

XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

DISTRIBUIÇÃO DAS PRESSÕES MÉDIAS AO LONGO DA CALHA DE UM VERTEDOIRO EM DEGRAUS JUNTO A ARESTA EXTERNA DOS ESPELHOS

Fabiane Aquino¹; Matheus Victor Cruz²; Matheus Kunrath Oliveira³; Rute Ferla⁴; Carolina Novakoski⁵; Alba Valéria Brandão Canellas⁶; Mauricio Dai Prá⁷; Luiz Augusto Magalhães Endres⁸; Eder Daniel Teixeira⁹; Marcelo Giulian Marques¹⁰

RESUMO – Vertedouros em degraus apresentam-se técnica e economicamente viáveis dada a significativa dissipação de energia hidráulica que é proporcionada ao escoamento devido à macro rugosidade dos degraus. Porém, a estrutura da calha sofre limitações quanto ao escoamento imposto, pois há risco de cavitação nos degraus dependendo das pressões negativas atuantes, condição comum aos espelhos dos degraus. Com o objetivo de identificar as zonas onde pode ocorrer o fenômeno da cavitação, foram realizados testes em modelos físicos de vertedouros em degraus. As calhas desses modelos possuem alturas dos degraus de 0,6 m e 0,9 m, sendo a declividade da calha de 1,00V:0,75H. Neste estudo, foi observado o comportamento das pressões médias nas arestas externas dos espelhos dos degraus. As pressões médias foram adimensionalizadas utilizando diferentes parâmetros a fim de prever o seu comportamento geral nos espelhos, para as condições ensaiadas. Conclui-se que para valores do adimensional $L/k/F^*$ maiores que 4 as pressões médias adimensionalizadas ($P_{med}/\gamma/Z$) começam a demonstrar um comportamento assintótico, com valores entre -0,02 e 0,00.

ABSTRACT– The stepped spillway is technically and economically feasible because of the significant dissipation of hydraulic energy, which is provided by the aerated flow due to the macro roughness of the steps. However, the structure of the gutter suffers limitations as to the flow imposed, as there is risk of cavitation in the steps depending on the negative pressures acting. This condition is common to the mirrors of the stairs. In order to identify the areas where the cavitation phenomenon may occur, tests were performed on physical models of 1:10 scale spillways. The gutters of these models have steps heights of 0.6m and 0.9m, with slope of 1.00v:0,75H. In this study, the behavior of the mean pressures at the outer edges of the step mirrors was observed. The mean pressures were dimensionless using different parameters in order to predict their general behavior in the mirrors for the conditions tested. As results of the analyzes it was shown that for values of the dimensionless $L/k/F^*$ greater than 4 the pressure $P_{med}/\gamma/Z$ begin to demonstrate an asymptotic behavior, with values between -0,02 and 0.00.

Palavras-Chave – Vertedouro em degraus; Pressões médias.

¹ IPH/UFRGS, Porto Alegre – RS - fabianaquino7@gmail.com; ²matheusvictorcruz8@gmail.com; ³matheuskunrath92@gmail.com; ⁴carolkn04@gmail.com; ⁵ruteferla@hotmail.com; ⁶ELETROBRÁS - FURNAS Centrais Elétricas - alba@furnas.com.br; ⁷endres@ufrgs.br; ⁸mmarques@iph.ufrgs.br; ⁹eder.teixeira@ufrgs.br; ¹⁰mauricio.daipra@ufrgs.br

INTRODUÇÃO

As barragens possuem papel significativo na história do desenvolvimento da humanidade. A sua finalidade era de, sobretudo, combater a escassez de água em períodos de seca. As barragens mais antigas, a nível mundial, se localizavam no Egito, Oriente Médio e Índia. Com o surgimento da revolução industrial, aumentou-se a construção de barragens e as técnicas de construção foram aprimoradas. Conforme o avanço das tecnologias de construção foi possível desenvolver nestas barragens vertedouros específicos, que melhor convém às características da obra. Os vertedouros são estruturas hidráulicas que permitem a passagem do escoamento, de montante para jusante do barramento, contribuindo para a segurança das construções. O vertedouro em degraus (figura 1) apresenta-se diferente dos demais em função da dissipação de energia ao longo de sua calha, causada pela antecipação da aeração do escoamento. Isto permite que o escoamento alcance a estrutura de dissipação com menor energia, contribuindo, assim, com a diminuição de custos e com a possível redução dos danos.



Figura 1: Vertedouro da UHE Dona Francisca (RS) (Fonte: <http://lucaspsoficial-ikran7.blogspot.com/2016/03/turismo-barragens-e-pontes-no-rio-jacui.html>).

A partir da década de 70, com o surgimento da tecnologia do concreto compactado a rolo (CCR), a construção de vertedouro em degraus aumentou significativamente, tornando-se objeto de estudo de vários pesquisadores e profissionais da área da engenharia hidráulica devido às vantagens construtivas e econômicas dessas obras. No país, o surgimento de barragens construídas a partir da tecnologia do CCR despertou o interesse por vertedouros com calha em degraus. Hoje se destacam, no estado do Rio Grande do Sul (RS), por exemplo, os vertedouros das barragens de Dona Francisca e Val de Serra, sendo que ambos possuem degraus de 60 cm de altura com declividade de $53,13^\circ$ (1,00V:0,75H). Seguindo o avanço nas construções, surgiu a necessidade de se construir vertedouros mais altos e com maior capacidade de vazão, entretanto, com isso, cresce a

preocupação com a zona dos degraus onde ocorrem as pressões negativas mais críticas. Essa zona está localizada, geralmente, nas proximidades das arestas dos espelhos dos degraus, e em regiões não aeradas da calha. Desse modo, o desenvolvimento de metodologias para estimativa das regiões propensas à ocorrência do fenômeno da cavitação é uma importante ferramenta na previsão de locais suscetíveis a danos.

OBJETIVO

Tendo em vista a importância do estudo das pressões e suas flutuações na calha de um vertedouro em degraus, em especial nas arestas dos espelhos, o presente estudo visa caracterizar a distribuição longitudinal exclusivamente das pressões médias negativas nestas regiões.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Segundo Osmar (2016), o aumento da vazão específica e da velocidade nas calhas em degraus têm implicações. Entre elas está o aumento das pressões negativas sobre os degraus do vertedouro, situação que favorece a ocorrência do fenômeno da cavitação e, conseqüentemente, intensifica a chance de ocorrência de danos às estruturas hidráulicas.

Com o intuito de prever quais são as zonas de maior ocorrência das pressões negativas, estudos envolvendo a calha de vertedouros em degraus vêm sendo desenvolvidos por diversos autores. Tozzi (1992), citado por Osmar (2016, p18), utilizou um modelo físico com calha de declividade igual a 1,00V:0,75H e vazões específicas entre 120,5 e 201,4 L/s/m, identificou pressões negativas com carga de pressão elevada e uma considerável variação de pressões (entre - 0,50 e 0,40 m.c.a). Através deste registro, o autor constatou que é preciso estabelecer um limite de vazão específica nas estruturas, visando à segurança da mesma contra o desgaste provocado pela cavitação.

Já Gomes (2006) utilizou um modelo físico com calha cuja declividade é semelhante à de Tozzi (1992), de 1,00V: 0,75H, porém com degrau de 9 cm de altura. O autor adimensionalizou as pressões pelo termo cinético do escoamento através da equação 1, proposta por Amador (2005), em conjunto com a equação 2 para adimensionalizar a posição ao longo da calha.

$$Cp = \frac{\frac{P}{\gamma}}{\frac{V_m^2}{2g}} \quad (1)$$

Sendo

Cp = coeficiente de pressão (adimensional)

P/γ = pressão que se deseja adimensionalizar (m.c.a.)

V_m = velocidade média do escoamento na seção (m/s)

g = aceleração da gravidade (m/s²)

$$s' = \frac{(L_j - L_i)}{d_i} \quad (2)$$

Sendo

s' = posição longitudinal (adimensional)

L_j = posição ao longo da calha a partir da crista do vertedouro (m)

L_i = posição de início de aeração ao longo da calha a partir da crista do vertedouro (m)

d_i = profundidade do escoamento no início da aeração.

Gomes (2006) usou a equação proposta por Matos (1999) para o cálculo da profundidade do escoamento no início da aeração (d_i), conforme apresentado na equação 3.

$$\frac{d_i}{k} = 0,361 \cdot F^{*0,606} \quad (3)$$

Sendo

d_i = profundidade do escoamento no início da aeração (m)

F^* = Froude rugoso (adimensional)

k = Rugosidade do degrau (m).

Conforme observado por Sanagiotto (2003), Amador (2005), Gomes (2006), Zhang et al. (2012), entre outros, as pressões extremas negativas ocorrem próximas às arestas dos espelhos dos degraus. É consenso que a amplitude das pressões médias aumente com a vazão ensaiada.

METODOLOGIA



Os dados analisados foram obtidos a partir da realização de ensaios em dois modelos físicos de vertedouro em degraus, sendo um deles localizados no Laboratório de Obras Hidráulicas (IPH/UFRGS), aqui identificado como LOH I, e o outro situado no Laboratório de Hidráulica Experimental (LAHE/Furnas), identificado como LAHE. A Tabela 1 apresenta as principais características dos modelos físicos utilizados.

Os dados de pressões foram adquiridos através de piezômetros. As tomadas de pressão foram instaladas próximas às arestas dos degraus, como mostra a figura 2, sendo que no modelo LOH I foram instrumentados os degraus de número 2 a 28 e no modelo LAHE se instrumentaram os degraus de número 2, 4, 5, 8, 9, 11, 12, 15 e 16. Ensaíram-se vazões específicas equivalentes entre ambos os modelos, correspondendo às vazões de 0,10, 0,20 e 0,33 m³/s/m.

As pressões médias foram adimensionalizadas pela carga total (Z) calculada através da equação (5) em função do comprimento longitudinal (L), da rugosidade (k) e do número de Froude

rugoso (F^*), conforme equações (6), (7) e (8), de acordo com os parâmetros esquematizados na Figura 3.

Tabela 1: Resumo das características geométricas dos modelos físicos

	Símbolo	LAHE	LOH I
Escala	-	1:10	
Altura do modelo (m)	-	2,30	2,45
Altura do degrau (m)	h_d	0,09	0,06
Altura da ogiva (m)	Y_0	0,78	0,82
Rugosidade do degrau (m)	k	0,054	0,036
Largura do vertedouro (m)	B	1,15	0,40
Declividade da calha (°)	-	1:00V:0,75H	
Fotos dos modelos	-		

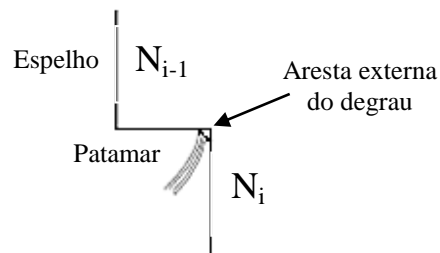


Figura 2: Esquema dos pontos de medição instalados junto às arestas externas dos degraus (n = número do degrau)

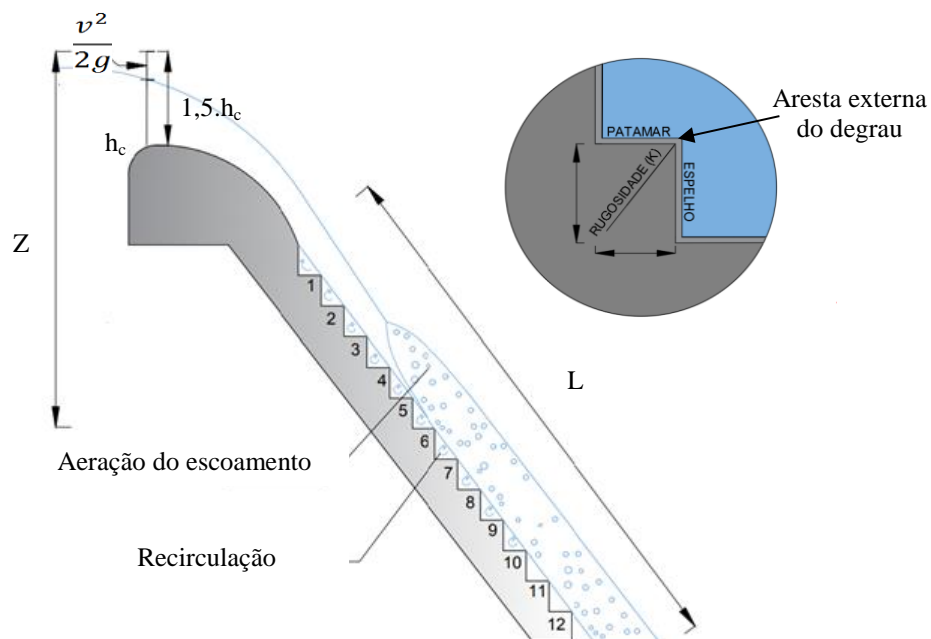


Figura 3: Modelo esquemático apresentando os parâmetros utilizados no presente estudo. (FONTE: Laboratório de Obras Hidráulicas).

$$Z = 1,5hc + Y_0 + Y_d \quad (5)$$

Sendo

Z = carga total (m)

h_c = altura crítica (m)

Y_0 = altura da ogiva (m)

Y_d = altura a partir do primeiro degrau até o degrau em análise (m)

$$L = N(\sqrt{hd^2 + ld^2}) \quad (6)$$

Sendo

N = número do degrau

hd = altura do espelho (m)

ld = comprimento do patamar (m)

$$F^* = \frac{q}{\sqrt{g \cdot k^2 \cdot \sin \alpha}} \quad (7)$$

Sendo

q = vazão específica (m³/s/m)

$$k = h \cos \alpha \quad (8)$$

Sendo

α = declividade da calha (°)

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A figura 4 mostra o comportamento das pressões médias ($P_{\text{méd}}$) nos espelhos dos modelos LAHE e LOH I ao longo da calha, para as vazões ensaiadas. Nota-se que as pressões médias possuem comportamento semelhante ao longo de toda a calha, com carga de pressão em torno de - 0,06 a 0,05 m.c.a.

A Figura 5 apresenta as pressões médias adimensionalizadas em função da carga total (Z), da posição longitudinal (L), da rugosidade do degrau (k) e do número de Froude rugoso (F^*).

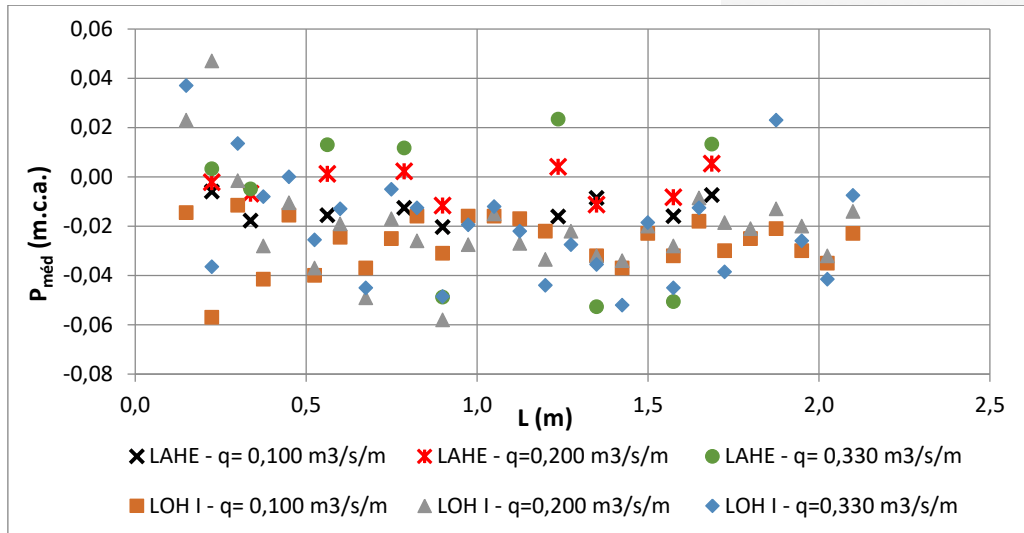


Figura 4: Comportamento entre as pressões médias (m.c.a.) nos espelhos dos degraus do modelo LAHE e LOH I ao longo da calha.

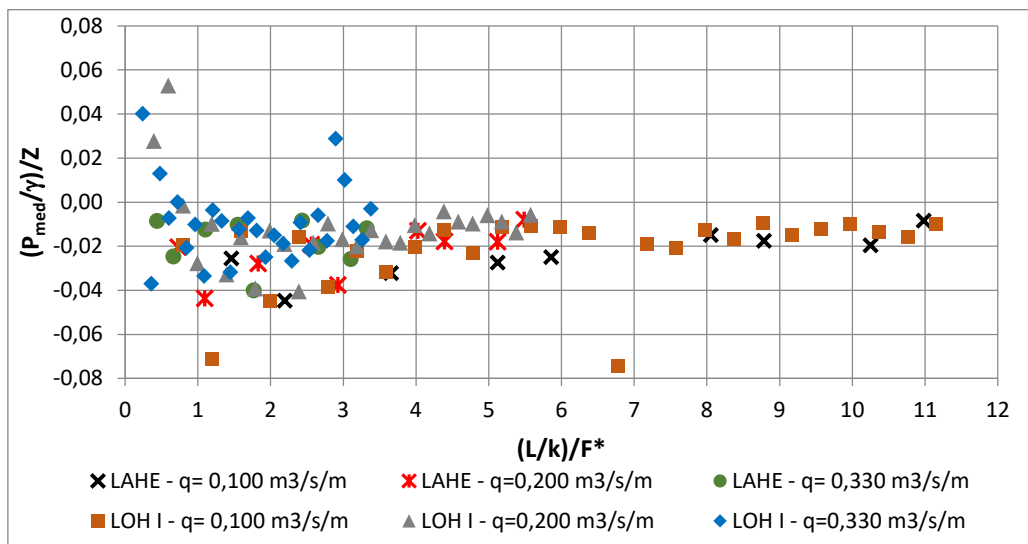


Figura 5: Comportamento das pressões médias nos espelhos dos degraus dos modelos LAHE e LOH I adimensionalizadas pela carga total (Z) em função do comprimento longitudinal (L), rugosidade (k) e número de Froude rugoso (F^*).

De acordo com a Figura 5, é possível observar que:

- Os valores apresentaram maior dispersão no início da calha, na região compreendida em $0 < \left(\frac{L}{k}\right)/F^* < 4$. Nesta região o adimensional $(P_{med}/\gamma)/Z$ assumiu valores entre -0,07 a 0,06, diminuindo a dispersão para posições mais a jusante (maiores valores de L).
- A partir da posição 4 do eixo $\left(\frac{L}{k}\right)/F^*$ as pressões médias mostraram um comportamento praticamente assintótico com valores adimensionais compreendidos entre -0,02 e 0,00. Nesta zona verifica-se escoamento aerado comprovando que as zonas de maiores riscos a cavitação se encontram no início da calha, onde as pressões negativas são mais intensas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH/UFRGS) e ao Laboratório de Hidráulica Experimental (LAHE/Furnas) por viabilizarem o estudo, e à Furnas Centrais Elétricas pelo financiamento da pesquisa.

REFERÊNCIAS

AMADOR, A. (2005) – “Comportamiento hidráulico de los aliviaderos escalonados em presas de hormogón compactado.”, Tese de Doutorado, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.

GOMES, J. (2006) – “Campo de pressões: condições de incipiência à cavitação em vertedouros em degressos com declividade 1V:0,75H.”, 2006. 173 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre

MATOS, J. S. G (1999) – “Emulsioneamento de ar e dissipação de energia do escoamento em descarregadores em degressos.”, Tese (Doutorado em Engenharia) – Instituto Superior Técnico, Lisboa.

OSMAR, F. M. (2016) – Análise de esforços sobre vertedouros em degressos de declividade 1V:0,75H, MSc Thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

SANAGIOTTO, D. G. (2003) – “Características do escoamento sobre vertedouros em degressos de declividade 1V:0,75H.”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: UFRGS, 118 p.