

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

Carolina Kuhn Novakoski, Priscila dos Santos Priebe, Eder Daniel Teixeira, Augusto Ceron Reginatto, Eliane Conterato, Guilherme Santana Castiglio, Alba Valéria Brandão Canellas, Fabrício Prates Desessards, Marcelo Giulian Marques, Aline Saupe Abreu

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil,

carolkn04@gmail.com, priscilaspriebe@gmail.com, eder.teixeira@ufrgs.br, augusto.creginatto@gmail.com, conterato.eliane@gmail.com, alba.canellas@gmail.com, fabricio.desessards@gmail.com, mmarques@iph.ufrgs.br

RESUMO:

Apesar das vantagens relacionadas à utilização de vertedouros em degraus, como a dissipação de grande parte da energia potencial durante a passagem do escoamento pela calha, sua utilização é limitada a vazões específicas em torno de $15\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ devido à possibilidade de danos por erosão e cavitação nos degraus e à não garantia de uma dissipação de energia significativa para vazões maiores. A inserção de pilares, defletores e chaminés (aeradores) na calha em degraus pode possibilitar a descarga de maiores vazões específicas. O presente artigo tem por objetivo analisar a diferença de dissipação de energia entre um vertedouro em degraus com a implantação dos elementos citados (aeração forçada) e um vertedouro em degraus com aeração natural. A análise foi realizada com base em medições de pressões e cálculos de comprimento de ressalto hidráulico em um modelo físico de bacia de dissipação a jusante de um vertedouro em degraus localizado no Laboratório de Obras Hidráulicas – IPH - UFRGS. Concluiu-se que a inserção de pilar com defletor, chaminé ou chaminé com defletor resulta em pressões mais baixas na região de impacto do escoamento na bacia e comprimentos de ressalto hidráulico menores se comparados a uma situação com calha em degraus sem aeração forçada.

ABSTRACT:

Although the advantages related to stepped spillways utilization, such as the dissipation of much of the potential energy during the passage of the flow by the chute, their use is limited to specific flows around $15\text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ due to the possibility of damages caused by erosion and cavitation in the steps and the non-guarantee of a significant energy dissipation for larger flows. The insertion of pillars, deflectors and chimneys (aerators) in the stepped channel can enable the discharge of higher specific flows. This article aims to analyze the difference of energy dissipation between a stepped spillway with the implantation of the mentioned elements (forced aeration) and a stepped spillway with natural aeration. The analysis was performed based on pressure measurements and calculations of the hydraulic jump length in a physical model of a dissipation basin downstream a stepped spillway located at the Laboratório de Obras Hidráulicas – IPH – UFRGS. It was concluded that the insertion of a pillar with deflector, chimney or chimney with deflector results in lower pressures in the region of impact of the flow in the dissipation basin and smaller hydraulic jump lengths when compared to a situation with stepped spillway without forced aeration.

PALABRAS CLAVES: Vertedouros em degraus; dissipação de energia; aeração forçada

INTRODUÇÃO

Vertedouros são estruturas que fazem parte do sistema extravasor de barragens e são responsáveis por conduzir o excesso de água do reservatório para jusante do maciço de forma segura. A utilização de degraus com função de dissipar energia foi consolidada a partir dos anos 1970, com o aprimoramento da técnica de CCR (concreto compactado a rolo). A grande vantagem das estruturas escalonadas é a dissipação da energia potencial proveniente do desnível ocasionado pela construção do barramento que ocorre, em sua maior parte, durante a passagem do escoamento pela calha. Dessa forma, as estruturas de dissipação da energia residual, como bacias de dissipação por ressalto hidráulico instaladas a jusante dos vertedouros em degraus podem ter suas dimensões e seus custos reduzidos.

De acordo com Matos (2000), Amador (2005), Gomes (2006), entre outros, a utilização dos vertedouros em degraus é limitada a vazões específicas em torno de $15 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ 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.

Tendo em vista a demanda por vazões mais altas nos vertedouros de barragens e as vantagens associadas às estruturas escalonadas, estão sendo desenvolvidas pesquisas com o intuito de ampliar a faixa de vazões específicas possíveis nos vertedouros em degraus sem causar danos às estruturas e sem prejudicar a dissipação da energia de montante. 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.

Uma forma de avaliar a dissipação de energia de uma calha em degraus é através da verificação das 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. Quanto maior é a dissipação de energia durante a passagem do escoamento pela calha, menor é a pressão no ponto de impacto do jato na bacia e menor é o comprimento do ressalto hidráulico formado. Novakoski et. al (2017) estudou o comportamento do ressalto hidráulico a jusante de um vertedouro em degraus com aeração natural através da medição de pressões atuantes na bacia de dissipação e constatou que a equação proposta por Marques et. al (1997) (equação 1) para o cálculo do comprimento do ressalto hidráulico desenvolvido a jusante de uma calha lisa, pode ser aplicada, sem prejuízos, para bacias a jusante de vertedouros em degraus. A figura 1 apresenta as pressões médias, em m.c.a. obtidas por Novakoski et. al (2017) para o modelo reduzido de bacia de dissipação a jusante de vertedouro em degraus.

$$L_j = 8,5 * (y_l - y_r) \quad [1]$$

Onde:

L_j = Comprimento do ressalto hidráulico (m);

y_l = altura conjugada lenta (m);

y_r = altura conjugada rápida (m).

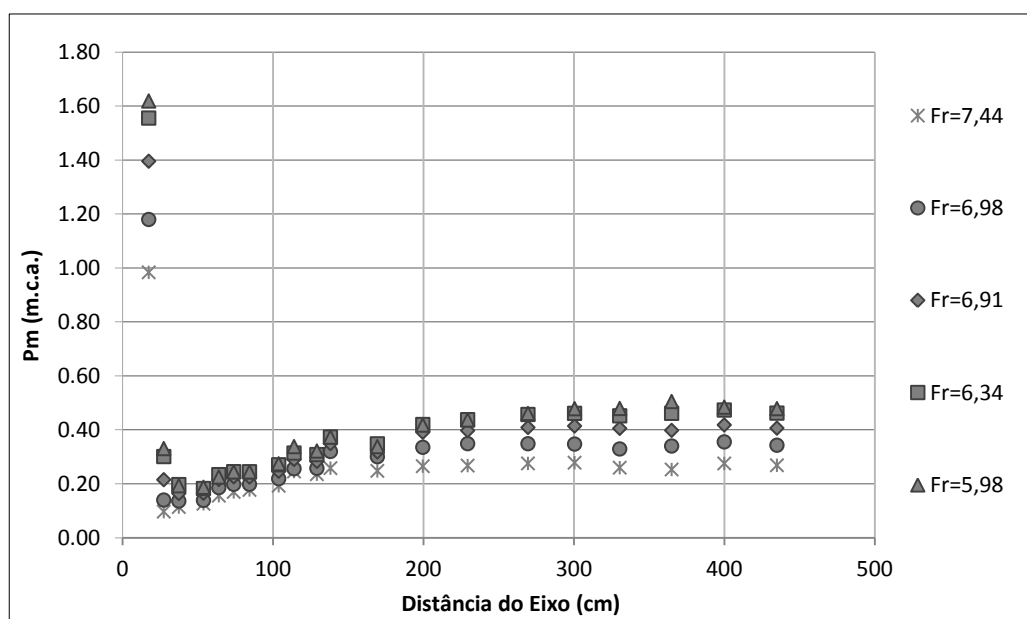


Figura 1.- Pressões médias ao longo de bacia de dissipação a jusante de calha em degraus obtidas por Novakoski et. al (2017)

O objetivo do presente artigo é verificar a influência que a inserção de elementos aeradores na calha em degraus (como pilar, defletor e chaminé) causa na dissipação de energia durante a passagem do escoamento pela calha. Essa verificação foi possível através de análises de pressões médias e comprimento do ressalto hidráulico desenvolvido na bacia de dissipação.

METODOLOGIA

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 Instituto de Pesquisas Hidráulicas, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. As características gerais do modelo estão apresentadas na tabela 1.

Tabela 1. - Características gerais do modelo físico utilizado

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

No modelo, foram implantados diferentes elementos para a realização dos ensaios com aeração forçada. Os elementos implantados foram: I) 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 2), II) chaminé no primeiro degrau (figura 3) e III) chaminé com defletor de 6mm no primeiro degrau (figura 4). Para a comparação com a aeração natural foram utilizados os dados de Novakoski et. al (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.

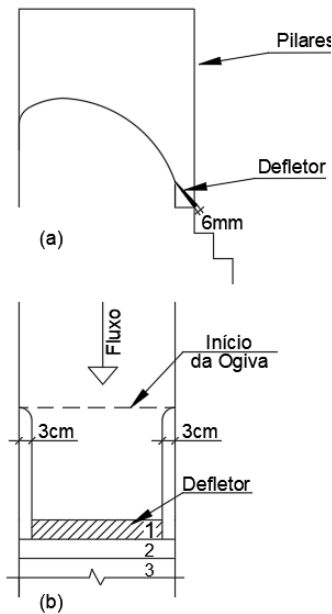


Figura 2.- a) vista lateral e b) vista superior de vertedouro em degraus com pilares e defletor

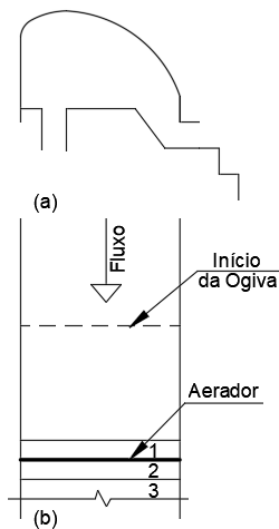


Figura 3.- a) vista lateral e b) vista superior de vertedouro em degraus com aerador

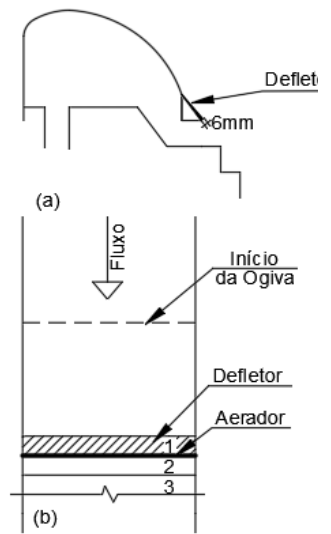


Figura 4.- a) vista lateral e b) vista superior de vertedouro em degraus com aerador e defletor

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_l) foi medida e a altura conjugada rápida (y_r) foi calculada através da equação proposta por Bélanger em 1828. Além disso, para a configuração com pilares e defletor de 6 mm, foram medidas pressões médias 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.

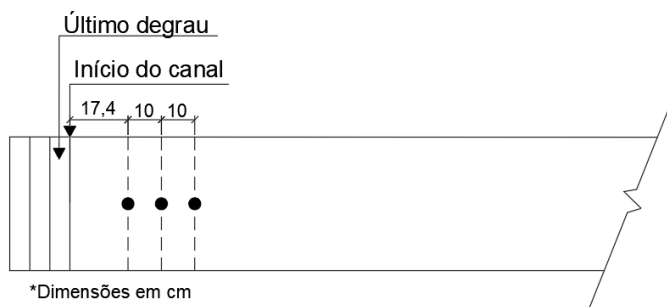


Figura 5.- Posições de medições das pressões médias ao longo de bacia de dissipação.

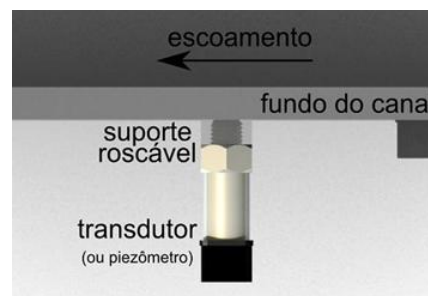


Figura 6.- Instalação dos transdutores para medição de pressões médias ao longo da bacia de dissipação.

Notou-se, através da figura 7, que, na posição mais próxima do pé do vertedouro (onde aproxima-se da ocorrência da profundidade conjugada rápida, y_r), o valor das pressões médias é semelhante para as condições com e sem formação de ressalto hidráulico. Para as posições mais afastadas do pé do vertedouro a formação do ressalto hidráulico exerce influência nas pressões médias causando um aumento em seus valores. Sendo assim, para as demais configurações de elementos, foram medidas as pressões médias apenas para a posição mais próxima do vertedouro (17,4 cm do final da calha) com condição de formação de ressalto hidráulico livre.

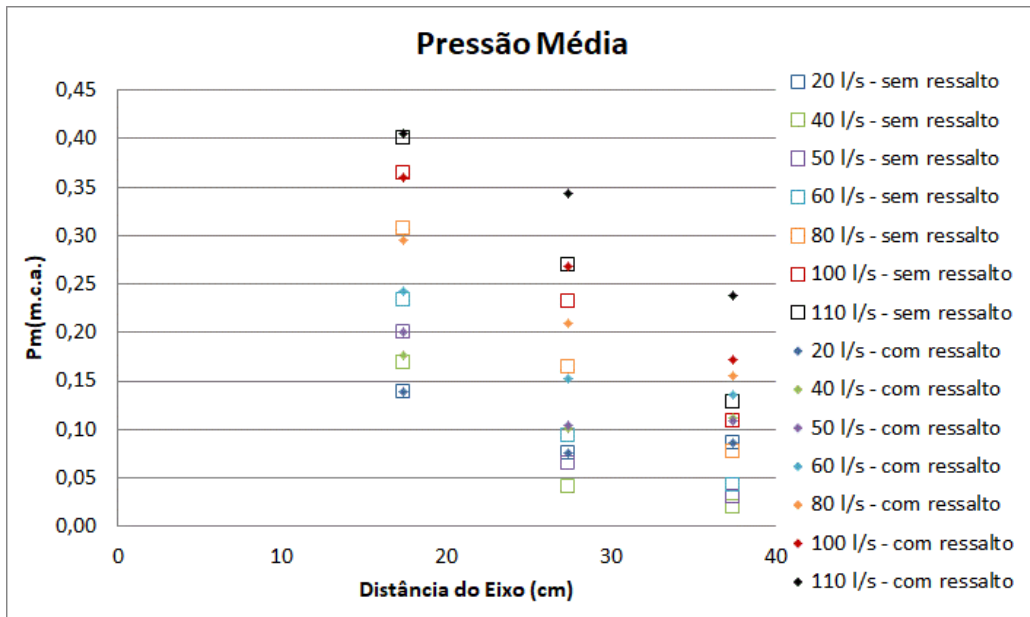


Figura 7.- Pressões médias ao longo de bacia de dissipação a jusante de calha em degraus com pilares e defletor com e sem formação de ressalto hidráulico

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A figura 8 apresenta os resultados de pressões médias, em m.c.a. obtidas no ponto de impacto do escoamento para cada configuração de bacia de dissipação a jusante de vertedouro com aeração forçada em função das vazões ensaiadas. Os dados 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.

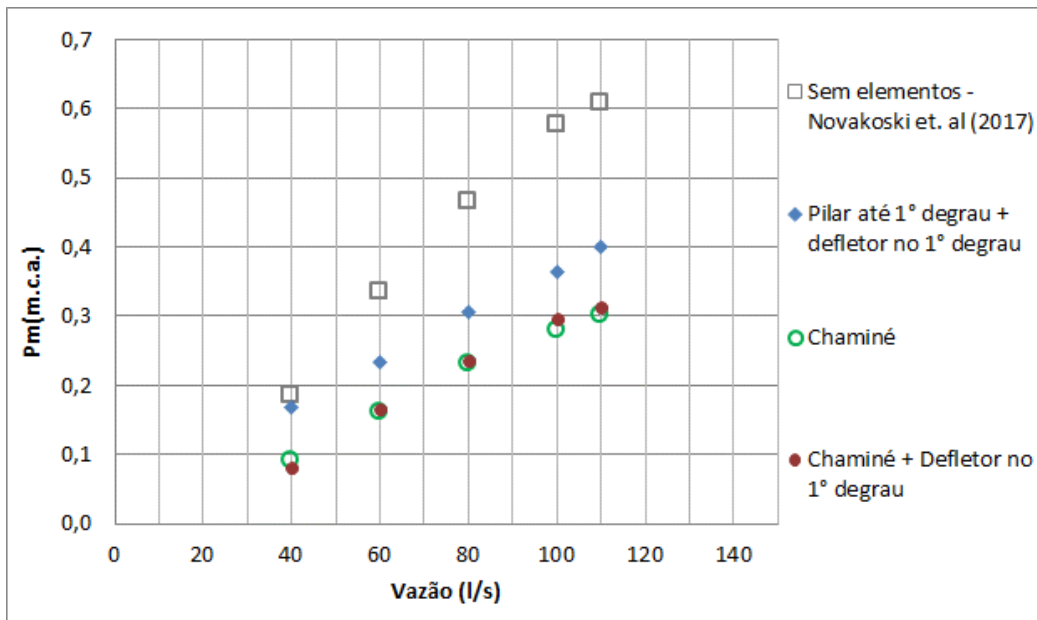


Figura 8. - Pressões médias (em m.c.a.) para todas as configurações e vazões ensaiadas comparadas com as obtidas por Novakoski et. al (2017).

Analisando a figura 8, pode-se perceber que as configurações com aeração forçada apresentam pressões médias significativamente reduzidas em relação à 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.

As figuras 9, 10, 11 e 12 apresentam fotos do ressalto hidráulico obtido em cada condição ensaiada para a vazão de 40 l/s.



Figura 9. – Ressalto hidráulico a jusante de vertedouro em degraus com aeração natural.



Figura 10. – Ressalto hidráulico a jusante de vertedouro em degraus com aeração forçada por pilares e defletor.



Figura 11. – Ressalto hidráulico a jusante de vertedouro em degraus com aeração forçada por aerador.



Figura 12. – Ressalto hidráulico a jusante de vertedouro em degraus com aeração forçada por pilar mais defletor.

Analisando as figuras 9 a 12, pode-se notar uma suave redução no comprimento do ressalto hidráulico das condições com aeração forçada em relação à condição com aeração natural. Porém a visualização do ressalto hidráulico por imagens fica prejudicada devido à grande oscilação do fenômeno, sendo assim, a seguir são apresentados os resultados obtidos empiricamente para análise do comprimento do ressalto hidráulico. A figura 9 apresenta graficamente os comprimentos do

ressalto hidráulico livre desenvolvido na bacia de dissipação a jusante do vertedouro em degraus, calculados através da equação 1, para cada configuração e vazão ensaiada. Na figura referida, percebe-se uma redução significativa do comprimento do ressalto hidráulico desenvolvido a jusante das configurações de vertedouro em degraus com aeração forçada em relação ao desenvolvido a jusante de vertedouro em degraus com aeração natural. Diferentemente das pressões médias, não se pode notar uma diferença significativa nos comprimentos de ressalto hidráulico entre as configurações com aeração forçada, bem como entre as vazões ensaiadas. A diferença no comprimento do ressalto hidráulico formado entre as condições com aeração forçada e com aeração natural foi de aproximadamente 0,5 m.

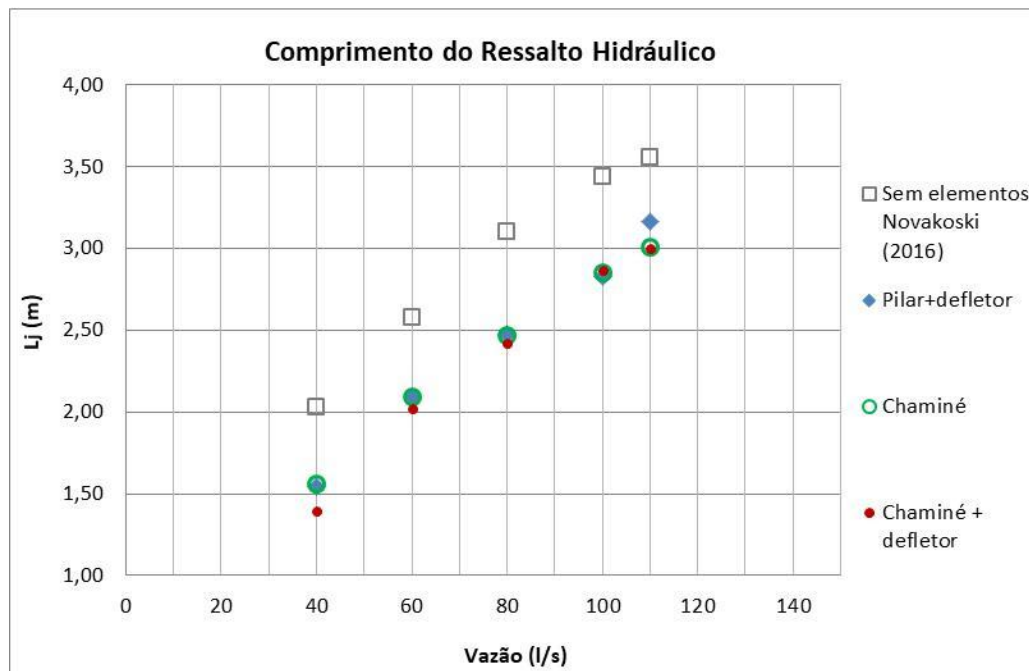


Figura 9. – Comprimentos de ressalto hidráulico para todas as configurações e vazões ensaiadas comparados com os obtidos por Novakoski et. al (2017).

As alturas conjugadas rápida e lenta do ressalto hidráulico formado para cada configuração e vazão ensaiadas estão apresentadas graficamente nas figuras 10 e 11. Observa-se que a altura conjugada rápida (y_r) é maior para as condições com aeração forçada, o que era esperado já que a energia do escoamento no impacto do jato na bacia de dissipação é menor devido à antecipação da incorporação de ar ao escoamento. A altura rápida nas condições de aeração forçada sofreu uma ampliação de aproximadamente 1,5cm, independentemente da configuração e da vazão ensaiada. A altura lenta do ressalto hidráulico é maior para as condições de aeração forçada em relação à condição de aeração natural, essa diferença ficou entre 5 e 6 cm. Assim como para altura conjugada rápida, não é possível identificar diferenças significativas entre as configurações de aeração forçada.

Analisou-se, também, o número de Froude na entrada do ressalto hidráulico, para as situações com aeração forçada e com aeração natural. A tabela 2 apresenta o número de Froude calculado para ambas as situações. Percebe-se que as condições com aeração forçada apresentam número de Froude menores em relação à aeração natural, sendo que a condição que apresentou números de Froude menores foi de chaminé com defletor, com exceção para a vazão de 100 l/s, na qual a condição de pilar e defletor apresentou o menor número de Froude.

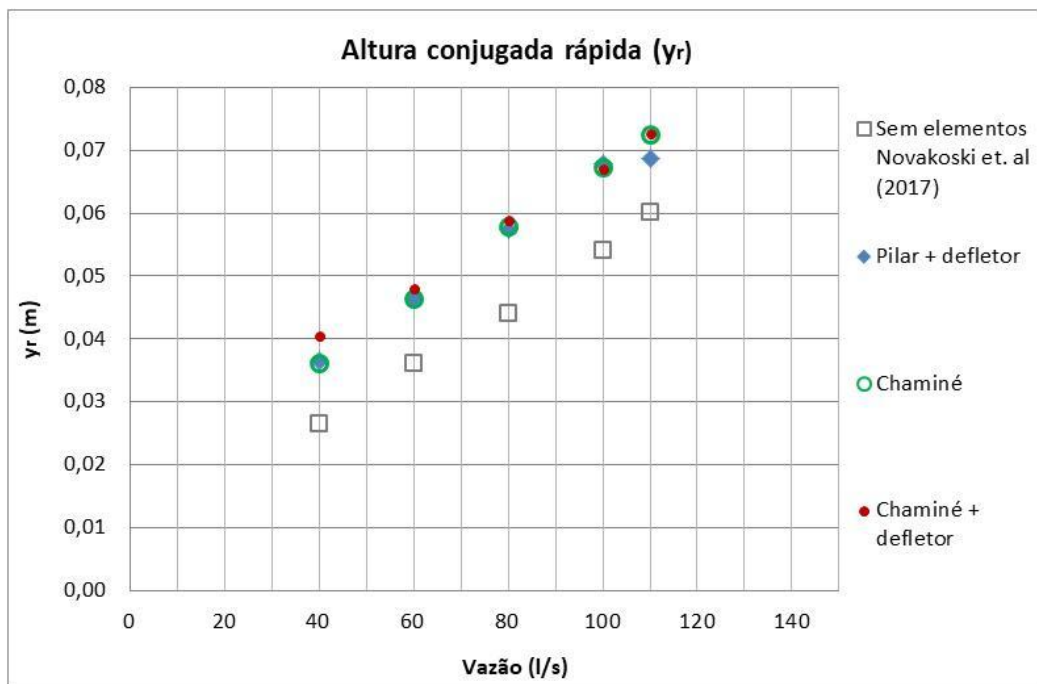


Figura 10. – Altura conjugada rápida para todas as configurações e vazões ensaiadas comparados com os obtidos por Novakoski et. al (2017).

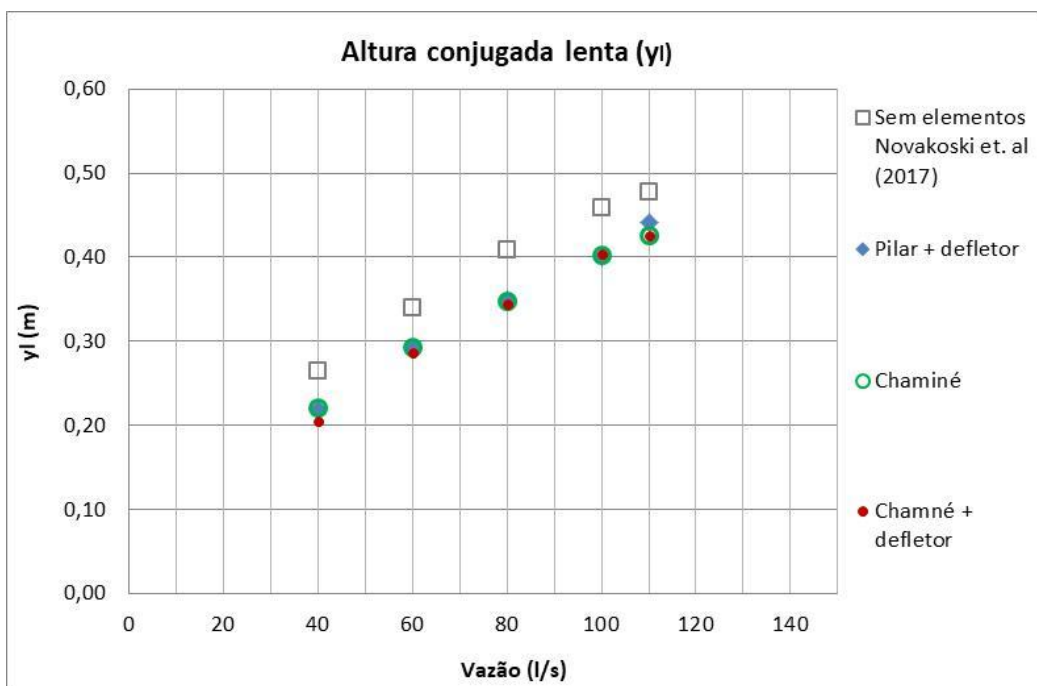


Figura 11. – Altura conjugada lenta para todas as configurações e vazões ensaiadas comparados com os obtidos por Novakoski et. al (2017).

Tabela 2. – Números de Froude na entrada do ressalto hidráulico para as condições de aeração natural e forçada.

Q [l/s]	Sem elementos	Pilar+defletor	Chaminé	Chaminé + defletor
40	7,43	4,56	4,64	3,92
60	6,98	4,81	4,81	4,55
80	6,91	4,63	4,60	4,47
100	6,33	4,51	4,58	4,61
110	5,97	4,89	4,50	4,48

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Foi possível concluir que a dissipação de energia durante a passagem do escoamento pelo vertedouro é maior nas situações em que a calha possui elementos que possibilitam a aeração forçada. Essa conclusão foi possível após analisar os seguintes fatos:

- 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. Como esperado, nessa situação, a altura conjugada rápida foi maior e a altura conjugada lenta foi menor, o número de Froude na entrada do ressalto hidráulico também foi menor.

A configuração com pilares e defletor forneceu reduções significativas referentes às pressões médias e comprimento do ressalto, em relação a um vertedouro em degraus com aeração natural. Porém, deve-se observar que o canal tem largura de 40 cm, o que indica que a distância entre os pilares é inferior do que seria utilizado em protótipo. Considerando-se que, devido à largura reduzida do canal, a influência dos pilares possa ser superestimada, recomenda-se o estudo dessa configuração (pilares e defletor) em um modelo com maior largura de canal.

Além disso, sugere-se a caracterização das pressões médias e instantâneas ao longo da calha para essas mesmas configurações apresentadas bem como para outras configurações que possibilitem a aeração forçada no escoamento ao longo de um vertedouro em degraus. 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.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, à equipe do Laboratório de Obras Hidráulicas e à Furnas Centrais Elétricas pelo financiamento à pesquisa.

Referencias 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 Incipiência 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.
- Novakoski, C.K.; Conterato, 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.
- 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.