

ALBUFEIRAS NA ILHA DA MADEIRA: (IMPRESINDÍVEL) IMPERMEABILIZAÇÃO COM GEOSSINTÉTICOS

Water reservoirs on Madeira Island: (essential) waterproofing with geosynthetics

Madalena Barroso^a, Laura Caldeira^a, Pedro França Ferreira^b, Paulo França^b, Carlos Maligno^c

^a Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal

^b Empresa de Eletricidade da Madeira, Portugal,

^c ARM – Águas e Resíduos da Madeira, S.A., Portugal

RESUMO – Na ilha da Madeira, existem vários reservatórios de água para diferentes fins, entre eles as albufeiras das barragens de Pico da Urze e da Portela. Estas infraestruturas têm em comum a particularidade de as características das formações geológicas vulcânicas ocorrentes e os materiais de construção das barragens não garantirem a estanquidade necessária para a retenção da água, tornando imprescindível o uso de geossintéticos na impermeabilização do corpo das barragens e das suas albufeiras. Na Barragem do Pico da Urze foi utilizado um geocompósito de impermeabilização (geomembrana de PVC termoacoplada a um geotêxtil) e na Barragem da Portela foi usada uma geomembrana de PEAD. A utilização destes materiais colocou alguns desafios ao nível da conceção e construção dos seus sistemas de impermeabilização. Neste artigo, apresentam-se os principais desafios enfrentados durante as fases de projeto e de construção dos sistemas de impermeabilização, que o Laboratório Nacional de Engenharia Civil acompanhou no âmbito de assessorias técnicas prestadas aos donos de obra.

ABSTRACT – The island of Madeira has several water reservoirs for different purposes, including the Pico da Urze and Portela dams. A common feature of these infrastructures is that the characteristics of the volcanic geological formations and the materials used in the construction of the dams do not guarantee the necessary waterproofing, making the use of geosynthetics in lining systems essential. A geocomposite (PVC geomembrane thermally coupled to a geotextile) was used in the Pico da Urze dam and a PEAD geomembrane in the Portela dam. The use of these materials presented some challenges in terms of the design and construction of their lining systems. This paper presents the main challenges faced during the design and construction of the lining systems, which were supported by the *Laboratório Nacional de Engenharia Civil* as part of the technical assistance provided to the dam owners.

Palavras Chave – barragem, albufeira, formações vulcânicas, sistema de impermeabilização, geossintéticos.

Keywords – dam, reservoir, volcanic formations, lining system, geosynthetics.

E-mails: mbarroso@lnec.pt (M. Barroso), laurac@lnec.pt (L. Caldeira), pferreira@cem.pt (P. Ferreira), pfranca@cem.pt (P. França), carlos.maligno@arm.pt (C. Maligno)

ORCID: orcid.org/0000-0002-0862-055X (M. Barroso), orcid.org/0000-0002-9164-2118 (L. Caldeira)

1 – INTRODUÇÃO

Na ilha da Madeira existem vários reservatórios de água para diversos fins, tais como o abastecimento às populações, a irrigação ou a produção de energia. Entre os reservatórios existentes, contam-se as albufeiras das barragens do Pico da Urze e da Portela, doravante designadas por BPU e BP.

A BPU localiza-se na ribeira do Alecrim, no Concelho da Calheta. É uma infraestrutura integrada no Projeto de Ampliação do Aproveitamento Hidroelétrico da Calheta, cujo objetivo é aumentar a capacidade de produção de energia do Sistema Hidroelétrico da Calheta através da sua associação à produção de energia eólica e da adoção de sistemas reversíveis.

A BP situa-se na ribeira do Passa Remos, no Concelho de Machico. Foi construída com vista ao melhoramento da rede de rega do concelho de Machico.

Estas infraestruturas têm em comum a particularidade de que as características das formações geológicas vulcânicas ocorrentes e os materiais usados na construção do corpo das barragens não garantem a estanquidade necessária à retenção da água, tornando imprescindível a utilização de geossintéticos nos sistemas de impermeabilização.

Os geossintéticos mais utilizados em sistemas de impermeabilização deste tipo de obras são as geomembranas, os geotêxteis e os geocompósitos (constituídos, pelo menos, por dois tipos de geossintéticos diferentes, unidos em fábrica). As geomembranas desempenham a função de barreira (retenção/armazenamento da água), os geotêxteis as funções de proteção da geomembrana, drenagem e filtragem, e os geocompósitos desempenham sempre mais do que uma das funções descritas, por exemplo, barreira e proteção (geocompósito de impermeabilização, substituindo o conjunto geomembrana e geotêxtil), ou drenagem e filtragem (geocompósito drenante em substituição do conjunto geotêxtil filtrante e georrede drenante).

Os geossintéticos podem ser fabricados a partir de diferentes materiais poliméricos. No fabrico de geomembranas, os polímeros mais usados são o polietileno de alta densidade (PEAD), o cloreto de polivinilo (PVC), o polietileno de baixa densidade (PEBD), o polipropileno (PP) e o polietileno clorosulfanado (CSPE) e, no fabrico de geotêxteis, o PP, o poliéster (PET), o PEAD e a poliamida (PA).

A função de barreira foi assegurada por uma geomembrana de PVC unida em fábrica a um geotêxtil (geocompósito de impermeabilização), na BPU, e por uma geomembrana de PEAD, na BP. A utilização destes materiais trouxe alguns desafios de projeto e de construção dos seus sistemas de impermeabilização, destacando-se os seguintes: (i) o dimensionamento e a construção do sistema de ancoragens dos geossintéticos; (ii) as exigências de desempenho da camada de apoio dos geossintéticos e a sua preparação; (iii) o sistema de drenagem subsuperficial; (iv) as ligações entre os geossintéticos e as estruturas de betão; e (v) a implementação de procedimentos de garantia de qualidade de instalação dos geossintéticos.

O Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) prestou assessoria técnica aos donos de obra, designadamente à Empresa de Eletricidade da Madeira, durante as fases de projeto, de construção e de exploração da BPU, e à Empresa IGA – Investimento e Gestão da Água, S.A., presentemente denominada ARM – Águas e Resíduos da Madeira, S.A., durante a fase instalação dos geossintéticos na BP.

No âmbito dos geossintéticos, a intervenção do LNEC teve por objetivo assessorar os donos de obra na solução das questões que a utilização desses materiais levantou.

Neste artigo, descrevem-se as características gerais das obras, a constituição dos sistemas de impermeabilização e apresentam-se os principais desafios enfrentados durante as fases de projeto e/ou de construção dos sistemas de impermeabilização das barragens do Pico da Urze e da Portela e respetivas albufeiras.

2 – CARACTERÍSTICAS GERAIS DAS OBRAS

2.1 – Barragem do Pico da Urze e sua albufeira

A BPU localiza-se no Paul da Serra, no Concelho da Calheta. Tem o coroamento à cota 1354 m, com um desenvolvimento de 620 m e uma largura de 8 m (Figura 1). A altura máxima da barragem acima da fundação é de 31 m.



Fig. 1 – Vista geral da BPU.

A barragem é constituída por um aterro de enrocamento com um sistema de impermeabilização, com geossintéticos, colocado sobre uma camada de betão projetado (armado com uma geogrelha, a montante) e sobre um geotêxtil de proteção e de drenagem. O geotêxtil encontra-se ligado a 4 tubos de drenagem (diâmetro de 80 mm, espaçados de 6 m) na zona a cotas mais baixas do paramento de montante, para permitir o escoamento da água potencialmente afluyente entre o geocompósito de impermeabilização e a camada de betão projetado. O paramento de montante tem uma forte inclinação, de 1(V):1,4(H), com uma banquetta intermédia, a cota variável (mínima 1335 m), e o paramento de jusante é, ainda mais inclinado, 1(V):1,2(H).

A albufeira é alimentada pela ribeira do Alecrim e pela levada Velha do Paul. Tem um volume de armazenamento de, aproximadamente, 1 hm³, em parte obtido por escavação do maciço natural. Tem o nível de pleno armazenamento a 1352 m, o nível de máxima cheia a 1352,6 m e o nível mínimo de exploração a 1332,2 m.

O fundo da albufeira foi modelado através de duas plataformas, uma localizada a montante, à saída do canal de entrada da ribeira do Alecrim, à cota 1332 m, e outra a jusante, na zona da torre de tomada de água, à cota 1329 m, bem como uma zona de transição, de inclinação constante e igual a 2%, para compatibilizar as pendentes do sistema de drenagem sob a geomembrana e do fundo da albufeira, na zona inclinada. Os taludes de escavação têm inclinação variável entre 1(V):3(H) e 1(V):1,7(H), e uma banquetta intermédia, aproximadamente, à cota 1338 m.

2.2 – Barragem da Portela e sua albufeira

A BP situa-se na freguesia de Santo António da Serra, no Concelho de Machico. Tem o coroamento à cota 740 m, com um desenvolvimento de cerca de 140 m e uma largura de 6 m (Figura 2). Tem 19,5 m de altura máxima acima do talvegue do curso de água a jusante e 22 m acima da cota de fundação.



Fig. 2 – Vista geral da BP.

A barragem é constituída por um aterro de terra homogéneo, com um volume de 70 000 m³, formado por solos resultantes da desagregação de tufos vulcânicos. Dispõe de um tapete drenante no contacto da fundação com o maciço estabilizador de jusante. Os paramentos têm inclinação de 1(V):1,5(H).

A albufeira é alimentada pela ribeira do Passa Remos (afluente da margem direita da ribeira do Machico). O curso de água apresenta características marcadamente torrenciais, com forte declive longitudinal do talvegue e elevada capacidade de erosão.

A albufeira tem um volume de armazenamento de cerca de 87 800 m³, conseguido por escavação, e taludes inclinados de 1(V):1(H). O nível de pleno armazenamento situa-se à cota 738,5 m.

Tanto o paramento de montante da barragem, como a albufeira têm uma banquetta intermédia à cota 734 m.

3 – CONSTITUIÇÃO DOS SISTEMAS DE IMPERMEABILIZAÇÃO

Na BPU, o sistema de impermeabilização é constituído, do topo para a base, por um geocompósito de impermeabilização, formado por uma geomembrana de PVC, com 2,5 mm de espessura, termoacoplada a um geotêxtil de PP, não tecido, agulhado, com massa por unidade de área de 700 g/m². O geocompósito desempenha simultaneamente as funções de barreira e de

proteção contra o punçamento por partículas de dimensão controlada presentes na camada subjacente.

Na Figura 3 apresenta-se uma vista geral da obra antes e após a construção do sistema de impermeabilização.



Fig. 3 – Vista geral da obra: (a) antes da construção do sistema de impermeabilização; (b) após a construção do sistema de impermeabilização.

Na BP, o sistema de impermeabilização é constituído por uma geomembrana de PEAD, com 2,5 mm de espessura, com a função de barreira, e por um geotêxtil de PP, não tecido, agulhado, com massa por unidade de área de 600 g/m², com a função de proteção da geomembrana contra o punçamento.

Na Figura 4 apresenta-se uma vista geral da obra durante os trabalhos de terraplenagem e após a construção do sistema de impermeabilização da albufeira.



Fig. 4 – Vista geral da obra: (a) durante os trabalhos de terraplenagem; (b) após a construção do sistema de impermeabilização.

As maiores diferenças entre os sistemas de impermeabilização das duas barragens prendem-se com o tipo de geomembranas utilizadas (PVC, na BPU, e PEAD, na BP) e o seu acoplamento, ou não, ao geotêxtil de proteção contra o punçamento, unidos em fábrica, no caso do geocompósito de impermeabilização, ou aplicados em separado.

Segundo Vertematti (2004), teoricamente, os dois tipos de geomembranas (de PVC e de PEAD) apresentam vantagens e inconvenientes, apresentando-se no Quadro 1 os mais relevantes, sendo a sua opção definida pelas condições de utilização.

Quadro 1 – Vantagens e inconvenientes das geomembranas de PVC e PEAD (adaptado de Vertematti, 2004).

Geomembrana	Vantagens	Inconvenientes
PVC	<ul style="list-style-type: none"> - Elevada resistência mecânica - Elevada elasticidade - Elevada estabilidade térmica - Elevado atrito 	<ul style="list-style-type: none"> - Baixa resistência química - Fraco desempenho a temperaturas altas e baixas
PEAD	<ul style="list-style-type: none"> - Elevada resistência química - Elevada resistência à tração - Elevada resistência à deformação uniaxial - Bom desempenho a baixas temperaturas 	<ul style="list-style-type: none"> - Baixo atrito (GM lisas) - Grande suscetibilidade à fissuração (<i>stress cracking</i>) - Comportamento plástico - Baixa resistência à deformação multiaxial

Na BPU assumiu particular relevância a elevada elasticidade da geomembrana de PVC quando solicitada por condições extremas devido à ação do vento, por esvaziamentos frequentes da albufera e por deformações impostas devido à ocorrência de assentamentos na fundação da albufera, constituída, em alguns locais, por solos moles, ou de assentamentos diferenciais entre zonas mais rígidas e menor rigidez. Na BP as condições eram menos gravosas.

Relativamente à utilização de geocompósito de impermeabilização *versus* aplicação em separado de geomembrana e de geotêxtil, de acordo com o ICOLD (2010), o primeiro é vantajoso, pois apresenta menor suscetibilidade ao deslizamento devido ao acoplamento do geotêxtil à geomembrana, uma vez que será esta interface a mais desfavorável no seu dimensionamento.

4 – PRINCIPAIS DESAFIOS DE PROJETO

4.1 – Sistema de ancoragem dos geossintéticos

Um dos principais desafios que se colocaram ao projeto foi o dimensionamento do sistema de ancoragem dos geossintéticos para: (i) resistir à ação do vento; (ii) evitar o deslizamento sob ação do peso próprio; e (iii) evitar roturas de tração ou de arranque na zona de coroamento.

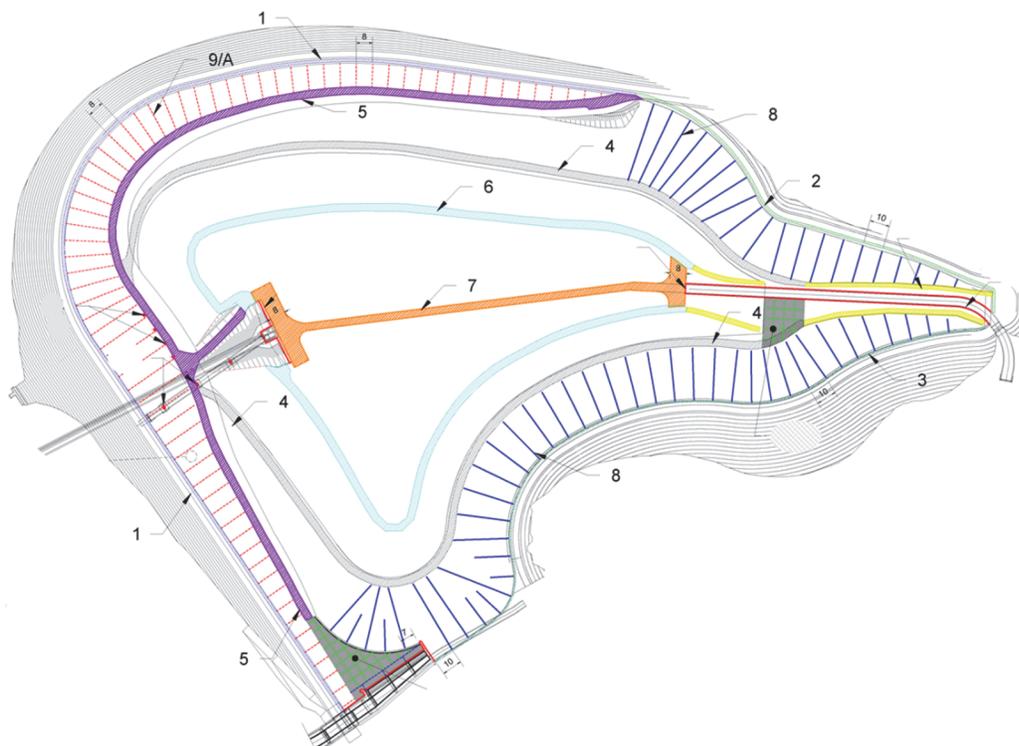
A ação do vento é importante durante a fase de instalação, onde podem ser adotadas soluções de amarração provisórias, mas é relevante sobretudo durante a fase de exploração especialmente aquando do esvaziamento da albufera. O vento pode originar ações de sucção suficientes para provocar o levantamento dos geossintéticos, o rasgamento, ou mesmo, o arrancamento dos geossintéticos e dos seus pontos de fixação.

Na BPU, em face da ação do vento da região, verificou-se que não seria possível garantir a segurança e a durabilidade da solução com uma configuração tradicional das ancoragens, localizadas essencialmente na crista, em banquetas se existentes e na base de taludes, pelo que se adotou uma configuração bastante flexível, essencialmente constituída por ancoragens ao longo dos taludes, sendo o seu espaçamento calculado de modo a verificar os estados limites relevantes para o sistema. Deste modo, o sistema de ancoragem dos geossintéticos concebido inclui os seguintes elementos:

- valas perimetrais em betão no coroamento da barragem e na crista dos taludes da albufera;
- balastros materializados por lajes de betão colocados nas banquetas intermédias, no pé dos taludes de escavação, no pé dos taludes do fundo da albufera, e no alinhamento central do fundo da albufera;
- fixações mecânicas constituídas por chapas metálicas colocadas no paramento de montante da barragem e nos taludes superiores da albufera; no paramento de montante da barragem, as chapas metálicas foram fixadas à camada de betão projetado através de ancoragens mecânicas expansivas e, nos taludes superiores da albufera, foram fixadas a valas de

ancoragem em betão, construídas segundo a linha de maior declive antes da colocação dos geossintéticos, através de ancoragens químicas.

Na Figura 5 apresenta-se uma planta da barragem do Pico da Urze e sua albufeira com o sistema de ancoragens.



Legenda

- 1 – Vala trapezoidal em betão no coroamento da barragem
- 2 – Vala retangular (1m×0,5m) em betão na crista dos taludes da albufeira
- 3 – Vala retangular (0,8m×0,5m) em betão na crista dos taludes da albufeira
- 4 – Balastro na banquetta intermédia à cota 1338 m
- 5 – Balastro na banquetta intermédia a cota variável (mínimo 1335 m)
- 6 – Balastro no pé do talude
- 7 – Balastro no alinhamento central do fundo da albufeira
- 8 – Fixações mecânicas às valas de betão (taludes superiores da albufeira)
- 9/A – Fixações mecânicas ao betão projetado (paramento de montante da barragem)

Fig. 5 – Planta da barragem do Pico da Urze e sua albufeira com o sistema de ancoragens (adaptado de CARPI, 2019).

É de salientar que, nos taludes com ancoragens segundo a linha de maior declive, foram também adotadas ancoragens no topo e na base, constituindo elementos redundantes que reforçam a segurança, mas que não foram contabilizados no dimensionamento.

O dimensionamento dos elementos de ancoragem foi realizado adotando coeficientes de segurança globais mínimos, entre as forças resistentes e as forças atuantes, de 1,5 e de 1,1,

respetivamente, para velocidades do vento de 90 km/h, para o vento habitual, e de 150 km/h, para o vento excecional (CARPI, 2018).

No projeto, foram verificados os seguintes estados limites últimos:

- tração do geocompósito;
- corte das soldaduras;
- levantamento das ancoragens;
- deslizamento das ancoragens;
- derrubamento das ancoragens.

De entre as verificações mencionadas, salienta-se o cálculo do levantamento do geocompósito de impermeabilização devido à sucção provocada pela ação do vento, o qual foi realizado com base na metodologia proposta por Giroud (1995). Foi definido como levantamento máximo admissível para o geocompósito o valor de 2 m, para a ocorrência de um vento excecional (CARPI, 2019).

Com base no valor do levantamento definido, foram calculados os espaçamentos a adotar entre as chapas metálicas nos taludes superiores de escavação da albufeira (entre a crista e a banquetta à cota 1338 m) e no paramento de montante da barragem (entre o coroamento e a banquetta a cota variável), os quais foram de 10 m e de 8 m, respetivamente.

Na BP, em face da ação do vento da região e das dimensões da obra, o sistema de ancoragens dos geossintéticos concebido é constituído pelos seguintes elementos (Figura 6):

- valas de ancoragem em betão, de forma retangular, no coroamento da barragem e na crista dos taludes (à cota 740 m);
- vala de ancoragem em betão, forma trapezoidal, na banquetta intermédia da barragem (à cota 734 m).

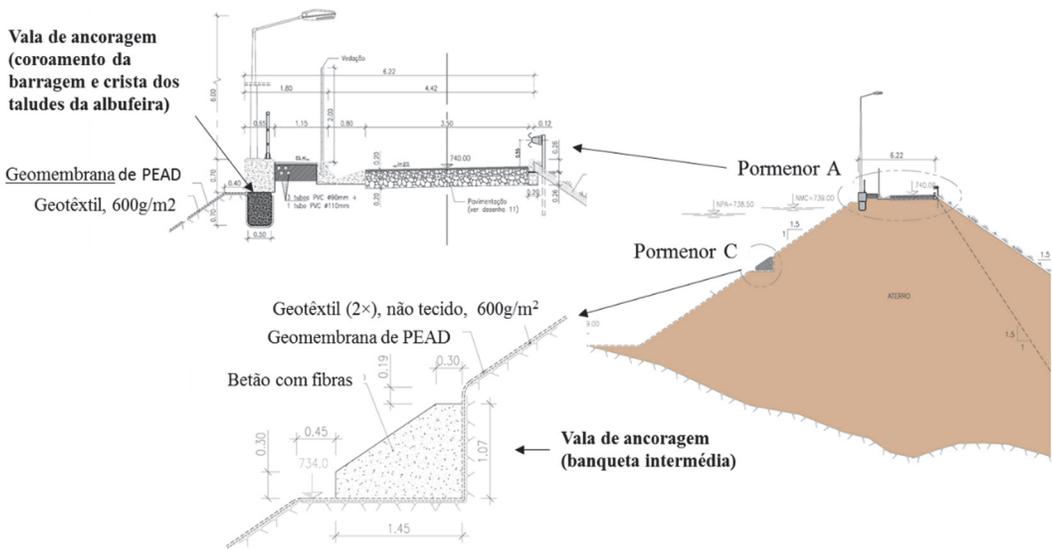


Fig. 6 – Sistema de ancoragens na barragem da Portela.

O dimensionamento dos elementos de ancoragem foi realizado com base na verificação da sua estabilidade face à ação de um vento com velocidade de 80 km/h. Foram verificados os seguintes estados limites últimos:

- levantamento da geomembrana no fundo da albufeira vazia;
- levantamento da geomembrana no fundo da albufeira, considerando um nível mínimo de exploração à cota 728,5 m (0,5 m acima da cota do fundo da albufeira);
- tração da geomembrana.

Os coeficientes de segurança de globais obtidos foram, respetivamente, 1,9; 16,0; e 15,4.

4.2 – Requisitos da camada de apoio dos geossintéticos

O punçoamento dos materiais da camada de apoio sob os geossintéticos, sobretudo, sob a geomembrana/geocompósito de impermeabilização constitui uma das maiores causas de danos, comprometendo o desempenho dos sistemas de impermeabilização.

A geomembrana/geocompósito de impermeabilização deve ser colocada sobre uma superfície regular, isenta de fragmentos rochosos, lama, detritos, vegetação, fissuras por secagem excessiva, exsurgências, zonas instáveis e materiais contundentes. Quando as características da camada de apoio não cumprem os requisitos referidos, devem ser desenvolvidas especificações de projeto que garantam a integridade das barreiras.

Na albufeira da BPU, o paramento de montante da barragem era de enrocamento e a superfície dos taludes resultantes da escavação do maciço e do fundo da albufeira era constituída por zonas rochosas, com arestas vivas, e zonas de solos desagregados ou moles, bastante irregular com cavidades, protuberâncias e desníveis.

Para garantia de um apoio contínuo do geocompósito de impermeabilização e fixação das chapas metálicas das ancoragens, no paramento de montante da barragem foi colocada uma camada de betão projetado, com 0,10 m de espessura, devidamente armado com uma geogrelha.

Para proteção do geocompósito de impermeabilização contra o punçoamento, foram definidos os seguintes requisitos de projeto (CARPI, 2018):

- todos os materiais com arestas vivas, ou outros objetos que causassem protuberâncias superiores a 20 mm, deviam ser removidos;
- as cavidades, ou desníveis, com dimensões superiores a 20 mm, deviam ser preenchidos com solo, devidamente compactado;
- no paramento de montante da barragem, sobre a camada de betão projetado, e junto à torre de tomada de água, foi requerida a colocação de um geotêxtil com massa por unidade área de 1000 g/m², o qual permitia adicionalmente a drenagem de eventuais fugas através do geocompósito de impermeabilização.

Na albufeira da BP, a superfície de apoio constituída pelo paramento de montante da barragem e obtida pela escavação das formações geológicas ocorrentes, era de caráter terroso, não sendo exetável uma presença, significativa, de fragmentos rochosos, com arestas vivas. A necessidade de proteção da geomembrana resultava de se tratar de uma geomembrana de PEAD, com baixa resistência à fissuração (*stress cracking*). Pequenas deformações na geomembrana causadas, por exemplo, por pequenas irregularidades na superfície de apoio, podem induzir tensões na geomembrana (inferiores à tensão de cedência) que conduzem à sua fissuração a longo prazo.

No projeto da BP foi proposto um geotêxtil, com resistência ao punçoamento superior a 7,8 kN e 600 g/m² de massa por unidade de área, para proteção da geomembrana. A colocação de um geotêxtil sobre a superfície de apoio é vantajosa dado que propicia uma superfície ainda mais regular.

4.3 – Sistema de drenagem subsuperficial

Para captação e drenagem da água proveniente do maciço onde se inserem as albufeiras, foram concebidos sistemas de drenagem sob os sistemas de impermeabilização.

Na BPU, o sistema de drenagem sob o geocompósito de impermeabilização é constituído pelos seguintes elementos:

- uma vala de drenagem no pé dos taludes superiores de escavação, na banquetta à cota 1338 m;
- sete descidas de talude, para condução da água para a vala de drenagem do pé dos taludes de escavação no fundo da albufeira;

- uma vala de drenagem perimetral no pé dos taludes de escavação no fundo da albufeira;
- um conjunto de valas de drenagem de ligação da vala de drenagem perimetral do fundo da albufeira à vala de drenagem central;
- uma vala de drenagem central de recolha dos caudais das restantes valas de drenagem e de ligação ao tapete drenante na base do aterro da barragem;
- diversas máscaras drenantes, executadas em zonas com ressurgências de água, para captação dos respetivos caudais e sua condução para as valas de drenagem;
- geotêxteis drenantes, instalados em zonas com humidade.

Na Figura 7 apresenta-se uma planta com a configuração das valas de drenagem subsuperficiais na banqueta intermédia à cota 138m e no fundo da albufeira.

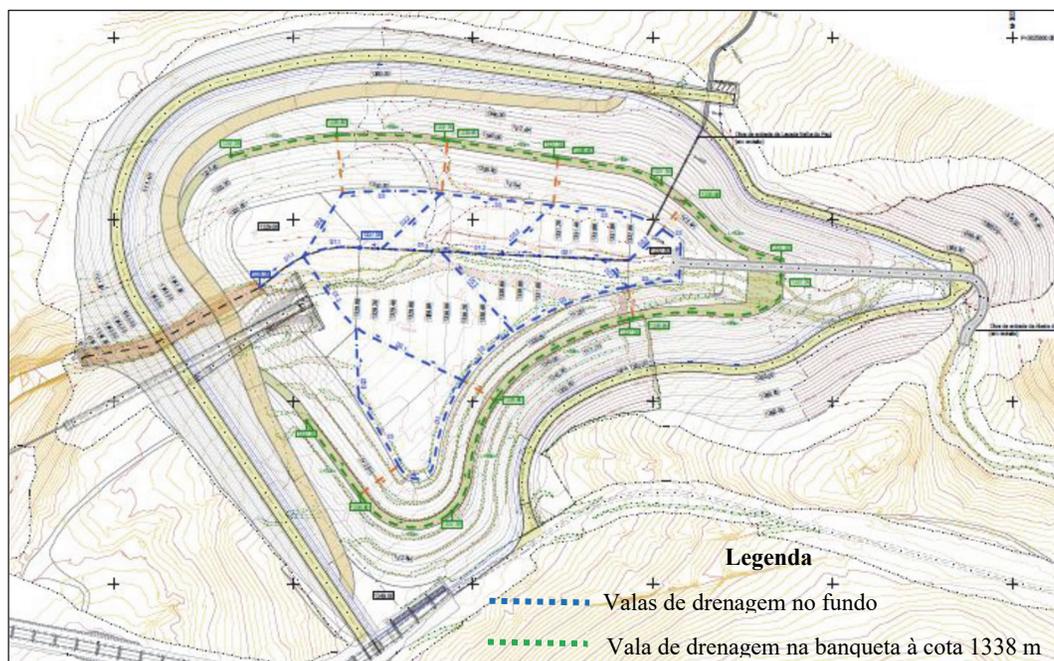


Fig. 7 – Planta com o sistema de drenagem subsuperficial da BPU (adaptado de TPF, 2019).

Na BP, o sistema de drenagem subsuperficial inclui cinco setores independentes, que permitem a leitura individualizada do caudal percolado em cada um dos setores, com vista à fácil identificação dos locais onde possam ocorrer eventuais fugas devido a danos na geomembrana e promover a sua rápida reparação.

O sistema de drenagem é formado tubos de PVC com 110 mm de diâmetro, corrugados e perfurados, dispostos no interior das valas de drenagem no fundo da albufeira. Os tubos de PVC são envolvidos em material granular compactado (diâmetro médio de 4 cm), que por sua vez se encontra envolvido em geotêxtil de filtragem.

Os tubos de PVC perfurados estão ligados a tubos de PVC lisos, com 160 mm, que transportam a água. No extremo de montante do circuito de tomada de água e descarga de fundo, os tubos de recolha são integrados para efeitos de controlo.

Em termos gerais, o sistema de drenagem integra os seguintes elementos:

- uma vala de drenagem perimetral no pé dos taludes de escavação no fundo da albufeira;
- um conjunto de valas de drenagem, dispostas em espinha no fundo da albufeira, ligadas a uma vala de drenagem perimetral do fundo da albufeira e à vala de drenagem central;

- descidas de talude, para condução da água para a vala de drenagem do pé dos taludes de escavação no fundo da albufeira;
- valas de drenagem central, para recolha dos caudais das restantes valas de drenagem e de ligação ao tapete drenante no contacto da fundação com o maciço estabilizador de jusante.

Na Figura 8 apresenta-se uma planta com a configuração das valas de drenagem subsuperficiais no fundo da albufeira da BP.

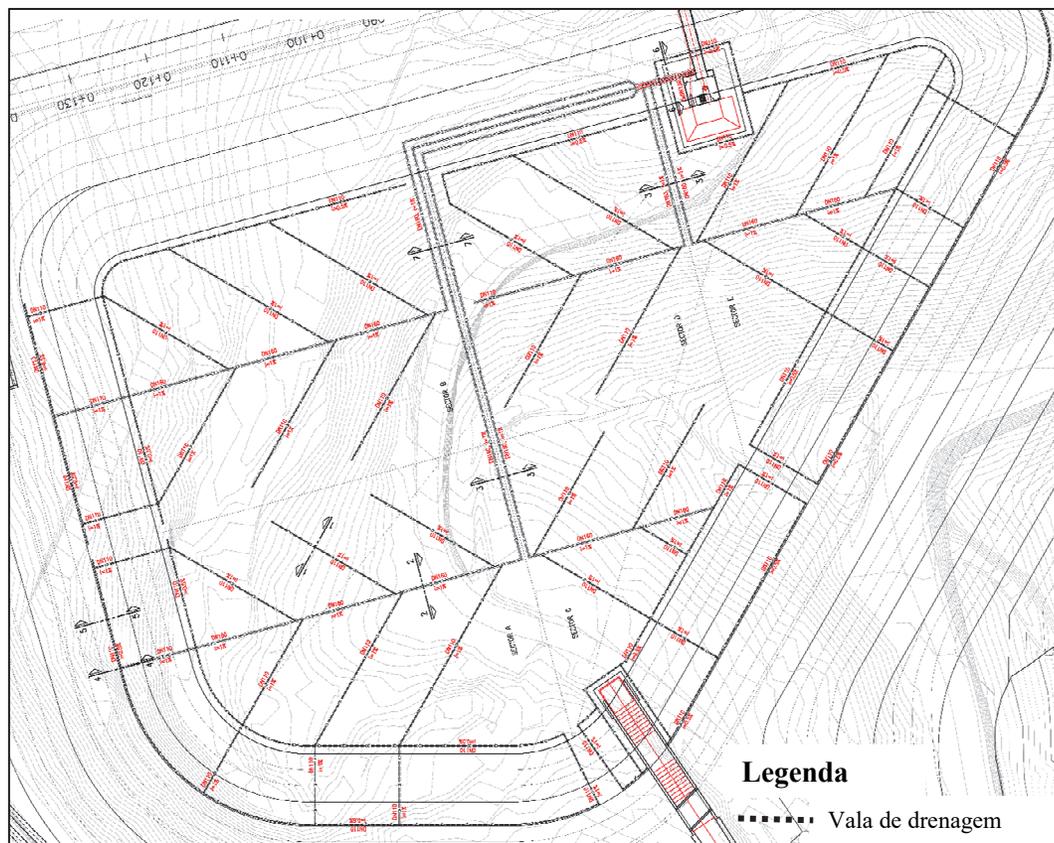


Fig. 8 – Planta com o sistema de drenagem subsuperficial da BP.

5 – PRINCIPAIS DESAFIOS DE CONSTRUÇÃO

5.1 – Sistema de ancoragens dos geossintéticos

Na BPU, o primeiro aspeto a salientar sobre a construção do sistema de ancoragens prende-se com as fixações mecânicas. Nos taludes superiores de escavação da albufeira, as chapas metálicas colocadas sobre o geocompósito de impermeabilização foram ligadas a valas de betão, construídas segundo a linha de maior declive. Estas valas interessaram o talude superior, entre a crista e a banquetta intermédia à cota 1338 m, e foram executadas com um espaçamento de 10 m (Figura 9).

As chapas metálicas foram fixadas às valas em betão por parafusos e buchas químicas, conforme ilustrado na Figura 10.



Fig. 9 – Vista das valas de betão executadas segundo a linha de maior declive nos taludes superiores.



Fig. 10 – Exemplo da fixação das chapas metálicas às valas de betão executadas segundo a linha de maior declive na parte superior dos taludes da albufeira.

No paramento de montante da barragem, as chapas metálicas foram ligadas à camada de betão projetado de 0,10 m espessura, devidamente armado com geogrelha, através de parafusos espaçados de 0,20 m. As chapas metálicas distam 8 m entre si.

Para assegurar a estanquidade do sistema de impermeabilização, as chapas metálicas foram cobertas com uma faixa de geomembrana (Figura 11).



Fig. 11 – Exemplo da colocação da faixa de sobreposição sobre as chapas metálicas no paramento de montante da barragem.

A construção das valas de ancoragem na crista dos taludes da albufeira apresentou algumas dificuldades. Na margem direita, observou-se que os materiais se desagregavam facilmente, continham fragmentos rochosos com dimensões e características incompatíveis com a colocação do geocompósito de impermeabilização e, nem sempre, era respeitada a distância à crista do talude definida, de 0,5 m (Figura 12a). Estes problemas foram solucionados mediante a estabilização da vala de ancoragem com betão, colocando cofragem na face junto ao talude (Figura 12b) e aumentando a distância entre vala de ancoragem e a crista do talude, para 1,0 e 1,5 m, nos locais onde era previsível a existência de material rochoso facilmente desagregável.



Fig. 12 – Vista da vala de ancoragem na crista dos taludes da albufeira: (a) antes da reparação; (b) após a reparação.

Na BP, a execução do sistema de ancoragens, de um modo geral, não levantou grandes dificuldades. Na Figura 13 apresenta-se a execução da vala de ancoragem à cota 734 m.

5.2 – Preparação da superfície de apoio

Na BPU, constatou-se que nem sempre era possível cumprir os critérios de aceitação definidos no projeto, sobretudo nos taludes superiores da albufeira. Eram visíveis locais onde a superfície era muito irregular, com zonas rochosas protuberantes e zonas mais deformáveis.



Fig. 13 – Vista da execução da vala de ancoragem na banquetta intermédia da albufeira à cota 734 m.

Dependendo do incumprimento e da localização e inclinação da superfície, foi adotada uma das seguintes medidas (Figura 14):

- colocação de uma camada de betão projetado, em zonas de rocha fortemente fraturada;
- colocação de geotêxtil de proteção com massa por unidade área de 1000 g/m^2 , em superfícies de maior irregularidade e com partículas de dimensões superiores a 60 mm ;
- compactação com auxílio da pá da giratória, em superfícies de menor irregularidade;
- regularização com meios manuais, em zonas com cavidades e/ou com fragmentos rochosos contundentes (preenchimento de cavidades e remoção de fragmentos rochosos);
- passagem com o cilindro de rasto liso (sem vibração), em zonas de menor inclinação dos taludes.



Fig. 14 – Exemplos de regularização da superfície de apoio em curso.

5.3 – Ligações entre o geocompósito de impermeabilização e as estruturas de betão na BPU

Na BPU, a execução das ligações entre o geocompósito de impermeabilização e as estruturas de betão existentes no interior da albufeira (descarregador de cheias, torre de tomada de água e respetivos muros ala, Canal de Entrada da Ribeira do Alecrim e pilares do passadiço) colocou também alguns desafios. Para acomodar os eventuais assentamentos do solo junto às estruturas de betão, o geocompósito devia ser colocado com uma folga (dobra), localizada na zona de transição entre o solo (material que está sujeito a sofrer assentamentos no futuro) e a estrutura, tal como ilustrado, a título de exemplo, na Figura 15.

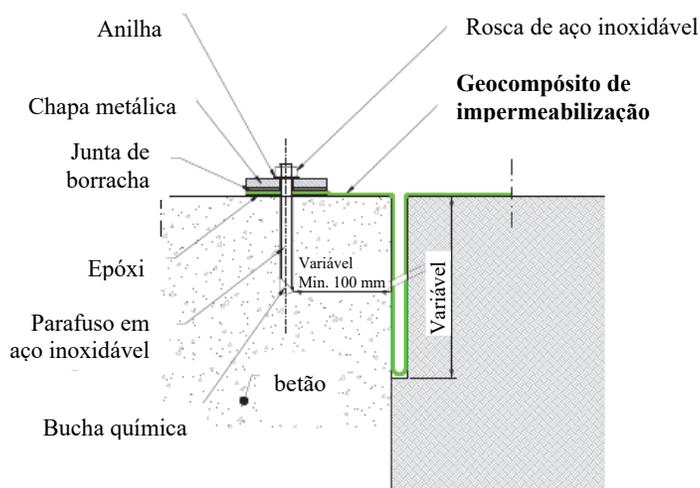


Fig. 15 – Exemplo da ligação entre o geocompósito de impermeabilização e torre de tomada de água (CARPI, 2019).

Durante a execução da ligação entre o geocompósito de impermeabilização e o canal de entrada da ribeira do Alecrim na margem direita da albufeira, verificou-se que a furação se encontrava subida e tinha sido adicionada uma camada de solo junto ao canal, onde estava prevista a dobra de geocompósito. Também, ao longo do canal, o contacto entre a fundação e o solo era irregular, em resultado de a fundação ter sido inadequadamente betonada contra o solo. O LNEC preconizou a remoção do excesso de betão, uma vez que eventuais assentamentos diferenciais não ocorriam no contacto entre a face da fundação e o solo, mas sim no contacto entre a face da fundação irregular e o solo. O projetista, evocando que a fundação do canal era rochosa, não sendo expetável a ocorrência de assentamentos diferenciais significativos, propôs a inserção de uma membrana adicional, de baixo atrito, sob o geocompósito do sistema de impermeabilização, com vista a minimizar o atrito entre o geocompósito e o material de fundação, permitindo ao geocompósito acomodar os eventuais assentamentos que possam vir a ter lugar na transição entre o betão de fundação e o terreno adjacente. Dadas as condições prevaletentes na obra e o prazo apertado para a conclusão da mesma, foi adotada esta solução.

5.4 – Implementação de procedimentos de garantia de qualidade de instalação

5.4.1 – Planos de garantia de qualidade de instalação dos geossintéticos

Os procedimentos de garantia de qualidade de instalação dos geossintéticos nas barragens do Pico da Urze e da Portela foram previamente definidos em Plano de Garantia da Qualidade da Instalação, elaborados pelo LNEC antes do início da instalação dos geossintéticos.

Os Planos têm por objetivo guiar as atividades dos diferentes intervenientes, estabelecer recomendações construtivas e de controlo da instalação, com vista a atingir a máxima qualidade construtiva.

As atividades de garantia de qualidade realizadas pelo LNEC decorreram em simultâneo com as atividades de controlo de construção (autocontrolo) realizadas pelo instalador, complementando-se.

De entre as atividades desenvolvidas, destacam-se as seguintes:

- supervisão dos procedimentos de receção e aceitação dos geossintéticos;
- supervisão dos procedimentos de transporte, manuseamento e armazenamento dos geossintéticos;
- supervisão dos procedimentos de instalação dos geossintéticos e eventual reparação dos mesmos após colocação;
- realização de ensaios destrutivos sobre as soldaduras do geocompósito de impermeabilização;
- verificação dos resultados dos ensaios não destrutivos de autocontrolo do instalador; e
- realização de observações/inspeções, com vista a avaliar a qualidade da instalação dos geossintéticos.

Das atividades referidas destacam-se, neste artigo, as relacionadas com a garantia de qualidade das uniões entre rolos adjacentes de geocompósito de impermeabilização/geomembrana, tipicamente designadas por soldaduras.

A qualidade das soldaduras é determinante para assegurar o bom desempenho do sistema de impermeabilização e deve ser avaliada em termos de resistência mecânica e de estanquidade.

Neste âmbito, as atividades de garantia de qualidade realizadas pelo LNEC, consistiram em:

- colaboração na definição dos critérios de aceitação/rejeição das soldaduras;
- realização de ensaios destrutivos *in situ* e em laboratório: ensaios de arranque (*peel test*) e ensaios de corte (*shear test*), para avaliar a qualidade das soldaduras em termos de resistência mecânica, segundo as frequências especificadas nos respetivos projetos;
- verificação dos resultados dos ensaios não destrutivos do instalador, para avaliar a qualidade das soldaduras em termos de estanquidade, estes ensaios são realizados em todas as soldaduras, sem exceção, e em todo o comprimento.

5.4.2 – Critérios de aceitação/rejeição das soldaduras

No que se refere à resistência mecânica, os critérios de aceitação/rejeição das soldaduras definidos para as barragens do Pico da Urze e da Portela basearam-se nos resultados dos ensaios de arranque e de corte realizados segundo a norma ASTM D 6392.

Nos Quadros 2 e 3 sintetizam-se os critérios de aceitação/rejeição das soldaduras definidos, respetivamente, para a BPU e para a BP, em termos de resistência mecânica. Estes critérios foram adotados tanto nos ensaios de pré-qualificação, realizados diariamente sobre soldaduras experimentais, para confirmação se equipamento funciona adequadamente e se encontra

Quadro 2 – Critérios de aceitação/rejeição para a resistência mecânica das soldaduras do geomembrana de PVC (geocompósito de impermeabilização) na Barragem do Pico da Urze.

Ensaio	Norma	Soldadura dupla (termofusão)	Soldadura simples (manuais, ar quente)
Arranque	ASTM D6392	≥ 11 kN/m	≥ 8 kN/m
Corte		≥ 22 kN/m	≥ 18 kN/m

Quadro 3 – Critérios de aceitação/rejeição para a resistência mecânica das soldaduras de geomembrana de PEAD na Barragem da Portela.

Ensaio	Norma	Soldadura dupla (termofusão)	Soldadura simples (manuais, extrusão)
Arranque	ASTM D6392	$\geq 28,8$ kN/m	$\geq 24,8$ kN/m
Corte		$\geq 38,0$ kN/m	≥ 38 kN/m

devidamente ajustado às condições climáticas, bem como nos ensaios realizados sobre as amostras retiradas das soldaduras realizadas *in situ*.

Como se pode observar nos quadros, os valores mínimos requeridos para a resistência ao arranque e ao corte foram diferentes, apesar das geomembranas empregues nas duas obras apresentarem a mesma espessura. Essa diferença decorre de se tratarem de dois tipos de geomembranas: PVC, na BPU, e PEAD, na BP.

Relativamente à estanquidade, os critérios de aceitação/rejeição definidos para as barragens do Pico da Urze e da Portela basearam-se em ensaios e/ou normas de ensaio diferentes. As soldaduras duplas foram avaliadas com base nos resultados dos ensaios de pressão de ar, segundo as normas ASTM D7177 e ASTM D5820, respetivamente, na BPU e na BP. As soldaduras simples (manuais) foram ensaiadas pelo método da haste metálica (norma ASTM D4437), na BPU, e pelo método elétrico (norma ASTM D 6365), na BP, conforme resumido no Quadro 4 e no Quadro 5. A utilização de ensaios diferentes e/ou normas diferentes nas duas obras prendeu-se com a diferença entre as geomembranas (PVC, na BPU, e PEAD, na BP).

5.4.3 – Ensaios de arranque e de corte

Na BPU, os ensaios de arranque e de corte sobre as soldaduras duplas foram, inicialmente, realizados com uma frequência de 1/150 m de soldadura, conforme o especificado no projeto. Esta frequência foi ajustada, de acordo com o preconizado no Plano de Garantia de Qualidade de Instalação dos Geossintéticos, para 1/200 m de soldadura, após a realização de, aproximadamente, 35% dos ensaios previstos com resultados satisfatórios.

Nesta obra, foram ensaiadas 196 amostras. As amostras foram retiradas em locais não críticos, nomeadamente, no princípio ou no fim da soldadura, com vista à diminuição do número de remendos a efetuar.

Os resultados dos ensaios não cumpriram os critérios de aceitação/rejeição indicados no Quadro 2 em 13,7% das amostras ensaiadas (27 amostras). Estes resultados foram associados a dois problemas. O primeiro envolveu 21 amostras retiradas de soldaduras localizadas no fundo da albufeira (do lado da margem esquerda), e interessou os resultados do ensaio de arranque. Posteriormente, verificou-se que este problema envolvia um maior número de soldaduras, num comprimento total de aproximadamente 2 000 m. O segundo reporta-se a 6 amostras, retiradas nos taludes localizados abaixo do paramento de montante da barragem e no pé do talude inferior, e interessou os resultados do ensaio de corte.

Quanto às soldaduras localizadas no fundo da albufeira (todas efetuadas com a mesma máquina de soldar e pelo mesmo operador), para corrigir o problema, o instalador propôs efetuar dois tipos de reparações, dependendo se o problema interessava apenas uma parte ou a totalidade da soldadura. No caso de o problema interessar apenas parte da soldadura, a reparação consistia na colocação de um remendo sobre essa parte da soldadura. Se o problema interessasse toda a soldadura, a reparação era realizada através de uma faixa de sobreposição, com 0,2 m de largura, colocada sobre a totalidade

Quadro 4 – Critérios de aceitação/rejeição em termos de estanquidade para as soldaduras de geomembrana de PVC na Barragem do Pico da Urze.

Ensaio	Norma	Condições de ensaio	Condições de aceitação
Pressão de ar (soldadura dupla)	ASTM D7177	<ul style="list-style-type: none"> – pressão de ensaio: 2 bar – tempo de ensaio: 5 min. – soldadura integralmente pressurizada 	<ul style="list-style-type: none"> – pressão final admissível: 1,8 bar – saída do ar pela extremidade da soldadura, no lado oposto àquele em que se inseriu a agulha, após a remoção da selagem
Haste metálica (soldaduras simples)	ASTM D4437	<ul style="list-style-type: none"> – passagem da haste metálica ao longo da totalidade da soldadura 	<ul style="list-style-type: none"> – soldadura contínua – ausência de “bocas de peixe” – penetração da haste metálica na soldadura inadmissível

Quadro 5 – Critérios de aceitação/rejeição em termos de estanquidade para as soldaduras de geomembrana de PEAD na Barragem da Portela.

Ensaio	Norma	Condições de ensaio	Condições de aceitação
Pressão de ar (soldaduras duplas)	ASTM D5820	<ul style="list-style-type: none"> – pressão de ensaio: 2-3 bar – tempo de ensaio: 5 min. – soldadura integralmente pressurizada 	<ul style="list-style-type: none"> – pressão final admissível: 10% da pressão inicial – saída do ar pela extremidade da soldadura, no lado oposto àquele em que se inseriu a agulha, após a remoção da selagem/realização de furo na extremidade da soldadura
Elétrico (soldaduras simples)	ASTM D6365	<ul style="list-style-type: none"> – passagem da sonda elétrica sobre a totalidade da soldadura 	<ul style="list-style-type: none"> – soldadura contínua – emissão de um som agudo e/ou de uma fâsca: inadmissível

da soldadura. Esta última medida não chegou a ser aplicada na totalidade das soldaduras por não haver geomembrana (faixa) aprovacionada para efetuar as faixas de sobreposição em tempo útil.

Relativamente às soldaduras cujas resistências ao corte apresentaram resultados insatisfatórios, procedeu-se à comparação das resistências ao corte obtidas nos ensaios com os valores das tensões de corte de cálculo induzidas pela sucção, calculadas considerando as ações do vento (para velocidades de 90 e de 150 km/h). Verificou-se que as primeiras eram superiores, pelo que as soldaduras não foram reparadas ou substituídas.

Na BPU, os ensaios de arranque e de corte sobre as soldaduras duplas foram realizados com uma frequência de 1/300 m de soldadura, segundo o especificado no projeto. Esta frequência de ensaios foi estabelecida com base na maior experiência dos operadores na realização deste tipo de soldaduras em geomembranas de PEAD.

Na BP, foram colhidas 10 amostras. Destas, 4 apresentaram valores de resistência ao corte inferiores aos mínimos definidos nos critérios de aceitação/rejeição. De acordo com definido no Planos de garantia de qualidade de instalação dos geossintéticos desta barragem, se os resultados dos ensaios destrutivos não satisfizessem os critérios de aceitação/rejeição, o instalador podia optar por fazer a soldadura entre os locais de amostras cujos resultados foram satisfatórios, ou refazer ensaios de autocontrolo em amostras retiradas a uma distância mínima de 3 m, para cada lado do local da amostragem cujos resultados não cumpriram os critérios de aceitação/rejeição. Caso as

segundas amostras apresentassem resultados conformes, deveria a soldadura ser rejeitada no interior da zona limitada por aquelas amostras. Se, pelo contrário, os resultados não fossem satisfatórios seria repetido o mesmo procedimento.

No que diz respeito às amostras cujos resultados foram insatisfatórios, foram retiradas novas amostras para ensaio a uma distância de 3 m, para cada lado do local da amostragem. Os resultados obtidos para essas amostras continuaram a não cumprir os critérios de aceitação/rejeição definidos. O instalador optou por substituir todas as soldaduras cujos resultados foram insatisfatórios.

5.4.4 – Ensaio não destrutivo (pressão de ar, haste metálica e método elétrico)

Os ensaios não destrutivos foram realizados em todas as soldaduras, conforme anteriormente mencionado. No caso da BPU, nos locais em que os ensaios de pressão de ar (soldaduras duplas) e de haste metálica (soldaduras simples), apresentaram resultados insatisfatórios, procedeu-se à reparação das soldaduras, geralmente, mediante a colocação de um remendo. As soldaduras reparadas foram reensaiadas, assim como as soldaduras resultantes da colocação dos remendos. Os resultados finais cumpriram os critérios de aceitação/rejeição estabelecidos na totalidade das soldaduras.

Procedimento semelhante foi adotado na BP, quando os resultados dos ensaios de pressão de ar, realizados nas soldaduras duplas por termofusão, e dos ensaios elétricos (*spark test*), efetuados nas soldaduras de extrusão (remendos), não cumpriram os critérios de aceitação/rejeição definidos, as soldaduras foram reparadas e reensaiadas, tendo os resultados finais sido satisfatórios para todas as soldaduras.

6 – CONCLUSÕES

Neste artigo, foram descritas as características gerais das barragens do Pico da Urze e da Portela e suas albufeiras. Foram, também, apresentados os principais desafios enfrentados durante o projeto e/ou a construção dos sistemas de impermeabilização dessas obras, incluindo o dimensionamento e construção do sistema de ancoragens dos geossintéticos, a definição dos requisitos e a preparação da camada de apoio dos geossintéticos e a implementação de procedimentos de garantia de qualidade de instalação desses materiais. Apesar de se localizarem na mesma Região e em cenários geológicos semelhantes, apresentam características muito diferenciadas devido às condições locais prevalentes, pelo que foram adotados sistemas muito diferentes em termos do tipo de geossintéticos e de sistemas de ancoragem.

A utilização de geossintéticos em sistemas de impermeabilização é uma solução aplicável a diversos tipos de obras, para além das barragens e suas albufeiras, como, por exemplo, túneis ou aterros de resíduos. Independentemente do tipo de material e da matéria-prima que o constitui, é importante selecionar o(s) geossintético(s) que melhor atenda(m) às necessidades específicas de cada obra. A conceção geral da obra, o dimensionamento dos geossintéticos e a especificação dos seus requisitos de desempenho, e a qualidade da sua instalação são fatores determinantes para garantir as condições de segurança, de funcionalidade e de durabilidade do sistema de impermeabilização.

7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM D 4437-18 (2018). *Standard practice for nondestructive testing (NDT) for determining the integrity of seams used in joining flexible polymeric sheet geomembranes*. American Society for Testing Materials, USA.

ASTM D 5820-18 (2018). *Standard practice for pressurized air channel evaluation of dual seamed geomembranes*. American Society for Testing Materials, USA.

- ASTM D 6365-18 (2018). *Standard practice for nondestructive testing of geomembrane seams using the spark test*. American Society for Testing and Materials, USA.
- ASTM D 6392-18 (2018). *Standard test method for determining the integrity of nonreinforced geomembrane seams produced using thermo-fusion methods*. American Society for Testing Materials, USA.
- ASTM D 7177 -15 (2015). *Standard specification for air channel evaluation of polyvinyl chloride (PVC) dual track seamed geomembranes*. American Society for Testing Materials, USA.
- CARPI (2018). *Pico da Urze reservoir. Wind uplift and stability calculation*. Technical note.
- CARPI (2019). *Waterproofing of Pico da Urze reservoir with CARPI geomembrane system*. Design Statement (revision 3).
- Giroud, J.P. (1995). *Uplift of geomembranes by wind*. Geosynthetics International, Vol. 2, No. 6, pp. 897-952. <https://doi.org/10.1680/gein.2.0042>
- ICOLD (2010). *Geomembrane sealing systems for dams*. Bulletin 135 of the International Commission on Large Dams, Paris, France.
- TPF (2019). *Ampliação do Aproveitamento Hidroelétrico da Calheta. Barragem do Pico da Urze*.
- Vertematti, J. C. (2004). *Manual Brasileiro de Geossintéticos*. 6 ed. São Paulo: Edgard Blucher.