

RESSALTO HIDRÁULICO A JUSANTE DE UM VERTEDOIRO EM DEGRAUS: RELAÇÃO ENTRE ALTURA NORMAL E ALTURA CONJUGADA RÁPIDA

Carolina K. Novakoski^{1} & Marcelo G. Marques² & Eliane Conterato³ & Eder Daniel Teixeira⁴
& Rute Ferla⁵*

Resumo – O ressalto hidráulico a jusante de vertedouros tem por objetivo a dissipação da energia cinética presente no escoamento quando esse atinge a base da estrutura. Quando o ressalto ocorre em uma bacia de dissipação a jusante de um vertedouro em degraus, suas dimensões são reduzidas devido a esse tipo de estrutura possibilitar uma significativa dissipação de energia durante a passagem do escoamento pela calha. O presente trabalho visa relacionar a altura normal do escoamento, que se desenvolve ao longo da calha em degraus, com a altura conjugada rápida, que ocorre na entrada do ressalto hidráulico. Os resultados indicam que a altura normal do escoamento próxima ao pé do vertedouro é maior do que a altura conjugada rápida, sendo que estas grandezas podem ser relacionadas segundo uma equação, função do número de Froude do escoamento rápido.

Palavras-Chave – Vertedouro em degraus, altura normal do escoamento, altura conjugada rápida.

HYDRAULIC JUMP DOWNSTREAM STEPPED SPILLWAYS: RELATIONSHIP BETWEEN NORMAL DEPTH AND DEPTH UPSTREAM THE HYDRAULIC JUMP

Abstract – The hydraulic jump downstream stepped spillways aims to dissipate the kinetic energy present in the flow on the base of the structure. When the hydraulic jump occurs in a stilling basin downstream stepped spillway, the dimensions of the stilling basin are reduced because this type of structure dissipates a significant amount of energy during the passage of the flow through the stepped spillway chute. This paper aims to connect the normal flow depth, which develops along the stepped chute, with the depth upstream the hydraulic jump. The results indicate that the normal depth of the flow near the foot of the stepped spillway chute is greater than the depth upstream the hydraulic jump, and these values can be related according to an equation, function of the Froude number of the supercritical flow.

Keywords – Stepped spillways, normal flow depth, depth upstream the hydraulic jump.

INTRODUÇÃO

Vertedouros em degraus são utilizados desde a antiguidade, porém, a partir de 1970, essas estruturas começaram a ser amplamente utilizadas devido ao desenvolvimento de técnicas construtivas, como o concreto compactado a rolo (CCR). A grande vantagem da utilização de uma estrutura escalonada é a dissipação de energia ocasionada pela passagem do escoamento sobre a

¹ Doutoranda em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (IPH/UFRGS); carolkn04@gmail.com.

² Professor Doutor DOH/IPH/UFRGS; mmarques@iph.ufrgs.br

³ Doutoranda em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (IPH/UFRGS); eliconterato@gmail.com.

⁴ Professor Doutor DOH/IPH/UFRGS; eder.teixeira@ufrgs.br

⁵ Mestranda em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (IPH/UFRGS); ruterferla@hotmail.com.

calha. Estudos como de Tozzi (1992) e Sanagiotto (2003) revelam que, dependendo das características da estrutura e do escoamento, uma calha em degraus pode dissipar entre 60% e 92% da energia total de montante. Em contrapartida, uma calha convencional (lisa) dissipa, no máximo, 5% dessa energia, segundo Peterka (1974). Como a energia residual, que não pôde ser dissipada durante a passagem do escoamento sobre a calha, deve ser dissipada através de ressalto hidráulico, ao utilizar vertedouros em degraus, a bacia de dissipação onde o fenômeno ocorre pode ter suas dimensões e custos reduzidos em comparação à mesma estrutura construída a jusante de uma calha convencional.

O escoamento ao longo da calha pode ser classificado segundo três definições principais, sendo elas: escoamento por quedas sucessivas, escoamento de transição e escoamento deslizante sobre turbilhões. Nesse último, formam-se vórtices de recirculação (turbilhões) entre os degraus, sobre os quais o escoamento desliza, conforme pode ser observado na figura 1. O escoamento deslizante sobre turbilhões se desenvolve imediatamente após o início da aeração do escoamento, que ocorre no momento em que a camada limite atinge a profundidade total da lâmina d'água. Esse ponto é chamado de ponto de início de aeração (L_a). A jusante desse ponto ocorre o aumento da lâmina d'água, até que a altura do escoamento atinge a condição praticamente uniforme, mantendo este comportamento até o final do escoamento sobre a calha. Essa altura é denominada altura normal do escoamento (h_n).

No momento em que o escoamento atinge a base da estrutura, um ressalto hidráulico se desenvolve na bacia de dissipação a fim de dissipar a energia residual, como pode ser observado na figura 1. O ressalto hidráulico é um fenômeno altamente instável que resulta do encontro entre os escoamentos rápido (número de Froude (Fr) >1) e lento (número de Froude (Fr) <1) e pode ser livre ou afogado. O ressalto representado na figura 1 é livre, o que significa que seu início ocorre no encontro entre a calha do vertedouro e a bacia de dissipação, e que a altura conjugada lenta (y_2) é igual ao nível d'água de jusante. Visto que o estabelecimento da altura conjugada rápida (y_1) está diretamente relacionado com a altura normal do escoamento (h_n), o presente trabalho visa elaborar uma equação relacionando as variáveis h_n e y_1 .

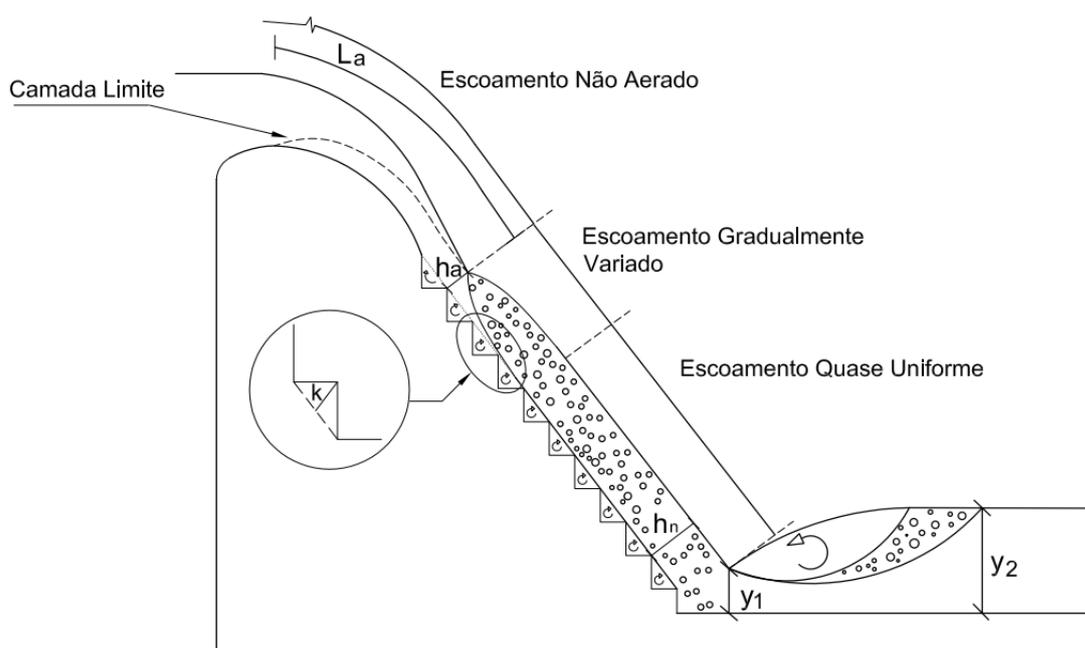


Figura 1: Desenvolvimento do escoamento deslizante sobre turbilhões em um vertedouro em degraus.

METODOLOGIA EXPERIMENTAL

A presente pesquisa foi desenvolvida em modelo físico reduzido, na escala 1:10 em relação ao protótipo, de um vertedouro em degraus seguido de bacia de dissipação instalado no Laboratório de Obras Hidráulicas – IPH – UFRGS. A calha do vertedouro, cujos 33 degraus têm dimensões de 0,06 m de espelho e 0,045 m de patamar, possui inclinação de 1V:0,75H e altura total de 2,45 m. A jusante da calha foi implantado um canal com 8 m de comprimento, dos quais 5 m são constituídos por paredes em acrílico a fim de permitir a visualização do escoamento. A bacia de dissipação pode ser caracterizada como tipo 1, conforme classificação de Peterka (1974), uma vez que não existem elementos no canal mencionado. A figura 2 apresenta um esquema do modelo físico reduzido utilizado.

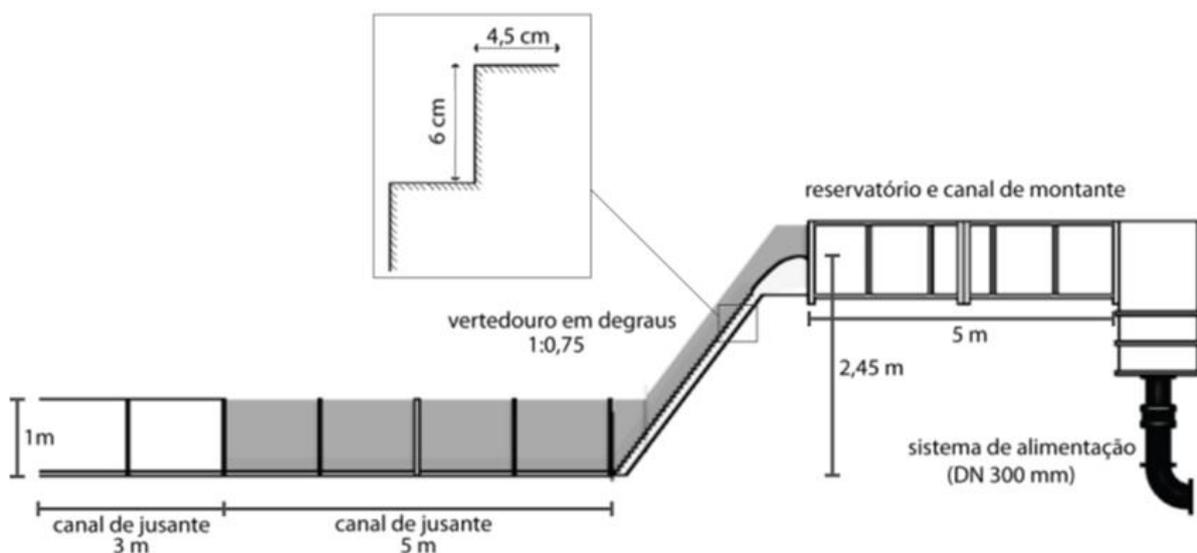


Figura 2: Esquema do modelo físico utilizado.

Foram realizados ensaios com nível de jusante igual à altura conjugada lenta do ressalto hidráulico (y_2), ou seja, com ressalto hidráulico livre. Realizaram-se ensaios para cinco diferentes vazões (40, 60, 80, 100 e 110 l/s) e, em cada um deles, determinou-se, através de um tubo piezométrico com escala graduada, a altura conjugada lenta (y_2) e, a partir dela, estimou-se a altura conjugada rápida (y_1) através da equação de Bélanger (equação 1).

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} (\sqrt{1 + 8F_{r1}^2} - 1) \quad (1)$$

Onde y_2 é a altura conjugada lenta (m); y_1 é a altura conjugada rápida (m); Fr_1 é o número de Froude do escoamento para a altura conjugada rápida (adimensional).

Entretanto, na condição de ensaio com ressalto livre, não foi possível o estabelecimento a olho nu da altura normal e da altura conjugada rápida do escoamento. Dessa forma, foram realizados, também, ensaios com as mesmas vazões já identificadas, porém com nível d'água de jusante menor do que a altura conjugada lenta (y_2). Sendo assim, o ressalto hidráulico se desenvolveu a jusante do início da bacia de dissipação, isto é, a jusante do ponto inferior extremo da calha do vertedouro. Ressalta-se que tais ensaios foram realizados apenas com o intuito de favorecer a análise visual das dimensões mencionadas, visto que a situação de ressalto hidráulico formado a jusante do pé do vertedouro não deve ser utilizada devido à possibilidade de erosão causada pelo estabelecimento do ressalto hidráulico externamente aos limites da bacia de dissipação.

Para a verificação da relação entre a altura normal do escoamento (h_n) e da altura conjugada rápida (y_1), aplicou-se a equação 2, proposta por Conterato et al. (2015) e a equação 3, proposta por Tozzi (1992), a partir dos fatores de resistência (f) propostos por alguns autores, conforme pode ser observado na tabela 1.

$$\frac{h_n}{k} = \frac{3}{8} F^{*4} \quad (2)$$

Onde: h_n é a altura normal do escoamento (m); k é a altura de rugosidade dos degraus (ver figura 1); F^* é o número de Froude do degrau.

$$h_n = \left(\frac{f \cdot q^2}{8 \cdot g \cdot \sin \alpha} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

Onde: h_n é a altura normal do escoamento (m); f é o fator de resistência da calha em degraus (adimensional); q é a vazão específica ($m^3/s/m$); g é a aceleração da gravidade (m/s^2); α é a declividade da calha (graus).

Tabela 1 – Fator de resistência (f) de acordo com alguns autores.

| Autor | Equação |
|-----------------------------|---|
| Stephenson (1991) | $\frac{1}{\sqrt{f}} = 1,74 + 2 \cdot \log\left(\frac{h}{k}\right) \quad (4)$ |
| Tozzi (1992) | $\frac{1}{\sqrt{f}} = 2,16 + 1,24 \cdot \log\left(\frac{h}{k}\right) \quad (5)$ |
| Chamani e Rajaratnam (1999) | $\frac{1}{\sqrt{f}} = 1,77 + 1,92 \cdot \log\left(\frac{h}{k}\right) \quad (6)$ |

Onde: f é o fator de resistência da calha em degraus (adimensional); h é a profundidade não aerada do escoamento; g é a aceleração da gravidade (m/s^2); α é a declividade da calha (graus); q é a vazão específica ($m^3/s/m$); k é a rugosidade do degrau (m).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A tabela 2 apresenta os resultados das alturas conjugadas medidas (y_2) e calculadas (y_1) bem como as demais características dos ressaltos hidráulicos ensaiadas. As figuras 3 (a) apresentam os ensaios realizados, com ressalto hidráulico livre, com as vazões de 40, 80 e 100 l/s. As figuras 3 (b) apresentam ensaios realizados com as mesmas vazões indicadas, porém com o nível d'água de jusante menor do que a altura conjugada lenta (y_2).

Analisando-se qualitativamente as figuras 3 (a) e 3 (b), percebe-se que a profundidade normal do escoamento sobre a calha, no pé do vertedouro, após a aeração do escoamento e uniformização da altura normal (h_n), é maior do que a altura conjugada rápida (y_1). Os resultados obtidos a partir da relação entre essas duas grandezas, calculadas através das equações 2 e 3, foram relacionados em função do número de Froude (figura 4), ajustando-se uma equação adimensional para a estimativa de h_n/y_1 , dada pela equação 7.

Tabela 2 – Características dos ressaltos hidráulicos ensaiados.

| Q (l/s) | y_1 (mm) | V_r (m/s) | y_2 (mm) | Fr | Re ($\times 10^3$) |
|---------|------------|-------------|------------|------|----------------------|
| 40 | 26,4 | 3,78 | 265 | 7,44 | 100 |
| 60 | 36,11 | 4,15 | 339 | 6,98 | 150 |
| 80 | 44,05 | 4,54 | 409 | 6,91 | 200 |
| 100 | 54,15 | 4,62 | 459 | 6,34 | 250 |
| 110 | 60,01 | 4,58 | 478 | 5,98 | 275 |

Onde: Q é a vazão (l/s); y_1 é a altura conjugada rápida (mm); V_r é a velocidade rápida do escoamento (m/s); y_2 é a altura conjugada lenta (mm); Fr é o número de Froude do escoamento rápido (adimensional); Re é o número de Reynolds do escoamento (adimensional).

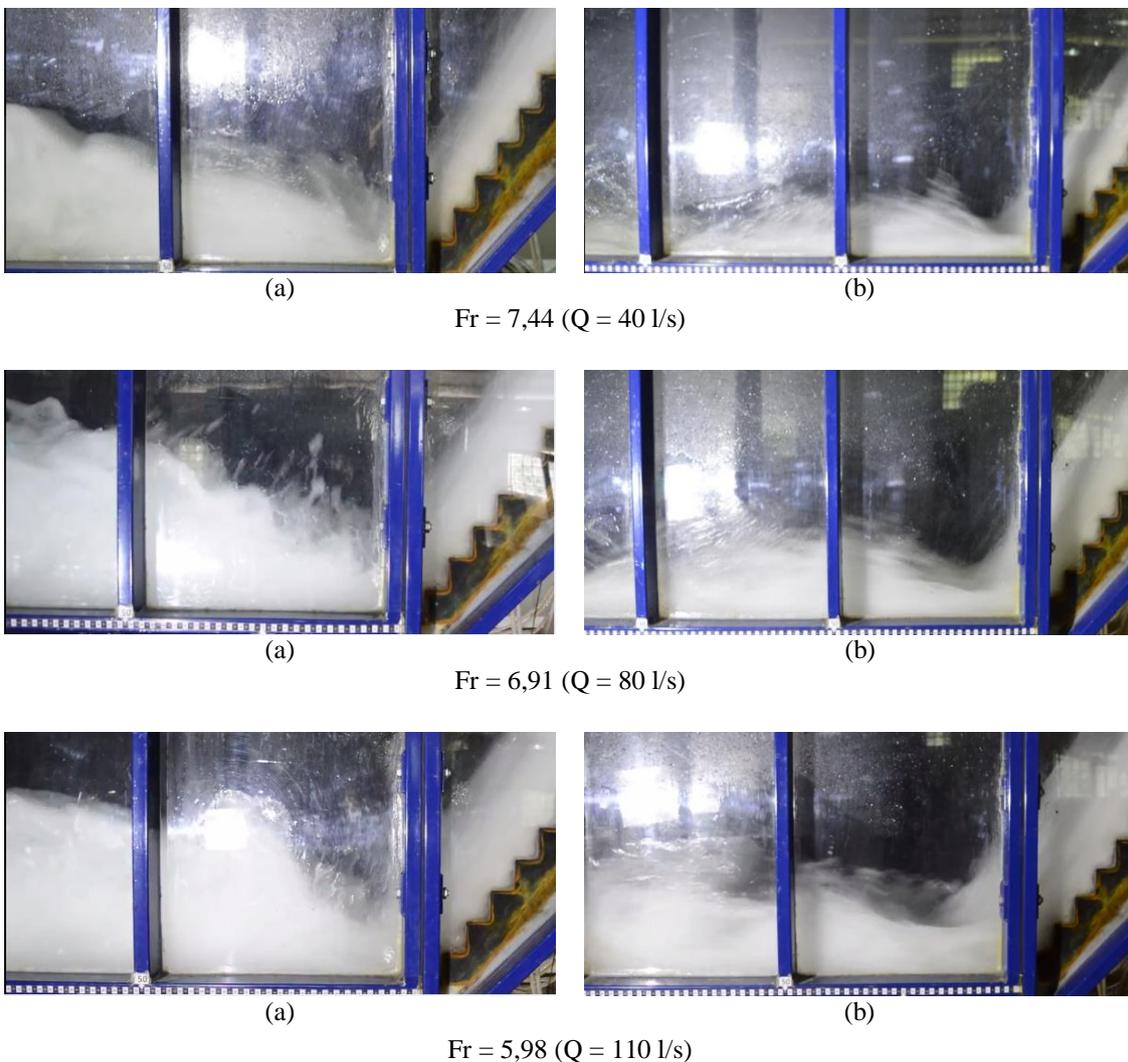


Figura 3: Escoamentos ensaiados. (a) ressalto hidráulico livre. (b) ressalto hidráulico formado a jusante do pé do vertedouro, na bacia de dissipação.

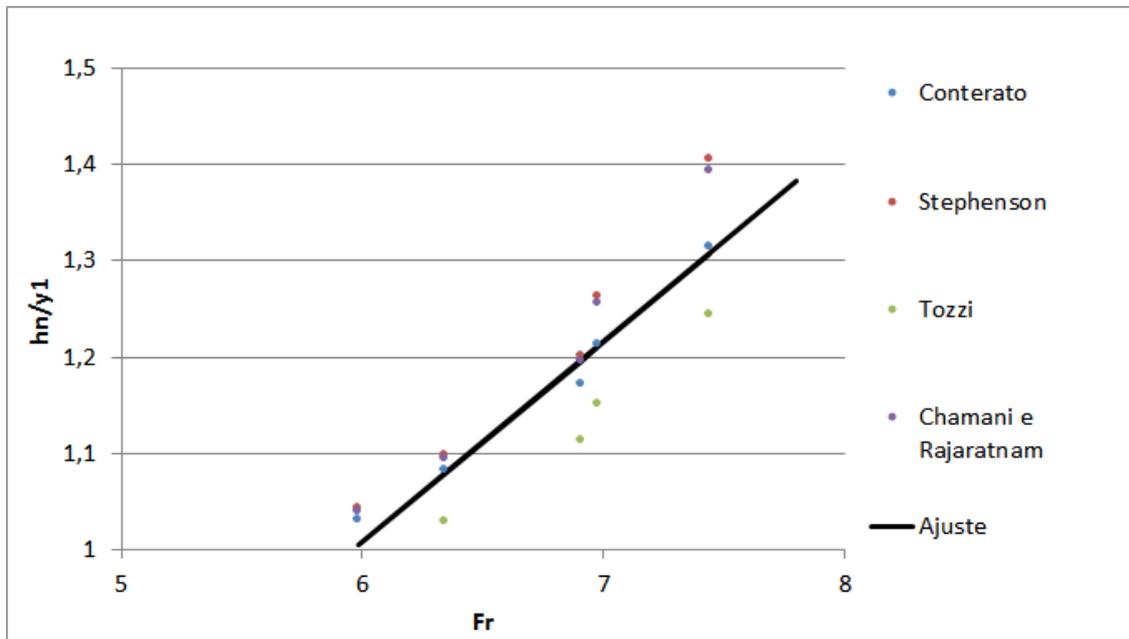


Figura 4: Relação entre profundidades normal (y_n) e rápida (y_1) do escoamento segundo número de Froude.

$$\frac{h_n}{y_1} = \frac{1}{8,5} \cdot Fr^{1,2} \quad (7)$$

Onde: h_n é a profundidade normal do escoamento (m); y_1 é a profundidade conjugada rápida (m); Fr é o número de Froude do escoamento rápido.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro parcial da CAPES - Brasil, CNPq, Finep, Eletrobras, Fapergs e IPH/UFRGS.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Através dos resultados preliminares apresentados no presente artigo indica-se que a altura normal do escoamento (h_n) que se desenvolve na calha em degraus próxima ao pé do vertedouro é maior do que a altura conjugada rápida (y_1) do ressalto formado na bacia de dissipação a jusante. Ademais, entende-se que a altura normal do escoamento (h_n) e a altura conjugada rápida (y_1) são dependentes entre si e podem ser relacionadas pela equação 7, considerando as características dos ensaios realizados na presente análise.

Sugere-se que novos ensaios sejam desenvolvidos de modo a realizarem-se análises quantitativas do escoamento, utilizando equipamentos precisos de coleta de dados, como transdutores de pressão, por exemplo. Além disso, sugere-se que sejam definidas novas equações adimensionais, relacionando-se outras variáveis que possivelmente sejam relevantes para o comportamento do escoamento nestes casos.

REFERÊNCIAS

CHAMANI, M. R.; RAJARATNAM, N. (1999). Characteristics of skimming flow over stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE, pp. 361-368.

CONTERATO, E.; MARQUES, M. G.; MEES, A. A. A. (2015) proposta de uniformização das equações de previsão das características do escoamento sobre a calha de um vertedouro em degraus. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. RBRH, pp. 131-137.

PETERKA, A. J. (1974). Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators, Washington, U.S. Govt. Print. Off, 217 p.

SANAGIOTTO, D. G. (2003). Características do escoamento sobre vertedouros em degraus de declividade 1V:0,75H. 118f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Porto Alegre, 2003.

STEPHENSON, D. (1991). Energy dissipation down stepped spillways. *Water Power & Dam Constructio*, pp. 27-30.

TOZZI, M. J. (1992). Caracterização/comportamento de escoamento em vertedouros com paramento em degraus. 302f. Tese (Doutorado em Hidráulica) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.