

AVALIAÇÃO DO COMPRIMENTO MÁXIMO DE ATUAÇÃO DE ESFORÇOS HIDRÁULICOS LÍMITES A JUSANTE DE COMPORTAS EM CONDUTOS

Bruna Moreira Sell¹, Priscila dos Santos Priebe² e Mauricio Dai Prá³

¹Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos- Universidade Federal de Pelotas, Brasil.

²Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

³Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos- Universidade Federal de Pelotas, Brasil.

E-mail: brunamoreirasell@gmail.com, priscilaspriebe@gmail.com, mdaipra@gmail.com

Resumo

As eclusas de navegação são estruturas utilizadas para transposição de desníveis. A compensação da diferença de carga hidráulica, enchimento e/ou esvaziamento da câmara, se dá por meio de um sistema de tubulações, enquanto que a operação das eclusas é feita por meio de comportas. Como na região a jusante das comportas ocorre uma zona de instabilidade de pressões, o presente estudo avaliou esta região, na base e no teto de um conduto retangular, exposta ao risco de erosão do concreto, causadas pelas mínimas cargas de pressões médias. A pesquisa propôs uma metodologia adimensional para analisar as condições de operação que podem desencadear o processo erosivo no concreto, assim como estimar o comprimento máximo do conduto no qual os esforços críticos são atuantes. Por meio dos resultados obtidos foi possível concluir que um adimensional de operação pode ser aplicado para estimar este comprimento máximo a jusante de comportas, tanto na base quanto no teto dos condutos.

Introdução

As eclusas são estruturas hidráulicas que permitem a compensação de desnível, causado por barreiras topográficas naturais ou artificiais, que impedem a navegação em determinados trechos. Os sistemas clássicos para o enchimento/esvaziamento de câmaras de eclusas são compostos por condutos e comportas, que permitem o controle da vazão.

O mesmo sistema hidráulico é observado na operação de descarregadores de fundo; estruturas hidráulicas tipicamente construídas junto ao corpo de barragens e cuja finalidade é escoar a água para jusante a fim de garantir uma vazão mínima, descarregar sedimentos acumulados e escoar as vazões de cheia, total ou parcialmente (Kanashiro, 2011).

Em ambos os casos, além dos sistemas hidráulicos respeitarem o mesmo princípio de funcionamento, o material de revestimento geralmente empregado é o concreto. Durante a operação destas estruturas, Priebe (2016) aponta que na região a jusante das comportas, devido as altas velocidades em que o escoamento ocorre e as baixas pressões, problemas de cavitação podem ocorrer. O fenômeno de cavitação pode desencadear processos de erosão, os quais podem reduzir a vida útil da obra, e por esta razão, as áreas superficiais das estruturas hidráulicas de concreto devem ser resistentes (Dafre Filho, 2004).

O objetivo deste estudo foi desenvolver uma análise adimensional para identificar o trecho a jusante de comportas em condutos retangulares de concreto, expostos a condições de operação que podem desenvolver processos erosivos pelo efeito de abrasão e/ou cavitação.

Metodologia

Os dados utilizados neste estudo foram obtidos de Priebe (2016) e Oliveira (2016). O estudo foi conduzido em ensaios realizados em um modelo experimental, alocado no Laboratório de Hidráulica e Hidroenergia do curso de graduação em Engenharia Hídrica da Universidade Federal de Pelotas.

O modelo físico simula o escoamento em um conduto de enchimento/esvaziamento de uma eclusa de navegação de média/alta queda e possui escala geométrica de 1:32, cujo

protótipo tem um conduto de seção transversal quadrada com 4 metros de lado. Integram os componentes do modelo reduzido: dois reservatórios interligados, um conjunto moto-bomba, um sistema de condutos com diversas peças especiais que permitem conduzir e acompanhar as características hidráulicas do escoamento, uma comporta do tipo segmento invertida e uma chaminé de equilíbrio.

Durante as campanhas de ensaio foram registradas, em cada simulação, com diferentes condições de vazão e grau de abertura da comporta, as cargas de pressão média observadas em piezômetros, bem como a distância dos pontos de tomada de pressão em relação ao batente da comporta. A região de interesse foi o trecho a jusante da comporta, com dados coletados na base e no teto do conduto.

Após a etapa de ensaios, foram traçados gráficos para representar o comportamento das distribuições longitudinais das cargas de pressão média. A fim de identificar as condições de ensaio que poderiam desenvolver risco de erosão, o presente estudo adotou a recomendação de Lemos (1981) do qual aponta que para evitar a cavitação em estruturas de concreto, a limitação das cargas de pressão locais médias não podem exceder o valor de $-6 \text{ mH}_2\text{O}$. Por se tratar de uma análise em um modelo físico com escala reduzida, o valor limite de $-6 \text{ mH}_2\text{O}$ foi então convertido, resultando em $-0,1875 \text{ mH}_2\text{O}$ e inserido aos gráficos plotados. Desta maneira foi possível apontar quais as condições de ensaio, em que combinadas a vazão e o grau de abertura da comporta, a carga de pressão média registrada encontrou-se abaixo daquela indicada como limite, implicando em propensão aos esforços erosivos em estruturas de concreto.

Para as condições de ensaio onde as cargas de pressão média registradas foram inferiores à recomendada por Lemos (1981), foi identificada a posição limite, definida como a porção mais distante do trecho a jusante da comporta como sendo zona de risco a erosão, e, conseqüentemente, como área a ser protegida em condições de projeto. Assim, gerou-se uma nova série de dados, e para estes foi realizada a análise dimensional, seguindo metodologia do Teorema Pi de Buckingham (White, 2002).

Foram analisados diferentes parâmetros hidráulicos e formados oito conjuntos adimensionais. Os parâmetros analisados estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1.- Parâmetros hidráulicos utilizados para a análise adimensional.

Parâmetro Hidráulico	Símbolos
Velocidade do Escoamento na Abertura da Comporta	$V_{\text{abertura comporta}}$
Velocidade do Escoamento Conduto Pleno	$V_{\text{conduto pleno}}$
Vazão	Q
Carga de Pressão do Limite de Tração do Concreto	P/γ_{limite}
Perda de Carga	h_f
Altura da Abertura da Comporta	$H_{\text{abertura comporta}}$
Altura do Conduto Pleno	$H_{\text{conduto pleno}}$
Massa Específica da Água	ρ
Viscosidade Dinâmica da Água	μ
Aceleração da Gravidade	g

Como ferramenta de decisão, foram analisados conjuntamente os coeficientes de determinação (R^2) e o erro médio quadrático

(RMSE). Recorreu-se a análise conjunta, visto que o R^2 é indicado para as condições cujo ajuste característico é do tipo linear. Em contrapartida, o RMSE apresenta limitações no seu uso por ser sensível a escala de valores das grandezas em análise. Pelas razões apresentadas, o presente estudo adotou como critério de decisão o R^2 , a fim de eleger o grupo adimensional que melhor descreva as condições de operação e o RMSE como ferramenta complementar.

Resultados e Discussão

Neste estudo foram definidos dois conjuntos adimensionais, um de posição e outro de operação. O conjunto adimensional de posição, proposto e adotado neste estudo, resulta da razão entre a posição limite e a altura da abertura da comporta (equação 1).

$$\Pi_{\text{posição}} = \frac{X_{\text{limite}}}{H_{\text{abertura da comporta}}} \quad [1]$$

Buscou-se analisar adimensionalmente a posição longitudinal, visto que desta forma é possível determinar a incógnita de principal interesse prático para pesquisadores, projetistas e operadores de estruturas hidráulicas, que é a posição limite.

Após definir o adimensional de posição, foram propostos oito conjuntos adimensionais a partir das variáveis definidas na Tabela 1. Cada conjunto Π_i foi confrontado com o adimensional de posição, através da representação gráfica, onde extraiu-se a curva de ajuste, os coeficientes R^2 e RMSE, para desta forma, apontar o melhor conjunto adimensional que representasse as condições de operação. Os oito conjuntos propostos são apresentados na Tabela 2, juntamente os coeficientes R^2 e RMSE.

Tabela 2.- Grupos adimensionais de operação.

Grupo Adimensional	R^2		RMSE	
	Base	Teto	Base	Teto
$\Pi_1 = \frac{h_f^2 \cdot V_{\text{abertura comporta}}}{Q}$	0,978	0,898	50,73	242,44
$\Pi_2 = \frac{h_f^2 \cdot V_{\text{conduto pleno}}}{Q}$	0,935	0,803	24,77	44,76
$\Pi_3 = \frac{P}{\gamma_{\text{limite}} h_f}$	0,967	0,871	0,012	0,048
$\Pi_4 = \frac{H_{\text{abertura comporta}}}{h_f}$	0,991	0,931	0,002	0,023
$\Pi_5 = \frac{X_{\text{limite}}}{h_f}$	0,709	0,581	0,019	0,064
$\Pi_6 = \frac{H_{\text{conduto pleno}}}{h_f}$	0,935	0,803	0,009	0,041
$\Pi_7 = \frac{h_f \cdot v}{Q}$	0,979	0,945	4,6E-6	1,09E-5
$\Pi_8 = \frac{h_f^5 \cdot g}{Q^2}$	0,985	0,905	3,0E4	7,64E5

Após análise de cada conjunto adimensional, com base na sua representação gráfica e nos coeficientes R^2 e RMSE, o Π_7 foi adotado como o adimensional de operação. A escolha do adimensional Π_7 em relação aos demais propostos foi devido ao fato de que este grupo adimensional apresentou valores de R^2 bastante próximo de 1 e dado o fato de que os parâmetros que o compõe representarem as condições de operação de fácil obtenção ou determinação.

De modo a facilitar sua aplicação, o Π_7 foi reescrito em função da viscosidade cinemática (ν), resultando no adimensional de operação ($\Pi_{\text{operação}}$) exposto na equação 2.

$$\Pi_{\text{operação}} = \frac{h_f \cdot \nu}{Q} \quad [2]$$

Após definir o adimensional de operação, foi elaborada a avaliação conjunta com os dados obtidos para a base e o teto do conduto (Figura 1), sendo possível identificar que, embora existam pontos que se encontram fora da linha de tendência, os dados tendem a um ajuste comum. Tal afirmativa é reforçada com o valor de R^2 encontrado, de 0,933.

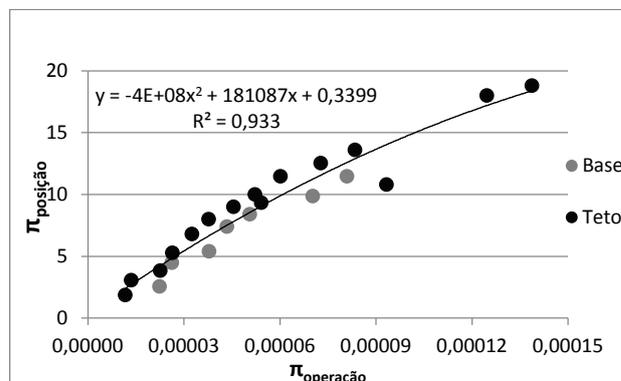


Figura 1.- Avaliação do conjunto adimensional de operação e do conjunto adimensional de posição, para os dados obtidos na base e no teto do conduto.

O adimensional de operação proposto neste estudo pode ser aplicado para descrever o comportamento do escoamento no trecho a jusante da comporta tanto na base quanto no teto do conduto retangular, de forma a inferir o comprimento limite em que os esforços de pressão serão inferiores a $-6mH_2O$, que podem desencadear danos ao concreto, estarão atuantes.

Conclusões

Com base nos resultados obtidos, é possível concluir que o método adimensional proposto permite averiguar as condições de operação que podem comprometer a integridade de estruturas hidráulicas revestidas de concreto, operadas por um sistema de condutos retangulares e comportas, e identificar o trecho onde os esforços atuantes podem degradar o material de revestimento. O adimensional de operação proposto pode ser aplicado tanto na base quanto no teto de condutos retangulares. Por meio do emprego do adimensional de posição é possível apontar o comprimento do trecho a jusante das comportas, exposto a processos erosivos, do qual deve ser protegido com materiais mais resistentes, em condições de projeto.

Referências bibliográficas

- Dalfré Filho, L. G.; Genovez, A. I. B. (2004). "Métodos para Avaliação do Desgaste em Amostras de Concreto Submetidas à Abrasão e à Cavitação". *Ingeniería Del Agua*, Vol. 11, No. 4, Dez. 2004, p. 389-396.
- Kanashiro, W. H. (2011). *Curso Segurança de Barragens: Módulo 1 – Barragens: Aspectos Legais, Técnicos e Socioambientais, Unidade 6: Noções de Hidráulica*. Foz do Iguaçu: Convênio entre Agência Nacional de Águas e Parque Tecnológico de Itaipu, 2011. 75 p.
- Lemos, F. O. (1981). *Crerios para o Dimensionamento Hidráulico de Barragens Descarregadoras*. Ministério da Habitação e Obras Públicas – Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Memória nº 556, Lisboa, 1981.
- Oliveira, F. F. M. (2016). "Pressões a Jusante de Comportas Tipo Segmento Invertida em Condutos de Eclusas". 2016. 135 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2016.
- Priebe, P. S. (2016). "Caracterização das pressões induzidas pelo escoamento a jusante de comportas em condutos retangulares". 2016. 172f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2016.
- White, F.M. (2002). *Mecânica dos Fluidos*. 4ª ed. Rio de Janeiro: McGraw-Hill, 2002.