

ANÁLISE DO FUNCIONAMENTO E DA APLICABILIDADE DE DESCARREGADORES DE CHEIAS EM TÚNEL *Analysis of the Operation and Applicability of Tunnel Spillways*

ANTÓNIO MIGUEL MARQUES ⁽¹⁾, FRANCISCO TAVEIRA-PINTO ⁽²⁾ e PEDRO MANSO ⁽³⁾

⁽¹⁾ Mestre em Engenharia Civil, FEUP,
Rua do Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal, ec06185@fe.up.pt / Miguel.gs.marques@gmail.com

⁽²⁾ Professor Catedrático, FEUP,
Rua do Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal, fpinto@fe.up.pt

⁽³⁾ STUCKY Ltd (grupo GRUNER),
Rue du Lac 33, P.O. Box 1020 Renens VD 1, Switzerland

Resumo

Os descarregadores de cheias são um componente de extrema importância no funcionamento de uma barragem, daí que o estudo do seu funcionamento hidráulico e a aplicabilidade de outras tipologias, como os descarregadores de cheias em túnel, deva ser tida em consideração.

Nesse sentido, numa tentativa de compreender a existência de algum limite hidráulico que impeça a construção de um descarregador de cheias em túnel, foram analisadas, em maior pormenor, as características deste tipo de solução, assim como possíveis métodos de dimensionamento dos mesmos e a importância do seu correto arejamento, de forma a evitar problemas no seu funcionamento. Foi então compilada uma lista de diversas barragens que possuem descarregadores de cheia em túnel, e as características dos mesmos, tendo sido realizada, com essa informação, uma análise comparativa e dimensional, procurando compreender quais as variáveis que teriam mais influência na capacidade de descarga deste tipo de órgão de segurança de barragens.

Finalmente foi realizada uma análise a diferentes métodos de escavação de túneis, tentando compreender se existe algum limite tecnológico que possa inviabilizar a construção deste tipo de estrutura.

Palavras-chave: Descarregador de cheias em túnel, dimensionamento, arejamento, análise dimensional.

Abstract

The flood spillways are an extremely important component in a dam's operation, hence the study of its hydraulic operation and the applicability of other typologies, as the tunnel spillways, must be taken in account.

Thus in an attempt to understand the existence of a hydraulic limitation that prevents the construction of a tunnel spillway, the characteristics of this type of solution were analysed with more detail, as well as possible design methods and the importance of its proper aeration, preventing problems in its operation. A list of several dams that include tunnel spillways was then compiled, along with its characteristics, with this information, a comparative and dimensional analysis was performed, with the objective of trying to understand which variables have the most influence on the discharge capacity of this type of dam safety organ.

Finally an analysis was performed on different methods of tunnel opening, in an attempt to figure out if there is any technical limitation that could derail the construction of this type of structure.

Keywords: Tunnel spillway, design, ventilation, dimensional analysis.

1. Introdução

A problemática da rutura de barragens tem levantado questões importantes no que se refere ao seu dimensionamento e segurança. Esta questão está associada, na maioria dos casos, a um comportamento inadequado dos respetivos órgãos de segurança, particularmente dos descarregadores de cheia. Segundo o International Committee on Large Dams (ICOLD), um terço das falhas em barragens foram provocadas por galgamentos devido principalmente a uma capacidade de descarga insuficiente por parte dos descarregadores de cheias instalados.

As principais razões para este deficiente dimensionamento dos descarregadores são a falta de precisão dos métodos utilizados para prever as cheias a que a zona onde se encontra a barragem irá estar sujeita e a limitada especificação das condições de dimensionamento do descarregador.

Neste trabalho pretende-se analisar melhor a solução dos descarregadores de cheia em túnel e identificar em que condições tecnológicas, hidráulicas, geológicas, económicas e ambientais este tipo de solução é uma alternativa conceptual vantajosa e em que condições se poderá explorar os limites tecnológicos atuais.

Apesar de possuírem vantagens significativas, como será referido mais à frente, este tipo de descarregadores não constitui uma solução frequentemente adotada em circuitos de aproveitamentos hidroelétricos, especialmente para cheias superiores a 2000 m³/s. Com este trabalho pretende-se compreender as razões que levam a que, na maioria dos casos, se opte por não construir um descarregador de cheias em túnel.

Em função deste objetivo, apresentam-se, em primeiro lugar, as principais vantagens e desvantagens da aplicação em barragens de descarregadores de cheia em túnel, analisando depois, em detalhe, as características de funcionamento hidráulico deste tipo de descarregadores, com o objetivo de indicar as principais preocupações a ter no dimensionamento dos mesmos e de forma a verificar se existe algum limite que impeça que esta solução seja mais vezes utilizada.

Serão então apresentados os resultados de uma análise comparativa e dimensional, realizada através da recolha de informação relativa às características de diversos descarregadores de cheias em túnel existentes. O objetivo destas análises é tentar compreender de que forma os descarregadores foram dimensionados e identificar/obter algumas relações empíricas comuns entre os parâmetros de projeto dos mesmos.

Por último, serão apresentadas as conclusões do trabalho, tentando assim responder às questões colocadas:

- Por que razão os descarregadores em túnel podem ser alternativas conceptualmente interessantes?
- Por que razão a construção de descarregadores em túnel não é mais comum?
- Quais as condições que poderiam levar a que este tipo de solução fosse mais vezes utilizado?

2. Descarregadores de Cheias em Túnel

2.1. Vantagens e desvantagens

Os descarregadores em túnel são, geralmente, muito vantajosos em barragens situadas em vales estreitos e com grandes declives, e, uma vez que não implicam qualquer risco para o suporte lateral da barragem, são apropriados para barragens cujas margens não são adequadas à construção devido à possível ocorrência de derrocadas.

Um outro fator que leva à escolha deste tipo de descarregador de cheias é a possibilidade de aproveitar o desvio provisório por galeria, executado no início da construção da barragem.

Por fim, uma vez que, para a construção destes descarregadores, não é necessária uma tão grande escavação a céu aberto e a obra terá um menor impacto visual.

Por outro lado, os descarregadores de cheias em túnel são de difícil dimensionamento. O escoamento no túnel deve ser em superfície livre, por questões de segurança estrutural, decorrentes da pressão exercida na parede da galeria e da possibilidade de ocorrência de ressalto hidráulico contra a abóbada.

Para isto, é por vezes necessária a construção de uma conduta de arejamento que introduz o ar necessário para que o escoamento se processe em superfície livre. É necessário ainda ter em conta a possibilidade do orifício de entrada ficar obstruído por troncos de árvores ou outros detritos transportados pelo rio.

Os descarregadores em túnel podem levar, ainda, a uma situação muito delicada pois, em caso de mau funcionamento, o seu arranjo não é tão fácil de executar como em outros descarregadores, podendo levar à rutura do túnel, colocando a barragem em risco de colapso.

2.2. Critérios de projeto atuais

Os descarregadores de cheias em túnel são constituídos, geralmente, por um órgão de controlo de entrada da água, e uma galeria que se divide numa parte inclinada, e numa parte aproximadamente horizontal, que transporta a água para jusante da barragem, Figura 1.

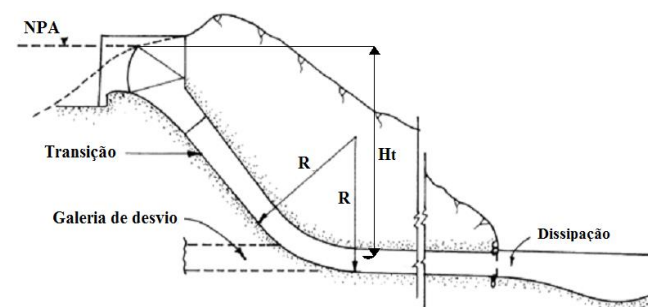


Figura 1. Esquema habitual de um descarregador de cheias em túnel (Dekker, 2005).

Como órgão de controlo do caudal descarregado, é geralmente utilizada uma soleira descarregadora, em geral do tipo WES, que poderá ser equipada, ou não, com comportas do tipo segmento.

Quanto à galeria, a sua configuração, em perfil, engloba um trecho inicial muito inclinado e um trecho final praticamente horizontal, terminando numa obra de dissipação de energia. De forma a facilitar a mudança de declive é construída uma secção em curva. A secção transversal do trecho inclinado, logo após a soleira descarregadora, possui uma forma retangular, devido à existência de comportas. Importa, por isso, referir a transição que deverá ocorrer de forma a tornar a secção circular ou em forma de ferradura, em formas que permitam um escoamento mais estável dos caudais de cheia. O escoamento no túnel processa-se de forma rápida e sem pressões, ou seja em superfície livre. Assim, por questões económicas, o diâmetro da galeria deverá ser o mais pequeno possível, sendo de dimensão suficiente para que nunca ocorra uma descarga em secção cheia, evitando assim a ocorrência de efeito de sifão. Os descarregadores de cheia em túnel são geralmente dimensionados para índices de enchimento entre 0,75 e 0,875, de forma a permitir que a passagem de ar se processe ao longo de toda a secção.

O trecho em curva que une a parte inclinada à parte horizontal da galeria é, não só, a parte mais difícil de construir, mas também uma das mais complicadas de dimensionar.

Teoricamente, é nesta zona que o escoamento sofrerá maiores distúrbios, existindo também um aumento da pressão no túnel, podendo levar a graves problemas de cavitação. O raio da curva deverá, então, ser de dimensão adequada para que a transição entre os dois trechos se processe da forma o mais suave possível. Numa fase inicial do dimensionamento, uma opção conservativa para o raio da curva seria dada pela equação:

$$R = 0,45 H_t \quad [1]$$

em que H_t representa a diferença entre o nível de pleno armazenamento e a cota da água no final da curva.

Por último, o trecho final do túnel, horizontal ou ligeiramente inclinado, deverá, caso seja necessária a construção de uma obra de dissipação, sofrer uma nova transição, desta feita da secção circular ou em ferradura novamente para uma secção retangular. Na Figura 1 é possível observar um esquema da constituição mais comum de um descarregador em túnel (Dekker, 2005).

2.2.1. Cálculo do diâmetro do túnel

Uma vez que se pretende que o escoamento se processe em superfície livre e que a lâmina líquida se mantenha o mais estável possível, é possível estimar o diâmetro da conduta descarregadora, de forma simplificada, através da aplicação da equação da continuidade, da fórmula de Manning-Strikler e das características geométricas da secção e da altura de água por ela escoada. Tendo em conta a equação da continuidade:

$$Q = US \quad [2]$$

em que Q corresponde ao caudal que se pretende escoar (m^3/s), U a velocidade de escoamento (m/s) e S a secção do escoamento no plano perpendicular ao eixo do túnel (m^2).

A fórmula de Manning-Strikler é dada por:

$$U = K_s R_h^{\frac{2}{3}} J^{\frac{1}{2}} \quad [3]$$

em que K_s representa o coeficiente de Manning-Strikler (rugosidade do material da conduta), R_h o raio hidráulico e J a perda de carga unitária (coincidente com a inclinação do túnel).

A Figura 2 apresenta as características geométricas da secção de escoamento consideradas.

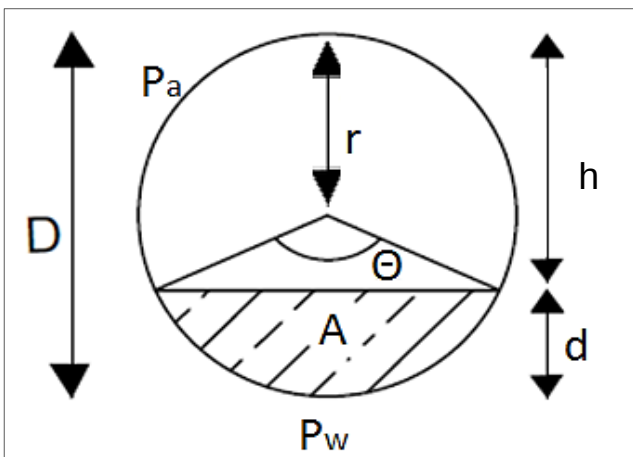


Figura 2. Significado das variáveis geométricas consideradas.

Sabendo que:

$$\frac{d}{D} = \frac{1 - \cos \frac{\theta}{2}}{2} \quad [4]$$

$$A = D^2 \frac{\theta - \sin \theta}{4\theta} \quad [5]$$

e

$$R_h = D \frac{\theta - \sin \theta}{4\theta} \quad [6]$$

Substituindo na equação [2] obtém-se:

$$Q = K_s \left(D \frac{\theta - \sin \theta}{4\theta} \right)^{\frac{2}{3}} \frac{\theta - \sin \theta}{8} D^2 \sqrt{J} \quad [7]$$

Sabendo o índice de enchimento desejado para a conduta pode-se determinar o valor de θ e, sabendo, também, o caudal que se pretende descarregar e a inclinação que se pretende dar ao túnel, é então possível determinar o diâmetro que o mesmo deverá ter (Proença, 2010). Uma outra forma, mais exata, de dimensionar o canal de descarga, é através da fórmula de Colebrook-White:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{k}{3,7 D} + \frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda}} \right) \quad [8]$$

Sabendo que os valores do coeficiente de resistência λ e do número de Reynolds, Re resultam das expressões:

$$\lambda = \frac{J D 2 g}{U^2} \quad [9]$$

$$Re = \frac{4 Q}{\pi D \nu} \quad [10]$$

A fórmula de Colebrook-White pode então ser desenvolvida, resultando a seguinte expressão matemática:

$$Q + \frac{\pi D^2}{2} \sqrt{2 g D J} \log \left(\frac{k}{3,7 D} + \frac{2,51 \nu}{D \sqrt{2 g D J}} \right) = 0 \quad [11]$$

Através desta, é possível determinar o diâmetro mínimo que a conduta deverá possuir para escoar determinado caudal, Q , em secção cheia. Uma vez que se pretende que o escoamento se processe em superfície livre, deve-se substituir, na equação [11], o valor do diâmetro real pelo seu diâmetro hidráulico equivalente:

$$D = 4 R_h \quad [12]$$

Correspondendo R_h , ao raio hidráulico do canal, ou seja, ao quociente entre a área do escoamento e o perímetro molhado. Este, para ser calculado, requer em primeiro lugar o conhecimento da altura da secção que se encontra preenchida por ar, h :

$$h = 2r - d \quad [13]$$

sendo d a altura de água escoada.

Sabendo o valor de h , é possível calcular o ângulo ao centro entre o canal e a lâmina líquida, θ , a área do canal preenchida por ar, K , e por água, A , o perímetro da parte do túnel preenchido por ar, P_a , e o perímetro molhado, P_w :

$$\theta = 2 \arccos \left(\frac{r - h}{r} \right) \quad [14]$$

$$K = \frac{r^2 (\theta - \sin\theta)}{2} \quad [15]$$

$$A = \pi r^2 - K \quad [16]$$

$$P_a = r * \theta \quad [17]$$

$$P_w = 2\pi r - s \quad [18]$$

sendo r o raio da secção circular.

O raio hidráulico pode então ser definido como:

$$R_h = \frac{\pi r^2 - \frac{r^2 (\theta - \sin\theta)}{2}}{2\pi r - r\theta} \quad [19]$$

Tendo em consideração o resultado obtido através do desenvolvimento da fórmula de Colebrook-White, [11], da fórmula [12], e sabendo o ângulo ao centro correspondente ao índice de enchimento pretendido, é possível então determinar o raio, e consequentemente o diâmetro que o canal deverá possuir.

2.2.2. Problemas de cavitação

e a importância de um correto arejamento do túnel

A cavitação num líquido em movimento consiste na formação e subsequente colapso de bolhas preenchidas por vapor.

Estas bolhas formam-se no seio do líquido do escoamento, em zonas onde a pressão local desce até atingir a tensão do vapor; quando estas bolhas são transportadas para uma região em que a pressão local é superior à tensão do vapor colapsam, dando origem a pressões localizadas muito elevadas que resultam em flutuações de pressão, vibrações e ruído.

Se este colapso ocorrer junto da superfície do canal que limita o escoamento, esta fica submetida a forças localizadas muito intensas e de alta frequência, podendo verificar-se erosão por cavitação.

Estas descidas de pressão localizadas resultam, na maioria dos casos, de flutuações turbulentas de pressão provocadas por vórtices originados, por exemplo, por descontinuidades das superfícies (Quintela e Pinheiro, 2001).

Quando a água segue por uma curva vertical, a aceleração do escoamento tende a eliminar a camada de ar, verificando-se, por isso, altas velocidades junto à parede da secção, tornando-se mais provável a ocorrência de erosão por cavitação a jusante da curva, onde a pressão diminui repentinamente e a turbulência aumenta.

O número significativo de danos verificados em descarregadores de cheias em túnel deve-se a este efeito (Pinto, 1988).

Esta erosão pode ser reduzida, ou até mesmo prevenida, se for garantido um arejamento suficiente e constante do túnel.

A presença de ar no canal descarregador permite ainda um maior volume de água escoada e reduz as perdas por atrito (Chanson, 1992). Assim, torna-se extremamente importante garantir a existência, no canal, de um fluxo de ar satisfatório.

Garantir este auto arejamento pode nem sempre ser uma tarefa fácil pois, como é sabido, o emulsionamento do ar, provocado pela grande velocidade de escoamento, aumenta a área da secção molhada (Álvares-Ribeiro, 1970), reduzindo a quantidade de ar existente e dificultando a entrada no mesmo. A ter em conta, ainda, que caso a secção do canal ocupada por ar seja menor do que 5% da área total do mesmo, o escoamento deixará de se processar em superfície livre (Chanson, 1992).

Então, o correto dimensionamento de um sistema de arejamento depende de uma correta avaliação do volume de ar a entrar pelo arejador e a garantir perto da superfície (Pinto, 1988). Investigações experimentais dos efeitos de arejamento sugerem que uma concentração de ar de 5 a 10% perto da superfície a ser protegida elimina praticamente os riscos de cavitação.

Em descarregadores de soleira normal de barragens de betão do tipo galgável, é usual utilizar-se para determinar o aumento de secção devido ao emulsionamento de ar, a fórmula de Douma, dada por,

$$\frac{A_a}{A_w + A_a} = 0,1 \sqrt{0,2 \frac{U^2}{g R_h} - 1} \quad [20]$$

sendo $A_w + A_a$ a área total molhada tendo em consideração o emulsionamento de ar, A_w a área teórica molhada, U a velocidade de escoamento, g a aceleração gravítica e R_h o raio hidráulico (Álvares-Ribeiro, 1970).

No caso da utilização de soleiras descarregadoras como orifício de entrada, a presença de ar acima do escoamento é garantida pelas mesmas. O mesmo não se verifica no caso da construção de um poço vertical, onde, para garantir a entrada de ar, é comum a construção de um poço de ventilação.

Poderão existir, no entanto, zonas ao longo do descarregador onde a concentração de ar desce abaixo do nível mínimo requerido.

Nestes casos deverão ser construídos arejadores extra, que garantam o arejamento natural do escoamento junto à superfície inferior do túnel descarregador.

Os dispositivos mais simples para cumprir este objetivo consistem em rampas ou degraus. A súbita descontinuidade no túnel cria uma interface ar-água ao longo da qual a água, a alta velocidade, arrasta o ar num intenso processo de mistura. Poder-se-á, também, construir uma galeria transversal ou um ligeiro degrau, melhorando assim o funcionamento do arejador. Também é possível a adoção de uma solução mista entre as diferentes soluções mencionadas.

Para garantir a admissão de ar no espaço a seguir ao degrau ou rampa, deve ser construída uma chaminé de arejamento, ranhuras ou reentrâncias na parede do túnel, ou cunhas laterais, de acordo com as especificações de projeto.

A definição das proporções ideais entre as diferentes partes constituintes de um sistema de arejamento constitui, assim, um dos principais problemas do dimensionamento de um descarregador de cheias em túnel (Pinto, 1988).

2.2.3. Dimensionamento de uma rampa de arejamento

A necessidade de construir uma rampa de arejamento é geralmente determinada através da avaliação do potencial de cavitação ao longo de todo o descarregador. Este pode ser calculado através do índice de cavitação, σ ,

$$\sigma = \frac{p_0 - p_v}{\rho_w \frac{U^2}{2g}} \quad [21]$$

sendo que,

$$p_0 = p_a + p_g \quad [22]$$

correspondendo p_0 à pressão de referencia na secção, p_a à pressão atmosférica, p_g à pressão manométrica, p_v à pressão de vapor da água, ρ_w à massa volúmica da água e U à velocidade do escoamento.

São expetáveis danos causados por cavitação em zonas onde o índice de cavitação é menor que 0,2. Além da velocidade do escoamento, a ocorrência de danos de cavitação depende também das irregularidades existentes na superfície do descarregador, da resistência do material que o constitui, e do seu comprimento.

A rampa de arejamento separa o caudal a ser descarregado da superfície do descarregador, formando uma cavidade por onde o ar pode entrar, prevenindo assim o risco de danos provocados por cavitação.

Uma vez que o índice de cavitação depende da velocidade de escoamento e da pressão verificada, o caudal máximo a descarregar não corresponde necessariamente ao mais baixo valor deste índice. O correto funcionamento de uma rampa de arejamento deverá ser comprovado em modelo físico, a não ser que se verifique uma grande semelhança em relação a outro projeto já existente que tenha sido já testado.

Um método recomendado para o dimensionamento de um sistema de arejamento num canal descarregador consiste dos seguintes passos:

- Realizar uma análise do escoamento a partir de um determinado caudal de descarga, aumentando-o 20% em cada análise, até se atingir o caudal máximo a descarregar na secção;
- Para uma avaliação preliminar, determinar o local mais a montante, onde, para o caudal máximo a descarregar, a velocidade do escoamento é de aproximadamente 30 m/s, local onde será necessária proteção por arejamento. Resultados experimentais indicam que até este ponto não ocorrem danos significativos provocados por cavitação;
- Determinar os índices de cavitação ao longo de todo o descarregador, para cada gama de caudais considerada no ponto 1;
- Determinar o local mais a montante, onde o índice de cavitação é menor que 0,20, ou menor que o índice de cavitação crítico para irregularidades na superfície do descarregador, calculando, depois, o local onde deverá ser instalada a primeira rampa de arejamento para que o ponto de impacto do escoamento a jusante desta corresponda a esse mesmo ponto;

- Tendo em conta a frequência de utilização do descarregador e os caudais a descarregar pelo mesmo, cada rampa deverá ser dimensionada de forma a garantir uma quantidade de ar correspondente a 10% do caudal máximo de descarga;
- O comprimento da cavidade de ar, L , correspondente ao caudal máximo a descarregar, poderá ser calculado através da seguinte equação:

$$q_a = 0,022 VL \quad [23]$$

sendo q_a a descarga de ar por unidade de largura e V a velocidade média do escoamento ao aproximar-se da rampa;

- Determinar as características geométricas para a rampa, de forma a garantir o comprimento da cavidade de ar necessário. Estas características podem ser calculadas utilizando os programas de modelação computacional, Falvey (1990), Harza Engineering Co. (1996) e Wei e DeFazio (1982);
- Dimensionar a conduta de arejamento de forma a garantir o fluxo de ar do ponto 6. A subpressão não deverá ser superior a -1,0 m e a velocidade de entrada do ar não deverá ultrapassar os 80 m/s de forma a evitar ruídos excessivos e o estrangulamento do escoamento;
- Analisar o funcionamento do sistema de arejamento para todas as gamas de caudais a descarregar. Se a velocidade de entrada do ar ultrapassar os 80 m/s ou a subpressão ultrapassar -1,0 m, a rampa deverá ser redimensionada de forma a cumprir estas limitações qualquer que seja o caudal descarregado;
- Colocar as restantes rampas espaçadas de uma distância nunca superior a 50 m. A última rampa de arejamento deverá estar, pelo menos, a uma distância de 20 m do órgão de dissipação de energia. Verificar a concentração de ar a jusante da rampa de arejamento através da fórmula de Falvey (1990):

$$C_x = C_0 e^{-K(L_x - L_i)} \quad [24]$$

em que C_x corresponde à concentração média de ar à distância X , C_0 à concentração média de ar no início do arejamento, L_x à distancia a jusante do arejador, L_i à distancia a jusante do arejador até ao ponto de início do arejamento e K a uma constante dimensional por metro, isto é, 0,017 m⁻¹. Numa secção reta a concentração de ar diminui aproximadamente de 0,15 a 0,20% por metro.

- Se necessário, instalar a rampa projetada no ponto 7 num modelo físico. O modelo deverá ser à escala 1:20 ou maior e deverá incluir todos os detalhes geométricos que poderão reduzir a trajetória do escoamento.

De notar que este processo consiste numa aproximação baseada em mais de 30 anos de experiencia (Coleman *et al.*, 2004).

3. Análise de Alguns Descarregadores de Cheias em Túnel Existentes

Com o objetivo de tentar compreender melhor o tipo de funcionamento e o método utilizado no dimensionamento de descarregadores em túnel, procedeu-se à recolha de informação sobre diversos descarregadores deste tipo existentes, não só em Portugal, mas também em outros países.

Com esta informação realizou-se uma análise comparativa, na tentativa de encontrar alguma correlação que pudesse ser pertinente no dimensionamento destas estruturas e uma verificação, através das fórmulas de Manning-Strikler e de Colebrook-White, da capacidade de descarga dos mesmos.

Foi realizada ainda uma análise dimensional, na tentativa de entender quais as características que mais influenciariam o funcionamento de um descarregador de cheias em túnel.

3.1. Análise comparativa de algumas barragens com descarregador em túnel

Após uma longa pesquisa bibliográfica, da recolha de alguns elementos provenientes da base de dados de barragens do ICOLD, e de informações fornecidas pela empresa Energia de Portugal (EDP), foi possível recolher informações detalhadas de diversas barragens, situadas em diversos países, que se encontram munidas de descarregadores de cheias em túnel.

Através de uma análise comparativa das diversas barragens estudadas, foi possível identificar quais as características do descarregador que irão influenciar diretamente a sua capacidade:

- Quanto maior a capacidade do descarregador, maior será o seu diâmetro;
- Para diferentes capacidades de descarga, poder-se-á aplicar ao túnel descarregador a mesma inclinação, sendo comum verificar-se inclinações entre 2 e 8%;
- O comprimento do túnel não irá influenciar a sua capacidade de descarga, apesar de a maioria dos descarregadores medir menos de 650 m.

3.2. Análise do dimensionamento dos túneis descarregadores

Com o objetivo de tentar compreender de que forma os descarregadores de cheias em túnel foram dimensionados, procedeu-se ao cálculo, para as barragens cujas características são conhecidas, da capacidade de descarga, do diâmetro e da inclinação através da fórmula de Manning-Strikler [7], tendo-se optado por considerar um coeficiente de Manning-Strikler de $75 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$ e um índice de enchimento de 0,8, ou seja, um ângulo ao centro, θ , de 4,4286 rad, valor deduzido através da fórmula [4].

Este cálculo permitiu constatar que, na sua grande maioria, os descarregadores não teriam capacidade suficiente para descarregar os caudais de cheia afluentes.

Tendo em conta os valores obtidos, procedeu-se a um cálculo idêntico, utilizando a fórmula de Colebrook-White, equação (11), com uma rugosidade equivalente, k , admitida igual a 1 mm, também com um índice de enchimento de 0,8 e uma viscosidade cinemática da água, ν , de $1,16 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

Através desta fórmula, mais precisa do que a de Manning-Strikler, foi possível obter valores mais próximos dos reais, sendo que os únicos descarregadores que não possuíam capacidade suficiente para descarregar o caudal necessário são os das barragens de Glen Canyon e Yellowtail (E.U.A.), conhecidas por terem sofrido graves problemas no que diz respeito ao dimensionamento dos respetivos descarregadores.

3.3. Análise dimensional

A análise dimensional é uma ferramenta muito útil para transpor dados obtidos no laboratório para situações reais, permitindo encontrar parâmetros adimensionais para caracterizar determinado processo físico. As suas principais vantagens são o facto de reduzir o número de variáveis envolvidas no estudo, não depender de qualquer sistema de unidades e fornecer parâmetros adimensionais que se mantêm invariáveis tanto na natureza como nos modelos físicos. Neste trabalho pretende-se analisar o escoamento num descarregador de cheias em túnel, no entanto, devido à dificuldade de construir um modelo físico optou-se por tentar determinar os parâmetros adimensionais característicos das diversas barragens cujas características foram recolhidas anteriormente, procurando verificar a existência de alguma relação que possa facilitar o dimensionamento de descarregadores de cheias em túnel. Para tal, aplicou-se o teorema de Vaschy-Buckingham, também conhecido como teorema dos π 's.

3.3.1. Escolha das variáveis e formulação dos parâmetros adimensionais

Na realização de uma análise dimensional é necessário, em primeiro lugar, identificar as variáveis características que influenciam a variável do fenómeno físico a estudar, neste caso, o caudal escoado pelo descarregador, Q .

Neste estudo, foram consideradas as seguintes variáveis: diâmetro do descarregador, D , altura útil do escoamento em secção circular, h_u , inclinação do túnel descarregador, i , aceleração da gravidade, g , rugosidade equivalente das paredes do descarregador, k , viscosidade cinemática da água, ν , massa volúmica, ρ , comprimento do túnel, L , e velocidade do escoamento, U . É agora necessário definir as variáveis fundamentais, ou seja, três variáveis que sejam dimensionalmente independentes e que permitam relacionar parâmetros adimensionais correspondentes a cada variável. Neste caso optou-se por considerar a altura útil do escoamento, a aceleração da gravidade e a massa volúmica. O passo seguinte consiste em determinar os parâmetros adimensionais referentes às variáveis e ao fenómeno físico que se pretende estudar. Então, com base nessa abordagem:

$$\pi_D = \frac{D}{h_u} \quad [25]$$

$$\pi_i = i \quad [26]$$

$$\pi_k = \frac{k}{h_u} \quad [27]$$

$$\pi_\nu = \frac{\nu}{\sqrt{g h_u^3}} \quad [28]$$

$$\pi_L = \frac{L}{h_u} \quad [29]$$

$$\pi_U = \frac{U}{\sqrt{g h_u}} \quad [30]$$

$$\pi_Q = \frac{Q}{\sqrt{g h_u^5}} \quad [31]$$

De referir que o parâmetro adimensional referente à velocidade, π_U , corresponde ao número de Froude, parâmetro hidráulico muito conhecido, utilizado para definir o tipo de escoamento verificado numa conduta.

Em muitos dos parâmetros adimensionais é possível verificar a presença da expressão $\sqrt{g h_u}$, correspondente à celeridade das pequenas perturbações da superfície livre. Como se pode ver, nenhum dos parâmetros adimensionais é dependente da massa volúmica, sendo então de assumir que esta não irá influenciar a capacidade de descarga de um descarregador de cheias em túnel.

Infelizmente, não foi possível obter valores exatos para alguns dos parâmetros característicos utilizados nesta análise, nomeadamente a rugosidade equivalente do túnel descarregador, a altura útil do escoamento e a viscosidade cinemática da água escoada por cada túnel.

Por isso, considerou-se a mesma viscosidade cinemática e rugosidade equivalente arbitrada em 3.2. Com estes valores foi realizada uma estimativa para a altura útil do escoamento através da equação de Colebrook-White.

O resultado desta estimativa foi, por sua vez, utilizado para estimar a velocidade do escoamento através da equação da continuidade.

3.3.2. Análise dos resultados

Após o cálculo dos parâmetros adimensionais, é possível efetuar algumas análises. Como era de esperar verifica-se que quanto maior for o diâmetro, maior será a capacidade de descarga, de acordo com uma tendência potencial, com um valor de R^2 de 90%, tal como mostra a Figura 3.

Em relação à inclinação e à velocidade de escoamento, é possível observar, em ambos os casos, uma tendência linear com um valor de R^2 ainda maior do que o obtido para o diâmetro, como se pode ver pelas Figuras 4 e 5.

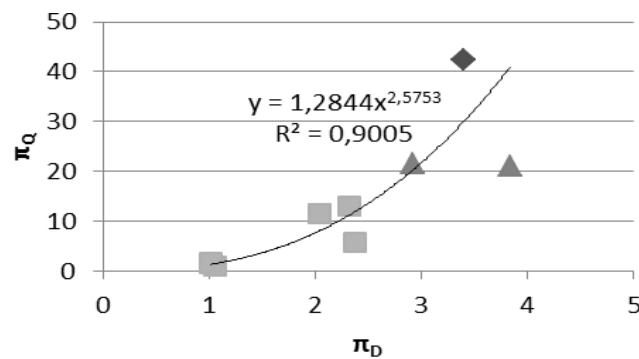


Figura 3. Relação entre os parâmetros adimensionais correspondentes ao diâmetro (π_D) e ao caudal (π_Q).

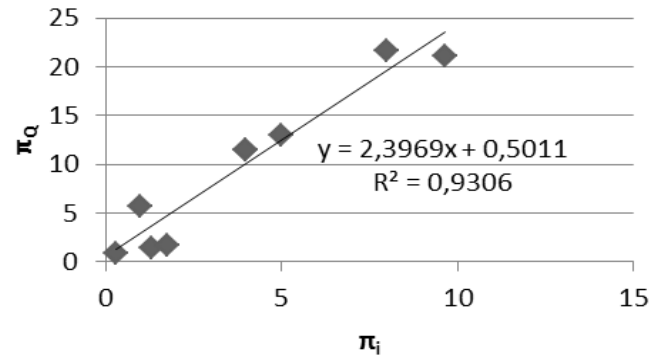


Figura 4. Relação entre os parâmetros adimensionais correspondentes à inclinação (π_i) e ao caudal (π_Q).

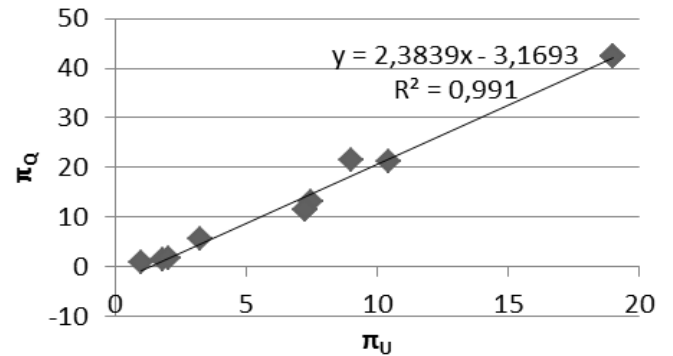


Figura 5. Relação entre os parâmetros adimensionais correspondentes à velocidade do escoamento (π_U) e ao caudal (π_Q).

Quanto ao comprimento do túnel descarregador, não é visível qualquer relação entre este e o caudal descarregado, indo esta conclusão ao encontro da que havia sido feita na análise comparativa das diferentes barragens com descarregadores de cheias em túnel. Uma conclusão idêntica pode ser tomada em relação à viscosidade cinemática e à rugosidade equivalente, havendo neste caso uma incerteza muito grande devido ao facto destes parâmetros terem sido arbitrados.

3.3.3. Conclusões

Através da análise dimensional realizada é possível concluir que a capacidade de descarga de um descarregador de cheias em túnel irá estar principalmente relacionada com o diâmetro, a inclinação e a velocidade de escoamento.

Simplificando a linha de tendência da Figura 3, é possível deduzir a equação [32] que, numa fase de pré-dimensionamento, pode ser utilizada de forma a obter uma aproximação do diâmetro que o descarregador deverá possuir para descarregar um determinado caudal de cheia máximo.

$$D = \sqrt[5]{\frac{Q^2}{g 1,2844^2}} \quad [32]$$

Simplificando a linha de tendência calculada na figura 5 obtém-se a seguinte equação:

$$\frac{Q}{h_u^{\frac{5}{2}} g^{\frac{1}{2}}} = 2,3839 \frac{U}{h_u^{\frac{1}{2}} g^{\frac{1}{2}}} - 3,1693 \quad [33]$$

Segundo a equação da continuidade, a velocidade do escoamento corresponde ao quociente entre o caudal e a secção de escoamento, sendo possível então utilizar as equações apresentadas no capítulo 2.2.1 em conjunto com a equação [33] de forma a obter uma aproximação da altura útil do escoamento no descarregador. Após estimar a altura útil do escoamento no descarregador pode utilizar-se a equação [34], resultante da linha de tendência da Figura 4, para estimar um valor para a inclinação que o descarregador deverá possuir.

$$\frac{Q}{h_u^2 \sqrt{g h_u}} = 2,3969 i + 0,5011 \quad [34]$$

Seguindo este processo, por exemplo, para os descarregadores instalados na barragem do Alto Lindoso, obtém-se, para um caudal de 1380 m³/s, um diâmetro aproximado de 10,33 m, uma altura útil de 3,5 m e uma inclinação de 8%.

Verifica-se alguma diferença em relação aos valores utilizados na construção do descarregador (diâmetro de 8,75 m, altura útil de 4,5 m e uma inclinação de 4%).

Dever-se-á, por isso, ter sempre em conta que quaisquer valores obtidos através destas fórmulas deverão ser confirmados por outros cálculos hidráulicos já comprovados e que o descarregador deverá ser analisado em modelo físico.

4. Conclusões

Este estudo teve como objetivo compreender o funcionamento de descarregadores de cheias em túnel e verificar a existência de limitações que impeçam que esta solução de descarga de cheias seja mais vezes aplicada.

Esta análise está associada ao facto do dimensionamento deste tipo de elemento não ser linear e recorrer muitas vezes a modelos físicos.

Por isso, utilizaram-se abordagens alternativas e indiretas, de forma a identificar a relação entre as variáveis mais significativas. Para tal, procurou-se obter a partir da bibliografia, características de descarregadores de cheias existentes, assim como os elementos que os constituem.

O trabalho foi então direcionado para o seu principal objeto de estudo, os descarregadores de cheias em túnel. A possibilidade de aproveitar o desvio provisório já construído oferece uma grande vantagem económica a este tipo de descarregador, assim como o facto de não implicar escavações a céu aberto, reduzindo não só o impacto visual mas também possíveis custos de expropriação.

Estes descarregadores são também muito vantajosos em barragens situadas em zonas de vales muito estreitos, e com grandes declives, onde a construção de um outro tipo de descarregador se pode revelar extremamente difícil ou até impossível.

No entanto, esta solução pode revelar-se difícil de dimensionar pois, uma vez que o escoamento se processa em superfície livre, é necessário projetar sistemas de arejamento de forma a garantir a presença de um volume de ar suficiente dentro do túnel.

Em caso de avaria ou problemas de funcionamento, os descarregadores em túnel colocam em risco a estabilidade da barragem, sendo por isso comum a utilização de descarregadores auxiliares em conjunto com estes.

Foram apresentados os critérios de projeto atuais para este tipo de descarregadores, assim como os processos de dimensionamento dos mesmos: perfil longitudinal, diâmetro do descarregador e sistema de arejamento.

Devido à ausência de informação suficiente para analisar um caso de estudo específico, optou-se, como foi referido, por recolher informações de diversos projetos munidos de descarregadores de cheias em túnel.

Com esta informação procedeu-se a uma análise comparativa dos diferentes descarregadores, onde se concluiu não existir qualquer limitação, do ponto de vista hidráulico, para a construção deste tipo de obra.

Realizou-se também uma análise dimensional, que permitiu determinar três expressões que poderão ser bastante úteis numa fase de pré-dimensionamento de um descarregador de cheias em túnel.

4.1. Desenvolvimentos futuros

Diversos estudos têm sido realizados na tentativa de tornar os descarregadores de cheias um elemento mais económico. Estes, no entanto, não têm como foco principal a solução analisada nesta dissertação, procurando reduzir os custos através da otimização do corpo das barragens, nomeadamente o coroamento das mesmas, e combinação de descarregadores e diques fusíveis, ou descarregadores controlados, e não, por comportas.

Existem ainda soluções que nos últimos anos têm vindo a ganhar bastante relevância, nomeadamente os descarregadores em degraus e soleiras em labirinto, que permitem otimizar a capacidade dos descarregadores de cheias e diminuir a energia do escoamento.

Os descarregadores em degraus têm vindo a ser estudados com bastante sucesso inclusive no Laboratório de Hidráulica da Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente (SHRHA) do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Apesar destas novas soluções construtivas, em vales estreitos, a aplicação de um descarregador de cheias em túnel, apesar de muito dispendiosa, tem-se revelado como alternativa única, existindo a possibilidade de construir diques fusíveis para ajudar na descarga de cheias superiores à cheia milenar, permitindo assim diminuir o custo do descarregador e as consequências resultantes de algum problema no funcionamento do mesmo (Lempérière e Vigny, 2012).

Como desenvolvimentos futuros, sugere-se a verificação em laboratório dos resultados obtidos pela análise dimensional que possa verificar a precisão das fórmulas determinadas no capítulo 3 deste trabalho, procurando aplicar as mesmas a um, ou mais casos de estudo específicos, procurando, também, verificar se a construção de um descarregador de cheias em túnel é a opção mais vantajosa.

Poderá ser realizada, ainda, uma análise de risco relativamente a descarregadores de cheias em túnel e outros tipos, de forma a comparar a probabilidade de estes sofrerem alguma perturbação no seu funcionamento e quais as consequências de tal falha.

4.2. Considerações finais

Como consideração final é de referir que não existe qualquer limitação hidráulica ou tecnológica que impeça a construção de um descarregador de cheias em túnel numa barragem, sendo que esta apenas pode ser impossibilitada pelas características geológicas do local.

É possível então concluir que o facto de não se recorrer mais frequentemente à construção de um descarregador de cheias em túnel se deve, na maioria dos casos, a limitações geológicas do local, a fatores económicos que tornam mais vantajosa a construção de outro tipo de órgão de descarga ou claro, o facto de o projetista não considerar que esta solução se aplica a um certo caso.

Referências

Álvares-Ribeiro, A. (1970). *Descarregadores em túnel. Trampolim em salto de ski*. Laboratório de Hidráulica, Maio 1970, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

Chanson, H. (1992). *Air entrainment in chute and tunnel spillways*. 11th Australasian Fluid Mechanics Conference, 14-18 Dezembro, Hobart, Australia.

Coleman H., Wei, C., Lindell, J. (2004). *Hydraulic design of spillways*. In Hydraulic design handbook, 17.41-17-49, Harza Engineering Company, Chicago, E.U.A.

Dekker, M. (2005). *Hydraulics of Spillway and Energy Dissipators*. Meyer, M., Atlanta, E.U.A.

Lempérière, F., Vigny, J-P. (2012). *New methods and criteria for designing spillways could reduce risks and costs significantly*. . In Hydropower & Dams, 120-128, Deroo, L., Paris, França.

Pinto, N. (1988). *Spillway design and construction*. In Advanced Dam Engineering for Design, Construction, and Rehabilitation, 620-634, Jansen, R., Nova Iorque, E.U.A.

Proença, M. (2010). *Cálculo de coletores circulares e valetas*, Aulas teóricas da disciplina de hidrologia e recursos hídricos do Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Ano letivo 2011/2012

Quintela, A., Pinheiro, A. (2001). *Barragens*. In *Curso de Exploração e Segurança de Barragens*, 1-160 a 1-163, Instituto da Água, Lisboa.