

Dissipação de energia do escoamento deslizante sobre turbilhões em vertedouros em degraus de declividade 1V:1H

Energy dissipation in skimming flow at stepped spillways with 1V:1H slope

Dai Prá, M.^{a1}, Priebe, P.S.^{a2}, Sanagiotto, D.G.^{b1}, Marques, M.G.^{b2}

^aUniversidade Federal de Pelotas, Rua Gomes Carneiro, 01, Sala 129, Pelotas/RS, CEP 96010-610, Brasil. E-mail: ^{a1}mauricio.daipra@ufpel.edu.br, ^{a2}priscilaspriebe@gmail.com

^bUniversidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Av. Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre/RS CEP 91501-970. E-mail: ^{b1}dsanagiotto@ufrgs.br, ^{b2}mmarques@iph.ufrgs.br

Recibido: 08/04/2015

Aceptado: 18/12/2015

Publicado: 28/01/2016

RESUMO

A dissipação de energia ao longo da calha é a principal função dos vertedouros em degraus. Com essas estruturas se busca a redução da energia residual no pé da barragem, proporcionando menores custos com a construção de estruturas de dissipação a jusante do vertedouro. Este estudo caracteriza a dissipação da energia do escoamento deslizante sobre turbilhões em vertedouros em degraus com declividade de 45° (1V:1H) através da análise experimental em quatro modelos físicos, sendo um com calha lisa e três com calhas em degraus de alturas constantes iguais a 30 mm, 60 mm e 90 mm. Foram avaliados os aspectos relacionados a dissipação de energia do escoamento, especialmente aqueles relacionados aos níveis médios da água nas regiões aeradas e não aeradas do fluxo, permitindo o estabelecimento de parâmetros adimensionais representativos da energia dissipada ao longo da calha em degraus.

Palavras chave | Vertedouros em degraus; Dissipação de energia; Estruturas Hidráulicas; Escoamento deslizante sobre turbilhões.

ABSTRACT

The energy dissipation along the chute is the stepped spillway's main function. With those structures the reduction of residual energy at the dam's toe is sought, allowing lower cost with the construction of dissipation structures downstream the spillway. The study characterizes energy dissipation on sliding flow in skimming flow on stepped spillways with slope of 45° (1V:1H), through experimental analysis in 4 physical models, one with flat chute and three stepped chutes with steps of 30 mm, 60 mm and 90 mm. Aspects related to flow's energy dissipation were evaluated, especially those related to mean levels of water on aerated and non-aerated flow regions, allowing the establishment of representative dimensionless parameters of dissipated energy along the stepped chute.

Key words | *Stepped Spillways; Energy Dissipation; Hydraulic Structures; Skimming Flow.*

INTRODUÇÃO

Os vertedouros em degraus são estruturas hidráulicas caracterizadas pela significativa resistência imposta ao escoamento e pela dissipação de energia associada à presença de macrorugosidades propiciada pelos degraus dispostos ao longo da calha.

A redução no tamanho das estruturas de dissipação a jusante de vertedouros, marcadamente por motivos econômicos, tem consequência direta na dissipação de energia, justificando a necessidade da correta caracterização dos escoamentos neste tipo de estrutura.

A dissipação de energia ao longo da calha é a função principal dos vertedouros em degraus, a partir do qual se busca a redução da energia residual no pé da barragem com o objetivo de diminuir os riscos de erosão no maciço.

Este estudo, desenvolvido a partir do trabalho de Dai Prá (2004), visa preencher uma lacuna existente no estudo da dissipação de energia em vertedouros em degraus, tendo em vista a carência de critérios de projeto relacionados a estruturas com paramento de jusante com declividade de 45°.

Aspectos históricos

Conforme Chanson (1995), a escolha por calhas em degraus nas barragens da antiguidade deu-se, muito provavelmente, por questões estruturais de estabilidade do maciço. A utilização de canais de irrigação dotados de degraus para reduzir as velocidades dos escoamentos fez surgir o interesse pelas características dissipativas dos vertedouros em degraus. Seguindo esta ideia, o autor cita a barragem de New Croton, construída nos Estados Unidos em 1906, como sendo, provavelmente, a primeira cuja função principal do vertedouro em degraus era dissipar a energia do escoamento. Assim, uma quantidade significativa de vertedouros em degraus foi construída até o princípio do século XX. Porém com o desenvolvimento de dissipadores de energia por ressalto hidráulico no pé de barragens, a utilização de calhas com função dissipativa caiu em desuso.

Apenas a partir da década de 70, com o surgimento de novos materiais e técnicas construtivas, como o concreto compactado a rolo e as estruturas em gabiões, é que o interesse por calhas em degraus voltou a atrair pesquisadores e profissionais da engenharia hidráulica.

A utilização de gabiões ganhou espaço na construção de vertedouros a partir dos anos 80 com a sua utilização em barragens de terra. Sua aplicação, porém, se restringe a pequenas vazões específicas, visto que os gabiões não podem ser submetidos a grandes velocidades, sob pena de colapso dos blocos (Fael e Pinheiro, 2003).

Fator de Resistência

A relação entre a dissipação de energia nos vertedouros em degraus e o fator de resistência de Darcy-Weisbach (f) tem sido proposta por alguns autores, assumindo que o escoamento seja uniforme ao longo da calha, na região em que o fluxo apresenta-se plenamente aerado.

Rajaratnam (1990) definiu teoricamente o coeficiente de resistência (c_p) a partir da conservação da quantidade de movimento. Stephenson (1991) propõe o cálculo do fator (f) a partir da equação geral para escoamentos turbulentos rugosos.

Chanson (1993) propõe a utilização da equação universal da perda de carga para o cálculo do fator de resistência (f) tornando-a função do diâmetro hidráulico do escoamento (D_H).

De acordo com Matos *et al.* (1999), os vórtices formados entre os degraus são tridimensionais e os movimentos turbulentos abaixo do pseudofundo induzem à dissipação viscosa durante a troca irregular do fluido com a corrente livre, mantendo o processo de recirculação e de dissipação de energia.

Sanagiotto (2003) propõe a estimativa do fator de resistência para calhas em degraus (f_k) a partir do fator de resistência da calha lisa (f_l), da posição longitudinal ao longo da calha (L_p) e da posição de início de aeração (L_A).

A Tabela 1 apresenta de forma resumida as principais proposições teóricas e experimentais acerca do fator de resistência (f).

Tabela 1 | Resumo das proposições teóricas e experimentais acerca do fator de resistência.

| Autor | Características | Equação | |
|-----------------------------|--------------------------------------|---|---|
| Rajaratnam (1990) | Teórica | $c_f = \frac{f}{4} = \frac{2h_n^3 g \sin \alpha}{q^2}$ | |
| Stephenson (1991) | Teórica | $f = \left(1,14 + 2 \log\left(\frac{4h}{k}\right)\right)^2$ | |
| Chanson (1993) | Teórica | $f = \frac{8gh_n^2 \sin \alpha}{q^2} \frac{D_H}{4}$ | |
| Tozzi (1992) | 53,13° K entre 5 e 60 mm | $\frac{1}{\sqrt{f}} = 2,16 + 1,24 \log\left(\frac{h}{k}\right)$ | $h/k > 1,8$ 53,13° |
| | 8,5° K de 19,8 e 39,6 mm | $f = 0,163$ | $h/k \leq 1,8$ 53,13° |
| Chamani e Rajaratnam (1999) | 51,34° e 59° 31,2 mm < H < 125 mm | $\frac{1}{\sqrt{f}} = 3,85 \log\left(\frac{h}{k}\right) + 3,53$ | |
| Sanagiotto (2003) | 53,13° K de 30 mm, 60 mm e 90 mm | $\frac{f_L}{f_k} = 1,8162 e^{-1,7692 \frac{L_p}{L_A}}$ | $\frac{h_L}{h_c} = \left(1,647 + 0,53 \frac{L_p}{h_c}\right)^{-0,7055}$ |

Na Tabela 1, K é a altura de rugosidade do degrau ($K = H \cdot \cos \alpha$), H é a altura do degrau, α é a declividade da calha, h_n é a profundidade do escoamento considerado uniforme, h_L é a profundidade do escoamento ao longo da calha lisa.

Dissipação de energia

Sorensen (1985) avaliou a dissipação de energia no pé do vertedouro a partir das velocidades do escoamento, obtidas indiretamente através de medições de níveis e determinadas pela aplicação da equação da continuidade, constatando que a energia cinética da calha em degraus correspondia a valores entre 6 e 12% daqueles obtidos para uma calha lisa.

Rajaratnam (1990) propôs a avaliação da dissipação de energia através da comparação entre o escoamento sobre calhas em degraus e sobre calhas lisas, a partir do número de Froude na base do vertedouro de calha lisa (Fr').

Stephenson (1991) afirmou que a dissipação de energia aumenta até o ponto em que a altura do escoamento sobre a calha é em torno de 1/3 da altura crítica do escoamento. A partir daí, os incrementos na dissipação seriam pouco significativos.

A relação entre a energia residual da calha em degraus e da calha lisa, a partir dos experimentos de Tozzi (1992), situou-se entre 40 e 66% para a declividade 53,13°, e entre 42 e 62% para a declividade 8,5°. O autor também apresenta a relação entre altura de rugosidade (K) e vazão específica (q) que conduz à máxima dissipação de energia para calhas em degraus com paramento de jusante 1V:0,75H (53,13°), conforme Equação 1.

$$K = 0,0764 \cdot q^{2/3} \quad (1)$$

Rice e Kadavy (1996) estudaram a dissipação de energia a partir de um modelo com declividade 1V:2,5H e com degraus de 0,61m, todos valores de protótipo. A dissipação de energia foi estimada em 2,4 a 2,9 vezes maior na calha em degraus do que na calha lisa.

Chamani e Rajaratnam (1999) determinaram valores de dissipação de energia entre 48 e 63% para calhas em degraus submetidas ao escoamento deslizante sobre turbilhões.

Povh (2000) determinou a dissipação de energia de duas formas: comparando as energias residuais em calhas lisas e em calhas em degraus, e comparando a energia a montante do vertedouro com a energia residual ao final da calha, calculada a partir das profundidades conjugadas do ressalto hidráulico.

Sanagiotto (2003) propôs a determinação da dissipação de energia em vertedouros em degraus comparando a perda de energia em relação à energia de montante disponível. Os resultados evidenciam a maior eficiência da calha em degraus como estrutura dissipadora para escoamentos aerados do que para escoamentos não aerados. A influência do tamanho dos degraus também se torna evidente, principalmente nos casos em que o fluxo se apresenta aerado. A dissipação de energia em relação a um vertedouro com calha lisa também foi analisada por Sanagiotto (2003).

A Tabela 2 apresenta de forma resumida as principais proposições teóricas e experimentais acerca da dissipação de energia.

Tabela 2 | Resumo das proposições teóricas e experimentais acerca da dissipação de energia.

| Autor | Características | Equação |
|-----------------------------|--|--|
| Rajaratnam (1990) | Altura de 1,464 m 1V:0,78H Degraus de 24,4 mm | $\Delta E' = E_r' - E_r \quad \frac{\Delta E'}{E_r'} = \frac{(1-A) + \frac{Fr'^2}{2} \frac{(A^2-1)}{A^2}}{1 + \frac{Fr'^2}{2}}$ |
| Stephenson (1991) | Teórica | $\frac{\Delta E_v}{H_v} = \frac{H_v - E_r}{H_v} = 1 - \left(\frac{4S}{f} + 1 \right) \left(\frac{f}{8S} \right)^{1/2} \left(\frac{h_c}{H_v} \right)$ |
| Peyras <i>et al.</i> (1992) | Calhas de gabiões Altura de 5 m Degraus de 1000 mm 1V:1H, 1V:2H e 1V:3H | $\frac{\Delta E}{H_v} = \frac{E_m - E_r}{H_v} = 1 - 4,195 \left(\frac{q^2}{gH_v^3} \right)^{0,526}$ |
| Chanson (1993) | Teórica | $\frac{\Delta E}{H_m} = 1 - \frac{\left(\frac{f}{8\text{sen}\alpha} \right)^{1/3} \cos\alpha + \frac{1}{2} \left(\frac{f}{8\text{sen}\alpha} \right)^{-2/3}}{\frac{3}{2} + \frac{H_v}{h_c}}$ |
| Pegram <i>et al.</i> (1999) | 1V:0,6 Degraus de 250, 500, 1000 e 2000mm | $E_r = 4,42h_2^{0,685} \quad \text{para } H = 500 \text{ mm}$ $E_r = 5,35h_2^{0,692} \quad \text{para } H = 2000 \text{ mm}$ |
| Povh (2000) | | $\frac{E_{r1}}{E_m} = 1 - 0,039 \frac{H_v}{h_c} \quad H_v/h_c \leq 13,25$ $\frac{E_{r1}}{E_m} = 0,719e^{-0,03 \frac{H_v}{h_c}} \quad 13,25 < H_v/h_c \leq 34,05$ |
| Sanagiotto (2003) | 1V:0,75H 30mm, 60mm e 90mm | $\frac{\Delta E}{E_m} = \frac{E_m - E_p}{E_m} \quad \frac{\Delta E'}{E'} = \frac{E' - E_p}{E'}$ $E_m = Y + 1,5h_c \quad E_p = z + h \cos\alpha + \alpha_1 \frac{V^2}{2g}$ |

Na Tabela 2, Fr' é o número de Froude na base do vertedouro de calha lisa, E_r' é a energia residual na base do vertedouro de calha lisa, E_r é a energia residual na base do vertedouro com calha em degraus, h_0 é o nível da água na base do vertedouro, A é um parâmetro adimensional função dos coeficientes de resistência das calhas lisa (c_f') e em degraus (c_f), h_n é a profundidade uniforme na calha, ΔE_v é a diferença entre a altura do vertedouro (H_v) e a energia específica residual na base da calha em degraus (E_r), h_c é a profundidade crítica do escoamento, S é a declividade da linha de energia, f é o fator de resistência, ΔE é a diferença entre a energia disponível na crista do vertedouro e a energia residual na base da calha em degraus, E_r é a energia residual em função da profundidade conjugada lenta do ressalto hidráulico (h_2), E_m é a energia a montante do vertedouro com relação ao ponto em análise,

E_{r1} é a energia residual ao final da calha, E_p é a energia num ponto qualquer ao longo da calha do vertedouro em degraus, Y é a diferença de cotas entre este ponto e a crista do vertedouro, h e V são a profundidade e a velocidade média do escoamento, α_1 é o coeficiente de Coriolis, z é a cota do piso do degrau na seção considerada em relação ao plano de referência, E' é a energia em qualquer ponto no vertedouro de calha lisa.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo abordou testes em modelos físicos bidimensionais de vertedouros em degraus com calha de declividade de 45° (1V:1H). As estruturas de ensaio tinham desnível de 2,44 m entre a crista do vertedouro e a base do canal de fuga, largura de 0,4 m e calhas com degraus de 30, 60 e 90 mm de altura, além de uma calha lisa convencional. As vazões específicas propostas para os ensaios estavam compreendidas entre 0,025 e $0,700 \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$. Os ensaios foram conduzidos no Laboratório de Hidráulica do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

A ogiva do vertedouro é do tipo Creager e foi projetada de acordo com as recomendações de USBR (1974) para uma carga de projeto no modelo de 0,40 m. O perfil da ogiva se desenvolve até que, no ponto de tangência, sua declividade seja igual à da calha, formada pelos cantos externos dos degraus. Não foram executados degraus menores de transição na porção imediatamente anterior à calha.

Os modelos são estruturas metálicas compostas pela calha vertente e ogiva, executadas com chapas de ferro galvanizadas de aproximadamente 2mm de espessura. As paredes laterais do vertedouro foram executadas em acrílico transparente.

A Figura 1 ilustra a instalação experimental típica com degraus de 60 mm e, neste caso, vazão específica de $0,15 \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$. Sobre as estruturas com e sem degraus foram estabelecidas seções principais de ensaio ao longo da calha, sobre as quais foram efetuadas medições de nível médio d'água, perfil de velocidades médias, pressões médias e “instantâneas”.



Figura 1 | Instalação Experimental: calha com degraus de 60mm e vazão específica de $0,15 \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Fator de Resistência

O fator de resistência (f) de Darcy-Weisbach foi avaliado a partir da proposta de Chanson (1993) (Tabela 1), que é função da declividade da calha (α), da vazão específica (q), da aceleração da gravidade (g) e da profundidade média do escoamento (h_n) e do diâmetro hidráulico (D_H). Para o cálculo do fator de resistência foram utilizadas as profundidades médias verificadas

experimentalmente, a partir da consideração de que o escoamento assume características uniformes para posições a jusante da posição de início de aeração firme.

A profundidade normal (h_n) foi determinada pela média aritmética dos níveis da água medidos nas seções onde o escoamento apresentava-se plenamente aerado. Na Figura 2 estão apresentados os valores determinados do fator de resistência (f) para as três alturas de degraus avaliadas neste estudo.

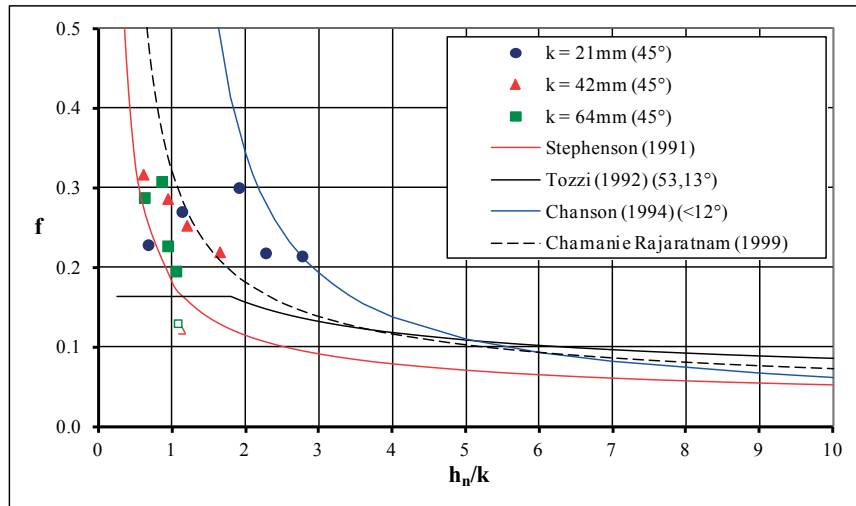


Figura 2 | Comparação entre os fatores de resistência obtidos neste estudo frente às propostas apresentadas por outros autores.

Apesar da análise efetuada anteriormente não permitir o estabelecimento de uma relação para o cálculo do fator de resistência (f), pode-se estimar um valor médio em torno de 0,25, válido para este estudo, independente da altura de rugosidade.

A avaliação do fator de resistência foi conduzida, também, a partir da consideração das medições de nível de água efetuadas na calha lisa. Seguiu-se a metodologia proposta por Sanagiotto (2003), que comparou os fatores de resistência das calhas em degraus (f_k) e da calha lisa (f_l) em cada ponto de medição (L_p), juntamente com a posição de início de aeração do escoamento (L_A) (Equação 2).

$$\frac{f_l}{f_k} = \xi \left(\frac{L_p}{L_A} \right) \quad (2)$$

Para a determinação do fator de resistência da calha lisa utilizou-se a proposta por Chanson (1993) apresentada na Tabela 1. Desta forma faz-se necessária a determinação de uma função que permita a estimativa do perfil da linha da água ao longo de toda a calha vertente. Para isso correlacionaram-se as profundidades medidas na calha lisa (h_l) com a distância (L_p), sendo esta tomada longitudinalmente a partir do início do desenvolvimento da camada limite, na crista do vertedouro, permitindo o levantamento completo das profundidades em qualquer posição da calha.

A Figura 3 apresenta a adimensionalização de h_l e de L_p pela profundidade crítica do escoamento (h_c), e a Equação 3, apresenta o ajuste a ser utilizado para o cálculo da linha da água ao longo da calha lisa, obtido com coeficiente de determinação igual a 0,96.

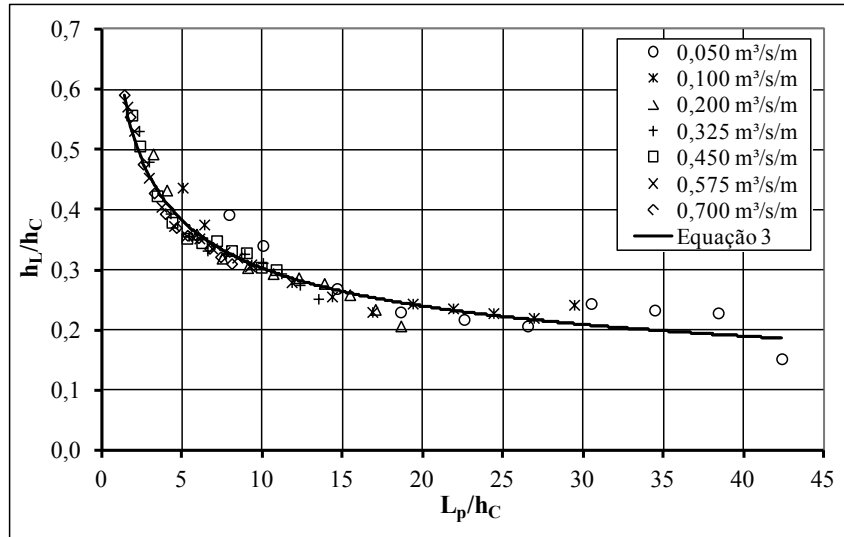


Figura 3 | Correlação entre as profundidades do escoamento na calha lisa (h_L) em qualquer ponto ao longo da calha (L_p), ambas adimensionalizadas pela profundidade crítica do escoamento (h_c).

$$\frac{h_L}{h_c} = \frac{2}{3} \left(\frac{L_p}{h_c} \right)^{-0,344} \quad (3)$$

A Equação 3 foi estabelecida a partir dos ensaios realizados neste estudo, recomendando-se, portanto, sua utilização apenas para calhas com declividade de 45° . Ela deve ser usada com restrições para valores de L_p/h_c maiores do que 30, tendo em vista a quantidade insuficiente de pontos experimentais utilizados a partir deste ponto para o seu ajuste.

Uma vez que foram estabelecidas as relações para a determinação de f_L , pode-se proceder a sua comparação com o fator de resistência da calha em degraus (f_k).

A Figura 4 apresenta a avaliação do fator de resistência da calha em degraus em comparação com o fator de resistência da calha lisa para qualquer posição (L_p) adimensionalizada pela posição de início de aeração (L_A).

A Equação 4, determinada a partir dos pontos da Figura 4, foi ajustada com coeficiente de determinação igual a 0,83. Salienta-se que se trata de uma estimativa, devendo seu uso ser criterioso, tendo sempre em vista a dispersão dos pontos experimentais envolvida na sua determinação.

$$\frac{f_L}{f_k} = 1,09 \exp\left(-0,834 \frac{L_p}{L_A}\right) \quad (4)$$

Os resultados apresentados na Figura 4 permitem perceber que na região onde se inicia a entrada de ar no fluxo, o comportamento do fator de resistência não está bem definido, tendo em vista a dispersão dos dados ali verificada. De qualquer forma, a utilização da Equação 4 pode ser feita nesta região de transição, porém deve-se atentar para eventuais valores de f_k que possam ser contrários à segurança do projeto da estrutura hidráulica.

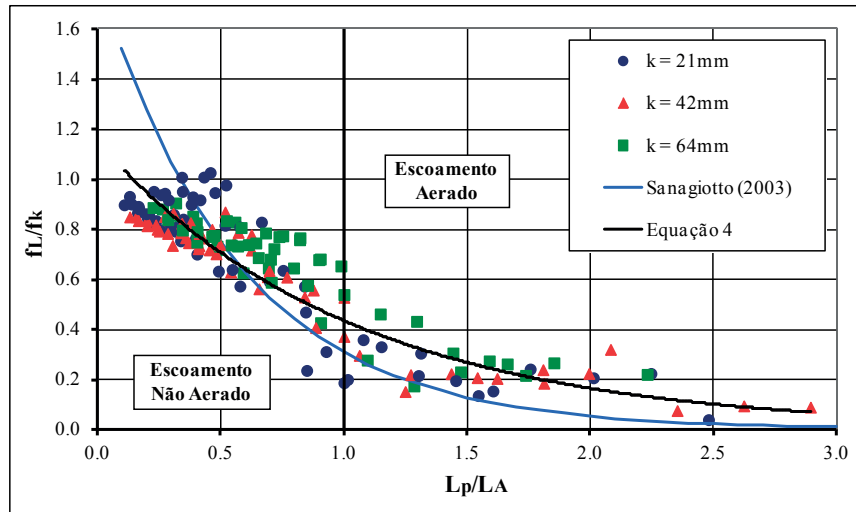


Figura 4 | Avaliação do fator de resistência da calha em degraus a partir do fator de resistência da calha lisa, em qualquer ponto ao longo da calha do vertedouro.

Dissipação de energia

A avaliação da dissipação de energia será conduzida através de duas propostas diferenciadas: a primeira, analisando a perda de energia com relação à energia total disponível a montante, e a segunda avaliando as diferenças entre a energia dissipada por um vertedouro de calha em degraus frente a um vertedouro de calha lisa.

O cálculo da dissipação de energia foi feito a partir dos dados de medições de nível ao longo da calha vertente. As velocidades médias do escoamento foram determinadas igualmente a partir das medições da profundidade do escoamento, utilizando-se para isso a equação da continuidade.

Em cada seção de testes foi estabelecido um plano de referência horizontal distinto, situado no vértice superior do espelho do degrau onde foram executadas as medições. Isso permitiu que fossem considerados barramentos de diferentes alturas na avaliação da dissipação de energia, limitados, é claro pela posição da última seção de ensaios a 1,86m, no modelo, abaixo da crista.

Dissipação de energia frente à energia total disponível a montante

Na análise da energia residual da calha em degraus frente à energia total disponível de montante foi utilizada a Equação 5, considerando um novo plano de referência horizontal para cada seção de teste.

$$\frac{\Delta E}{E_m} = \frac{E_m - E_p}{E_m} \quad (5)$$

onde E_m é a energia total disponível a montante e E_p é a energia residual na seção onde está sendo avaliada a dissipação.

A partir da análise detalhada da dissipação de energia em todas as calhas avaliadas neste estudo (Figura 5), algumas observações podem ser realizadas.

À medida que se consideram vertedouros com alturas maiores, os valores da dissipação de energia também aumentam, quando submetidos a uma mesma vazão. Para as menores vazões ensaiadas, verificou-se perda de energia da ordem de 90%, ao passo que para maiores vazões, determinaram-se valores por volta de 27%. Para as calhas com degraus de 90mm, os valores atingiram 37% para as maiores vazões, sempre considerando estruturas de maior altura, quando a razão entre o desnível entre a crista do vertedouro e o ponto em análise (Y) e a carga de projeto do vertedouro (H_d) correspondeu a 4,64.

A presença de ar no fluxo também deve ser destacada como um fator interveniente nesta avaliação. Observou-se que para os degraus de 90 mm, um máximo de 45% da energia disponível a montante foi dissipada na região não aerada da calha. Já para os degraus de 60 mm e 30 mm os percentuais correspondem, em média, a 55% e 65% respectivamente.

Percebe-se a influência da altura do degrau na determinação da dissipação de energia ao longo da calha. Avaliando-se diferentes degraus, num mesmo plano de referência, submetidos às mesmas vazões, na situação de escoamento sem aeração, a energia dissipada pelo vertedouro de calha com degraus de 30 mm mostrou-se, em média, 50% menor frente à dissipação no vertedouro com calha de 90 mm. Nas situações com aeração plena do fluxo, essa diferença máxima caiu para 15%.

Na Figura 5 estão representadas diversas proposições acerca da dissipação de energia, tanto a nível de equações propostas como a nível de dados experimentais obtidos em Dai Prá (2004).

Percebe-se que para os escoamentos não aerados, o comportamento de $\Delta E/E_m$ segue uma tendência bem definida, aumentando rapidamente para pequenas variações do parâmetro adimensional (Y/h_c). A partir do ponto onde o escoamento torna-se aerado (pontos hachurados), a dispersão aumenta e a tendência que se verifica para valores de Y/h_c maiores é de que a dissipação de energia se torne constante e igual a um máximo valor próximo a 90%.

A comparação imediata entre dados oriundos de calhas com declividade de 45° será bastante prejudicada tendo em vista que apenas o trabalho de Peyras *et al.* (1992) – desenvolvido a partir de estrutura com gabiões – contempla a mesma declividade avaliada neste trabalho. A proposta do referido autor, contudo, apresenta resultados menos conservadores, o que pode ser atribuído ao fato de que em estruturas em gabiões há infiltração de água e mesmo a rugosidade do degrau é bastante diferente da rugosidade dos modelos aqui estudados, proporcionando maiores perdas de energia ao escoamento.

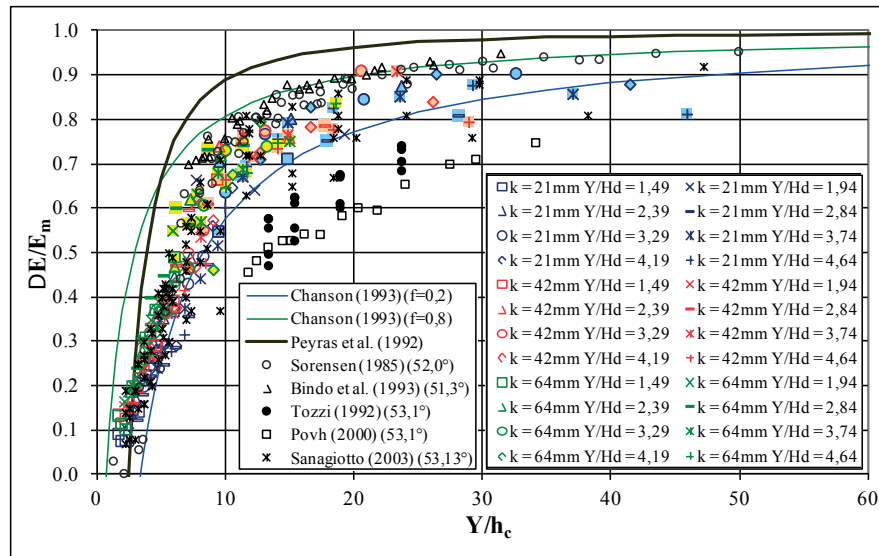


Figura 5 | Avaliação da dissipação de energia com relação à energia disponível a montante através da comparação entre as propostas de Chanson (1993), Peyras *et al.* (1992), os dados experimentais de alguns autores e aqueles obtidos neste estudo. Os pontos hachurados correspondem a regiões aeradas do escoamento.

Dissipação de energia nas calhas em degraus frente à energia dissipada por uma calha lisa

Este segundo item visa apresentar outra abordagem para a determinação da energia dissipada em vertedouros em degraus. Será efetuada uma avaliação da dissipação de energia da calha em degraus frente à dissipação de energia em uma calha lisa convencional.

O cálculo da dissipação de energia será feito pela equação 6.

$$\frac{\Delta E}{E'} = \frac{E' - E_p}{E'} \quad (6)$$

onde E_p é a energia em qualquer posição ao longo da calha em degraus e E' é a energia em qualquer posição ao longo da calha lisa.

A Figura 6 apresenta a influência da altura dos degraus na dissipação de energia, comparando as diferenças obtidas para mesmas vazões atuando sobre as três calhas distintas, na mesma posição $Y/H_d = 3,29$. Uma observação adicional que também pode ser feita é que para situações de escoamento aerado a dissipação de energia é significativamente maior do que nas regiões de fluxo não aerado.

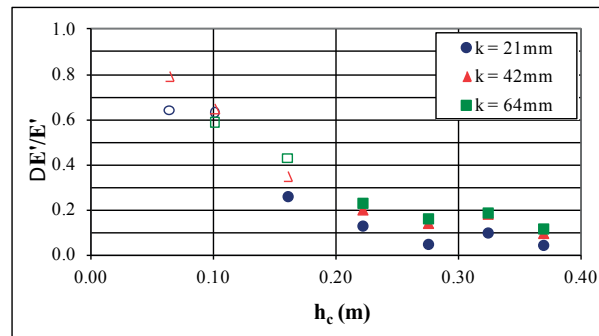


Figura 6 | Avaliação da influência da altura do degrau na dissipação de energia com relação à energia dissipada por uma calha lisa, na posição $Y/H_d = 3,29$. Os pontos sem preenchimento representam situações de escoamento aerado.

Não foram localizados trabalhos que avaliam a dissipação de energia de vertedouros em degraus com relação à dissipação ocasionada por um vertedouro convencional de calha lisa com declividade de 45° . Será então proposta uma breve avaliação a partir das análises feitas para declividades de $1V:0,75H$.

Povh (2000) determinou a dissipação de energia pelo método da camada limite e pelo método das diferenças finitas. Tozzi (1992) também utilizou o método das diferenças finitas para estabelecer os níveis da água sobre a calha dos vertedouros, para daí analisar a dissipação de energia em relação a uma calha lisa. Os dados de Sanagiotto (2003) foram determinados experimentalmente a partir da mesma metodologia de ensaios aplicada neste trabalho.

A Figura 7 apresenta os dados determinados neste estudo, novamente indicando que para escoamentos aerados a dissipação de energia é maior. A dispersão nesta zona é bastante acentuada, mas, apesar disso, em posições aeradas do escoamento a dissipação ocorrida em uma calha em degraus frente a uma calha lisa é sempre superior a 30%.

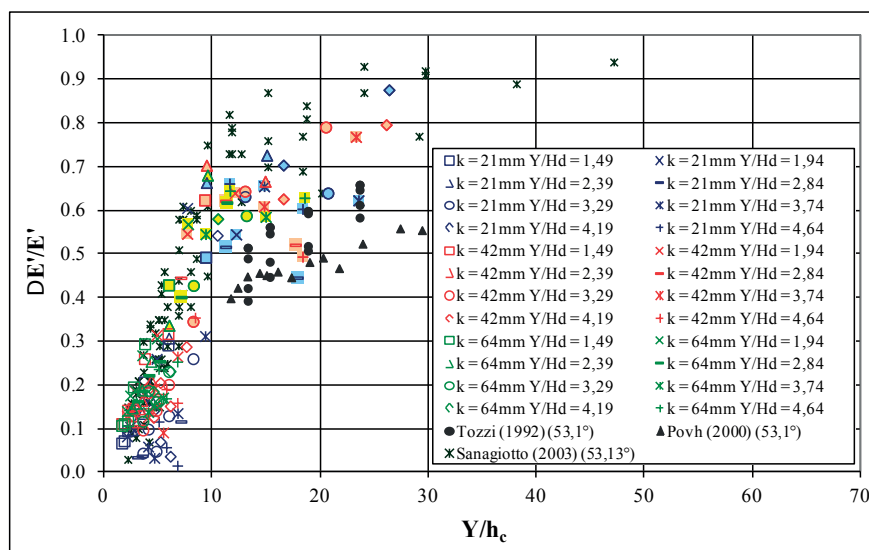


Figura 7 | Comparação entre os dados determinados neste estudo com os dados válidos para declividades de $53,1^\circ$ apresentados por Sanagiotto (2003), Povh (2000) e Tozzi (1992). Os pontos hachurados correspondem a regiões aeradas do escoamento.

CONCLUSÕES

Os itens constantes neste estudo referem-se às conclusões que foram obtidas a partir da avaliação do escoamento deslizante sobre turbilhões em vertedouros em degrau com declividade de 45° (1V:1H), a partir de modelos físicos bidimensionais.

Na avaliação da dissipação da energia frente a energia total disponível a montante conclui-se que escoamentos aerados dissipam mais energia do que escoamentos sem a presença de ar. Degraus com maiores alturas também proporcionam ao vertedouro melhores taxas de dissipação de energia.

Na relação entre energia dissipada em uma calha em degraus e em uma calha lisa, reafirmam-se as conclusões anteriores, acrescentando que a dissipação de energia aumenta quando se consideram estruturas mais altas, bem como quando se consideram maiores degraus.

Fica evidente que uma situação ideal para o projetista hidráulico seria a possibilidade de prever uma estrutura com calha bastante longa de forma a que o escoamento pudesse trabalhar plenamente aerado, provido de degraus bastante altos a fim de proporcionar maior resistência ao fluxo. Sabe-se, contudo, que os aspectos construtivos e as considerações a respeito da probabilidade de ocorrência de cavitação nas faces dos degraus não podem ser desconsideradas.

A aplicação dos resultados deste estudo fica restrita a vertedouros com alturas de até 25 m providos de degraus com altura máxima de 900mm, desde que utilizada a escala máxima de transposição sugerida igual a 1:10.

Salienta-se aqui a escassa bibliografia a respeito dessa geometria específica (declividade de 45°), o que impede, até certo modo, que critérios com maiores faixas de abrangência sejam definidos.

AGRADECIMENTOS

À Eletrobrás-Furnas a partir do projeto de Pesquisa e Desenvolvimento “Características dos Escoamentos sobre Vertedouros em Degraus”, inserido no programa de P&D ANEEL. Aos engenheiros Jaime Federici Gomes e Rafael André Wiest pela colaboração na equipe do projeto.

REFERÊNCIAS

- Chamani, M. R., Rajaratnam, N. (1999). Characteristics of Skimming Flow over Stepped Spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(4), 361-368. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1999\)125:4\(361\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1999)125:4(361))
- Chanson, H. (1993). Stepped Spillway Flow and Air Entrainment. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 20(3), 422-435. <http://dx.doi.org/10.1139/193-057>
- Chanson, H. (1995). History of Stepped Channels and Spillways: a Rediscovery of the “Wheel”. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 22(2), 247-259. <http://dx.doi.org/10.1139/195-034>
- Dai Prá, M. (2004). *Características do Escoamento sobre Vertedouro em Degraus de Declividade 1V:1H*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: UFRGS, 152 p.
- Fael, C., Pinheiro, A.N. (2003). Escoamentos em Quedas Sucessivas. Condições de Ocorrência e Energia Residual. *Associação Portuguesa de Recursos Hídricos*, 24(1), 39-50.
- Matos, J.S.G., Sanches, M., Quintela, A.C., Dolz, J. (1999). Characteristic Depth and Pressure Profiles in Skimming Flow over Stepped Spillways. *Congress IAHR*, August 28, Graz, Austria.
- Pegram, G.G.S., Officer, A.K., Mottram, S.R. (1999). Hydraulics of Skimming Flow on Modeled Stepped Spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, New York, 125(5), 500-510. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1999\)125:5\(500\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1999)125:5(500))

- Peyras, L., Royet, P., Degoutte, G. (1992). Flow and Energy Dissipation over Stepped Gabion Weirs. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, New York, 118(5), 707-717. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1992\)118:5\(707\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1992)118:5(707))
- Povh, P.H. (2000). *Avaliação da Energia Residual a Jusante de Vertedouros em Degraus com Fluxo em Regime Skimming Flow*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná. Curitiba: UFPR, 141 p.
- Rajaratnam, N. (1990). Skimming Flow in Stepped Spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 116(4), 587-591. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1990\)116:4\(587\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1990)116:4(587))
- Rice, C.E., Kadavy, K.C. (1996). Model Study of a Roller Compacted Concrete Stepped Spillway. *Journal of Hydraulic Engineering*, 122(6), 292-297. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1996\)122:6\(292\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1996)122:6(292))
- Sanagiotto, D.G. (2003). *Características do Escoamento sobre Vertedouros em Degraus de Declividade 1V:0,75H*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: UFRGS, 118 p.
- Sorensen, R.M. (1985). Stepped Spillway Hydraulic Model Investigation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 111(12), 1461-1472.
- STEPHENSON, D. (1991). Energy Dissipation down Stepped Spillways. *Water Power & Dam Construction*, Sutton, 43(9), 27-30.
- Tozzi, M.J. (1992). *Caracterização/Comportamento de Escoamentos em Vertedouros com Paramento em Degraus*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo. São Paulo: USP, 302 p.
- United States Department of The Interior Bureau of Reclamation. (1974). *Design of Small Dams*. Water Resources Technical Publication, Washington, USA.