

## COMPARAÇÃO DA DISSIPAÇÃO DE ENERGIA AO LONGO DE UMA CALHA EM DEGRAUS COM AERAÇÃO NATURAL E AERAÇÃO FORÇADA

### Introdução

Vertedouros são estruturas projetadas para extravasar reservatórios pensando sempre em reduzir os impactos ambientais gerados pelo seu escoamento. Ao final do vertedouro há uma estrutura chamada de bacia de dissipação que tem como finalidade terminar de dissipar a energia do escoamento pela calha. Como a energia do escoamento ao final da calha é muito grande, estas estruturas precisam ser extremamente fortes e robustas para suportar o fenômeno gerado, o ressalto hidráulico. Entretanto, o custo para que estas assegurem a total dissipação de energia é extremamente alto. Existe uma preocupação em reduzir estes gastos e uma das possibilidades de reduzir os impactos deste fenômeno e consequentemente as dimensões da bacia, é garantir uma maior dissipação de energia ao longo da calha. Para que essa necessidade fosse satisfeita foram projetados os vertedouros em degraus.



Figura 1 - Barragem de São Bento - Casan - SC, Brasil. Alturas dos degraus de 0,60 m e do vertedouro 50 m. Cortesia da Magna Engenharia Ltda; Gomes (2006)



Figura 2 - Modelo físico de vertedouro em degraus utilizado no projeto - Laboratório de Obras Hidráulicas - IPH/UFRGS

Segundo Matos (2000), Amador (2005), Gomes (2006), autores referência no estudo de vertedouros em degraus, a utilização dessas estruturas é limitada a vazões específicas em torno de 15 m³/s/m a fim de evitar a ocorrência de cavitação e erosão nos degraus. Além disso, para vazões específicas acima desse valor não é possível garantir uma boa eficiência na dissipação de energia durante a passagem do escoamento pelo vertedouro. Nesses casos é necessário que a calha possua uma grande extensão para que ocorra o desenvolvimento da aeração total do escoamento, resultando em uma significativa dissipação de energia. Uma alternativa para isso é a implementação, na calha em degraus, de elementos que aumentem a aeração do escoamento. Autores como Pfister et. al (2011) e Terrier (2016) se dedicaram ao estudo do comportamento do escoamento sobre vertedouros em degraus com inserção de defletores e aeradores (chaminés) na calha.

### Metodologia

Uma das maneiras de avaliar a capacidade de dissipação de energia de um vertedouro é verificar as pressões atuantes na bacia de dissipação em local próximo à incidência do escoamento advindo da calha e a verificação do comprimento do ressalto hidráulico formado na bacia.

Para a verificação da dissipação da energia ao longo de uma calha em degraus com aeração forçada utilizou-se um modelo físico de um vertedouro em degraus seguido de bacia de dissipação instalado no Laboratório de Obras Hidráulicas do IPH - UFRGS. As características gerais do modelo estão apresentadas na Tabela 1.

Características	Medidas
Escala	1:10
Altura do vertedouro	2,45m
Altura do degrau	0,06m
Comprimento do degrau	0,045m
Largura do vertedouro	0,40m
Declividade da calha	1,00V:0,75H

Tabela 1 - Características gerais do modelo físico utilizado

No modelo, foram implantados diferentes elementos para a realização dos ensaios com aeração forçada. Os elementos implantados foram: 1) pilares de 3 cm de espessura até o primeiro degrau junto às paredes do vertedouro com defletor de 6mm de espessura também no primeiro degrau (figura 3), 2) chaminé no primeiro degrau (figura 4) e 3) chaminé com defletor de 6mm no primeiro degrau (figura 5). Para a comparação com a aeração natural foram utilizados os dados de Novakoski (2017), que obteve seus dados com o mesmo modelo físico utilizado para a presente pesquisa, porém sem nenhum elemento na calha, configurando, assim, a aeração natural.

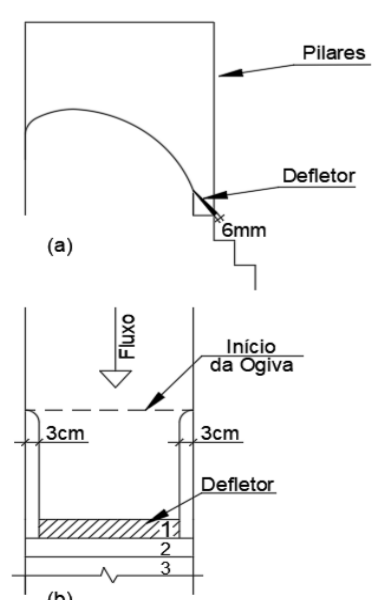


Figura 3 - (a) vista lateral e (b) vista superior de vertedouro em degraus com pilares e defletor

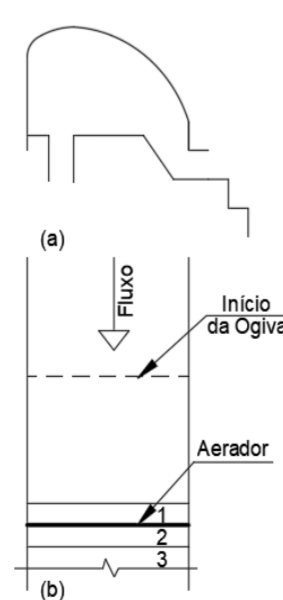


Figura 4 - (a) vista lateral e (b) vista superior de vertedouro em degraus com aerador

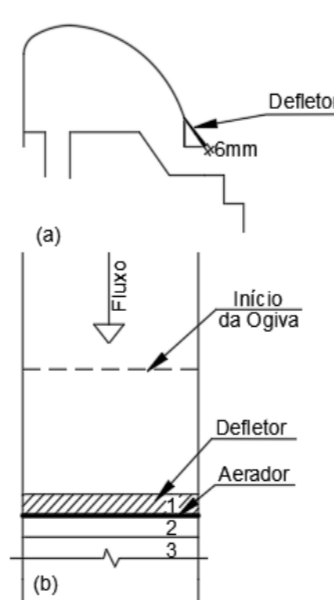


Figura 5 - (a) vista lateral e (b) vista superior de vertedouro em degraus com aerador e defletor

### Ensaio

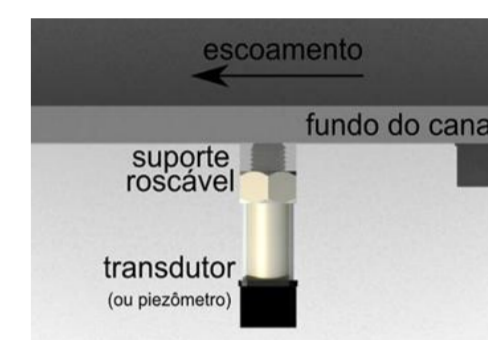
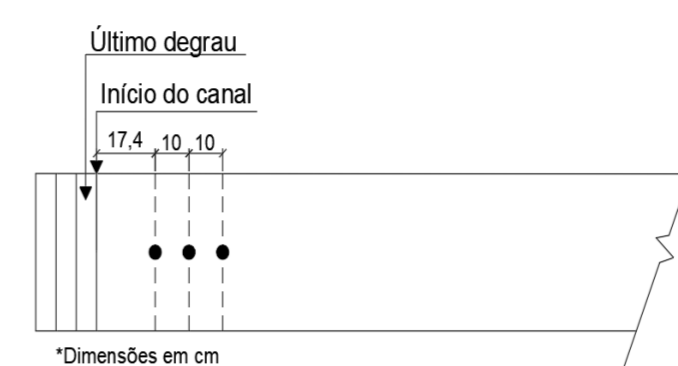
Os ensaios foram realizados com 7 diferentes vazões (20, 40, 50, 60, 80, 100 e 110 l/s) e, em cada ensaio, foi calculado o comprimento do ressalto hidráulico livre desenvolvido para as todas as vazões ensaiadas. O cálculo foi realizado através da equação 1. A altura conjugada lenta (y<sub>l</sub>) foi medida e a altura conjugada rápida (y<sub>r</sub>) foi calculada através da equação de Bélanger. Além disso, para a configuração com pilares e defletor de 6 mm, foram medidas pressões médias desenvolvidas em três posições a partir da calha em degraus (figura 5) com e sem formação de ressalto hidráulico na bacia. As pressões foram medidas através de transdutores de pressão da marca Sitron modelo SP96 instalados diretamente sob o canal como mostra a figura 6.

Equação 1

$$L_j = 8,5 * (y_l - y_r)$$

Onde:

L<sub>j</sub> = Comprimento do ressalto hidráulico (m);  
y<sub>l</sub> = altura conjugada lenta (m);  
y<sub>r</sub> = altura conjugada rápida (m).



Pressões médias ao longo de bacia de dissipação a jusante de calha em degraus obtidas por Novakoski et. al (2017)

### Resultados

Para que fossem realizadas as devidas comparações e análises, os dados obtidos nos ensaios estão comparados com os obtidos por Novakoski et. al (2017) para uma bacia de dissipação a jusante de um vertedouro em degraus com aeração natural.

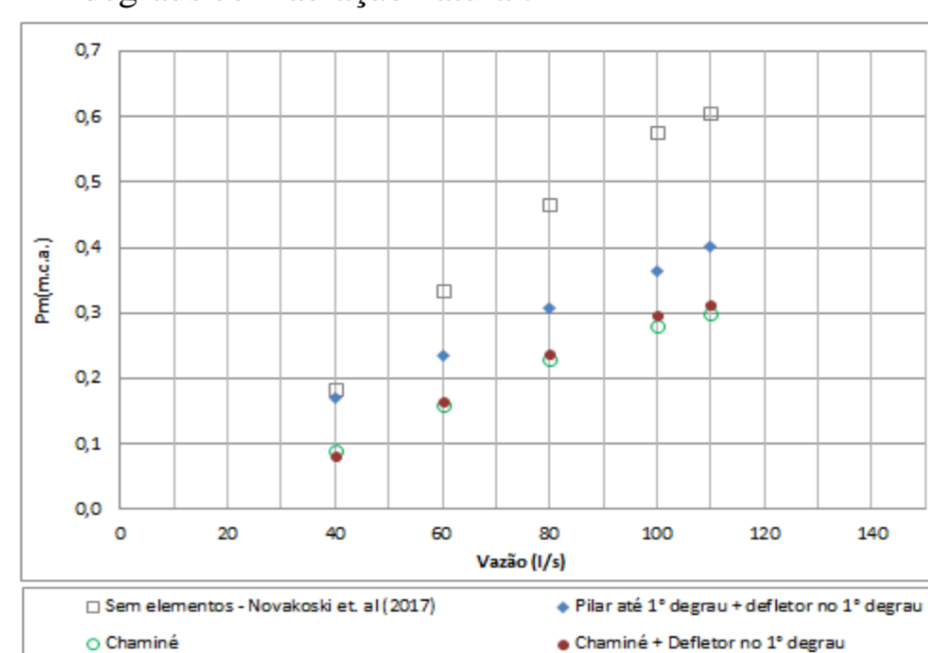


Figura 6 - Pressões médias (em m.c.a.) para todas as configurações e vazões ensaiadas comparadas com as obtidas por Novakoski et. al (2017).

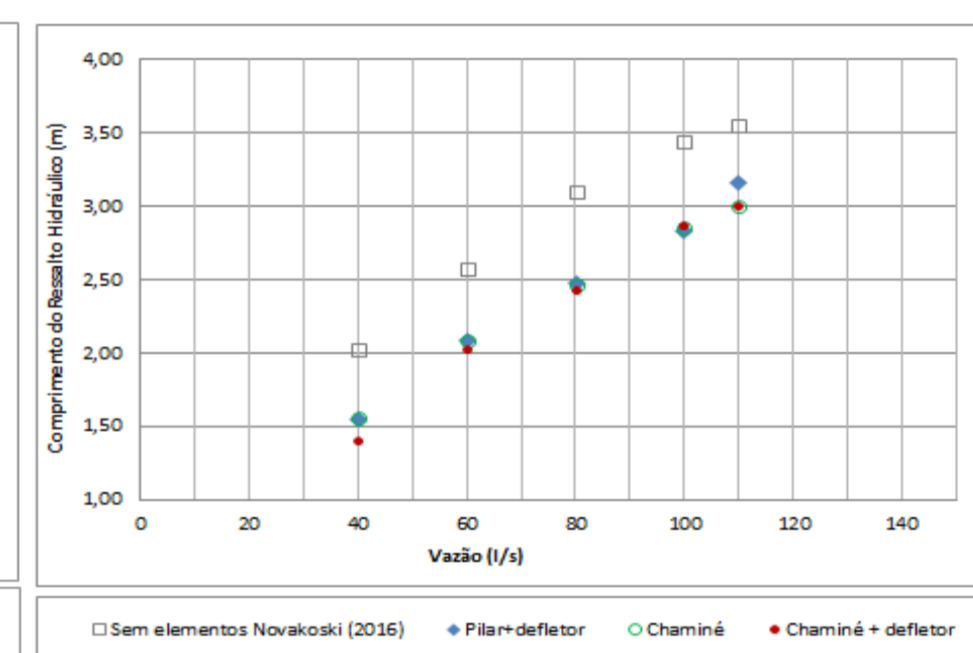


Figura 7 - Comprimentos de ressalto hidráulico para todas as configurações e vazões ensaiadas comparados com os obtidos por Novakoski et. al (2017).

Analisando os gráficos acima, pode-se perceber que os valores de pressão média obtidos no primeiro ponto de medição após o final da calha em degraus, foram significativamente reduzidos para as condições de aeração forçada, quando comparados aos valores obtidos com aeração natural. Destacam-se as configurações com chaminé e chaminé com defletor, que apresentaram uma redução ainda mais significativa no valor das pressões médias do que a configuração com pilares e defletor. Percebe-se também, que quanto maior é a vazão ensaiada, maior é a diferença entre as pressões médias resultantes de calha em degraus com aeração forçada em relação à calha com aeração natural. Para a vazão de 110 l/s a diferença de pressão média entre as condições de aeração natural e aeração forçada por chaminé foi de aproximadamente 0,3 m. A única situação em que a aeração forçada não apresentou uma redução significativa nas pressões médias foi a configuração de pilar e defletor com vazão de 40 l/s. Seguem abaixo dois registros fotográficos dos ressaltos hidráulicos desenvolvidos com aeração natural (Figura 8) e com aeração forçada (Figura 9) e é perceptível uma leve redução em seu comprimento quando na calha em degraus foram inseridos elementos.



Figura 8 - Ressalto hidráulico a jusante de vertedouro em degraus com aeração natural.



Figura 9 - Ressalto hidráulico a jusante de vertedouro em degraus com aeração forçada por pilares e defletor.

### Conclusão

Concluiu-se a partir da análise dos dados de pressões obtidos e também por uma análise comparativa dos ressaltos hidráulicos, que há uma suave redução em seu comprimento nas condições com aeração forçada em relação à condição com aeração natural. As pressões atuantes no ponto de impacto do escoamento na bacia de dissipação nas condições de vertedouro em degraus com aeração forçada foram inferiores aos mesmos valores a jusante de uma calha em degraus com aeração natural, o que indica que o escoamento tem menor energia e velocidade no momento de encontro com a bacia de dissipação; O comprimento do ressalto hidráulico formado na bacia de dissipação, calculado empiricamente, foi menor nas estruturas a jusante de calha em degraus com aeração forçada o que indica que a energia residual a ser dissipada pelo ressalto hidráulico era menor. Destaca-se a configuração com chaminé e chaminé e defletor, que forneceram reduções significativas referentes às pressões médias e comprimento do ressalto, em relação a um vertedouro em degraus com aeração natural, e também sugere-se que sejam analisadas as pressões médias ao longo de toda a bacia de dissipação de forma a melhor caracterizar o fenômeno do ressalto hidráulico a jusante de vertedouros em degraus com aeração forçada.

#### Referências Bibliográficas

- Amador, A. (2005). "Comportamento Hidráulico de los Aliaderos escalonados em presas de hormigón compactado". Tese de Doutorado, Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona.  
Gomes, A.J.F. (2006). "Campo de Pressões: Condições de Incipência à Cavitação em Vertedouros em Degraus com Declividade 1V:0,75H". Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.  
Matos, J.S.G. (2000). "Discussion of Hydraulics of skimming flow on modeled stepped spillways". Journal of Hydraulic Engineering.  
Pfister, M.D.; Lucas, J.; Hager, W.H. (2011). "Chute Aerators: Preaerated Approach Flow". Journal of Hydraulic Engineering.  
Terrier, S. (2016). "Hydraulic performance of stepped spillway aerators and related downstream flow features". Tese de Doutorado, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. Lausanne.  
Novakoski, C.K.; Canterato, E.; Marques, M.G.; Teixeira, E.D.; Lima, G.A.; Mees, A. (2017). "Macro-turbulent characteristics of pressures in hydraulic jump formed downstream of a stepped spillway". Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Vol.22, Fevereiro 2017.