



7, 8 e 9
Março 2018
ÉVORA
Évora Hotel

GESTÃO DOS
RECURSOS HÍDRICOS:
**NOVOS
DESAFIOS**

REFORÇO DA SEGURANÇA EM SITUAÇÃO DE CHEIA DE BARRAGENS DE ATERRO COM RECURSO A BETÃO COMPACTADO POR CILINDROS

Ana ROSA¹; Jorge MATOS²; João MARCELINO³

¹ ENGIDRO-Estudos de Engenharia, Lda., ana.rosa@engidro.pt

² CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, jorge.matos@tecnico.ulisboa.pt

³ Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Geotecnia, marcelino@lnec.pt

Resumo

A evolução do conhecimento relativamente ao cálculo do caudal de máxima cheia e a alteração das condições das bacias hidrográficas de várias barragens que se encontram atualmente em operação, leva a que algumas das barragens mais antigas não tenham capacidade para escoar o caudal de dimensionamento, em condições de segurança, sem que ocorra o seu galgamento. No caso de as barragens em questão serem de aterro, o galgamento pode levar à ocorrência de graves fenómenos de erosão e, eventualmente, à rotura da barragem.

A resolução deste problema pode passar pela construção de um descarregador de cheias de emergência, elevação da cota do coroamento, limitações à exploração, proteção do paramento de jusante, ou por uma conjugação destas soluções. Este tipo de intervenções é usualmente bastante oneroso, nomeadamente em pequenas barragens. Em alternativa às abordagens tradicionais, o recurso à proteção do paramento de jusante usando betão compactado por cilindros (BCC) traduz-se num processo célere, e que não implica o esvaziamento da albufeira.

Neste trabalho, apresenta-se um estudo de grandezas hidráulicas relevantes do escoamento deslizante sobre turbilhões em descarregadores em degraus com declive típico do paramento de jusante de barragens de aterro. Para além de elementos para o dimensionamento hidráulico, apresentam-se também as características principais deste método para o reforço da segurança, assim como exemplos de aplicação e experiência de funcionamento.

Apresenta-se por fim um estudo preliminar da aplicação desta técnica a uma barragem de aterro, com o dimensionamento da solução para este caso.

Palavras-chave: barragem de aterro, proteção contra o galgamento, betão compactado por cilindros, escoamento deslizante sobre turbilhões, reforço de segurança hidráulica.



7, 8 e 9
Março 2018
ÉVORA
Évora Hotel

GESTÃO DOS
RECURSOS HÍDRICOS:
**NOVOS
DESAFIOS**

1. INTRODUÇÃO

A alteração das condições das bacias hidrográficas, a atualização da classificação do risco de barragens antigas e a evolução de métodos de cálculo hidrológicos tem conduzido a caudais de ponta de cheia superiores aos que foram anteriormente calculados para algumas barragens atualmente em funcionamento. Por outro lado, algumas dessas barragens não têm capacidade para escoar o caudal de dimensionamento revisto sem que ocorra galgamento.

De entre as medidas de reabilitação disponíveis, a proteção do paramento de jusante da barragem pode por vezes ser a solução mais vantajosa do ponto de vista económico, particularmente no caso de barragens de pequena dimensão (McLean e Hansen, 1993).

O desenvolvimento de métodos para a aplicação de betão compactado por cilindros (BCC) fez com que este se tornasse uma solução estruturalmente estável e economicamente atrativa para a proteção contra o galgamento de barragens. O BCC tem um processo construtivo célere, requer métodos e equipamentos simples, e não implica o esvaziamento da albufeira para a sua aplicação. No entanto, a utilização de descarregadores sobre barragens de aterro é em geral prevista apenas para situações de emergência.

2. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO E EXPERIÊNCIA DE FUNCIONAMENTO

O BCC tem sido largamente utilizado ao longo das últimas décadas, particularmente nos EUA, na construção de barragens ou como medida de proteção contra o galgamento de barragens de aterro (McLean e Hansen, 1993, Matos, 2003).

Para além da erosão provocada pela passagem do escoamento, muitas destas barragens, devido à sua localização, estão sujeitas a ciclos de gelo/degelo, sendo necessário assegurar a proteção contra estes fenómenos.

A barragem de Ocoee no. 2 (Tennessee, EUA) foi o primeiro caso em que o BCC foi utilizado no paramento de jusante de uma barragem como medida de proteção contra o galgamento. Trata-se de uma barragem de madeira com enchimento de enrocamento construída em 1913. Devido à sua extrema deterioração, a barragem foi reabilitada, em 1980, com recurso à colocação de BCC no seu paramento de jusante. Desde então a barragem tem sido sujeita a mais de 80 dias por ano de galgamento planeado, para a prática de canoagem. A superfície da proteção de BCC, na zona do topo da barragem, tem apresentado poucos sinais de erosão. No entanto, na zona mais a jusante, os degraus em BCC denotaram alguma erosão, particularmente nos vértices dos degraus menos compactados. Apesar dos mencionados sinais de erosão, a barragem continua a funcionar normalmente (Abdo e Adaska, 2007).

A ligeira erosão nas extremidades menos compactadas dos degraus foi verificada noutras barragens com proteção em BCC, tais como a barragem de Brownwood Country Club (Texas, EUA), a barragem de Kerrville (Texas, EUA), a barragem de Lower Lake Royer (Maryland, EUA) e a barragem de Lake Tholocco (Alabama, EUA). No entanto, estas

ocorrências não comprometeram a operação normal destas barragens ou dos descarregadores de cheias (Abdo e Adaska, 2007).

A bacia de retenção de Red Rock é um caso em que o escoamento transporta sedimentos que em alguns casos, podem ter até 90 kg de peso. Inspeções em 2005 e 2006 mostraram que a passagem destes sedimentos conduziu à erosão superficial dos degraus, com menos de 50 mm de erosão na sua face exterior e algum esboroamento nas zonas onde se observou ter ocorrido segregação do betão (Abdo e Adaska, 2007).

A informação recolhida relativa a diversos casos, alguns destes com vários anos de operação, leva à conclusão que o BCC apresenta um bom funcionamento a longo prazo, mesmo após a passagem de grandes caudais que originam uma carga significativa sobre as estruturas, e de escoamentos que transportam material sólido (Rosa, 2017).

3. HIDRÁULICA DE DESCARREGADORES DE BCC SOBRE BARRAGENS DE ATERRO

3.1 Tipos de escoamento em descarregadores em degraus

O escoamento sobre descarregadores em degraus pode ser classificado em três tipos principais (Matos, 1999, Fael, 2000, Chanson, 2001, Meireles, 2004): escoamento em quedas sucessivas, escoamento de transição e escoamento deslizante sobre turbilhões. O tipo de escoamento que ocorre num descarregador em degraus depende do caudal descarregado e da geometria dos degraus.

Diversas expressões têm sido propostas para determinar o tipo de escoamento em descarregadores em degraus, nomeadamente por Matos (1999), para descarregadores que fazem ângulos com a horizontal entre 19 e 55°:

$$\frac{h_d}{h_c} = 0.634 + 0.446e^{-2.88\left(\frac{h_d}{l_d}\right)} \quad (1)$$

$$\frac{h_d}{h_c} = 0.775 + 0.759e^{-2.623\left(\frac{h_d}{l_d}\right)} \quad (2)$$

Nestas equações h_c é a altura crítica do escoamento, h_d é a altura dos degraus, e l_d é o comprimento dos degraus. A Eq. (1) define o final do escoamento em quedas sucessivas e o início do escoamento de transição, enquanto que a Eq. (2) define o final do escoamento de transição e o início do escoamento deslizante sobre turbilhões.

3.2 Caracterização do escoamento deslizante sobre turbilhões ao longo do descarregador

Para estimar a localização da secção de afloramento da camada limite, L_i , e a altura do escoamento nessa secção, h_i , Meireles e Matos (2009), com base em resultados experimentais obtidos por André e Ramos (2003) e por Cabrita (2007), sugerem as seguintes equações:

$$\frac{L_i}{k} = 5.19Fr_*^{0.95} \quad (3)$$

$$\frac{h_i}{k} = 0.28 Fr_*^{0.68} \quad (4)$$

As equações (3) e (4) foram obtidas para um descarregador com declive 1V:2H e $1.9 \leq Fr_* \leq 10$, sendo Fr_* o número de Froude definido em função da rugosidade de forma ($Fr_* = q/\sqrt{g \sin \theta k^3}$). Hunt e Kadavy (2013) consideram esta gama de Fr_* muito restritiva e referem que a Eq. (3) sobrestima L_i para valores de Fr_* superiores a 10. Hunt e Kadavy (2013) e Hunt e Kadavy (2014) obtiveram dados experimentais para uma gama mais alargada de Fr_* e de θ e apresentam as seguintes equações para estimar a localização da secção de afloramento da camada limite:

$$\frac{L_i}{k} = 5.19 Fr_*^{0.89}, 0.1 < Fr_* \leq 28 \quad (5)$$

$$\frac{L_i}{k} = 5.19 Fr_*^{0.95}, 28 < Fr_* < 10^5 \quad (6)$$

Para a mesma gama de Fr_* , Hunt e Kadavy (2014) sugerem a seguinte relação para calcular a altura de água na secção de afloramento da camada limite:

$$\frac{h_i}{k} = 0.34 (\sin \theta)^{0.13} Fr_*^{0.62} \quad (7)$$

Meireles e Matos (2009) analisaram dados experimentais de André e Ramos (2003) e de Cabrita (2007) e concluíram que a altura de água adimensionalizada, a montante da secção de afloramento da camada limite (h/h_i), para $L/L_i < 1$, é praticamente independente de h_c/h_d entre 1.27 e 2.85, embora dependa fortemente de L/L_i . Com base nos valores medidos experimentalmente de h_i e L_i , a seguinte relação foi então sugerida para $1.27 \leq h_c/h_d \leq 2.85$:

$$\frac{h}{h_i} = 0.971 + 0.891 e^{-3.41(L/L_i)} \quad (8)$$

Hunt e Kadavy (2014), com base em ensaios experimentais levados a cabo ao longo de vários anos em instalações em degraus com declives típicos de barragens de aterro, procuraram alargar os limites de aplicabilidade de relações já existentes. Hunt e Kadavy (2013) mostraram que para uma gama mais alargada de h_c/h_d , a altura do escoamento é dependente daquela grandeza e, com base nessa constatação, Hunt e Kadavy (2014) apresentaram a seguinte equação

$$\frac{h}{h_c} = \left(\frac{L}{L_i}\right)^{-0.22} \left[0.34 \left(\frac{h_d}{h_c}\right)^{0.063} (\cos \theta)^{0.063} (\sin \theta)^{-0.18} \right] \quad (9)$$

válida para $0.1 \leq L/L_i \leq 1.0$, $0.035 \leq h_d/h_c \leq 1.1$ ($0.9 \leq h_c/h_d \leq 28.6$) e $10^\circ \leq \theta \leq 30^\circ$.

A comparação entre os dois métodos permite verificar que, para a gama de valores de h_c/h_d analisada, as expressões propostas por Meireles e Matos (2009) e por Hunt e Kadavy (2014) conduzem a estimativas muito próximas da altura de água adimensionalizada ao longo do descarregador, no trecho sem emulsão de ar.

A jusante da secção de afloramento da camada limite ocorre a entrada de ar no escoamento, pelo que se torna necessário definir as grandezas do escoamento de emulsão ar-água, tais como a concentração média de ar, \bar{C} , a altura de água equivalente, h_{eq} , e a altura característica do escoamento, Y_{90} .

Matos *et al.* (2001) reanalisaram dados de outros autores e sugerem a seguinte expressão para o cálculo da concentração média de ar em descarregadores com declive de 1V:2H

$$\bar{C} = 0.262 + \frac{0.158}{(1+0.031s')^{-2.898}}, \text{ para } 0 \leq s' \leq 100 \quad (10)$$

onde

$$s' = \frac{L-L_i}{h_i}$$

Hunt *et al.* (2013) utilizaram os seus próprios dados experimentais para obter as seguintes relações

$$\bar{C} = 0.11 - \frac{0.22}{(L/L_i)} + 0.0645 + 0.216 \left[\frac{h_d}{h_c} \right] + 0.453(\sin \theta) \quad (11)$$

para $1.0 \leq L/L_i \leq 2.0$, e

$$\bar{C} = 0.0645 + 0.216 \left[\frac{h_d}{h_c} \right] + 0.453(\sin \theta) \quad (12)$$

para $L/L_i > 2.0$.

As Eq. (11) e (12) foram obtidas para $0.0035 \leq h_d/h_c \leq 1.1$ e $10^\circ \leq \theta \leq 30^\circ$.

Tanto as expressões propostas por Hunt *et al.* (2013), como as de Matos *et al.* (2001), conduzem a um aumento mais acentuado da concentração média de ar na região inicial a jusante da SACL, e mais gradual a jusante, chegando a estabilizar no trecho mais distante da SACL. Os resultados experimentais analisados em Matos *et al.* (2001) enquadram-se em geral nas expressões propostas por Hunt *et al.* (2013), embora se registre dispersão de resultados experimentais e diferenças assinaláveis para $h_c/h_d \sim 1$, e para valores superiores de h_c/h_d quando $L/L_i > 3$.

Para estimar a altura equivalente de água, Matos *et al.* (2001) apresentaram a equação seguinte, com base em resultados experimentais obtidos por Gaston (1995) e Boes (2000):

$$\frac{h_{eq}}{h_c} = 0.642 + 0.105e^{(-0.011s')}, \text{ para } 0 \leq s' \leq 100 \text{ e } 26.6^\circ \leq \theta \leq 30^\circ \quad (13)$$

Na expressão anterior, h_i é estimado de acordo com a expressão proposta por Chanson (1994), que segundo Matos *et al.* (2001), deverá sobrestimar a altura equivalente de água naquela secção, assim como L_i . Por essa razão $h_{eq} < h_i$, quando $L = L_i$, ou seja, quando $s' = 0$.

Hunt *et al.* (2013) desenvolveram a expressão seguinte para estimar a altura equivalente de água em função da altura crítica:

$$\frac{h_{eq}}{h_c} = 0.34 \left[\frac{h_d}{h_c} \right]^{0.063} (\cos \theta)^{0.063} (\sin \theta)^{-0.18} \quad (14)$$

A Eq. (14) é aplicável a jusante da secção de afloramento da camada limite ($L/L_i \geq 1$), para $0.0035 \leq h_d/h_c \leq 1.1$ e $10^\circ \leq \theta \leq 30^\circ$.

A Eq. (13) varia pouco com h_c/h_d , ajustando-se aos resultados experimentais obtidos por Gaston (1995) e Boes (2000). A Eq. (14), não sendo função de L/L_i , conduz a valores de altura equivalente de água adimensionalizada, h_{eq}/h_i , constantes e próximas de 1, independentemente da relação h_c/h_d . Note-se, contudo, que a expressão para o cálculo de h_i proposta por Hunt e Kadavy (2014) é distinta da expressão proposta por Chanson (1994), utilizada em Matos *et al.* (2001). Como se refere em Matos *et al.* (2001), a expressão proposta por Chanson (1994) deverá sobrestimar a altura de água na secção de afloramento da camada limite.

A altura característica do escoamento, Y_{90} , é dada por

$$Y_{90} = \frac{h_{eq}}{(1-\bar{C})} \quad (15)$$

onde h_{eq} pode ser estimado utilizando a Eq. (13) (para $\theta \sim 30^\circ$) ou a Eq. (14), para $10^\circ \leq \theta \leq 30^\circ$, e \bar{C} pode ser obtido utilizando a Eq. (10) (para $\theta \sim 30^\circ$) ou as Eq. (11) e (12), para $10^\circ \leq \theta \leq 30^\circ$.

4. RECOMENDAÇÕES PARA O DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO

4.1 Soleira descarregadora

Frequentemente, a soleira descarregadora à entrada de descarregadores em degraus sobre o paramento de jusante de barragens de aterro consiste numa soleira espessa ou, no caso de barragens de maior altura e descarregadores de declive mais acentuado, assume a forma mais eficiente de uma soleira do tipo WES (*Waterways Experiment Station*). A necessidade de fixar níveis de armazenamento mais elevados *à posteriori* levou a que se construíssem novas soleiras descarregadoras (com diretriz reta ou em labirinto), por cima da soleira espessa original.

As diversas alternativas de configuração da soleira descarregadora devem ser objeto de estudo por parte do projetista e a decisão não deverá ser determinada apenas pelo custo da solução (Frizell e Frizell, 2015).

4.2 Altura dos degraus

A espessura das camadas de BCC é, em geral, o fator condicionante da altura dos degraus. Usualmente a altura destas camadas pode variar entre 0.20 m e 0.60 m.

Os ensaios experimentais de vários investigadores levam à conclusão que a perda de carga ao longo de um descarregador em degraus é tanto maior quanto maior for o valor da altura dos degraus adimensionalizada pela altura crítica do escoamento (h_d/h_c). No entanto, Tozzi (1992) concluiu que, para valores de h_d/h_c superiores a 0,3, o aumento da perda de carga é muito pequeno.

4.3 Altura das paredes do descarregador

A altura das paredes do descarregador deve ter em conta a altura do escoamento com ar emulsionado, que ocorre após o afloramento da camada limite, a não ser que este não ocorra para o caudal de projeto.

Usualmente a dimensão das paredes de descarregadores em degraus é obtida através de

$$h_p = nY_{90} \quad (16)$$

onde Y_{90} é a altura característica do escoamento e n é um coeficiente de segurança.

No que diz respeito ao coeficiente de segurança, n , Boes e Minor (2002) e Boes e Hager (2003) consideram que este, no caso de descarregadores sobre o paramento de barragens de aterro, deve assumir o valor de 1,5. Recentemente, com base em resultados obtidos ao longo de vários anos em modelos reduzidos a grande escala, Hunt e Kadavy (2016) sugerem as seguintes expressões:

$$\frac{h_p}{Y_{90}} = 1.4, \text{ para } \frac{h_d}{h_c} \leq 0.40 \quad (17)$$

$$\frac{h_p}{Y_{90}} = 2.0 \left(\frac{h_d}{h_c} \right)^{0.37}, \text{ para } \frac{h_d}{h_c} > 0.40 \quad (18)$$

Considera-se assim adequada a utilização das Eq. (17) e (18) para o cálculo da altura das paredes do descarregador, sendo Y_{90} estimado de acordo com Hunt *et al.* (2013).

Se para o caudal de projeto não ocorrer afloramento da camada limite no descarregador, sugere-se a aplicação da Eq. (16), substituindo Y_{90} por h_{eq} e considerando $n=1.5$, como sugerido por Boes e Minor (2002) e Boes e Hager (2003).

5. CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO E ASPETOS CONSTRUTIVOS

5.1 Estrutura de controlo do escoamento e canal descarregador

É conveniente proteger a soleira descarregadora com uma ou duas camadas de BCC, que podem prolongar-se até à secção de controlo (secção crítica), até à secção de montante da soleira descarregadora, ou até à parte superior do paramento de montante da barragem.

Embora o declive do descarregador seja, regra geral, ditado pelo declive do paramento de jusante da barragem, em algumas situações pode ser adotado um declive distinto. Em geral, o ângulo do descarregador está compreendido entre 14° e 30° , sendo frequente a adoção de $26,6^\circ$ (1V:2H), que é a inclinação do paramento de jusante de muitas barragens de aterro.

Usualmente o descarregador é em degraus de pequena altura (0,20 ou 0,30 m), embora em alguns casos possa ter degraus de 0,60 m.

A construção de um descarregador em BCC subentende um processo construtivo muito específico. Para assegurar a operacionalidade do equipamento de espalhamento do BCC, as camadas devem ter uma largura mínima compreendida entre 2,40 m e 2,70 m (*in* Matos e Meireles, 2006).

5.2 Sistema de drenagem

É essencial prever um sistema de drenagem/filtragem. Este sistema deve ser colocado em camada contínua sob o descarregador e deve incluir um filtro adequado ao material do aterro, constituído por material granular ou, em alternativa, por materiais geotêxtis que funcionem como um filtro relativamente ao material do aterro. Este órgão permite impedir a erosão do aterro caso ocorra alguma fissuração do BCC.

5.3 Paramento de BCC

A fissuração do BCC deve ser evitada ou mitigada, uma vez que a orientação e dimensão das fendas pode conduzir a passagem de água para a zona do aterro sob o descarregador. De forma a prevenir a eventual deterioração do descarregador por ação de condições climáticas ou ações hidrodinâmicas agressivas, pode considerar-se um revestimento do descarregador de BCC.

Existem diversos tipos de acabamento passíveis de serem adotados para paramentos executados em BCC, em função de condicionantes de natureza estrutural ou estética, tais como: betão, elementos de betão pré-fabricado e terra coberta, ou não, por um tapete de relva. Os principais critérios a ter em conta na escolha do acabamento final do descarregador são: custo, aparência estética, durabilidade e facilidade de execução (*in* Matos e Meireles, 2006).

6. CASO DE ESTUDO

6.1 Considerações gerais

O objeto do presente caso em estudo é a barragem do Arroio, situada no distrito de Bragança, concelho de Torre de Moncorvo, a cerca de 2 km da povoação de Urros. É uma barragem de terra com uma altura máxima de 15 m e cerca de 110 m de desenvolvimento do coroamento. O projeto de execução desta barragem foi elaborado em 1987, pela CNEC, Engenheiros Consultores (*LNEC, 2017*).

O coroamento da barragem tem uma largura total de 6.0 m, sendo 5.0 destes utilizados para faixa de rodagem. O paramento de montante apresenta um declive de 1V:3H, e o de jusante 1V:2H. A montante o paramento é protegido por enrocamento, enquanto que a jusante nas cotas superiores o paramento é protegido por enrocamento e na zona inferior, por terra vegetal. O NPA situa-se à cota 438.5 m e o NMC à cota 439.8 m, situando-se o coroamento à cota 440.2 m.

A água armazenada na barragem do Arroio destina-se ao abastecimento de várias freguesias de Torre de Moncorvo, existindo uma estação de tratamento de água (ETA), para o efeito, imediatamente a jusante da barragem.

No âmbito da construção da barragem das Olgas, em janeiro de 2007 foi feita uma inspeção à barragem do Arroio, que se situa cerca de 3 km a montante desta. Um dos problemas identificados nesta inspeção, que afeta a segurança tanto da barragem do Arroio como da barragem das Olgas, foi a insuficiência de capacidade de vazão do descarregador de cheias, à luz do regulamento de Segurança de Barragens (RSB). O descarregador original da barragem do Arroio era de soleira espessa e irregular, escavado na rocha natural, com a crista à cota 439.0 m.

A Cenor, Projectos de Engenharia, Lda. (2007) levou a cabo a análise hidrológica e calculou os valores do caudal de ponta de cheia com os períodos de retorno de 20, 100 e 1000 anos, sendo estes, respetivamente, de 62, 92 e 134 m³/s. Atendendo às características do descarregador existente e à folga mínima necessária, os autores concluíram que o caudal máximo passível de ser descarregado por esse descarregador era de 79 m³/s, tendo portanto apenas capacidade de escoar, em segurança, cheias com um período de retorno não muito superior a 20 anos. Um dos objetos do trabalho desenvolvido pela Cenor (2007) foi o dimensionamento de um descarregador de cheias para uma cheia com o período de retorno de 1000 anos. Procurando aumentar a capacidade do descarregador de cheias sem baixar o NPA da barragem (438.50 m), foi preconizada uma soleira em labirinto e a substituição do troço do descarregador escavado na rocha por um canal retangular em betão.

6.2 Solução proposta

A utilização de BCC neste caso, para materializar um descarregador complementar pode ser uma solução vantajosa, uma vez que não exige o esvaziamento da albufeira e permitiria utilizar o descarregador já existente, que não apresentava danos estruturais.

A solução proposta no âmbito deste trabalho consiste num descarregador complementar em degraus de BCC, colocado sobre a crista e paramento de jusante da barragem, com capacidade para escoar cerca de 55.4 m³/s (complementando a capacidade do descarregador principal). Para o dimensionamento do descarregador foram utilizadas as expressões apresentadas anteriormente.

Foi preconizada uma largura do descarregador de 17.5 m e degraus de 0.30 m de altura, o que resulta no caudal unitário $q = 3.2 \text{ m}^2/\text{s}$. Para este caudal de dimensionamento e altura dos degraus, o escoamento que ocorre é do tipo deslizante sobre turbilhões, e é respeitada a relação que maximiza a dissipação de energia nos degraus, $h_d/h_c = 0.3$. O comprimento dos degraus é de 0.6 m, mantendo o declive do paramento de jusante (1V:2H). Para manter o NPA, previu-se o rebaixamento da cota do coroamento da barragem para a cota 438.50 m.

Na Tabela 1 apresenta-se a estimativa do custo para ambas as soluções. Apesar de, no caso da soleira em labirinto, a estimativa não contemplar todos os trabalhos necessários, verifica-se que excede o custo estimado da execução do descarregador em BCC. Com efeito, a intervenção no descarregador foi adjudicada pelo valor de 337 200 €.

Tabela 1. Estimativa de custos para as soluções alternativas.

Item	Custo	
	Descarregador em BCC	Soleira em labirinto
Demolição parcial do coroamento da barragem	27 177 €	-
Decapagem do paramento de jusante	5 663 €	-
Camada de drenagem/filtragem	11 326 €	-
Construção de descarregador em BCC	221 567 €	-
Paredes do descarregador (betão armado)	5 355 €	-
Laje de fundação da soleira em labirinto	-	166 993 €
Soleira em labirinto	-	37 607 €
Muros ala, incluindo fundação	-	85 548 €
Total	271 088 €	290 148 €

7. CONCLUSÕES

Com base em estudos desenvolvidos por vários autores, foi apresentada a formulação que permite caracterizar o escoamento deslizante sobre turbilhões ao longo de um descarregador em degraus com declive típico do paramento de jusante de barragens de aterro. Incluem-se recomendações para o dimensionamento hidráulico de descarregadores de BCC, bem como uma síntese de critérios de dimensionamento e aspetos construtivos.

Relativamente ao caso de estudo, apresentou-se uma solução alternativa à que foi implementada, mediante a construção de um descarregador em BCC sobre paramento de jusante da barragem. Os resultados sugerem que a utilização de BCC possa ser mais económica. Contudo, deverão também ser tidas em conta as implicações de ter um descarregador de cheias sobre a barragem de aterro.

A experiência tem evidenciado que a utilização de camadas de BCC não só é uma solução possível para reabilitação e proteção de barragens do ponto de vista técnico, como é menos onerosa que outras soluções que possam ser tipicamente adotadas, o que se afigura interessante para pequenas barragens, nomeadamente em países onde os recursos financeiros disponíveis sejam escassos.

Existem em Portugal alguns casos em que esta técnica poderia apresentar vantagens face às usualmente preconizadas. Julga-se que a não aplicação desta solução se deve ao facto de não existir muita divulgação, bem como ao grau de incerteza inerente à construção de um descarregador sobre uma barragem de aterro. No entanto, existe um vasto conhecimento relativo a este tipo de solução a nível internacional, nomeadamente nos EUA, o que pode ser um ponto de partida para o desenvolvimento da aplicação de BCC na reabilitação de pequenas barragens de aterro em Portugal.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam o seu agradecimento à empresa Águas do Norte, pela cedência dos elementos referentes à barragem do Arroio e pela autorização de publicação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdo, F. Y. e Adaska, W. S. (2007). Performance Review of RCC spillways and overtopping protection. Portland Cement Association.
- André, M. e Ramos, P. (2003). Hidráulica de Descarregadores de Cheia em Degraus: Aplicação a Descarregadores com Paredes Convergentes. Trabalho Final de Curso, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Boes, R. M. e Hager, W. H. (2003). Hydraulic design of stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(9), pp. 671-679.
- Boes, R. M. e Minor, H. E. (2000). Guidelines to the hydraulic design of stepped spillways. *Proc. 1st International Workshop on Hydraulics of Stepped Spillways*, (pp. 163-170). Zurich (Suíça).
- Boes, R. M. e Minor, H. E. (2002). Hydraulic design of stepped spillways for RCC dams. *Hydropower & Dams*, Vol. 9, no 3, 87-91.
- Cabrita, J. (2007). Caracterização do escoamento deslizante sobre turbilhões em descarregadores de cheias em degraus com paredes convergentes. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisbon.
- Cenor, Projectos de Engenharia, Lda. (2007). Barragem do Arroio. Descarregador de cheias e descarga de fundo. Projecto de remodelação. Volume 1. Tomo 1.
- Chanson, H. (1994). *Hydraulic Design of Stepped Cascades, Channels, Weirs and Spillways*. Inglaterra: Pergamon.
- Chanson, H. (2001). *The Hydraulics of Stepped Chutes and Spillways*. Holanda: Balkema.
- Fael, C. (2000). Escoamento em Quedas Sucessivas: Ocorrência e Dissipação de Energia. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Frizell, K. W. e Frizell, K. H. (2015). Guidelines for Hydraulic Design of Stepped Spillways. Hydraulic Laboratory Report HL-2015-06, Bureau of Reclamation, U.S. Dept. of the Interior, Denver, Colorado (EUA).
- Gaston, M. (1995). Air entrainment and energy dissipation on a stepped blocked spillway. M.Sc. thesis, CSU, Fort Collins, Colorado, USA.
- Hunt, S. L. e Kadavy, K. C. (2013). Inception point for embankment dam stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 138(9), pp. 796-802.
- Hunt, S. L. e Kadavy, K. C. (2014). Flow depth and energy coefficient relationships for stepped spillways. ISHS 2014-Hydraulic Structures and Society-Engineering



7, 8 e 9
Março 2018
ÉVORA
Évora Hotel

GESTÃO DOS
RECURSOS HÍDRICOS:
**NOVOS
DESAFIOS**

- Challenges and Extremes: Proceedings of the 5th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures (pp. 1-9). Universidade de Queensland.
- Hunt, S. L., e Kadavy, K. C. (2016). Stepped Chute Training Wall Height Requirements. Em B. C. Tullis (Ed.), Hydraulic Structures and Water System Management. 6th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures, (pp. 260-267). Portland, OR (EUA).
- Hunt, S. L., Kadavy, K. C. e Hanson, G. J. (2013). New flow depth relationships for embankment dam stepped spillway design. Dam Eng, 53-70.
- LNEC (2017) - Barragem do Arroio - Inspeção visual e análise do comportamento até outubro de 2017. RELATÓRIO 394/2017 – DG/NGOH.
- Matos, J. (1999). Emulsão de ar e dissipação de energia do escoamento em descarregadores em degraus. Dissertação de Doutoramento, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Matos, J. (2003). Roller compacted concrete and stepped spillways. From new dams to dam rehabilitation. Em J. Y. JA Llanos (Ed.), Proc., Int. Congress on Conservation and Rehabilitation of Dams: Dam Maintenance and Rehabilitation (pp. 553-560). Roterdão, Holanda: AA Balkema.
- Matos, J. e Meireles, I. (2006). Estudo detalhado sobre descarregadores de cheias em degraus de betão compactado por cilindros aplicado a barragens de betão e de aterro. Centro de Estudos de Hidrossistemas do Instituto Superior Técnico (CEHIDRO), Lisboa.
- Matos, J., Pinheiro, A. N., Frizell, K. H. e Quintela, A. (2001). On the role of stepped overlays to increase spillway capacity of embankment dams. Em G. H. NNCOLD (Ed.), Proc. ICOLD European Symposium – Dams in a European Context, (pp. 473-483).
- McLean, F. G. e Hansen, K. D. (1993). Roller Compacted Concrete for Embankment Overtopping Protection. Em Geotechnical Practice in Dam Rehabilitation (pp. 188-209). ASCE.
- Meireles, I. (2004). Caracterização do Escoamento Deslizante Sobre Turbilhões e Energia Específica Residual em Descarregadores de Cheias em Degraus. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Meireles, I. e Matos, J. (2009). Skimming Flow in the Nonaerated Region of Stepped Spillways over Embankment Dams. Journal of Hydraulic Engineering, 135(8), pp. 685-689.
- Rosa, A. (2017). Reforço da segurança em situação de cheia de barragens de aterro com recurso a betão compactado por cilindros. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Tozzi, M. J. (1992). Caracterização/Comportamento de Escoamentos em Vertedouros com Paramento em Degraus. Dissertação de doutoramento, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo (Brasil).