
Proposta de uniformização das equações de previsão das características do escoamento sobre a calha de um vertedouro em degraus

Proposal for Standardization of Equations of Estimated Flow Characteristics in a Stepped Spillway Flume

Eliane Conterato¹, Marcelo Giulian Marques² e Alexandre Augusto Mees Alves³

^{1,2,3}Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul,

E-mail: eliconterato@gmail.com; mmarques@iph.ufrgs.br e alexandremees@gmail.com

Recebido: 12/03/14 - Revisado: 19/05/14 - Aceito: 29/09/14

RESUMO

Vertedouros em degraus são estruturas hidráulicas caracterizadas pela significativa resistência imposta ao escoamento e pela dissipação de energia associada à macrorrugosidade propiciada pelos degraus, resultando na redução das estruturas de dissipação a jusante deste tipo de vertedouros. Este estudo teve como objetivo verificar as características da dissipação de energia devido à rugosidade da calha em vertedouros em degraus com declividade de 1V:0,75H através da análise experimental em modelos físicos e a comparação com resultados de outros autores, visando determinar das características do escoamento, tais como comprimento de aeração, altura de água na aeração, coeficiente de resistência da calha, altura normal do escoamento após a aeração e energia residual, de maneira a permitir o dimensionamento de estruturas mais seguras e econômicas.

Palavras Chave: Vertedouro em degraus. Dissipação de energia. Fator de resistência.

ABSTRACT

Stepped spillways are hydraulic structures characterized by significant resistance imposed upon the flow and by the dissipation of energy associated with the macro-roughness promoted by the steps, resulting in the reduction of downstream dissipation structures. The present study aims to verify the characteristics of the energy dissipation due to this roughness in a stepped spillway flume with a slope of 1V:0.75H through experimental analysis of physical model data and comparing it with data from different sources, aiming to determine flow characteristics, such as aeration length, water surface level, flume resistance coefficient and residual energy, allowing the design of safer and more economical structures.

Keywords: Stepped spillway. Energy dissipation. Friction factor.

INTRODUÇÃO

Um vertedouro em degraus se caracteriza pela existência de degraus ao longo do seu perfil, impondo ao escoamento uma resistência que, associada à incorporação de ar, causa uma maior dissipação de energia em relação a um vertedouro convencional (calha lisa). Desta maneira a parcela de energia residual no pé do vertedouro diminui, permitindo que se adote estruturas de dissipação mais curtas a jusante, com custos de implantação menores, porém mantendo as mesmas condições de segurança a jusante.

Hoje em dia o uso desse tipo de estrutura vem aumentando. Um dos fatores que contribuiu para essa expansão foi o avanço da técnica de construção por concreto compactado ao rolo (CCR), que facilita a construção de vertedouros com degraus. Conforme Amador et al. (2005) atualmente, cerca de 30% das barragens em CCR apresentam vertedouros em degraus. Com a demanda crescente por esse tipo de vertedouro aumenta também a necessidade de pesquisas voltadas a otimização desse tipo de estrutura e uma uniformização dos critérios de dimensionamento.

Nas últimas décadas, muitos autores vêm estudando, o fenômeno de aeração e dissipação ao longo da calha em relação a um vertedouro convencional, podendo-se citar: Tozzi (1992), Matos e Quintela (1995), Chanson (1994), Otshu e Yasuda (1997), Matos (1999) Sanagiotto (2003) e Dai Prá (2004), entre outros. Recentemente, começaram a se desenvolver estudos utilizando a modelação numérica, sendo os resultados promissores, mas ainda se tem muito a desenvolver e comparar os resultados com os obtidos em modelos físicos. Podendo-se citar Meirelles (2011), Simões et al. (2012) entre outros.

MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo procura verificar e descrever as características do escoamento ao longo de uma calha de um vertedouro em degraus através da análise experimental em um modelo físico com declividade de 1V:0,75H e degraus com 6 cm de altura e da comparação com resultados obtidos por outros autores. São abordados os critérios para estimar as características do escoamento, tais como comprimento de aeração (L_a), altura de água na aeração (h_a), coeficiente de resistência da calha (f), altura “normal” do escoamento após a aeração (h_n) e energia residual (E_r), de maneira a permitir o dimensionamento de estruturas mais seguras e econômicas.

Os dados obtidos neste estudo se referem a faixa de valores de $0,73 < hc/k < 1,66$ (sendo hc a altura crítica do escoamento e K_a altura de rugosidade do degrau, mostrado na Figura 4) e para valores de $H/h = 40,83$ (sendo H a altura do vertedouro e h a altura do degrau).

O modelo físico foi montado no Laboratório de Obras Hidráulicas do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Consiste em um vertedouro com bacia de dissipação a jusante, mostrado na Figura 1.

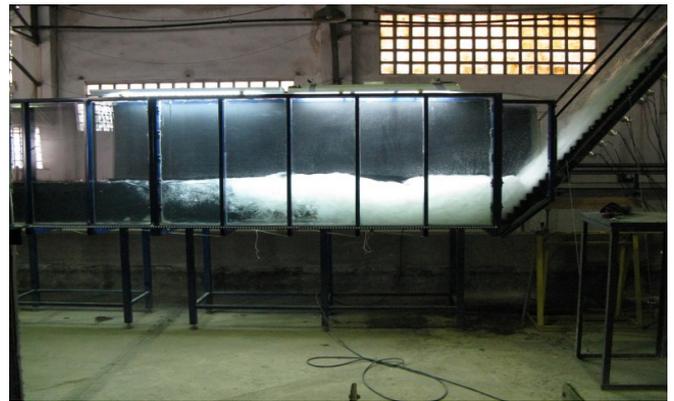


Figura 1 – Modelo físico utilizado

As principais características do modelo estão mostradas abaixo:

- altura da calha (H) = 2,45 m;
- declividade da calha = 1(V) : 0,75 (H);
- calha com 33 degraus com 0,06 m de altura;
- comprimento do canal de jusante do vertedouro = 5 m;
- largura do canal = 0,40 m.

As medições referentes ao comprimento de aeração foram realizadas visualmente sobre a calha do vertedouro. As medições referentes à altura do escoamento foram realizadas com uma ponta linimétrica instalada sobre a calha, perpendicularmente ao escoamento, mostrada na Figura 2.



Figura 2 – Ponta linimétrica utilizada nos ensaios

COMPRIMENTO E ALTURA DA LÂMINA D'ÁGUA NO PONTO DE INÍCIO DE AERAÇÃO

O início da aeração se dá quando a energia cinética do escoamento é superior aos efeitos da tensão superficial. Mas somente essa condição nem sempre é suficiente, é preciso que a camada limite esteja totalmente desenvolvida, conforme Gangadharaiyah et al. (1970) apud Dai Prá (2004) e Bindo et al (1993) enfatizam que a macrorugosidade dos degraus favorece o

desenvolvimento da camada limite fazendo com que sua espessura aumente mais rapidamente que em vertedouros de calha lisa.

Após, o ponto de início da aeração (L_a), coincidente com região onde ocorre afloramento da camada limite, a aeração faz com que a altura da lâmina cresça rapidamente até a altura do escoamento ficar praticamente uniforme (TOZZI, 1992; MATOS, 1999). A Figura 3 ilustra as 3 fases do escoamento sobre uma calha em degraus: escoamento não aerado, escoamento gradualmente variado e escoamento totalmente aerado com altura “uniforme” (h_n).



Figura 3 – Início da aeração sobre vertedouro

Através de medições experimentais em modelos físicos de laboratório de vertedouros em degraus, diversos autores sugeriram equações para previsão de posições de início de aeração (L_a) e profundidade do escoamento nesse ponto (h_a).

As equações propostas por alguns autores são apresentadas na Tabela 1, em que:

δ = espessura da camada limite (m);

L_a = posição de início de aeração a partir da crista ou início da ogiva do vertedouro (m);

h_a = altura da lâmina d’água no ponto de início de aeração (m);

K = altura de rugosidade do degrau (m), (mostrada na Figura 4);

α = declividade da calha ($^\circ$);

F^* = número de Froude rugoso, calculado pela Equação 1, (adimensional).

$$F^* = \frac{q}{\sqrt{g * K^3 * \text{sen}(\alpha)}} \quad (1)$$

onde:

q = vazão específica ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$);

g = aceleração da gravidade (m/s^2);

K = altura de rugosidade do degrau (m), (Figura 4);

α = declividade da calha ($^\circ$).

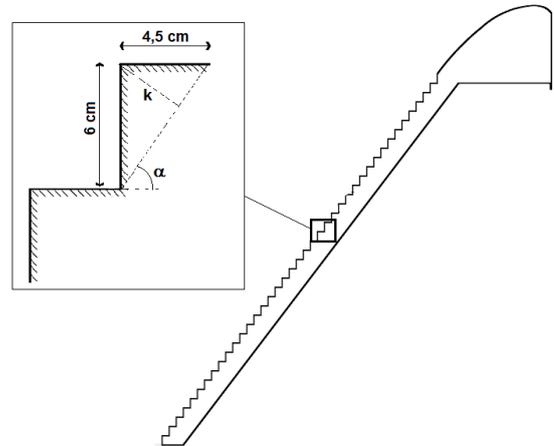


Figura 4 – Dimensões e características da calha e do degrau

Tabela 1 – Equações propostas para previsão de L_a e h_a por diferentes autores

| Autor | Equações propostas |
|--|---|
| Campbell et al. (1965)* e Tozzi (1992)** | $\frac{\delta}{L_a} = 0,080 \left(\frac{L_a}{k} \right)^{-0,33}$ |
| Wood et al. (1983) | $\frac{L_a}{k} = 13,3 (\text{sen } \alpha)^{0,796} \cdot (F^*)^{-0,713}$ |
| Chanson (1994) | $\frac{L_a}{K} = 9,8 (\text{sen } \alpha)^{0,08} F^{*0,71}$ $\frac{h_a}{K} = \frac{0,40}{(\text{sen } \alpha)^{0,04}} F^{*0,64}$ |
| MateosIguacel e Elviro García (1999) | $\frac{L_a}{H} = 5,6 \left(\frac{q}{g^{0,5} H^{1,5}} \right)^{0,8}$ |
| Matos (1999) | $\frac{L_a}{K} = 6,289 * F^{*0,734}$ $\frac{h_a}{K} = 0,361 * F^{*0,606}$ |
| Sanagiotto (2003) | $\frac{L_a}{K} = 9,7721 * F^{*0,7014}$ $\frac{h_a}{K} = 5,982 * F^{*0,5975}$ |
| Amador (2005) | $\frac{L_a}{K} = 5,982 * F^{*0,840}$ $\frac{h_a}{K} = 0,385 * F^{*0,580}$ |

* para vertedouros com face lisa e

**confirmou o uso para vertedouros escalonados

Na Figura 5 estão apresentados alguns resultados obtidos por diferentes autores, que estudaram estruturas com declividades e degraus diferentes entre si, e o ajuste proposto no presente estudo (Equação 2). Percebe-se que a adimensionalização leva os valores a uma mesma tendência, mesmo para os resultados obtidos em modelos com características geométricas diferentes. Baseando-se nos resultados obtidos na presente pesquisa e nos resultados obtidos pelos diferentes autores para outros tipos de estruturas, se observa que a equação sugerida pode representar bem a tendência do comportamento do comprimento do início da aeração (L_a).

$$\frac{L_a}{K} = 12F^{*2/3} \quad (2)$$

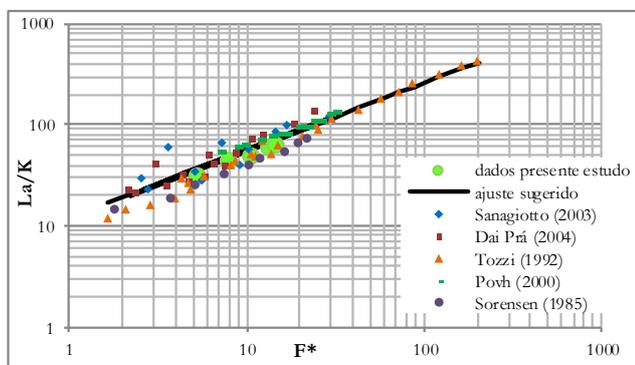


Figura 5 – Resultados obtidos por diferentes autores e ajuste para previsão de L_a . Valores adimensionalizados em função de F^*

Da mesma maneira foi obtido um ajuste para o cálculo de h_a , conforme Equação 3. A Figura 6 mostra os resultados referentes à altura do escoamento do presente estudo em comparação com outros autores. Os dados estão coerentes com o ajuste proposto.

$$\frac{h_a}{K} = \frac{1}{3} F^{*2/3} \quad (3)$$

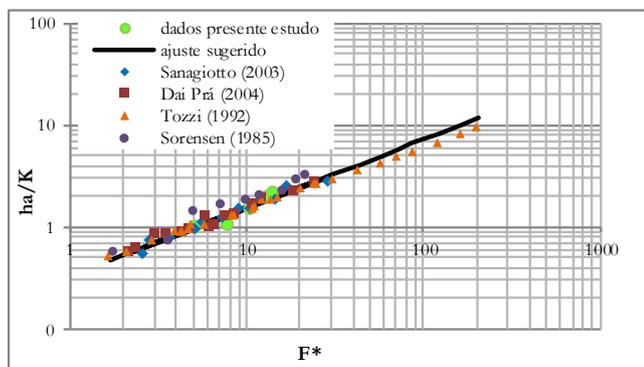


Figura 6 – Resultados obtidos por diferentes autores e ajuste para previsão de h_a . Valores adimensionalizados em função de F^*

FATOR DE RESISTÊNCIA PARA DETERMINAÇÃO DA ENERGIA RESIDUAL

A energia residual em um vertedouro pode ser calculada de diferentes maneiras. Conforme Tozzi (1992), a avaliação da dissipação em calhas com degraus pode ser feita analiticamente através do cálculo do fator de resistência “ f ” da equação de Darcy-Weisbach. Diferentes autores propuseram equações para cálculo do “ f ”, conforme Tabela 2.

Tabela 2 – Equações propostas para previsão do fator de resistência “ f ”

| Autor | Equações propostas |
|-----------------------------|--|
| Rajaratnam (1990) | $h_n = \left(\frac{f_k q^2}{8g \text{sen} \alpha} \right)^{1/3}$ |
| Stephenson (1991) | $\frac{1}{\sqrt{f}} = 01,74 + 2. \log \left(\frac{h_n}{K_s} \right)$ |
| Tozzi (1992) | $\frac{1}{\sqrt{f}} = 2,16 + 1,24. \log \left(\frac{h_n}{K} \right)$ |
| Chanson (1994) | $f = \frac{8.g.(sen \alpha).h_n^2}{q^2} \left(\frac{D_h}{4} \right)$ |
| Chamani e Rajaratnam (1999) | $\frac{1}{\sqrt{f}} = 1,77 + 1,92. \log \left(\frac{h_n}{K} \right)$ |
| Sanagiotto (2003) | $\frac{f_L}{f_K} = 1,8162. \exp \left(-1,7692. \frac{L}{L_a} \right)$ |

Na tabela:

h_n = profundidade do escoamento (m);

f_L = fator de resistência calha lisa;

f_k = fator de resistência vertedouro em degrau;

D_h = diâmetro hidráulico, corresponde a $4h$, considerando canal retangular de grande largura (m);

L = distância medida a partir da crista do vertedouro, paralelamente a calha (m);

Para o presente trabalho foi calculado o fator de resistência através da equação proposta por de Rajaratnam (1990), apresentada na Tabela 2. Os valores estão apresentados na Figura 7.

Os resultados apresentados no presente trabalho estão mais próximos aos valores apresentados por Tozzi (1992). Comparando com os resultados obtidos por Sanagiotto (2003), para mesmos valores de K , os valores são inferiores. Essa diferença pode estar associada ao método de medição ou cálculo da altura normal do escoamento após a aeração (h_n), ou ainda nas diferenças nas condições do ensaio como comprimento

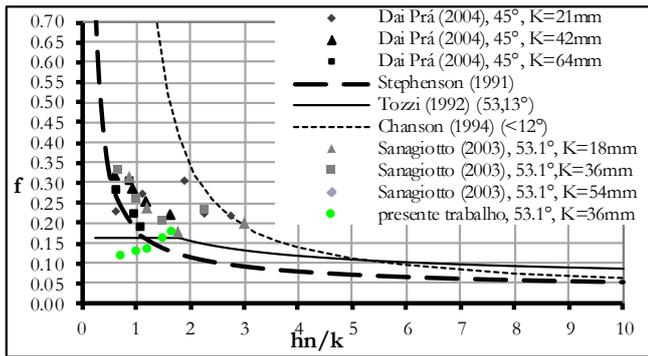


Figura 7 – Resultados obtidos por diferentes autores para previsão do fator de resistência

e largura do canal de aproximação. Sanagiotto (2003) utilizou valores medidos de altura normal ao longo da calha, enquanto que no presente trabalho esses valores foram calculados a partir da altura conjugada lenta (Y_2).

Outra análise foi feita relacionando os valores de hn com F^* com objetivo de verificar os resultados obtidos no presente trabalho com os resultados obtidos por outros autores e padronizar o cálculo dessa grandeza. A Figura 8 mostra os valores de hn adimensionalizados em função de F^* . Foram considerados os resultados obtidos no presente trabalho e de outros autores, considerando que alguns autores estudaram estruturas com declividade e altura de degrau diferentes do presente trabalho. Da mesma maneira que para previsão do La e ha sobre a calha, foi proposta uma equação em função de F^* (Equação 4), que pode ser aplicada à diferentes situações de declividade de calha e altura de degraus.

$$\frac{h_n}{K} = \frac{3}{8} F^{*4/7} \quad (4)$$

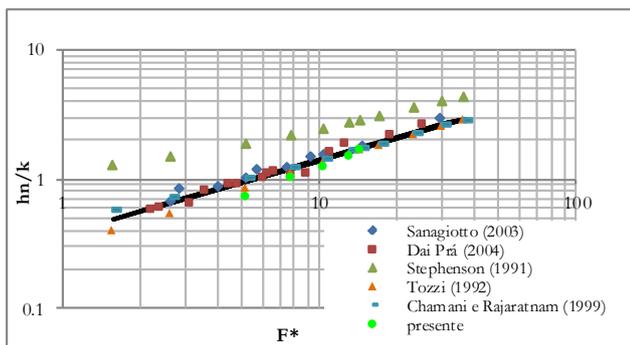


Figura 8 – Resultados obtidos por diferentes autores e ajuste para previsão de hn . Valores adimensionalizados em função de F^*

Os resultados estão coerentes com o ajuste feito. Os dados apresentados por Stephenson (1991) não se ajustam à equação proposta, inclusive não foram considerados no momento do ajuste. Essa diferença pode estar relacionada ao método de medição de hn ou ainda às características do modelo físico.

ENERGIA RESIDUAL A JUSANTE DE VERTEDOURO EM DEGRAUS

A dissipação de energia ao longo da calha é uma das principais funções do vertedouro em degraus. Com maior dissipação na calha do vertedouro, busca-se reduzir a energia residual do escoamento no pé da barragem, diminuindo os riscos de erosão do maciço e os custos de implantação de bacias de dissipação à jusante de barragens (SANAGIOTTO, 2003).

Vários fatores interferem na dissipação de energia ao longo da calha como: geometria dos degraus; declividade da calha; tipos de escoamento e aeração do escoamento. A energia total dissipada em um vertedouro em degraus em relação à energia ao montante é diretamente proporcional a altura do degrau, ou seja, degraus maiores tendem a dissipar mais energia, conforme sugerido por Sanagiotto (2003). Entretanto, é habitual se adotar para protótipos, alturas de degrau (h) variando entre 0,30 m e 0,90 m, sendo mais usual degraus de 0,6 m de altura.

Para avaliação da energia dissipada neste trabalho, primeiramente foi analisada a perda de energia em relação à energia total disponível a montante do vertedouro (E_m), e a energia na entrada da bacia de dissipação, no pé do vertedouro (E_j). O cálculo da dissipação de energia foi feito a partir da medição dos níveis a montante da calha e a jusante do ressalto, considerando a altura conjugada lenta (Y_2), de maneira que o ressalto se posicionasse no pé do vertedouro (Figura 9).



Figura 9 – Imagem do ressalto formado a jusante do vertedouro em degraus caracterizando as alturas conjugadas

Com os valores da altura (Y_2) lenta foi possível chegar a altura conjugada rápida (Y_1), através da equação de Belanger, e a energia residual ao pé do vertedouro (E_r). A Tabela 3 apresenta as equações utilizadas.

Tabela 3 – Equações utilizadas no cálculo da energia a montante e energia residual (no pé do vertedouro)

| Energia | Equações |
|--|---|
| Energia a Montante | $E_m = H + h_m + \frac{v_a^2}{2g}$ |
| Energia residual (no início do ressalto) | $E_r = \frac{v^2}{2g} + \frac{1}{2}Y_1$ |
| Equação de Bélanger | $\frac{Y_2}{Y_1} = \frac{1}{2}(\sqrt{1 + 8Fr^2} - 1)$ |
| Variação de energia | $\Delta E = E_m - E_r$ |

onde:

- Em=energia total a montante do vertedouro (m);
- H=altura total da estrutura (calha) (m);
- hm=altura d'água sobre a crista do vertedouro (m);
- va=velocidade de aproximação (m/s);
- g=aceleração da gravidade (m/s²).
- Er =energia residual no início do ressalto (m);
- Y2=altura conjugada lenta (m);
- Y1=altura rápida, calculada pela equação de Bèlanger, (m);
- v =velocidade no início do ressalto (m/s).

Na Figura 10 são apresentados os resultados da variação de energia em relação a montante obtidos neste trabalho. É feita também uma comparação com resultados de outros autores.

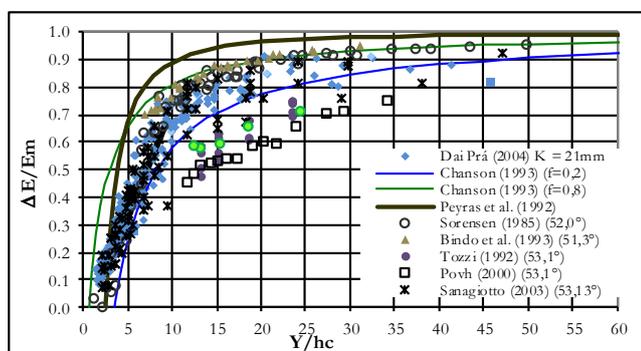


Figura 10 – Resultados obtidos por diferentes autores e ajuste para previsão da variação de energia

Percebe-se que os resultados estão mais próximos aos encontrados por Tozzi (1992) e que a máxima parcela de energia dissipada em relação a energia de montante, chega a 70%.

Tentando uniformizar os resultados da energia residual a jusante de um vertedouro em degraus obtida por diferentes autores, foi proposto no presente estudo o cálculo dessa energia em função de F*. Foi também proposta uma equação geral, conforme Equação 5. Os resultados estão mostrados na Figura 11.

(5)

$$\frac{E_r}{K} = 2F^{*1/2}$$

Com essa adimensionalização percebe-se que o ajuste proposto se ajusta bem aos dados. Essa proposta simplifica a determinação da energia residual a jusante de um vertedouro em degraus. No entanto cabe salientar a importância da determinação pelos métodos propostos por outros autores, muitos considerando a dissipação em relação à energia de montante, conforme citado anteriormente.

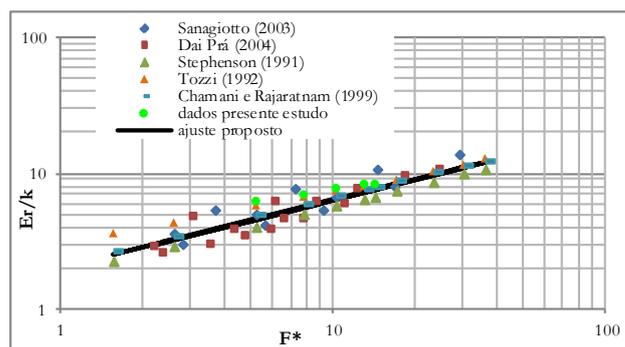


Figura 11 – Resultados obtidos por diferentes autores e ajuste para previsão de Er. Valores adimensionalizados em função de F*

CONCLUSÃO

As equações propostas para determinação do comprimento de aeração e altura da lâmina d'água nesse ponto se ajustam bem aos resultados, inclusive para calhas e degraus diferentes dos utilizados no presente estudo. Portanto essas equações podem ser utilizadas para determinação dessas duas grandezas.

Os coeficientes de resistência “f” possuem uma grande dispersão se comparados os resultados de diferentes autores. No entanto, a análise feita para a determinação da altura normal mostrou coerência entre os diferentes autores. A equação proposta se ajusta bem aos resultados, simplificando a determinação dessa grandeza.

O total de energia dissipada na calha do vertedouro em relação a energia de montante no presente estudo chega a 70%. Esse valor está coerente com os valores encontrados por outros autores.

A metodologia proposta para determinação da energia residual no pé do vertedouro em função de F*, se ajusta bem aos dados e simplifica a determinação dessa grandeza.

Cabe salientar que as equações propostas no presente trabalho tem o objetivo de simplificar e uniformizar alguns critérios de dimensionamento de vertedouros em degraus. No entanto é importante a análise e verificação pelas metodologias propostas por outros autores.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos aos bolsistas e funcionários do Laboratório de Obras Hidráulicas pelo apoio técnico. À Dona Francisca Energética pela parceria no P&D onde se enquadra este trabalho.

REFERÊNCIAS

AMADOR, A. Comportamiento Hidráulico de los Aliaderos Escalonados em Presas de Hormogón Compactado. 2005. Tese (Doutorado) - Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2005.

BINDO, M.; GAUTIER, J.; LACROIX, F. The stepped spillway

of M'Bali dam. *Water Power & Dam Construction*, p. 35-36, January, 1993.

CHAMANI, M. R.; RAJARATNAM, N. Characteristics of skimming flow over stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, New York, v. 125, n. 4, p. 361-368. Apr. 1999a.

CHAMANI, M. R.; RAJARATNAM, N. - Onset of skimming flow stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, New York, v. 125, n. 9, p. 969-971. Sept. 1999b.

CHANSON, H. Comparison of energy dissipation between nappe and skimming flow regimes on stepped chutes. *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Delft, v. 32, n. 2, p. 213-435, 1994.

CHANSON, H. Hydraulics of Stepped Spillways: current status. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, v. 126, n. 9, p. 636-637, 2000.

DAI PRÁ, M. *Características do Escoamento sobre Vertedouro em Degraus de Declividade 1V:1H*. 2004. 152f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

MATOS, J. S. G. *Emulsão de Ar e Dissipação de Energia do Escoamento em Descarregadores em Degraus*. 1999. Tese (Doutorado) - Instituto Superior Técnico, Lisboa, 1999.

MATOS, J. S. G.; QUINTELA, A. C. Descarregadores de cheias em degraus: posição actual da avaliação da dissipação de energia. Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. 1995a, Recife. *Anais...* Recife: ABRH, v.4, p. 65-71, 1995.

MEIRELES, I. O. C. *Hidráulica dos descarregadores em degraus: estudo experimental-numérico-teórico*. 2011. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Portugal, 2011.

OHTSU, I.; YASUDA, Y. *Characteristics of flow conditions on stepped channels*. 27^a IAHR Biental Congress, San Francisco, 1997, p. 583 – 588.

POVH, P. H. *Avaliação da Energia Residual a Jusante de Vertedouros em Degraus com Fluxo em Regime Skimming Flow*. 2000. 141f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2000.

RAJARATNAM, N. Skimming flow in stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, New York, v. 116, n. 4, p. 587-591, Apr. 1990.

SANAGIOTTO, D. G. *Características do Escoamento sobre Vertedouros em Degraus de Declividade 1V:0,75H*. 2003. 118f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

SIMÕES, A.; SCHULZ, E. H.; PORTO, R. M. *Definições para o comprimento do ressalto hidráulico e bacias de dissipação a jusante de vertedouros*. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE

HIDRÁULICA, XXV, 2012, San José, Costa Rica.

SORENSEN, R. M. Stepped Spillway Hydraulic Model Investigation. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, New York, v. 111, n. 12, p. 1461-1472, Dec.1985.

STEPHENSON, D. Energy dissipation down stepped spillways. *Water Power & Dam Constructin*.

TOZZI, M. J. *Comportamento de Escoamentos em Vertedouros com Paramento em Degraus*. 1992. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.