

Energia Residual a Jusante de Vertedouro Tipo Salto Esqui

João Gerdaud de Borja¹, Luciano Faustino da Silva¹, Daniela Guzzon Sanagiotto², Marcelo Giulian Marques¹
joao_gerdaudborja@hotmail.com; lucianofaustino@gmail.com; dsanagiotto@ufsm.br; mmarques@iph.ufrgs.br

Recebido: 13/12/12 - revisado: 01/03/13 - aceito: 03/04/13

RESUMO

A construção de descarregadores de cheias com defletores, em que a dissipação de energia se efetua no leito natural com a formação de uma fossa de erosão, é uma solução bastante divulgada sempre que as condições locais o permitam, pois evita a construção de uma obra específica onde tal dissipação ocorra. Porém, a energia do jato que atua sobre o leito rochoso é intensa, podendo ser transferida para a fundação do barramento através de descontinuidades, ou ocasionar erosões regressivas ao pé do vertedouro, dependendo dos padrões de recirculação do fluxo. Neste trabalho, foi utilizado um modelo físico de um vertedouro salto esqui com a finalidade de analisar a capacidade de dissipação de energia de sua estrutura extravasora, comparando-a com outros tipos de vertedouros. Os resultados obtidos podem auxiliar na definição da energia do jato mergulhante a jusante de um vertedouro salto esqui, reduzindo a incerteza no processo de formação e evolução dos processos erosivos.

Palavras-chave: bacia de dissipação; ressalto hidráulico; incidência de jato; fossa de erosão.

INTRODUÇÃO

O vertedouro é uma estrutura existente em barragens que tem o objetivo de permitir a passagem de cheias que ocorrem periodicamente nos rios. O escoamento que passa por estas estruturas tem grande energia que precisa ser dissipada para que não provoque erosões na estrutura do barramento.

No caso de vertedouros salto esqui, a fossa de erosão formada a jusante necessita de uma atenção ainda maior quanto aos esforços hidrodinâmicos provocados pelo jato d'água. A Figura 1 mostra o vertedouro com salto esqui da Usina Hidrelétrica Luís Carlos Barreto de Carvalho (Estreito) – ELETROBRAS/FURNAS, localizada em Pedregulho, São Paulo, Brasil. As características do vertedouro dessa estrutura foram representadas no modelo físico utilizado no presente trabalho.

Conforme o arranjo da obra, o vertedouro salto esqui pode ser uma alternativa muito econômica, pois dispensa a construção de uma bacia de dissipação a jusante do lançamento do jato d'água. Desta maneira, necessita de condições topográficas que apresentem características favoráveis ao lançamento do jato longe da estrutura.



Figura 1 – Salto Esqui da Hidrelétrica Luís Carlos Barreto de Carvalho – ELETROBRAS/FURNAS (Silva et al., 2011).

A dissipação de energia no vertedouro salto esqui ocorre pelo contato do jato d'água com o ar e no interior do colchão d'água formado a jusante do vertedouro. Se a coluna de água da fossa não for significativa, grande parte da energia será transferida para o leito, aprofundando ainda mais a fossa. A forma como o jato impacta no maciço rochoso pode gerar pressões dinâmicas muito elevadas e, conseqüentemente, fossas de erosão profundas e instáveis.

O dimensionamento do leito rochoso da fossa de erosão é feito através do equilíbrio hidráulico-geotécnico. Dependendo do caso, a fossa pode

¹ Instituto de Pesquisas Hidráulicas/UFRGS

² Depto. de Eng. Sanitária e Ambiental/UFMS

ser gerada a partir do próprio leito do rio pela ação do jato, ou ter uma escavação inicial (pré-escavação), obtendo-se, desta maneira, um maior controle dos esforços hidrodinâmicos. Para a verificação periódica da evolução dos processos erosivos, deve-se ter o conhecimento da energia residual do jato que impacta sobre o colchão d'água.

A partir do lançamento da estrutura, coexistem as fases emersas (superfície livre) do jato e imersas (mergulho) separadas pelo fenômeno de impacto no colchão d'água. O conhecimento desta trajetória e da evolução no ar de sua seção transversal, ou seja, o conhecimento da região e da extensão da zona de impacto são indispensáveis para se poder avaliar o grau de segurança da estrutura e das próprias margens do leito do rio, conforme alerta Pinto (1994).

Neste trabalho, a energia do fluxo do jato que impacta no colchão d'água a jusante do vertedouro salto esqui é determinada para a morfologia física do vertedouro analisado, em diferentes condições de escoamento. As características do jato livre, anteriormente ao mergulho do mesmo no colchão d'água, então identificadas, auxiliam na determinação da espessura e velocidade iniciais do jato mergulhante, o qual vem a se difundir no colchão d'água e impactar sobre o leito da fossa de erosão.

MATERIAL E MÉTODOS

O vertedouro salto esqui modelado, tem um protótipo existente em escala geométrica com vezes maior (1:100), pertencente à Usina Hidrelétrica Luís Carlos Barreto de Carvalho - ELETROBRAS/FURNAS. Este protótipo não é representado fielmente, pois suas comportas e pilares não foram modelados, além da calha do vertedouro simulado ser uma representação em duas dimensões de um vertedouro real, por isso, a vazão escoada é referida em termos de vazão específica. A superfície vertente foi desenvolvida em resina e fibra de vidro, possuindo um perfil Creager na entrada do fluxo e uma concha de lançamento com raio de 20cm e ângulo de lançamento de: $\theta_1 = 42 \text{ graus}$. Este vertedouro têm 40cm de largura, comprimento em planta de 183,59cm, altura da crista de: $H = 50 \text{ cm}$, e altura do ponto de lançamento do jato de: $Z_{concha} = 20,77 \text{ cm}$, conforme visto na Figura 2.

As vazões impostas ao modelo são equivalentes às vazões de ocorrência no protótipo, de: 2.000, 4.000, 6.000, 8.000, 10.000 e 12.000m³/s, cor-

respondentes à seção de lançamento do jato. Assim, as vazões específicas (q) ensaiadas, foram relacionadas com o comprimento do lábio do salto esqui, e não à crista do vertedouro, a qual é composta por pilares no protótipo, o que levaria a um comprimento líquido menor.

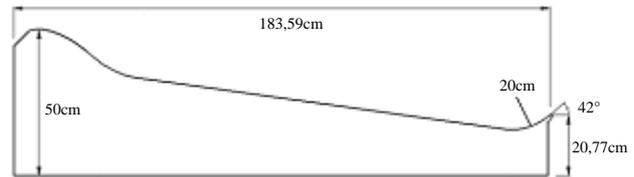


Figura 2 – perfil do vertedouro salto esqui modelado

As características referentes à hidrodinâmica do jato são apresentadas no Anexo 1. Onde: N_m é o nível de montante (m); H_i é a energia cinética do jato (m); V_i é a velocidade na saída do jato, calculada sem perdas (m/s); y_i é a altura do escoamento no lábio do vertedouro, calculada sem perdas (m); \bar{Z}_{topo} é a cota central do fluxo na altura máxima atingida pelo jato; L_{proj} é a distância horizontal projetada, desde a emissão do jato até o ponto de impacto do núcleo na soleira (m); y_{topo} é a espessura do jato na seção de altura máxima atingida pelo mesmo (m); y_i a espessura da seção de impacto do jato na soleira (m); y_p é a lâmina d'água do poço de acumulação; y_1 e y_2 são as alturas conjugadas do ressalto clássico (m), rápida e lenta, respectivamente. No presente trabalho, y_1 é estimada pela fórmula de Bélanger (1828), conforme a equação 1) indicada por Trierweiler (2006), onde F_2 é dado pela fórmula 2) e corresponde ao número de Froude do escoamento a jusante do ressalto clássico.

$$\frac{y_1}{y_2} = \frac{1}{2} \cdot \left(\sqrt{1 + 8 \cdot F_2^2} - 1 \right) \quad (1)$$

Com

$$F_2 = \frac{q/y_2}{\sqrt{g \cdot y_2}} \quad (2)$$

A Tabela 1 mostra as características dos ensaios e os números de semelhança de Froude (Fr) respectivos a cada uma das condições ensaiadas, os quais são calculados na seção de lançamento do jato, sem perdas, através da fórmula 3).

$$Fr = \frac{V_t}{\sqrt{g \cdot y_t}} \tag{3}$$

Tabela 1 – valores das variáveis representativas do modelo para as vazões ensaiadas

Q (L/s)	9,4	19,0	28,7	38,3	47,6	57,1
q (m ² /s)	0,023 5	0,0475	0,0718	0,0958	0,1190	0,1428
N_m (m)	0,553	0,584	0,606	0,626	0,644	0,661
H_t (m)	0,345	0,376	0,399	0,419	0,438	0,455
V_t (m/s)	2,60	2,71	2,79	2,86	2,93	2,98
y_t (m)	0,009	0,017	0,025	0,033	0,040	0,047
Fr	8,74	6,56	5,57	5,01	4,64	4,36

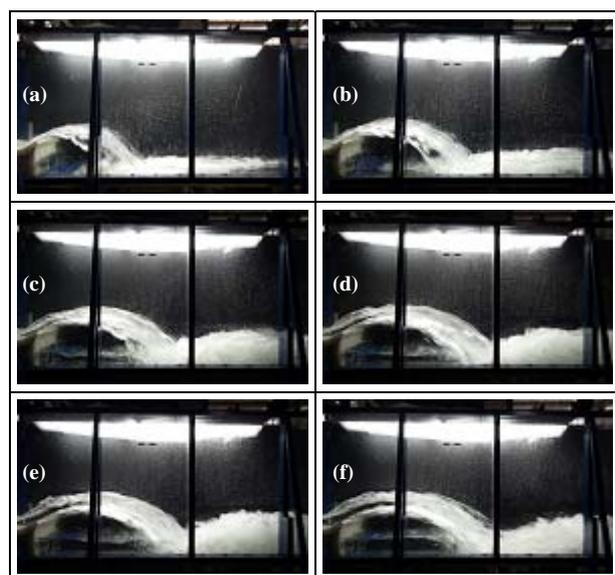


Figura 3 – visualização do escoamento para a condição de ressalto clássico a jusante: (a) $Fr = 8,74$; (b) $Fr = 6,56$; (c) $Fr = 5,57$; (d) $Fr = 5,01$; (e) $Fr = 4,64$; (f) $Fr = 4,36$

A Figura 3 apresenta a configuração do escoamento para cada uma das seis vazões ensaiadas, na condição de ressalto clássico a jusante do impacto do jato na soleira da bacia de dissipação. No presente trabalho, são analisados os seguintes parâme-

tros medidos nos ensaios: y_{topo} (espessura do jato na seção de altura máxima atingida pelo mesmo); y_i (espessura da seção de impacto do jato na soleira); e y_2 (altura lenta do ressalto clássico).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para iniciar a análise dos dados obtidos nos ensaios sobre o modelo de vertedouro salto esquí, fez-se um estudo sobre a capacidade deste tipo de estrutura de dissipar energia hidráulica. Posteriormente, foi desenvolvido um método para a estimativa da perda de carga sofrida pelo escoamento, anteriormente à entrada do fluxo no colchão d’água a jusante.

Esse tipo de informação é de extrema importância, já que auxilia na definição do tipo de vertedouro mais apropriado às condições de um determinado projeto.

Capacidade de dissipação de energia de vertedouros salto esquí

A capacidade de dissipação de energia de um vertedouro salto esquí foi comparada com a de outros tipos de vertedouros através da avaliação da energia residual a jusante destes vertedouros, ou seja, anteriormente à entrada do fluxo no ressalto, em modelo físico reduzido. Conforme Tozzi & Brighetti (1993), citados por Sanagiotto (2003), a energia residual teórica na bacia de dissipação ($H_{l,r}$) é dada pela expressão 4) vista abaixo, onde α_1 é o coeficiente de Coriolis, adotado igual a 1,10. Segundo metodologia empregada pelos autores, a energia residual pode ser obtida através da medição da profundidade conjugada lenta (y_2) do ressalto a jusante da bacia de dissipação, então, através da equação 1) de Bélanger, obtém-se a profundidade rápida do ressalto (y_1), a qual é aplicada na expressão 4).

$$H_{l,r} = y_1 + \alpha_1 \cdot \frac{q^2}{2 \cdot g \cdot y_1^2} \tag{4}$$

Conforme Sanagiotto (2003), Pegram et al. (1999) disponibilizam algumas fórmulas para a obtenção de valores de protótipo – de energia residual –, para vertedouros com calha lisa e calha em degraus, relativas aos modelos vistos na Tabela 2. Além destas fórmulas citadas, também foi desenvolvida, no

presente trabalho, uma fórmula com os dados medidos em um modelo de vertedouro em degraus fornecidos por Borja (2009), conforme metodologia citada anteriormente. Por último, nesta tabela (Tabela 2), está a fórmula desenvolvida com os dados obtidos no presente trabalho, isto é, para um vertedouro salto esqui.

Tabela 2 – Energia residual, para valores de protótipos, relativas aos modelos listados

<i>lisa, 1:10</i> (Pegram et al., 1999)	$H_{1,r} = 12,7 \cdot y_2^{0,392}$ (5)
<i>lisa, 1:20</i> (Pegram et al., 1999)	$H_{1,r} = 11,6 \cdot y_2^{0,634}$ (6)
<i>degraus, h=5cm, 1:10</i> (Pegram et al., 1999)	$H_{1,r} = 4,42 \cdot y_2^{0,685}$ (7)
<i>degraus, h=10cm, 1:20</i> (Pegram et al., 1999)	$H_{1,r} = 5,35 \cdot y_2^{0,692}$ (8)
<i>degraus, h=6cm, 1:10</i> (Borja, 2009)	$H_{1,r} = 4,31 \cdot y_2^{0,696}$ (9)
<i>salto esqui, 1:100</i> (presente trabalho)	$H_{1,r} = 2,01 \cdot y_2^{0,942}$ (10)

A fim de comparar a capacidade dissipadora dos diferentes vertedouros listados anteriormente, suas fórmulas de protótipo foram calculadas utilizando as mesmas condições de escoamento. Sendo assim, foram utilizados os valores das alturas lentas do ressalto (y_2) respectivas ao modelo do presente trabalho para estas fórmulas, sendo convertidas para a escala do devido protótipo. Após o cálculo da energia residual ($H_{1,r}$) de protótipo para cada uma das fórmulas, os valores de $H_{1,r}$ foram então convertidos para a escala de modelo do respectivo protótipo, para fins de comparação. Os resultados são mostrados na Figura 4.

Com isso, as alturas conjugadas lentas (y_2) mostradas no gráfico, caracterizam as energias de jusante para cada vazão específica modelada no presente trabalho. Sendo assim, pode-se perceber, por exemplo, que para uma mesma vazão escoada, a energia residual ($H_{1,r}$) a jusante de um vertedouro de calha lisa é maior que a oriunda de um vertedouro salto esqui, portanto, as alturas rápidas (y_1) são menores no vertedouro de calha lisa do que no vertedouro salto esqui. A partir desta análise, conclui-se que a estrutura vertedora deste último é capaz de dissipar maior quantidade de energia que o primeiro, isto é, anteriormente à dissipação de energia no colchão d'água a jusante do vertedouro.

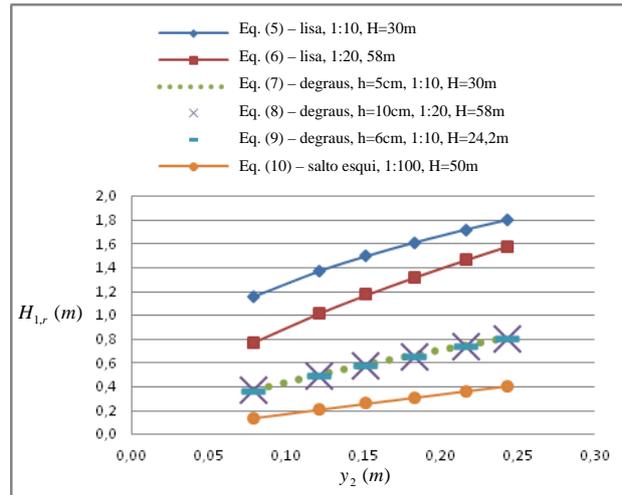


Figura 4 – comparação da capacidade dissipadora de diferentes tipos de vertedouros

Para permitir a avaliação da energia do escoamento na base do vertedouro salto esqui, ou seja, a energia residual ($H_{1,r}$) remanescente da energia de montante (H_m), compararam-se os valores obtidos no presente trabalho com os valores de vertedouros em degraus retirados de Sanagiotto (2003), conforme visto na Figura 5. A autora cita as fórmulas (11) e (12), as quais foram propostas por Povh (2000). Estas fórmulas foram tomadas como base no ajuste dos dados do presente trabalho para um vertedouro salto esqui, resultando nas fórmulas (11) e (12), as quais são apresentadas em seguida.

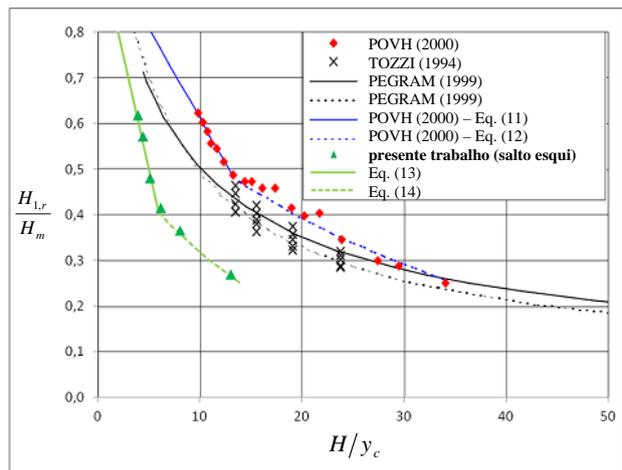


Figura 5 – energia do escoamento no pé de vertedouros em degraus e após a incidência de jato do vertedouro salto esqui modelado no presente trabalho, adaptado de Sanagiotto (2003)

Nota-se que há uma coincidência entre a tendência obtida por Povh (2000) e a tendência dos dados do presente trabalho, onde o decaimento da energia residual, em mudança brusca, deixa de ser linear, tornando-se exponencial para as vazões pequenas. No caso do presente trabalho, isto ocorreu para um número de Froude aproximadamente igual a 5,5 e, dependendo das dimensões dos modelos, este fenômeno pode ser caracterizado como um efeito de escala devido à quebra da tensão superficial da água. Este fenômeno ocorre para os jatos livres com maior velocidade e, no caso de vertedouros em degraus, é ainda mais complexo, pois a quebra da tensão superficial é induzida pela turbulência gerada nos degraus.

Equações de Povh (2000), citadas por Saniogotto (2003), para um vertedouro em degraus:

$$\frac{H_{1,r}}{H_m} = 1 - 0,039 \cdot \frac{H}{y_c}, \text{ para } H/y_c \leq 13,25 \quad (11)$$

$$\frac{H_{1,r}}{H_m} = 0,719 \cdot e^{-0,03 \frac{H}{y_c}}, \text{ para } 13,25 \leq H/y_c \leq 34,05 \quad (12)$$

Equações para o vertedouro salto esqui modelado no presente trabalho:

$$\frac{H_{1,r}}{H_m} = 1 - 0,1 \cdot \frac{H}{y_c}, \text{ para } H/y_c \leq 6; \quad (13)$$

$$\frac{H_{1,r}}{H_m} = 0,58 \cdot e^{-0,06 \frac{H}{y_c}}, \text{ para } 6 \leq H/y_c \leq 13. \quad (14)$$

Para concluir esta etapa do trabalho, tem-se que a capacidade de dissipação de energia de um vertedouro salto esqui foi verificada. A energia residual deste tipo de vertedouro foi comparada com as de outros tipos de vertedouros encontradas na bibliografia. Vale ressaltar que para a obtenção da energia residual não é considerada a perda de energia adicional do sistema de dissipação, isto é, aquelas sofridas a jusante do vertedouro, seja na bacia de dissipação, ou, para o caso de um vertedouro salto esqui, na fossa de erosão.

A seguir, é quantificada a perda de energia que ocorre anteriormente ao impacto do jato de um vertedouro salto esqui no colchão d'água. Para isto, foram utilizados alguns aspectos da dinâmica de jatos.

Modelo de perda de carga no vertedouro salto esqui, anteriormente à dissipação do jato no colchão d'água

De acordo com Wallis (1969), citado por Castillo (1989), e posteriormente por Pinto (1994), quando se deseja estudar o lançamento de jatos turbulentos em modelos hidráulicos construídos de acordo com a semelhança de Froude, um aspecto bastante importante que deve ser analisado é a condição de simulação do estado de jato na região da incidência no colchão d'água ou na própria soleira de jusante (grau de concentração e dispersão). Com efeito, as propriedades físicas dos jatos na seção de incidência são muito importantes para análise do campo de pressões transferidas para o fundo da bacia de dissipação.

O lançamento de um jato de água através da atmosfera é estudado a partir da teoria dos jatos turbulentos livres, como mostra Rajaratnam (1976), citado por Castillo (1989) e depois por Pinto (1994). Conforme este último, em geral, a geometria de um jato que cai livremente é modificada por efeito da aeração, que causa a dispersão do mesmo, diminuindo gradativamente seu núcleo central compacto. Posteriormente, o jato areado sofre pulverização, aumentando ainda mais a zona dispersa.

Na dinâmica de jatos com trajetórias parabólicas, isto é, para o caso do presente trabalho, Lencastre (1984) explica que: quando o jato é ascendente, há um aumento em sua espessura, desconsiderando a dispersão no ar. Já no percurso descendente, devido à aceleração do fluxo, a seção do núcleo do jato tende a sofrer redução. Essa dinâmica faz com que jatos com trajetórias parabólicas tenham uma dispersão mais eficaz do que os jatos de queda livre.

No desenvolvimento do presente trabalho, a dispersão exterior do jato (D_{ext}) é dada por: $D_{ext} = y_M / y_T$, onde y_M é a espessura do jato medida em uma dada seção (através da janela de acrílico, com precisão de centímetros e sem considerar a pulverização exterior), e y_T é a espessura teórica do fluxo para determinada carga de energia potencial, calculada sem perdas. Para cada uma das condições de ensaio, foram feitas medições da espessura y_M do jato em duas seções distintas:

- a) a primeira seção é respectiva à altura máxima atingida pelo jato, isto é, o topo da trajetória parabólica, a qual tem cota central do fluxo nesta seção, dada por \bar{Z}_{topo} (medida

em ensaio). A espessura $y_{topo,M}$ é então obtida pela diferença das cotas máxima e mínima da espessura exterior do jato, tomadas verticalmente nesta seção;

- b) a segunda espessura medida é respectiva à seção de impacto, na qual a distância horizontal projetada do jato, desde sua emissão até o ponto de impacto do centro do núcleo na soleira da bacia, é dada por L_{proj} (medida em ensaio). A espessura medida $y_{i,M}$ é obtida pela diferença entre a distância horizontal máxima e a distância horizontal mínima da seção de impacto do jato. É importante salientar que L_{proj} não é equivalente à média entre estas duas distâncias, pois não está localizado no centro entre as distâncias horizontais: máxima e mínima, da seção de impacto do jato.

As alturas teóricas do fluxo (y_T) na seção de altura máxima atingida pelo jato ($y_{topo,T}$) e na seção de impacto do jato na soleira ($y_{i,T}$) são calculadas, respectivamente, pelas equações (15) e (16). A partir destas seções de controle, a dispersão exterior do jato (D_{ext}) é calculada, no presente trabalho, pelas fórmulas (17) e (18). Com isso, têm-se as dispersões exteriores: D_{topo} e D_i , respectivamente à seção do topo do jato e a seção de incidência do jato na soleira da bacia de dissipação.

$$y_{topo,T} = \frac{q}{\sqrt{2 \cdot g \cdot (H_m - \bar{Z}_{topo})}} \tag{15}$$

$$y_{i,T} = \frac{q}{\sqrt{2 \cdot g \cdot H_m}} \tag{16}$$

$$D_{topo} = \frac{y_{topo,M}}{y_{topo,T}} \tag{17}$$

$$D_i = \frac{y_{i,M}}{y_{i,T}} \tag{18}$$

Os contornos exteriores do jato, medidos na seção do topo do jato e na seção de incidência do

mesmo na soleira da bacia, foram obtidos com uma precisão de centímetro, pois a superfície do jato variava nesta ordem. Com isso, as espessuras $y_{topo,M}$ e $y_{i,M}$ do jato, obtidas para estas respectivas seções, são vistas na Tabela 3, juntamente com os valores resultantes de dispersão exterior do jato nestas seções.

Tabela 3 – dispersão exterior do jato na seção do topo do jato e na seção de incidência do mesmo na bacia de dissipação, em função do número de Froude teórico no ponto de lançamento do jato, isto é, calculado sem perdas

<i>Fr</i>	8,74	6,56	5,57	5,01	4,64	4,36
$y_{topo,M}$ (m)	0,050	0,060	0,065	0,065	0,065	0,070
$y_{i,M}$ (m)	0,150	0,150	0,200	0,160	0,190	0,180
$y_{topo,T}$ (m)	0,010	0,021	0,030	0,039	0,048	0,056
$y_{i,T}$ (m)	0,007	0,014	0,021	0,027	0,033	0,039
D_{topo}	4,94	2,91	2,14	1,65	1,34	1,25
D_i	20,9	10,4	9,6	5,9	5,7	4,6

Observa-se que, para as condições modeladas no presente trabalho, o grau de dispersão na seção de incidência do jato (D_i) ficou por volta de quatro vezes maior que o grau de dispersão no topo do jato (D_{topo}). A relação é mostrada através da reta de paridade vista na Figura 6.

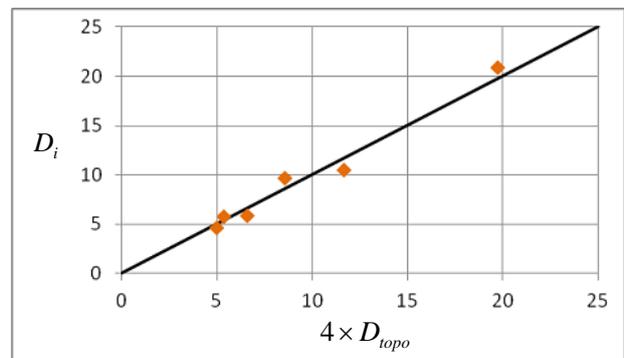


Figura 6 – A relação entre o grau de dispersão na seção de incidência do jato na bacia de dissipação e o grau de dispersão no topo do jato é de quatro vezes.

No presente trabalho, o parâmetro de dispersão exterior do jato (D_{ext}) foi relacionado com as variáveis de distância projetada do jato (L_{proj}) e perda de energia do jato no ar (hp_{m-1}). A primeira é função do percurso do jato no ar, e a segunda está

relacionada com a turbulência e a fricção do fluxo com as interfaces, tanto na calha do vertedouro, quanto com o ar. Desta maneira, os parâmetros (D_{topo}) e ($D_i/4$) foram relacionados, na Figura 7 e na Figura 8, com $K1$ e $K2$, os quais são expressos pelas relações (19) e (20).

$$K1 = \frac{hp_{m-1}}{L_{proj}} \tag{19}$$

$$K2 = \frac{L_{proj}}{Z_{concha}} \tag{20}$$

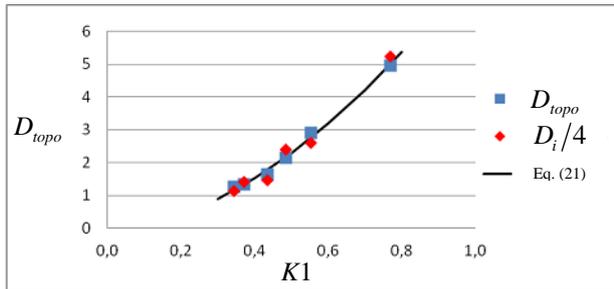


Figura 7 – dispersão exterior do jato em função de K1

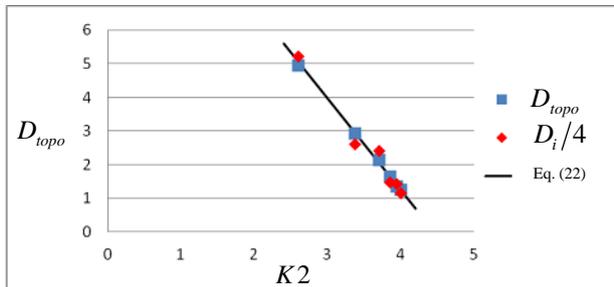


Figura 8 – dispersão exterior do jato em função de K2

No primeiro gráfico (Figura 7), tem-se que quanto maior é a dispersão exterior do jato (D_{ext}), maior é a perda de carga contabilizada entre a energia de montante ao vertedouro (H_m) e a energia remanescente no impacto do jato na bacia de dissipação (H_1), e quanto maior é a distância projetada do jato (L_{proj}), significa que a dispersão exterior do jato (D_{ext}) é menos intensa. Esta tendência é linear, como visto no segundo gráfico (Figura 8). As tendências vistas nas duas relações anteriores podem

ser obtidas através das equações(21) e (22), respectivamente.

$$D_{topo} = 8,07 \cdot K1^{1,82} \tag{21}$$

$$D_{topo} = 12 - 2,7 \cdot K2 \tag{22}$$

Dadas as equações anteriores ((21) e (22)), a perda de energia que ocorre no escoamento (hp_{m-1}), para a morfologia do vertedouro salto esquí modelado, antes do fluxo impactar sobre o colchão d’água, pode ser obtida pela relação de igualdade entre estas equações. Então, eliminando-se o parâmetro D_{topo} e isolando-se hp_{m-1} , resulta em:

$$hp_{m-1} = \left(1,47 \cdot L_{proj}^{1,82} - 0,33 \cdot \frac{L_{proj}^{2,82}}{Z_{concha}} \right)^{\frac{1}{1,82}} \tag{23}$$

Esta equação (23), é função da altura de lançamento do jato em relação ao ponto de impacto (Z_{concha}) e a distância horizontal projetada do jato (L_{proj}), esta última pode ser estimada através de formulações propostas na bibliografia, como a de Maitre e Obolensky (1954), indicada por Azamathulla et al. (2009) e vista abaixo (24) com o ângulo de lançamento (θ_1) em radianos. Com isso, a energia do jato que impacta sobre o colchão d’água (H_1), anteriormente à difusão do jato dentro do colchão d’água, pode ser obtida pela equação 25.

$$\frac{L_{proj}}{H_m} = 1,9 \cdot \frac{H_m - Z_{concha}}{H_m} \cdot \text{sen}(2 \cdot \theta_1) \tag{24}$$

$$H_1 = H_m - hp_{m-1} \tag{25}$$

CONCLUSÃO

No presente trabalho foi verificada a capacidade de dissipação de energia da estrutura extravasora de um vertedouro salto esquí, isto é, anteriormente ao impacto do jato no colchão d’água. A energia residual obtida para o modelo do presente trabalho foi comparada com outros tipos de vertedouros (calha em degraus e calha lisa), evidenciando a grande eficiência de vertedouros salto esquí.

Foi quantificada a perda de carga sofrida pelo fluxo à superfície livre no vertedouro salto esqui, ou seja, aquela sofrida pelo escoamento na calha do vertedouro e na travessia do jato no ar. Desta forma, foi proposta uma fórmula para a determinação da energia do jato que impacta sobre o colchão d'água a jusante do vertedouro, anteriormente à difusão do jato dentro do mesmo e posterior impacto sobre o leito rochoso. Essa energia de entrada do jato no colchão d'água já está prontamente disponível para vertedouros de jato em queda livre, conforme metodologia proposta por Rand (1955), citado por Pinto (1994), mas a bibliografia carece de dados sobre a morfologia da calha de um vertedouro salto esqui, que é bastante complexa.

É importante notar que os resultados obtidos no presente trabalho foram para um modelo de vertedouro salto esqui sem a utilização de comportas, isto é, um vertedouro salto esqui de soleira livre, o que não é usual. A alta capacidade de suportar vazões elevadas por unidade de largura da crista é uma característica de vertedouros salto esqui, porém, a carga hidráulica sobre a crista é alta nestes casos. Se tratando deste tipo de vertedouro, em comparação com outro tipo que tenha maior largura efetiva de vertimento, o posicionamento da cota da crista do vertedouro salto esqui deverá estar abaixo da cota da crista deste outro tipo de vertedouro. Desta forma, quando a elevação da cota da crista da barragem é inviável, utilizam-se vertedouros com comportas, a fim de reter maior carga hidráulica na barragem.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos aos funcionários do Laboratório de Obras Hidráulicas (LOH) do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH/UFRGS), Leandro do Espírito Santo Soares e Maximiliano Paschoaloti Messa, pelo apoio técnico e auxílio na realização dos ensaios no modelo. E ao Laboratório de Hidráulica Experimental e Recursos Hídricos (LAHE/FURNAS), pelo fornecimento das bolsas à equipe de trabalho.

REFERÊNCIAS

AZAMATHULLA, H. M.; GHANI, A. A.; AZAZI ZAKARIA, N. ANFIS-based approach to predicting

scour location of spillway. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Water Management 162, Issue WM6, Pages 399–407, December 2009.

BORJA, J. G. Análise das Características Macroturbulentas ao Longo de uma Bacia de Dissipação por Ressalto Hidráulico à Jusante de um Vertedouro em Degraus. 2009. 82 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

CASTILLO, L. G. Metodología experimental y numérica para la caracterización del campo de presiones en los disipadores de energía hidráulica. Aplicación al vertido libre en presas bóveda. Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya (Espanya), 214 f., 1989.

LENCASTRE, A. Descarregadores de cheia com particular incidência sobre a dissipação de energia em jactos cruzados. Dissertação apresentada para obtenção do grau de Doutor em Hidráulica Aplicada, na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 227 f., 1984.

MAITRE, R.; OBOLENSKY, S. Etuded quelques caracteristiques de l'écoulement dans la partie aval des evacuateurs de surface. La Houille Blanche, Grenoble, France, 481–511, 1954.

PEGRAM, G. G. S.; OFFICER, A. K.; MOTTRAM, S. R. Hydraulics of skimming flow on modeled stepped spillways. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, New York, v.125, n. 5 p.500-510, May 1999.

PINTO, L. C. S. Estudo teórico-experimental das pressões dinâmicas desenvolvidas no fundo de pré-escavações a jusante de estrutura tipo Salto Esqui. Tese de Doutorado Politècnica da Universidade de São Paulo, EPUSP, Brasil. 376 páginas, 1994.

POVH P. H. Avaliação da Energia Residual a Jusante de Vertedouros em Degraus com fluxo em Regime Skimming Flow. Dissertação de mestrado, 141p, 2000.

RAJARATNAM, N. Hydraulic jumps. ADVANCES in HYDROSCIENCE, v. 4, pp. 197-280, 1967.

RAND, W. Flow geometry at straight drop spillways. Paper 791, Proceedings, American Society of Civil Engineers, Vol. 81, pp. 1-13, September, 1955.

SANAGIOTTO, D. Características do escoamento sobre Vertedouros em Degraus de Declividade IV:0,75H. 2003. 118 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SILVA, L. F.; BORJA, J. G.; MARQUES, M. G.; SANAGIOTTO, D. G.; PERIUS, C.; PALAURO, C.; CANELLAS, A. V. B.; FRANCO, J. A. de M. Avaliação das pressões médias máximas e de suas flutuações a jusante de um vertedouro com salto esqui. In: XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2011, Maceió. Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2011.

TOZZI, M. J.; BRIGHETTI, G. Energia residual no pé de vertedouros com degraus. *Revista Brasileira de Engenharia, Caderno de Recursos Hídricos*, Rio de Janeiro : ABRH, v 11, n. 2 p. 49-61, Dez. 1993.

TRIERWEILER NETO, E. F. Avaliação do campo de pressões em ressalto hidráulico formado à jusante de uma comporta com diferentes graus de submergência. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 174 f., 2006.

WALLIS, B. G. One-dimensional two phase flow. New York: McGraw-Hill, 1969.

Residual Energy Downstream From Ski-Jump Spillways

ABSTRACT

The construction of flood spillways with deflectors, where energy dissipation occurs in the natural bed with the formation of a pit hole, is an often disseminated solution whenever local conditions allow it, because it avoids the construction of a stilling basin. However, the energy that acts on the bedrock is intense and could result in unpleasant erosions, which are related to the dynamics of the jet. In this paper, a physical model of a ski-jump spillway was used to analyze the energy dissipation capacity of the flow structure, comparing it with

other types of spillways. The results may help to define the energy of the plunging jet downstream of a ski-jump spillway, reducing the uncertainty of formation and evolution of the scour process.

Keywords: stilling basin, hydraulic jump; impinging jet; scour hole

