura de água na albufeira (H) e a evolução dos caudais (Q) no tempo uma potência quadrática do número de dias contados a partir do início do período em observação (T). Esta análise (Figura 10) mostrou uma boa aproximação entre os valores lidos e os calculados (coeficiente de correlação de 0,94), evidenciando a adequação do modelo para caracterizar a respetiva evolução no tempo.

As observações fotográficas e vídeo realizadas durante a última inspeção subaquática, juntamente com os dados da batimetria, permitiu concluir que as infiltrações se processariam quase exclusivamente por roturas localizadas das lâminas de cobre das juntas, associadas à sua deterioração progressiva e, também, provavelmente decorrentes das deformações diferenciais entre lajes contíguas.

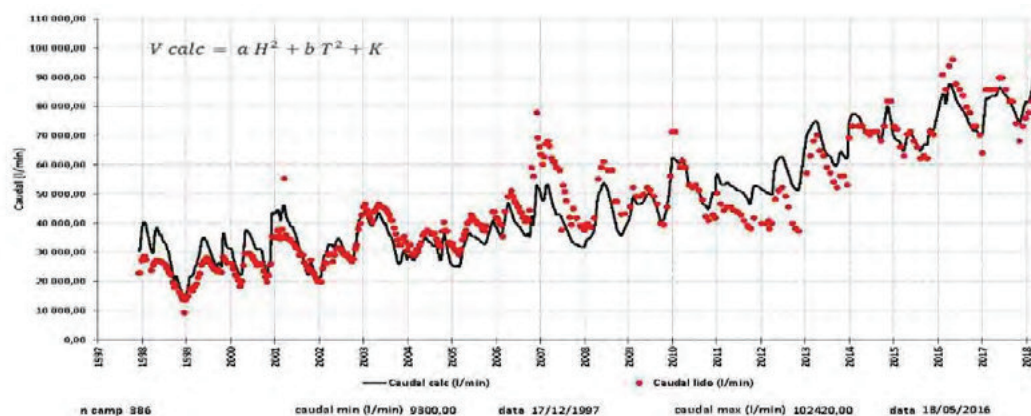


Figura 10 – Descarregador definitivo. Caudais infiltrados. Análise por Separação de efeitos

Contudo, não se sabendo quantos orifícios poderiam ser responsáveis pelos caudais infiltrados, variáveis no tempo, procedeu-se a uma análise de sensibilidade simples, consideraram-se os caudais concentrados num só hipotético orifício, como “centro de gravidade” das infiltrações. Tomando os caudais e as cotas da albufeira ao longo do tempo, foi calculada a área do orifício capaz de deixar passar aquele volume de água. Caso o orifício não fosse suficientemente profundo, os caudais não teriam correlação com a altura de água, a não ser em caso de variação muito significativa da sua secção.

Cada curva do gráfico da Figura 11 corresponde assim a uma posição (cota) do “centro de gravidade” do orifício, para o qual se obteria, ao longo do tempo, a respetiva secção, de modo a corresponder com os caudais infiltrados efetivamente lidos.

Da análise deste gráfico verifica-se que o hipotético orifício não poderia situar-se acima da cota (685,00), caso contrário, a sua secção deveria variar de 1 vez para 5 vezes mais, o que não se afigura provável.

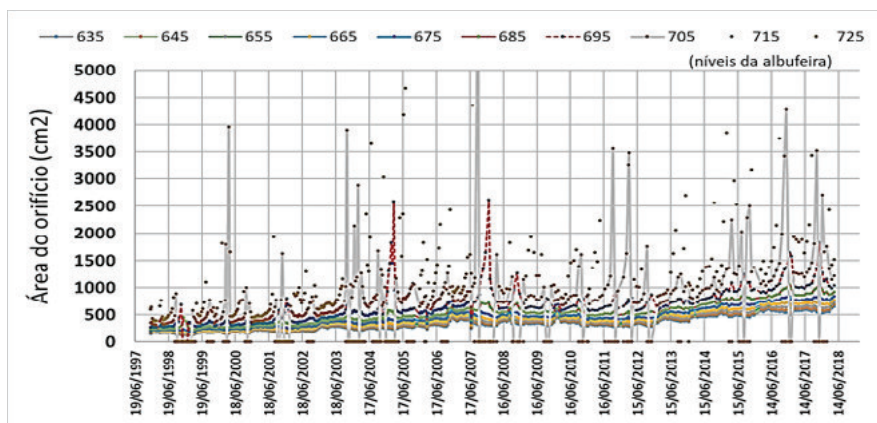


Figura 11 – Estudo de sensibilidade de determinação de área de uma secção única

Deste modo concluiu-se que as infiltrações teriam de ocorrer a cotas baixas no paramento de montante, como se verificou após o esvaziamento da albufeira (ver Figura 8). Sendo assim, a manter-se o ritmo de aumento dos caudais infiltrados, estes poderiam vir a erodir de forma significativa a zona de maciço permeável da fundação, no contacto com a base do enrocamento arrumado.

4. IMPERMEABILIZAÇÃO COM GEOSSINTÉTICOS

Tendo por base o diagnóstico acima apresentado foram considerados dois cenários de áreas a cobrir por uma membrana em PVC-P. O Cenário 1 abrangendo a zona do paramento de montante, desde o fundo do vale até à cota (691,00), e Cenário 2, do fundo do vale até à cota (710,00). Entretanto, tendo por base os resultados dos estudos apresentados no ponto anterior, mas também os resultados da valorização económica do investimento, optou-se por implementar a solução correspondente ao Cenário 1 (Figura 12).

A solução adotada recaiu na aplicação do sistema patenteado da CarpiTech, drenado com três compartimentos independentes. Para além da ação do vento, foi especificada para o projeto de execução, a capacidade de acomodação de fendas de 20 mm para a maior parte das juntas da cortina e de 40 mm para algumas das juntas perimetrais, onde se aplicou uma segunda camada de geossintéticos.

Aquando do esvaziamento de albufeira, para aplicação da impermeabilização referida, foi possível confirmar a localização de 5 orifícios nas juntas perimetrais nos alinhamentos das juntas “verticais” J13, J15, J16, J18 e J22. (ver Figura 8), que confirmaram o diagnóstico.

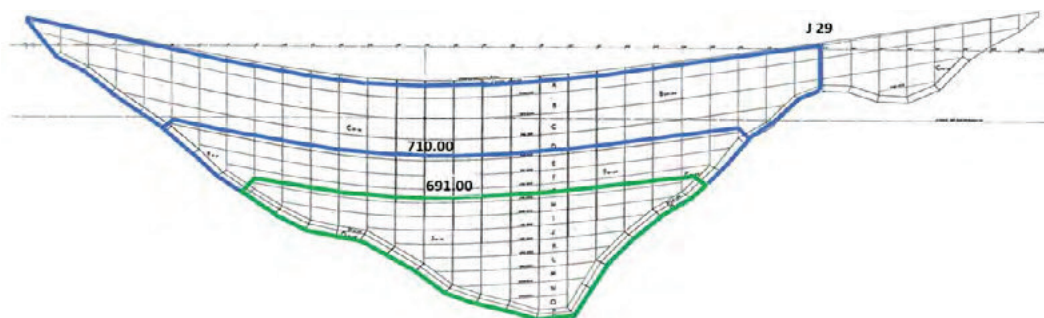


Figura 12 – Áreas de impermeabilização do paramento afetas aos cenários 1 e 2

Os trabalhos foram realizados na estiagem de 2019 tendo nos meses anteriores decorrido o esvaziamento da albufeira de acordo com um programa de abaixamento previamente definido com as entidades competentes.

5. CONCLUSÕES

Após a execução dos trabalhos (Figura 13), cumprindo prazos e custos, e procedendo ao reenchimento da albufeira, verificou-se que as infiltrações pela drenagem da geomembrana apresentam valores inferiores a 100 l/m. para níveis da albufeira à cota (729,00). Verificou-se ainda que as infiltrações a jusante apresentaram uma redução muito significativa, sendo que, sem influência da pluviosidade (situação ainda não verificada), se poderá estimar um máximo de 2 000 l/min, quando, antes da intervenção, eram da ordem dos 92 000 l/min, comprovando a eficiência da intervenção.

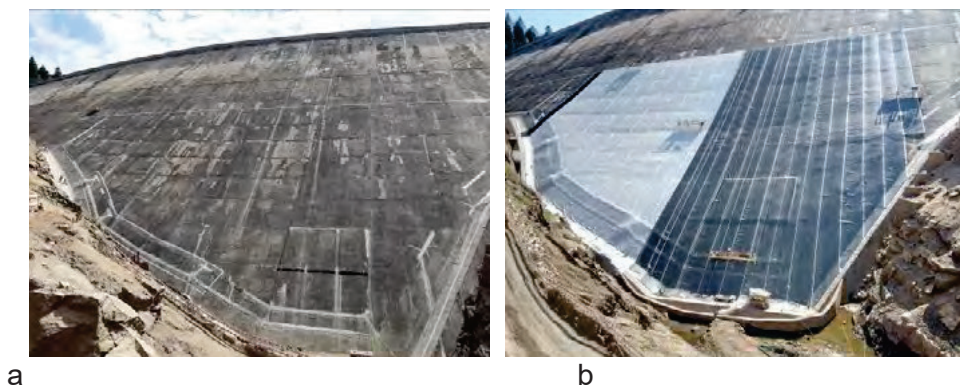


Figura 13 - Duas fases da obra (a – jul.2019; b -ago.2019).

Durante o reenchimento da albufeira o comportamento observado da estrutura tem sido concordante com o seu histórico, e continuará a ser aferido pelos resultados do plano de observação da barragem.

REFERÊNCIAS

- Gomes Fernandes, L.H. (1957) – A cortina estanque da barragem de Paradela – Revista Eletricidade nº 3 jul.- set.
- Gomes Fernandes, L.H., Oliveira, Edgar, Vasconcelos Porto, N. (1965) – A Barragem de Paradela – 1as. Jornadas Luso Brasileiras de Engenharia Civil, LNEC.
- Grupo de Centrais do Cávado (1980) – Relatório das obras da Barragem de Paradela. ICOLD, Bulletin 135 (2010)– Geomembrane sealing systems for dams, Paris.
- Larson, E., Kelly, R., Dreese, T., Wilkes, J. (March 2006) – A permanent solution at Salt Springs Dam, Water Power & Dam Construction @ <https://www.waterpowermagazine.com/features/featurea-permanent-solution-at-salt-springs-dam/> (on 2018).
- Sousa, A. Correia, Miranda, M.Pinho, Porcellinis, P., Catalão, J. (1985) – La réparation du barrage de Paradela, ICOLD 15th Congress, Question 59, R.25, Lausanne.