

SOLEIRAS TERMINAIS EM BACIAS DE DISSIPAÇÃO A JUSANTE DE VERTEDOUROS EM DEGRAUS: EFEITO NA DISTRIBUIÇÃO LONGITUDINAL DAS PRESSÕES MÉDIAS JUNTO AO FUNDO

Eliane Conterato^{1}; Marcelo G. Marques²; Luiz Augusto Magalhães Endres³; Carolina K. Novakoski⁴;*

Resumo – O conhecimento dos valores das pressões médias, das flutuações de pressão e dos seus valores extremos junto ao fundo da bacia de dissipação com formação de ressalto hidráulico é fundamental para um dimensionamento seguro e econômico deste tipo de estrutura. A utilização de soleiras terminais vem a possibilitar uma melhor distribuição desses valores, melhorando o desempenho da estrutura. Este trabalho tem como objetivo mostrar a influência do posicionamento e da geometria (altura) de soleiras terminais na distribuição longitudinal de pressões médias em bacias de dissipação a jusante de vertedouros em degraus. Espera-se que estes resultados venham a contribuir no estabelecimento de critérios para o dimensionamento dessas estruturas.

Palavras-Chave – soleiras terminais, bacia de dissipação, vertedouro em degraus.

END SILLS IN STILLING BASIN DOWNSTREAM OF STEPPED SPILLWAYS: EFFECT ON LONGITUDINAL DISTRIBUTION OF THE MEAN PRESSURE ALONG THE BOTTOM

Abstract –The knowledge of the values of the mean pressure, the pressure fluctuations and their extreme values along the bottom of the stilling basin with hydraulic jump formation is crucial to a safe and economical design of this type of structure. The use of end sills come to allow a better distribution of these values, improving the performance of the structure. This work aims to show the influence of the positioning and the geometry (height) of end sills on longitudinal distribution of the mean pressures in stilling basins downstream of stepped spillways. It is expected that these results will contribute to the establishment of criteria for the design of such structures.

Keywords – end sills, stilling basin, stepped spillways.

^{1*} Mestranda em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, UFRGS, Porto Alegre, (51) 3308-6114, eliconterato@gmail.com.

² Professor Doutor DOH/IPH/UFRGS, UFRGS, Porto Alegre, (51) 3308-6114, mmarques@iph.ufrgs.br

³ Professor Doutor DHH/IPH/UFRGS, UFRGS, Porto Alegre, (51) 3308-6669, endres@ufrgs.br

⁴ Graduanda Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, (51) 3308-6114, carolkn04@gmail.com

INTRODUÇÃO

Vertedouros são dispositivos de segurança de barragens que permitem que o excesso de vazão passe pelo sistema sem ocasionar danos nas estruturas. Esses danos podem ocorrer por fadiga dos materiais, cavitação e/ou por erosão do leito do rio a jusante, e podem vir a comprometer a segurança da obra. Para que os danos sejam minimizados, uma das maneiras é prever a colocação de dissipadores de energia por ressalto hidráulico a jusante do vertedouro, de forma que o escoamento retorne ao leito do rio com características hidráulicas adequadas ao tipo de geologia. A vantagem da utilização de um vertedouro em degraus associado a uma bacia de dissipação por ressalto hidráulico é que parte da energia do escoamento será dissipada ao longo da calha. Desse modo a energia cinética na entrada do dissipador é reduzida. Conforme Simões (2008), canais com calha lisa podem dissipar até 5% da energia total de montante, dependendo das condições de geometria e do escoamento, enquanto que para canais em degraus, estudos indicam uma redução média da ordem de 60% da energia total a montante, se a calha tiver comprimento suficiente para aerar o escoamento podendo chegar a mais de 80%, conforme indicado por Tozzi (1992). Assim, as dimensões da bacia (comprimento e cota de fundo) podem ser reduzidas, minimizando os custos e mantendo-se a mesma eficiência.

Com o objetivo de diminuir ainda mais os custos da obra, é possível a utilização de bacias mais compactas com elementos, como blocos dispersores ou soleiras terminais, que podem ser dentadas ou não. Conforme Elevatorski (1959), os acessórios auxiliam na estabilização do escoamento, confinando o ressalto, aumentando a turbulência e distribuindo a velocidade equilibradamente através da bacia. Em alguns casos a redução no comprimento da bacia pode ser alcançada através de tais acessórios, tornando a obra mais econômica. Conforme Pirestani *et all* (2012), acessórios desse tipo afetam até 60% da dissipação da energia do escoamento que entra em uma bacia, dependendo do número de Froude.

O uso de blocos dispersores hoje em dia é bastante limitado devido à alta velocidade do escoamento na bacia, que pode propiciar o fenômeno de cavitação, prejudicando a eficiência da estrutura. Contudo, a utilização dessas estruturas a jusante de vertedouros em degraus pode resultar em um bom desempenho devido à grande aeração do escoamento causada pelos degraus. Entretanto, existem poucos estudos contemplando bacias de dissipação com elementos intermediários ou soleiras terminais e ficam ainda mais escassos quando se trata de bacias com elementos a jusante de vertedouros em degraus. A maioria das análises existentes na bibliografia não aborda o comportamento das pressões a montante e jusante desses elementos, apenas são verificadas alterações de nível d'água e forma do ressalto.

Com a análise de pressões instantâneas e suas flutuações é possível verificar zonas de maior probabilidade de erosão e/ou cavitação que podem ser minimizadas mudando o posicionamento e a geometria dos elementos. Assim, além de possibilitar a redução no comprimento da bacia pode-se afastar o escoamento com característica mais agressiva para jusante, evitando assim que ocorram problemas na descontinuidade de estrutura-leito por erosão regressiva.

Baseado em estudos de laboratório para soleiras terminais de forma retangular (figura 1) Vischer e Hager (1995) puderam concluir que para qualquer altura de soleira é necessário um

número de Froude mínimo para que haja formação de ressalto hidráulico, pois do contrário ocorrerá escoamento do tipo "weir flow" (onde a soleira começa a funcionar como um novo vertedouro). A figura 1 mostra o ressalto formado em bacia com soleira retangular, onde Y_1 é a altura rápida conjugada, e Y_2 a altura lenta conjugada. A Figura 2 mostra um escoamento tipo *weir flow*, não recomendado.

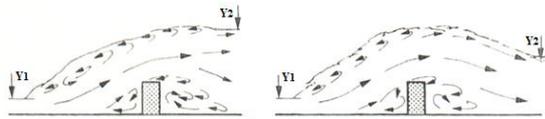


Figura 1: Ressalto em bacia com soleira retangular, a) submerso e b) livre (adaptado de Vischer e Hager (1995))



Figura 2: Escoamento tipo *weir flow*

METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Este trabalho faz parte do projeto de pesquisa e desenvolvimento (P&D) em andamento no Laboratório de Obras Hidráulicas (IPH/UFRGS) intitulado "Determinação das características geométricas de soleiras terminais em bacias de dissipação a jusante de vertedouros em degraus". Para execução desta pesquisa, foi utilizado um modelo físico de um vertedouro em degraus com ogiva do tipo *Creager* projetada para uma carga de 0,4 m, seguido de uma bacia de dissipação com soleira terminal, onde ocorre a formação de ressalto hidráulico. O modelo experimental consiste em uma calha de 2,45 m de altura e inclinação de 53,13°, com altura de degrau (h_d) de 6 cm. O canal a jusante do vertedouro possui 8 m de comprimento e 0,4 m de largura. A Figura 3 mostra o vertedouro em degraus e o canal com o sistema de alimentação.

Na parte de jusante do canal (bacia de dissipação) foram instaladas soleiras terminais de diferentes tamanhos em diferentes posições. Foram ensaiadas soleiras com declividades de 45° e alturas de 10, 12, 18 e 24 cm, ou seja, 1,67; 2,00; 3,00 e 4,00 vezes a altura do degrau (h_d). As peças foram confeccionadas em chapas metálicas dobradas e pintadas. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.**4 mostra um esquema das diferentes soleiras utilizadas.

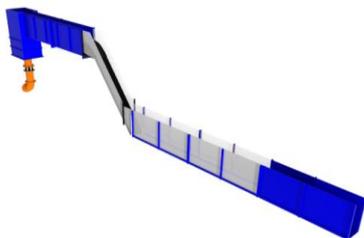


Figura 3: Esquema simplificado do canal e vertedouro em degraus com sistemas de alimentação.

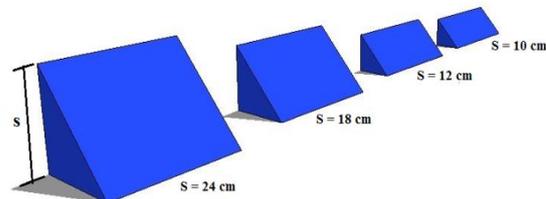


Figura 4: Esquema das diferentes alturas de soleiras utilizadas (s =altura da soleira).

A vazão específica máxima ensaiada foi de $0,275 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, que corresponde a uma altura de lâmina de água de 0,27 cm sobre a crista do vertedor no modelo. A escala para transposição dos resultados obedece a Lei de Semelhança de Froude, pois se trata de um escoamento com superfície livre, onde a força gravitacional é predominante. Nessas condições o modelo está na escala 1:10,

portanto estariam sendo representadas vazões da ordem de até $8,7 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ e carga sobre a crista do vertedouro da ordem de $5,5 \text{ m}$ em protótipo.

METODOLOGIA DE ENSAIOS

Os dados de pressões junto ao fundo do canal foram coletados em 24 tomadas localizadas na direção longitudinal central da bacia de dissipação (figuras 5 e 6).

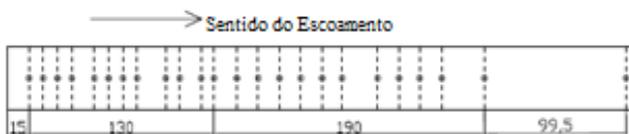


Figura 5: Esquema das posições longitudinais das tomadas de pressão a partir do início do trecho plano.



Figura 6: Detalhe da instalação dos transdutores

As quatro alturas de soleira foram colocadas, separadamente, em 3 posições distintas, a partir do início do trecho plano da bacia de dissipação: 245 cm , 163 cm e $122,5 \text{ cm}$ (equivalentes a $1/1H$, $2/3 H$ e $1/2 H$, respectivamente - sendo H a altura da calha do vertedouro, igual a 245 cm). **A Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra um esquema de uma das soleiras colocadas nas três diferentes posições. **A Erro! Fonte de referência não encontrada.** I mostra as características dos ensaios onde estão apresentados os valores das vazões específicas ensaiadas (q), a altura conjugada rápida no pé do vertedouro em degraus (Y_1), o número de Froude na entrada da bacia de dissipação (F_{1d}), a altura conjugada lenta (Y_2) e o número de Froude no fim do ressalto (F_{2d}).

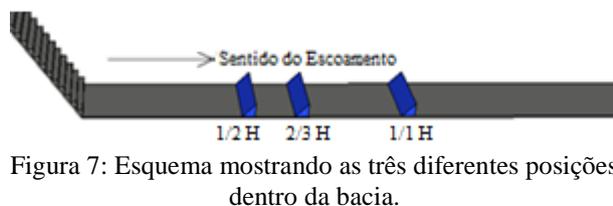
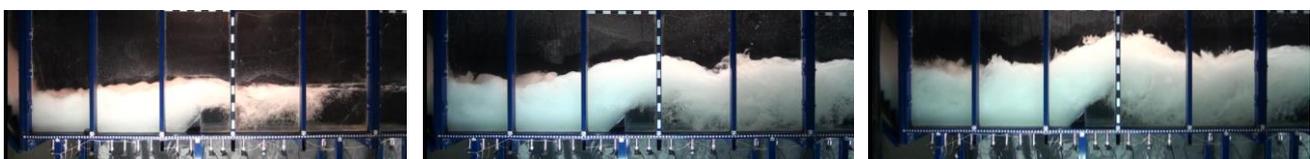


Figura 7: Esquema mostrando as três diferentes posições dentro da bacia.

Tabela I - Condições ensaiadas

q ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$)	Y_1 (m)	F_{1d}	Y_2 (m)	F_{2d}
0,100	0,03	7,44	0,27	0,23
0,150	0,04	6,98	0,34	0,24
0,200	0,04	6,91	0,41	0,24
0,250	0,05	6,34	0,46	0,26
0,275	0,06	5,98	0,48	0,27

A altura de água a jusante para cada vazão foi fixada igual à altura conjugada lenta (Y_2) para bacia livre. Quando da colocação da soleira, a altura de água Y_2 foi imposta em cada ensaio em função da vazão ensaiada. A Figura 8 mostra a soleira de altura de 12 cm na posição $1/2H$ com as vazões ensaiadas de 40 L/s ($q=0,1 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, $F=7,44$), 80 L/s ($q=0,2 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, $Fr=6,91$) e 110 L/s ($q=0,275 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, $Fr=5,98$).



a) Vazão = $0,1 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, $F_{1d}=7,44$

b) Vazão = $0,20 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, $F_{1d}=6,91$

c) Vazão = $0,275 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, $F_{1d}=5,98$

Figura 8: Escoamento (esquerda para a direita) com a soleira terminal com altura = $0,12 \text{ m}$, localizada na posição $1/2H$

SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Os dados de pressões instantâneas ao longo da bacia de dissipação foram coletados com transdutores piezo-resistivos fixados no fundo da bacia de dissipação, conforme descrito anteriormente. Os pontos onde foram instalados os transdutores foram escolhidos de modo que, praticamente, todo o trecho de visualização lateral do canal pudesse ser instrumentado, como indica a figura 6. Os transdutores foram previamente calibrados no próprio canal de ensaios, determinando para cada um a sua curva de pressão por corrente elétrica de saída. As amostras de dados foram coletadas com frequência de 256 Hz durante 8 minutos. O tempo e a frequência de aquisição foram baseados em estudos anteriores realizados no próprio laboratório.

ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise realizada para a distribuição longitudinal das pressões médias junto ao fundo da bacia de dissipação indicou um comportamento semelhante para todas as condições ensaiadas (alturas e posições), porém em magnitudes diferentes. Os gráficos a seguir descrevem o comportamento dos dados coletados nesses ensaios, comparados com os obtidos em ensaios realizados sem a presença da soleira terminal. A distribuição longitudinal das pressões médias junto ao fundo de uma bacia de dissipação por ressalto hidráulico a jusante de um vertedouro em degraus sem a presença de soleira terminal foi apresentada por Marques *et al.* (2013), onde foi observado que segue a mesma distribuição de um ressalto hidráulico formado a jusante de uma calha lisa (sem degraus) e sem soleira terminal.

A Figura 10 apresenta a distribuição longitudinal de pressões médias para os ensaios com soleira de altura 24 cm em cada uma das posições ensaiadas (1/1H, 2/3H, 1/2H) para a vazão específica de $0,275 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ ($F_{1d} = 5,98$). O eixo das abscissas representa as pressões médias obtidas nos ensaios, que foram adimensionalizadas através da Equação 1. O eixo das ordenadas representa a posição relativa (Equação 2) referenciado ao pé do vertedouro em degraus (início da bacia de dissipação).

$$\frac{P - Y_r}{Y_l - Y_r}$$

(Equação 1)

$$\frac{X}{Y_l - Y_r}$$

(Equação 2)

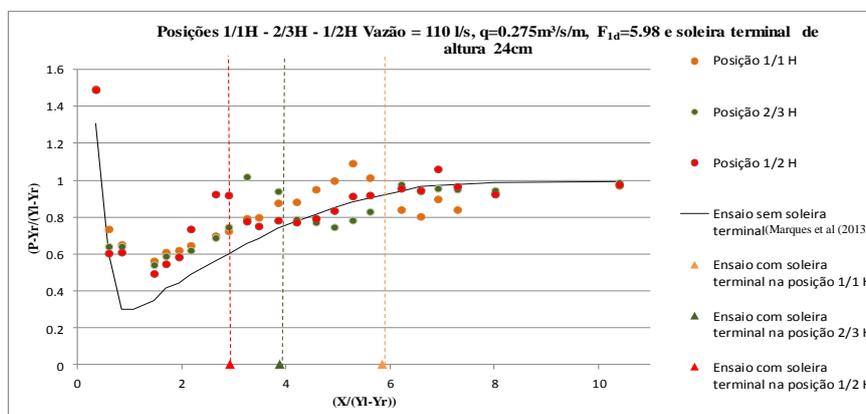


Figura 10: Pressões médias adimensionalizadas para a vazão específica $q=0,275 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ ($F_{1d} = 5,98$) e soleira de altura igual a 24 cm para 3 posições relativas das soleiras (1/1H, 2/3H, 1/2H)

A partir da observação da figura 10 são feitas algumas considerações. A montante da soleira terminal, para todas as posições, há um aumento no valor da pressão média em relação à curva que representa a distribuição sem soleira. Pode-se concluir que a soleira causa um afogamento artificial, causado pela introdução da soleira no escoamento, aumentando a altura de água e, conseqüentemente, a pressão no interior da bacia. Esse aumento se intensifica quanto mais próxima a soleira fica do pé do vertedouro. Observando o gráfico, notamos que com a soleira localizada na posição 1/1H, o máximo aumento da relação da equação (1) com a curva obtida sem a soleira é de, aproximadamente, 0,18. Na posição 2/3H essa diferença sobe para 0,34 e na posição 1/2H esse valor fica em torno de 0,36.

A jusante da soleira ocorre uma queda na pressão média, chegando a valores mais baixos do que os obtidos nos ensaios sem soleira. Independente da posição ensaiada, o valor mínimo encontrado para a relação da Equação 1 fica entre 0,75 e 0,80, aproximadamente. A partir do ponto de mínima pressão, os valores tendem a encontrar a curva que representa os ensaios realizados sem soleira.

A Figura 11 apresenta a comparação da curva gerada nos estudos da bacia sem soleira com os dados referentes às medições realizadas com as diversas alturas de soleira terminal (10 cm, 12 cm, 18 cm e 24 cm) para a mesma vazão específica da Figura 10 ($q=0,275\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, $F_{1d} = 5,98$), na posição igual a 1/2H, com as adimensionalizações obtidas a partir das mesmas equações descritas para o gráfico anterior.

Figura 11: Pressões médias adimensionalizadas para a vazão específica $q=0,275\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ e posição igual a 1/2H para as 4 alturas de soleira.

A partir dos dados apresentados, percebemos que, reforçando as conclusões da análise anterior, a montante da soleira ocorre um aumento nas pressões médias, provavelmente devido à ocorrência de um afogamento artificial do ressalto, que eleva a pressão média no interior da bacia. Percebemos que o desenvolvimento das pressões médias é semelhante para todas as alturas da soleira, porém, para as menores alturas a magnitude é significativamente menor. Ou seja, ao inserir, na bacia, soleiras com alturas maiores, as pressões médias se elevam com o aumento de tamanho da peça. Próximo ao pé do vertedouro, na região onde o escoamento impacta no fundo da bacia, observa-se que os valores de pressão média podem chegar a um valor adimensional de, aproximadamente, 1,5.

A jusante da soleira, os valores, após passarem por um mínimo situado entre 0,75 e 0,80, tendem a retornar aos valores da curva ensaiada sem soleira. Esse comportamento é semelhante ao observado para as demais vazões que mostram a variação das posições.

A Figura 12 apresenta os resultados do ensaio realizado com uma soleira com altura de 12 cm na posição 1/2H e vazões de 40l/s ($q=0,1\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, $F_{1d}=7,44$), 80l/s ($q=0,2\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, $F_{1d}=6,91$) e 110l/s ($q=0,275\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, $F_1=5,98$).

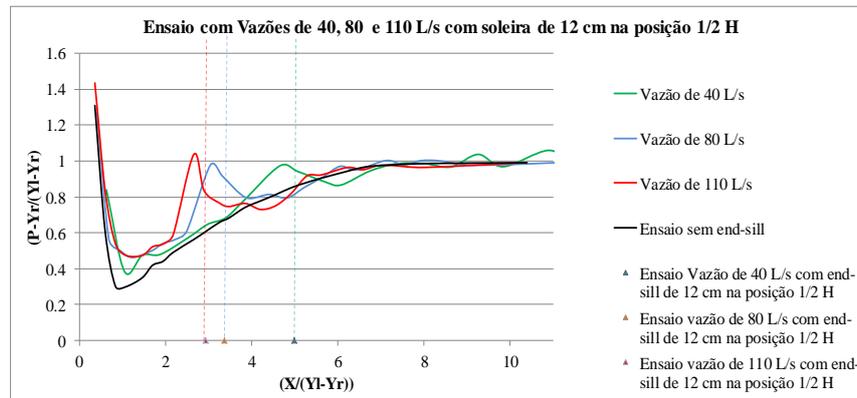


Figura 12: Pressões médias adimensionalizadas para vazões 40l/s, 80l/s e 110l/s na posição igual a 1/2H.

Através da Figura 12, observou-se que para a vazão de 40 l/s, a posição relativa da soleira está localizada mais ao final do ressalto hidráulico. Dessa forma, o afogamento artificial é menor. Esse afogamento também gera um aumento de pressão a montante da soleira, embora menor que o aumento gerado para vazões maiores, como podemos observar nas vazões de 80 l/s e 110 l/s, também apresentadas na figura. Como esperado, a posição relativa da soleira para a vazão de 110 l/s é mais próxima do início do ressalto do que para a vazão de 80 l/s e esta é mais próxima do que para a vazão de 40 l/s, indicando que quanto maior a vazão, mais próxima do início do ressalto fica a posição relativa da soleira, assim maior é o afogamento artificial, e maior é a pressão média no interior da bacia. Foram feitos ensaios, também, para vazões de 60 l/s ($q=0,15\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, $F_{1d}=6,98$) e 100 l/s ($q=0,25\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, $F_{1d}=6,34$), e foi verificado o mesmo comportamento descrito anteriormente. A jusante da soleira, o comportamento dos resultados obtidos é o mesmo descrito anteriormente, com tendência a aproximar da curva dos ensaios realizados sem soleiras.

CONCLUSÕES

Com as análises realizadas até o momento, pode-se notar que o comportamento do escoamento na bacia com soleira terminal é semelhante ao do escoamento em bacia sem elementos. A inserção de uma soleira terminal reflete em um aumento das pressões médias a montante da soleira e uma diminuição logo a jusante, retornando à mesma tendência encontrada em bacias sem soleiras. Observamos que as soleiras com maiores alturas têm maior influência no valor das pressões adimensionalizadas, assim como maiores vazões. A posição que mais interfere na pressão média foi a de 1/2H e, em sequência, 2/3H, indicando que quanto mais próximo ao pé do vertedouro estiver a soleira, mais influência essa terá nos valores de pressão.

As análises apresentadas são referentes a estudos realizados com os dados de pressão média. A seguir, no decorrer da pesquisa, serão analisadas as medições relativas à flutuação de pressão e seus valores extremos. Esses dados são de grande relevância para o dimensionamento adequado da bacia de dissipação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Dona Francisca Energética S/A pelo financiamento do projeto de pesquisa, e à equipe do Laboratório de Obras Hidráulicas do IPH/UFRGS, que vem se dedicando intensamente a este trabalho.

REFERÊNCIAS

- ELEVARTOSKI, A. E. (1959). Hydraulic Energy Dissipators. McGraw-Hill: New York.
- DAÍ PRÁ, M., (2004) “Características do Escoamento Sobre Vertedouros em Degraus de Declividade 1V:1H”, Dissertação de Mestrado, Departamento de Obras Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS.
- MARQUES, M. G.; PELUFO, J.; CONTERATO, E.; NOVAKOSKI, C. (2013). Análise da distribuição das pressões médias junto ao fundo de uma bacia de dissipação por ressalto hidráulico a jusante de vertedouro em degraus. In *Anais do XXIX Seminário Nacional de Grandes Barragens*. Porto de Galinhas, PE, Abr. 2013.
- PIRESTANI, M. R.; RAZMKHAH, A.; GHOBADI, F. (2012). Effect of convergent walls on energy dissipation in stilling basin by physical modeling. *International Journal of Thermal and Fluid Sciences*. v. 1, pp. 1 - 10.
- SIMÕES, A. (2008). Considerações sobre a Hidráulica de Vertedores em Degraus: Metodologias Adimensionais para Pré – Dimensionamento. 258 f. Dissertação (mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos.
- TOZZI, M. J. (1992). Caracterização/Comportamento de Escoamentos em Vertedouros com Paramento em Degraus. 302 f. Tese (Doutorado em Hidráulica) – Universidade de São Paulo, São Paulo.
- USBR (1987), Design of Small Dams, *Water Resources Technical Publication*, 860p.
- VISCHER, D. L.; HAGER, W.H. (1995). Energy Dissipators. IAHR, Hydraulic Structures Design Manual.