

Características do escoamento em Vertedouros em Degraus de Declividade 1V:0,75H

Daniela Guzzon Sanagiotto

Departamento de Hidráulica e Saneamento – UFSM

daniagsana@yahoo.com.br

Marcelo Giulian Marques

Instituto de Pesquisas Hidráulicas – UFRGS

mmarques@iph.ufrgs.br

Recebido: 22/06/07 – revisado: 20/12/07 – aceito: 26/09/08

RESUMO

Os vertedouros em degraus são estruturas que passaram a ser muito utilizadas, principalmente a partir dos últimos 40 anos, com o desenvolvimento de novos métodos construtivos, como o concreto compactado a rolo (CCR) e os gabioes. Os vertedouros em degraus são estruturas caracterizadas pela significativa resistência imposta ao escoamento e pela dissipação de energia associada a macrorugosidade inserida pelos degraus. Essa característica conduz a estruturas de dissipação a jusante com dimensões reduzidas, e conseqüente diminuição nos custos associados. No entanto, embora existam estudos em modelos físicos e algumas observações em protótipos, não há um critério consagrado na bibliografia para o dimensionamento de vertedouros em degraus. Neste trabalho foram realizados ensaios em um modelo físico de um vertedouro em degraus com declividade da calha 1V: 0,75H (53,13°), e degraus com 0,06 m de altura em modelo. Esse modelo foi instalado em um canal com 0,40 m de largura e desnível de 2,44 m entre a crista e o pé do vertedouro. Os ensaios realizados contemplaram vazões específicas entre 0,025 e 0,700 m³/s/m, que, sugerindo uma escala de transposição de resultados de 1:10, correspondem a vazões entre 0,8 e 22,1 m³/s/m em protótipo. A partir dos resultados pode-se definir uma metodologia para a avaliação da posição de início da aeração, do fator de resistência ao escoamento e da dissipação de energia ao longo da calha.

Palavras-chave: vertedouro em degraus, dissipação de energia, escoamento aerado

INTRODUÇÃO

Vertedouros em degraus são estruturas que apresentam degraus ao longo da calha, desde uma posição próxima da crista até o pé da estrutura (ou próximo deste). Os vertedouros em degraus são estruturas caracterizadas pela resistência imposta ao escoamento e pela dissipação de energia associada à macrorugosidade inserida pelos degraus. Essas características conduzem a estruturas de dissipação a jusante com dimensões reduzidas, e conseqüente diminuição nos custos associados.

Esse tipo de estrutura vertedoura é conhecido desde a Antiguidade, sendo que nos últimos 40 anos, observou-se um acréscimo na sua utilização, devido ao desenvolvimento da tecnologia do concreto compactado a rolo (CCR) que otimiza econômica e construtivamente os projetos de barragens.

No Brasil, a difusão do CCR despertou o interesse nos paramentos de vertedouros em degraus.

No estado do Rio Grande do Sul, destacam-se os vertedouros das barragens da UHE Dona Francisca e de Val de Serra, ambas com degraus com 60 cm de altura e declividade 53,13° (mesmas características do presente estudo).

No entanto, embora existam estudos em modelos físicos e algumas observações em protótipos, não há um critério consagrado na bibliografia para o dimensionamento de vertedouros em degraus.

Neste trabalho foi estudado um modelo físico de um vertedouro em degraus de declividade 1V: 0,75H (53,13°), com degraus ao longo da calha com 0,06 m de altura. Utilizando os critérios de similitude de Froude e a escala de transposição de resultados recomendada na bibliografia, para este tipo de escoamento, igual a 1:10, tem-se a caracterização do escoamento sobre vertedouros em degraus com degraus de 0,60 m de altura. Foram analisados a posição de início de aeração, as velocidades médias, o fator de resistência e a dissipação de energia ao

longo da calha. A partir desses resultados pode-se avaliar, para diferentes vazões, a proporção da energia do escoamento dissipada ao longo da calha e, estimar a conseqüente redução na estrutura de dissipação a jusante, junto ao pé da barragem. Para isso analisa-se considerando como estrutura de dissipação uma bacia horizontal com formação de ressalto hidráulico.

BREVE REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Tipos de escoamento sobre calhas em degraus

O escoamento sobre calhas, canais e vertedouros em degraus pode ser dividido em duas classes associadas às concentrações de vazões sobre as mesmas: *nappe flow* (em quedas sucessivas) e *skimming flow* (deslizante sobre turbilhões), de acordo com Rajaratnam (1990). O escoamento do tipo *nappe flow* caracteriza-se por uma sucessão de quedas livres seguidas por ressalto hidráulico pleno ou parcialmente desenvolvido, onde a dissipação de energia ocorre na quebra do jato de água no ar e na formação do ressalto hidráulico. O *skimming flow* ocorre em geral para vertedouros com calhas de maiores declividades e vazões específicas. Nesse regime observa-se a formação de um pseudofundo formado pelos cantos externos dos degraus. Acima desse pseudofundo, a água desliza (escoamento principal) e abaixo, formam-se os vórtices. Estes vórtices são mantidos através da transmissão de esforços cortantes do escoamento principal à zona turbilhonar.

Neste trabalho as vazões específicas ensaiadas representam escoamentos do tipo *skimming flow*.

A seguir comenta-se brevemente sobre alguns aspectos importantes no estudo do escoamento sobre vertedouros em degraus. As proposições de outros pesquisadores são apresentadas, comparativamente, no item de resultados.

Início da aeração do escoamento

O início da aeração em escoamentos sobre vertedouros de calha lisa ocorre na posição onde a camada limite atinge a superfície livre. Em vertedouros em degraus esse comportamento também é observado, no entanto, a macrorugosidade formada pela inserção dos degraus ao longo da calha favorece o desenvolvimento da camada limite, e esta atinge a superfície livre antes do observado nos escoamentos

sobre calhas lisas, para as mesmas condições de declividade da calha e vazões.

Chanson (1994a) distingue três regiões ao longo da calha em degraus (figura 1) para o escoamento em regime deslizante, quanto à aeração do fluxo.

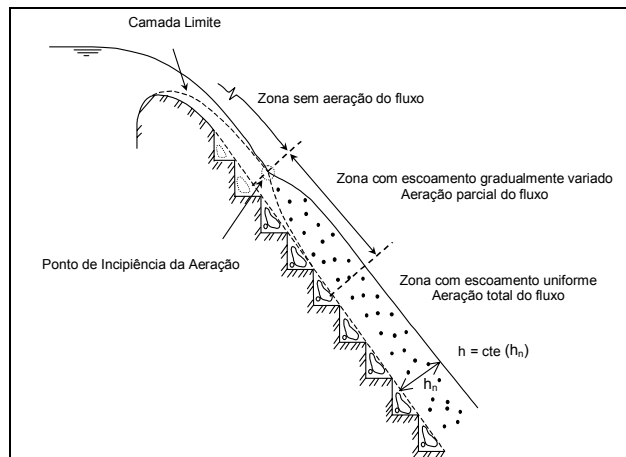


Figura 1 – Regiões do escoamento ao longo de um vertedouro em degraus no regime *skimming flow*, adaptado de Chanson (1994a).

Alguns pesquisadores propuseram equações para determinar a posição de início de aeração, tais como Wood *et al.* (1983), Tozzi (1992), Chanson (1994b) e Mateos Iguacel e Elviro Garcia (1999), apresentadas nas equações (01) a (04), respectivamente.

$$\frac{L_A}{k} = 13,6 \cdot (\text{sen } \alpha)^{0,0796} \cdot (F^*)^{0,713} \quad (1)$$

$$\frac{\delta}{L_A} = 0,080 \left(\frac{L_A}{k} \right)^{-0,233} \quad (2)$$

$$\frac{L_A}{k} = 9,719 \cdot (\text{sen } \alpha)^{0,0796} \cdot (F^*)^{0,713} \quad (3)$$

$$\frac{L'}{H} = 5,6 \left(\frac{q}{g^{0,5} \cdot H^{1,5}} \right)^{0,8} \quad (4)$$

Onde: δ é a espessura da camada limite; L_A é a distância, medida contornando a calha, do início do desenvolvimento da camada limite à posição que esta atinge a superfície livre, que indica o início da aeração do escoamento; k é a rugosidade formada

pelo degrau, dado por $k = H \cdot \cos \alpha$; H é a altura do degrau; α é o ângulo de declividade da calha em relação ao plano horizontal; $F^* = q / \sqrt{g \cdot k^3 \cdot \sin \alpha}$; q é a vazão específica; g é a aceleração da gravidade e L' é o desnível entre a cota da crista do vertedouro e a posição na qual se observa o início da aeração.

Fator de resistência

Para a avaliação teórica da energia do escoamento em qualquer posição da calha, torna-se necessário o estabelecimento de uma lei geral para o fator de resistência f da equação de Darcy-Weisbach. A seguir são apresentadas algumas proposições, apresentadas na literatura, para a avaliação do fator de resistência.

Rajaratnam (1990), considerando que o escoamento torna-se totalmente desenvolvido depois dos primeiros degraus, propôs teoricamente, a partir da equação da quantidade de movimento, que o fator de resistência pode ser obtido por:

$$f = \frac{8 \cdot h_n^3 \cdot g \cdot \sin \alpha}{q^2} \quad (5)$$

onde: h_n é a profundidade normal uniforme obtida para um escoamento completamente desenvolvido num regime de escoamento deslizante; g é a aceleração da gravidade; α é a declividade do paramento em degraus e q é a vazão específica do escoamento.

Stephenson (1991) propôs uma expressão geral para o fator de resistência em escoamentos turbulentos rugosos, assumindo que este tenha atingido a zona de escoamento aerado uniforme:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1,14 + 2 \cdot \log \left(\frac{4 \cdot h_n}{k} \right) \quad (6)$$

onde k é a rugosidade formada pelos degraus, definida pela menor distância do canto interno dos degraus até o pseudofundo (linha imaginária que une os cantos externos dos degraus).

Devido à dificuldade de medição da superfície livre de escoamentos aerados e turbulentos, como o que ocorre em vertedouros em degraus, Tozzi (1992) procurou estabelecer uma lei para a avaliação da resistência relativa à rugosidade dos degraus, com base em uma investigação experimental, compreendendo a execução de ensaios com fluxo de ar em condutos sob pressão. Desses ensaios para calhas

com declividade $1V: 0,75H$ pode-se estabelecer as equações (07) e (08):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2,16 + 1,24 \cdot \log \left(\frac{h}{k} \right), \text{ para } h/k > 1,80 \quad (7)$$

$$f = 0,163, \text{ para } h/k < 1,80 \quad (8)$$

onde h é a profundidade do escoamento medido a partir do pseudofundo, perpendicular a este.

Chanson (1993) deduziu o fator de resistência f da equação de quantidade de movimento, incluindo o raio hidráulico, para considerar nesta avaliação os possíveis efeitos de parede.

$$f = \frac{8g \cdot (\sin \alpha) \cdot h_n^2}{q^2} \cdot \left(\frac{D_H}{4} \right) \quad (9)$$

onde: D_H é o diâmetro hidráulico ($D_H = 4A/P$, sendo A a área da seção e P o perímetro molhado).

Chanson (1994b) analisou uma série de estudos realizados por outros pesquisadores. A partir da análise de estruturas com declividade inferior a 12° , o autor propôs a equação (10) para a avaliação do fator de resistência. O estudo compreendendo estruturas com declividade entre 50° e 55° resultou em valores de fator de resistência variando entre 0,17 e 5,00, com um valor médio em torno de 1,00.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1,42 \cdot \ln \left(\frac{D_H}{k} \right) - 1,25 \quad (10)$$

Chamani e Rajaratnam (1999) realizaram ensaios experimentais e propuseram a equação (11), a partir de seus resultados em conjunto com alguns dados da literatura, assumindo que o escoamento é turbulento rugoso.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1,925 \cdot \log \left(\frac{h}{k} \right) + 1,765 \quad (11)$$

Apesar das várias proposições apresentadas, não existe um consenso para a determinação da resistência do escoamento em calhas em degraus, como pode ser observado na figura 8. Devido a este fato, procurou-se neste trabalho, uma alternativa para a avaliação do fator de resistência ao escoamento.

Dissipação de energia

Quando se trata do escoamento sobre vertedouros em degraus, o aspecto mais estudado é o fenômeno de dissipação de energia ao longo dos seus degraus. Alguns pesquisadores estudaram a energia residual no pé do vertedouro de forma indireta, através da medição da altura conjugada lenta do ressalto hidráulico formado no pé do vertedouro, e, por conseguinte, na determinação da altura rápida e energia residual nessa posição. Tozzi (1992), Pegram *et al.* (1999) e Povh (2000) são alguns dos pesquisadores que realizaram estudos desta forma. Outros estudos basearam seus resultados a partir da medição de determinadas características (profundidade ou velocidades) do escoamento ao longo de toda calha, como, por exemplo, os trabalhos de Sorensen (1985), Christodoulou (1993), Tozzi (1992), Sanagiotto (2003) e Dai Prá (2004).

Sorensen (1985) avaliou a dissipação de energia experimentalmente e constatou que a energia cinética na base do vertedouro em degraus corresponde a valores entre 6 e 12% do valor obtido nos modelos com calha lisa.

Rajaratnam (1990) propôs uma equação teórica (equação 12), para avaliar a dissipação de energia adicional em um vertedouro em degraus, em comparação com um vertedouro de calha lisa.

$$\frac{\Delta E'}{E'} = \frac{(1-M) + \frac{F_0'^2}{2} \cdot \frac{(M^2-1)}{M^2}}{1 + \frac{F_0'^2}{2}} \quad (12)$$

onde: E' é a energia residual no vertedouro de calha lisa; $\Delta E'$ é a diferença entre a energia residual do vertedouro de calha lisa e do vertedouro em degraus; $M = (c_f/c'_f)^{1/3}$; F_0' é o número de Froude na base do vertedouro com calha lisa; c_f e c'_f são os coeficientes de rugosidade para a estrutura em degraus e lisa, respectivamente.

Stephenson (1991), considerando que o escoamento atinge a profundidade aerada uniforme, propôs uma equação teórica para a avaliação da dissipação de energia em vertedouros em degraus:

$$\frac{\Delta E}{E_m} = 1 - \left[\left(\frac{f}{8 \cdot \text{sen} \alpha} \right)^{1/3} \cos \alpha + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{f}{8 \cdot \text{sen} \alpha} \right)^{-2/3} \right] \frac{h_c}{Y} \quad (13)$$

onde: $\Delta E/E_m$ é a dissipação de energia em relação à energia total a montante; E_m é a energia total a

montante ($E_m = Y + 1,5 \cdot h_c$); f é o fator de resistência; α é a declividade da calha do vertedouro; h_c é a profundidade crítica do escoamento e Y é a altura total do vertedouro.

Chanson (1994c) propõe a equação (14) para estimar a perda de energia em escoamentos do tipo *skimming flow*.

$$\frac{\Delta E}{E_m} = 1 - \frac{\left(\frac{f}{8 \cdot \text{sen} \alpha} \right)^{1/3} \cdot \cos \alpha + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{f}{8 \cdot \text{sen} \alpha} \right)^{-2/3}}{\frac{3}{2} + \frac{H_V}{h_c}} \quad (14)$$

Sendo H_V a diferença entre a cota da crista do vertedouro e a cota da bacia de dissipação.

Fernández (1994), através de investigação experimental, obteve valores para a dissipação de energia relativa em relação ao que se teria num vertedouro de calha lisa, estando eles entre 61% e 82%.

Rice e Kadavy (1996) observaram que a dissipação de energia em vertedouros de calha em degraus está entre duas a três vezes maior que aquela que ocorre em um vertedouro de calha lisa.

Pegram *et al.* (1999) propuseram a equação (15), através de ensaios em modelo na escala 1:10, representando um vertedouro de 30 m de altura, com degraus de 0,50 m de altura.

$$E_r = 4,42 \cdot h_2^{0,685} \quad (15)$$

onde: E_r é a energia residual no pé do vertedouro e h_2 é a altura conjugada lenta do ressalto hidráulico formado no pé do vertedouro.

Povh (2000) propôs as seguintes equações para a avaliação da energia residual relativa do escoamento na base do vertedouro em degraus:

$$\frac{E_r}{E_m} = 1 - 0,039 \cdot \frac{H_V}{h_c} \quad \text{para} \quad \frac{H_V}{h_c} \leq 13,25 \quad (16)$$

$$\frac{E_r}{E_m} = 0,719 e^{-0,03 \frac{H_V}{h_c}} \quad \text{para} \quad 13,25 < \frac{H_V}{h_c} \leq 34,05 \quad (17)$$

No entanto, apesar de vários estudos já realizados, não há um consenso entre os diferentes pesquisadores para a avaliação da dissipação de energia em vertedouros em degraus, conforme pode ser confirmado nas figuras 10 e 11, onde são utiliza-

dos dados da bibliografia para comparar com os resultados do presente estudo.

Pressões na calha

O desenvolvimento tecnológico do CCR e das técnicas construtivas possibilitou a construção de barragens mais altas, com valores de vazões específicas e velocidades mais elevadas. No entanto, existem algumas limitações devido à possibilidade da ocorrência de cavitação, principalmente, na zona não aerada do escoamento. O fenômeno da cavitação está relacionado à ocorrência de certos níveis de pressões negativas nos degraus associados a determinadas frequências. Por isso, os estudos sobre pressões nos degraus ao longo da calha, bem como as probabilidades de ocorrência, são importantes para a definição de limites de utilização destas estruturas com segurança.

Alguns estudos, com o objetivo do melhor entendimento do comportamento das pressões ao longo de calhas em degraus, vêm sendo realizados, entre eles, destacam-se os trabalhos de Tozzi (1992), Matos et al. (1999), Olinger e Brighetti (2002, 2004), Sánchez-Juny e Dolz (2003), Amador et al. (2004) e Gomes (2006).

METODOLOGIA

Descrição da estrutura

O presente estudo foi realizado em um modelo bidimensional de um vertedouro em degraus com calha de declividade 1V: 0,75H (53,13°), altura 2,44 m e largura 0,40 m, sendo a calha composta por degraus com 0,06 m de altura em modelo. Para efeitos de comparação, realizaram-se medições em uma outra estrutura com calha lisa mantendo as demais características idênticas.

O perfil da crista do vertedouro é do tipo Creager, projetado de acordo com o USBR (1974), com carga de projeto (Hd) igual a 0,40 m, de equação $Y = 1,08945X^{1,85}$, com origem na soleira do vertedouro e X e Y positivos no sentido do escoamento. Normalmente, no desenho de vertedouros em degraus existe uma região com degraus menores, no alinhamento do perfil Creager, antes do ponto de tangência com a declividade da calha, com o objetivo de evitar que o escoamento 'salte' nos primeiros degraus. O perfil utilizado neste trabalho desenvolve-se até o ponto de tangência com a declividade da calha (53,13°), sem a execução de degraus de tran-

sição. Essa simplificação reflete a tendência atual de não se utilizar os degraus de transição, com o objetivo de facilitar a execução. A figura 2a apresenta o perfil do modelo do vertedouro em degraus, com a localização dos pontos onde foram realizadas medições de nível, e a figura 2b mostra o modelo instalado no canal.

Os ensaios realizados contemplam vazões entre 0,10 m³/s/m e 0,70 m³/s/m (em modelo), que correspondem a escoamentos do tipo deslizante sobre turbilhões (*skimming flow*). Considerando uma escala de transposição de resultados de 1:10, conforme sugerido por Chanson et al. (2002), para estudos de escoamentos aerados, têm-se as vazões específicas entre 0,8 e 22,1 m³/s/m em protótipo.

Descrição dos ensaios

Neste trabalho foram realizadas observações da posição do início da aeração e medições dos níveis do escoamento, das velocidades ao longo do perfil dos vertedouros (calha em degraus e calha lisa).

Medições de níveis

Os níveis de água, ao longo da calha, foram medidos de duas formas: através da utilização de ponta linimétrica e por meio de medidas diretas nas laterais transparentes do vertedouro. As medições realizadas com ponta linimétrica foram feitas no meio do canal, perpendiculares ao fundo, estando o medidor preso a um carrinho móvel ao longo da calha.

As medidas de níveis foram realizadas em determinados pontos ao longo da calha que permitiram caracterizar o perfil médio da linha de água ao longo da estrutura. Nas estruturas em degraus, além das posições indicadas na figura 2b, perpendiculares ao plano da calha no alinhamento da quina superior dos degraus, foram também executadas medições de níveis em degraus intermediários, contribuindo para uma melhor definição do perfil da linha de água.

Considerando a natureza do escoamento, altamente aerado, com uma superfície livre de difícil definição, as medições foram realizadas com a ajuda de um detector de lâmina de água de alta sensibilidade com sinal luminoso instalado na ponta linimétrica.

Medições de velocidades

As medições de velocidades médias do escoamento foram efetuadas com a utilização de um

Tubo de Pitot-Prandtl, acoplado a um transdutor diferencial de pressão, nas posições indicadas na figura 2b.

O Tubo de Pitot-Prandtl e o transdutor diferencial de pressão foram presos à calha, utilizando o mesmo carrinho móvel utilizado na medição de níveis.

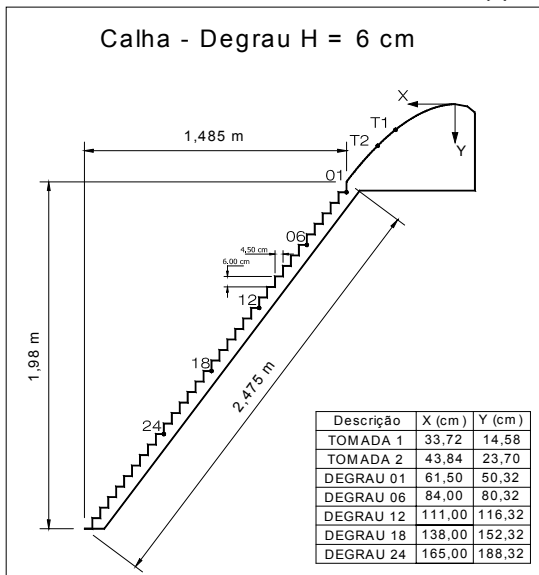
Os dados foram adquiridos a uma frequência de 50 Hz, com duração de aquisição de 180 segundos.

Avaliação da aeração do escoamento

A avaliação da aeração do escoamento foi feita visualmente, sendo que foram realizados registros em vídeo de todas as condições de ensaio.



(a)



(b)

Figura 2 – Modelo do vertedouro com calha em degraus: (a) vista lateral do modelo instalado no canal; (b) esquema do modelo indicando os degraus de controle.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Início da Aeração

Observou-se no escoamento sobre as calhas em degraus, que a aeração começa com uma perturbação na superfície da água, na posição onde a camada limite atinge a superfície livre, o que provoca o começo da entrada de ar no escoamento. Imediatamente a jusante deste ponto, visualiza-se no escoamento a aeração intermitente dos degraus, até uma posição onde o vórtice aerado, formado na cavidade do degrau, ocorre de forma contínua, e o escoamento aerado apresenta um regime uniforme. Os resultados apresentados neste trabalho referem-se a este último tipo de comportamento descrito.

A tabela 1 resume os resultados da posição de início de aeração para diferentes descargas no vertedouro em degraus estudado. Observa-se que o aumento da vazão específica conduz o início de aeração a posições mais a jusante.

Na figura 3 são apresentados os resultados da posição de início de aeração, comparando-os com as equações propostas na bibliografia. Constatase que os dados deste estudo estão em maior concordância com a equação (03), proposta por Chanson (1994b).

Os dados de comprimento de início de aeração foram adimensionalizados em relação à rugosidade de cada estrutura (L_A/k) e foram apresentados em um gráfico em função de $F^* = q/\sqrt{g \cdot k^3 \cdot \text{sen} \alpha}$. Na figura 4 são apresentados os resultados do presente estudo, obtidos nos modelos dos vertedouros em degraus de declividade 1V: 0,75H (53,13°), juntamente com os dados de diferentes pesquisadores, de acordo com Chanson (1994a), na mesma forma adimensionalizada de L_A/k , em função de F^* . Utilizando os dados de Beitz e Lawless (apud Chanson, 1994a), Bindo *et al.* (1993), Sorensen (1985) e Tozzi (1992), que representam resultados obtidos em estruturas com calhas de declividades entre 50,0° e 53,13°, e os dados encontrados nesta pesquisa, propõe-se uma equação para o cálculo do comprimento de início da aeração (equação 18). Observa-se que a equação proposta representa um bom ajuste aos dados, com um coeficiente de determinação igual a 0,94.

$$\frac{L_A}{k} = 9,7721 \cdot F^{*0,7014} \quad (r^2=0,94) \quad (18)$$

Sanagiotto *et al.* (2004) e Dai Prá *et al.* (2006) relatam os resultados obtidos nesses

monitoramentos, sendo que estes pontos são apresentados na figura 4. Observa-se que os resultados do presente estudo concordam com os dados obtidos nos protótipos.

Tabela 1 – Posições de início da aeração do escoamento sobre vertedouros de calha em degraus de declividade 1V: 0,75H e degraus com 0,06 m de altura.

Q (m ³ /s/m)	Degrau de início da aeração	L _A (m)
0,03	1	0,96
0,05	2	1,04
0,10	4	1,19
0,20	14	1,94
0,32	22	2,54
0,45	*	*
0,58	*	*
0,70	*	*

* Nestes casos, não foi possível a observação do início da aeração uniforme, limitada pelo comprimento total da calha do modelo.

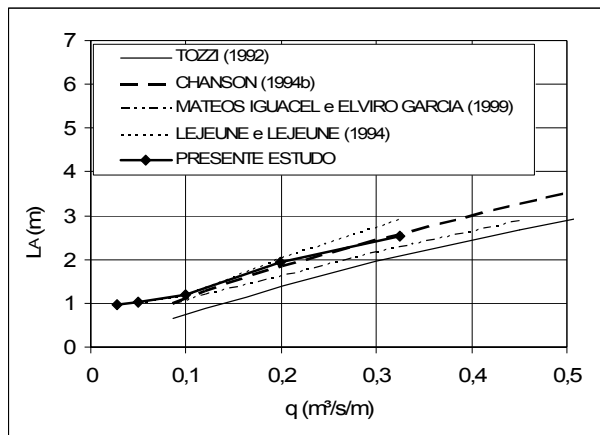


Figura 3 – Resultados de posições de início de aeração obtidos neste estudo (linhas somente para visualização).

Linha D'Água

A figura 5 apresenta as profundidades do escoamento ao longo do vertedouro em degraus. A linha de água da superfície livre média observada nos escoamentos em degraus, em comparação com a obtida para o vertedouro de calha lisa, como era de se esperar, apresenta uma forma um tanto irregular. Nos escoamentos sobre vertedouros com calha lisa, as profundidades diminuem ao longo da calha. Nos vertedouros em degraus, as profundidades ao longo da calha, de um modo geral, são maiores do

que as correspondentes na calha lisa, e apresentam um comportamento irregular, que tende a uma profundidade uniforme (h_n) quando o escoamento atinge a aeração classificada como uniforme (figura 1). A linha de água nas calhas em degraus, para as maiores vazões, apresenta uma menor irregularidade, explicando-se pelo fato do escoamento não chegar a atingir a aeração, limitado pela altura do modelo.

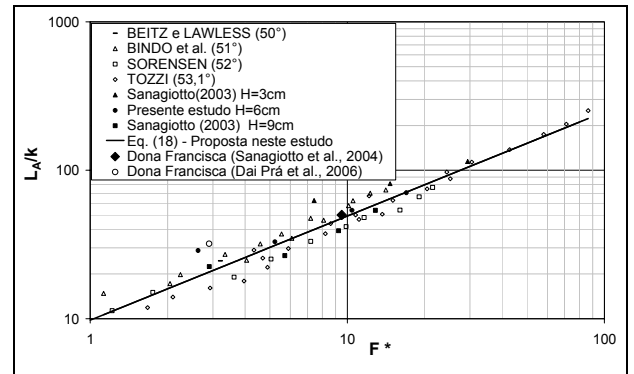


Figura 4 – Comparação da posição do início da aeração do escoamento entre os resultados obtidos no presente estudo, com os dados de outros pesquisadores (de acordo com Chanson 1994a, a equação (18), proposta neste estudo e um resultado obtido no vertedouro em degraus da UHE de Dona Francisca e de Val de Serra).

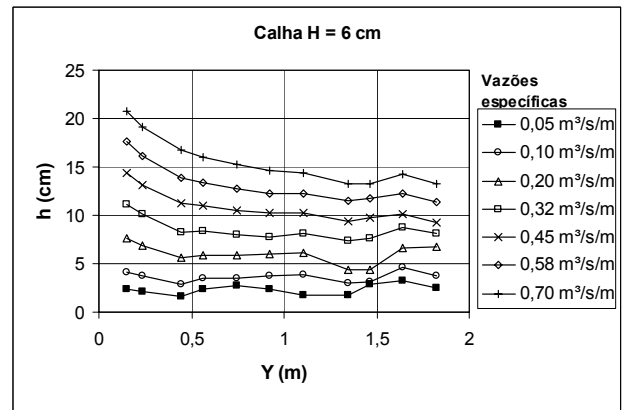


Figura 5 – Profundidade do escoamento ao longo da calha para as três estruturas em degraus, para os diferentes valores de vazões específicas ensaiados em cada estrutura.

Em seguida analisaram-se os níveis de água a jusante do ponto de início de aeração uniforme, com o objetivo da determinação das profundidades

médias correspondentes ao escoamento uniforme (neste regime o escoamento apresenta profundidades aproximadamente constantes). Os valores correspondentes a essas profundidades foram obtidos a partir da média das profundidades a jusante do ponto de início de aeração e são apresentados na Tabela 2, para as vazões ensaiadas em que foi possível atingir a aeração uniforme.

Tabela 2 – Profundidade normal do escoamento nas situações em que foi atingido o escoamento aerado uniforme em vertedouros de calha em degraus de declividade 1V: 0,75H e degraus com 0,06 m de altura.

q (m ³ /s/m)	h _n (cm)
0,03	1,50
0,05	2,46
0,10	3,66
0,20	5,49
0,32	8,17
0,45	*
0,58	*
0,70	*

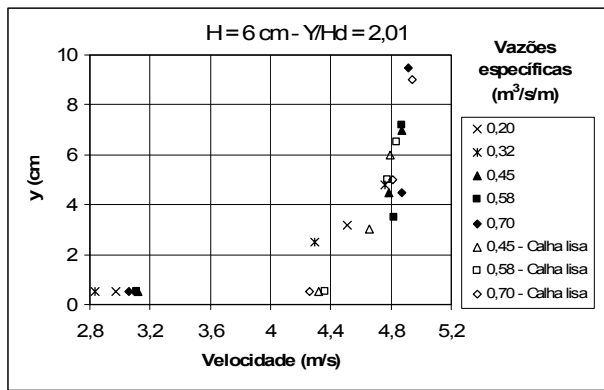
* Não foi possível avaliar a profundidade uniforme para estas vazões.

Velocidades

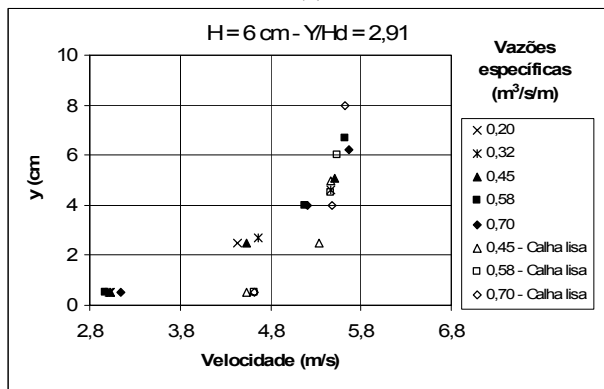
A partir dos dados obtidos com um conjunto Pitot / transdutor diferencial, foram registradas séries de resultados de velocidades instantâneas. Através das velocidades instantâneas foram calculadas as velocidades médias em cada posição vertical da seção de medição.

Tozzi (1992) verificou a distribuição típica do perfil de velocidades ao longo da profundidade do escoamento, caracterizada pelo valor nulo junto ao contorno, por valor máximo no interior do fluxo aerado e por valores decrescentes acima desta profundidade. Esses valores menores próximos à superfície livre ocorrem pela presença de ar arrastado pelo escoamento, que em contato com o tubo de estagnação do tubo de Pitot-Prandtl indica uma velocidade menor que a real.

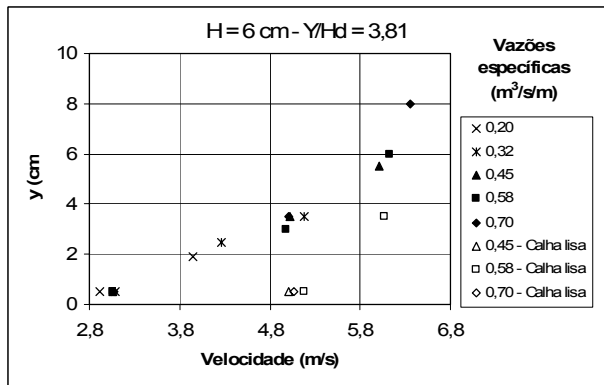
A figura 6 apresenta os resultados dos perfis médios de velocidades, obtidos para a calha em degraus, comparados com os obtidos na mesma posição no modelo com calha lisa, para três posições ao longo da calha.



(a)



(b)



(c)

Figura 6 – Perfis de velocidade do escoamento no vertedouro de calha em degraus comparados com os resultados obtidos no vertedouro de calha lisa (y representa as posições de medição de velocidade ao longo da profundidade total do escoamento h), para (a) Y/Hd = 2,01; (b) y/Hd = 2,91 e (c) Y/Hd = 3,81.

Nos perfis analisados na figura 6 observam-se velocidades menores, próximas ao fundo do escoamento, e maiores, a distâncias maiores do fundo da calha, tendendo a um valor constante. Esses perfis

gerados não apresentam, como citado por Tozzi (1992), uma região de valores menores próximos à superfície livre, isto devido a não terem sido realizadas medições nessa região. Segundo Chow (1959), na região da camada limite turbulenta o perfil de velocidades tem um comportamento logarítmico com relação à profundidade. Esse comportamento pode ser observado nos perfis de velocidade medidos.

Quando se comparam os valores de velocidades encontrados para a calha lisa com a calha em degraus, observa-se que há uma redução das velocidades nas calhas em degraus, como se esperava.

Na figura 7 as velocidades estão apresentadas de forma adimensionalizada. No eixo das abscissas estão representados os quocientes das velocidades medidas (V_m) pelas velocidades médias calculadas (V_c), a partir dos dados das profundidades do escoamento medidos em cada seção. Através desse gráfico pode-se observar que a medição de velocidades no vertedouro de calha lisa não difere significativamente das velocidades calculadas a partir da equação da continuidade. Para as menores profundidades observam-se relações V_m/V_c menores que 1, próprias do perfil logarítmico de velocidades. As medições de velocidade no vertedouro com calha em degraus apresentam, para profundidades relativas menores que 0,2, geralmente, relações V_m/V_c menores que 1,0. Por outro lado, para as maiores profundidades relativas, observa-se que os valores de velocidade medida são superestimados em relação à velocidade calculada. Esse fato reflete a dificuldade na medição de velocidades e níveis neste tipo de escoamento, altamente turbulento e em algumas situações com presença de ar incorporado.

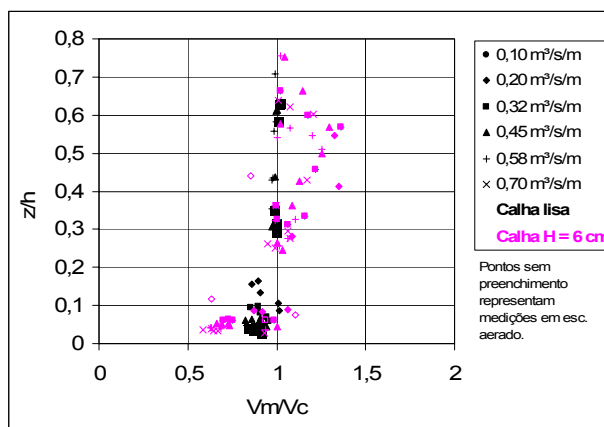


Figura 7 – Perfis de velocidade adimensionalizados (V_m é a velocidade medida, V_c é a velocidade calculada a partir das medições de níveis, z/h é a profundidade relativa).

As velocidades foram medidas até, aproximadamente, 75% da profundidade total do escoamento. Utilizaram-se as velocidades médias calculadas a partir da profundidade do escoamento na posição desejada, para a avaliação da energia ao longo do escoamento.

Fator de resistência

Através da definição das alturas normais na região de escoamento aerado uniforme (h_n), pode-se avaliar o valor do fator de resistência a partir da equação (09). Na figura 8 comparam-se os resultados encontrados neste estudo com algumas equações propostas por outros pesquisadores. Observa-se que os resultados obtidos para o fator de resistência neste estudo encontram-se na faixa entre as curvas propostas por Stephenson (1991) e Chanson (1994a) e aproximam-se, na maioria dos pontos, a proposição de Chamani e Rajaratnam (1999). De acordo com essa análise, sugere-se a utilização da equação (11), proposta por Chamani e Rajaratnam (1999) para o cálculo do fator de resistência em calhas em degraus atuando no regime de escoamento aerado uniforme.

Devido ao número limitado de casos onde se obteve o regime de escoamento aerado uniforme, foi possível obter diretamente os valores do fator de resistência apenas para situações de $h_n/k < 3$, como se observa na figura 8. Isso se deve à limitação da altura do modelo (2,44 m), que impossibilitou que o escoamento atingisse o regime aerado uniforme em todas as vazões ensaiadas.

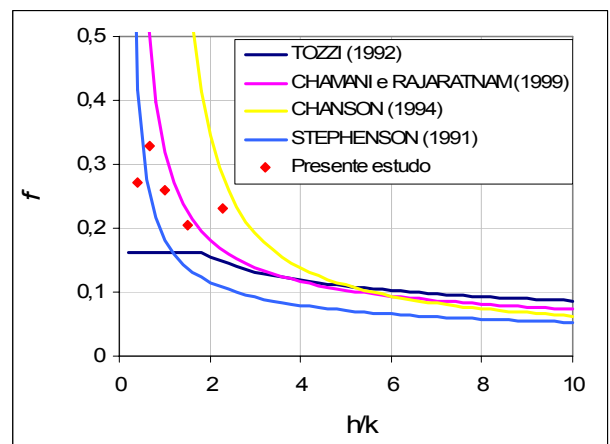


Figura 8 – Resultados de posições de início de aeração obtidos neste estudo (linhas somente para visualização).

Sanagiotto (2003) realizou uma análise comparativa entre os fatores de resistência obtidos em modelos de vertedouros com calhas em degraus (f_k) com os obtidos em um modelo da calha lisa (f_L), independentes do regime de escoamento uniforme ter sido atingido. Nessa análise foram considerados os dados de todos os pontos onde foram realizadas as medições de níveis, em todas as vazões ensaiadas. Na figura 9 são apresentados os resultados de fator de resistência, considerando qualquer posição na calha, denominada 'L_p' (L_p é a distância medida alinhada ao perfil) e o início da aeração (L_A). A partir desses dados, propõe-se a equação (19). Os valores de L_p/L_A < 1,0 correspondem a regiões de escoamento não aerado.

$$\frac{f_L}{f_k} = 1,8162 \exp\left(-1,7692 \cdot \frac{L_p}{L_A}\right) \quad (r^2=0,91) \quad (19)$$

Salienta-se que a equação (19) foi proposta a partir de dados que apresentavam algumas limitações, e para a utilização adequada desta, faz-se necessário as seguintes observações:

- para L_p/L_A < 1, válida para h/k ≤ 9,0 (região não aerada);
- para 1,0 ≤ L_p/L_A ≤ 2,0, válida para h/k ≤ 3,0 (região aerada);
- para 2,0 < L_p/L_A ≤ 2,5 esta equação deve ser utilizada com restrições;
- para L_p/L_A > 2,5 → não utilizar esta equação.

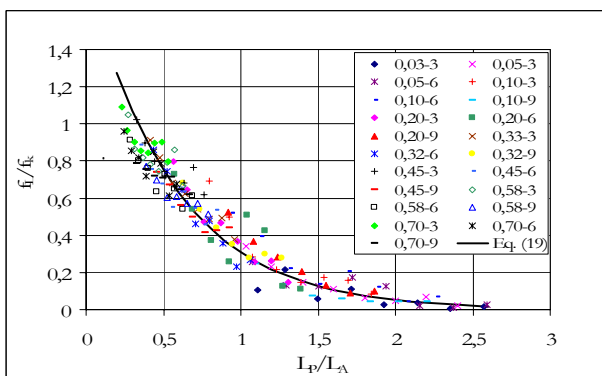


Figura 9 – Comparativo do fator de resistência de calha lisa com as calhas em degraus, considerando a posição de medição e o início da aeração em cada caso (f_L é o fator de resistência para vertedouros de calha lisa, f_k é o fator de resistência nos vertedouros de calha em degraus, L_p é a distância alinhada ao perfil, a partir do início deste). Na legenda indica-se a vazão específica em m³/s/m, seguida pela altura do degrau em cm (Fonte: Sanagiotto, 2003).

Como foram realizados ensaios em uma calha lisa, procurou-se avaliar o fator de resistência nesta estrutura, através da análise desses resultados. Primeiramente procurou-se determinar a profundidade do escoamento em qualquer posição da calha para diferentes vazões, que resultou na equação ajustada (20).

$$\frac{h_L}{h_c} = \left(1,647 + 0,53 \cdot \frac{L_p}{h_c}\right)^{-0,7055} \quad (r^2=0,99) \quad (20)$$

onde: h_L é a profundidade do escoamento em qualquer ponto da calha lisa; L_p é a distância a partir do início da crista, contornando o perfil até determinado ponto e h_c é a profundidade crítica ($h_c = (q^2 / g)^{1/3}$). Essa equação limita-se para a faixa de 1,0 ≤ L_p/h_c ≤ 17,0.

Os valores do fator de resistência para um vertedouro de calha lisa (f_L) foram relacionados com o número de Froude (Fr). A equação (21) corresponde à curva de tendência obtida desta relação, que é válida para valores de 2,5 ≤ Fr ≤ 12,0. O fator de resistência na calha lisa pode ser obtido da equação (21) ou através da equação (09), utilizando as profundidades calculadas na equação (20).

$$f_L = 2,6976 \cdot Fr^{-1,7068} \quad (r^2=0,98) \quad (21)$$

A partir do conhecimento do valor do fator de resistência em uma calha lisa, para uma determinada posição e vazão, pode-se avaliar o valor do fator de resistência para uma calha em degraus, utilizando a equação (19). Desta forma, possibilita-se a avaliação de valores de fator de resistência para faixas maiores de h/k e para regiões onde o fluxo não atingiu o regime de escoamento aerado uniforme.

Dissipação de energia

A dissipação de energia pode ser analisada a partir de dois aspectos diferentes. Pode-se avaliar a dissipação de energia na calha do vertedouro em degraus, em relação à energia total a montante, e também se pode realizar um estudo comparativo da energia dissipada no vertedouro em degraus em relação à energia dissipada no modelo similar com calha lisa.

O cálculo da energia em qualquer ponto ao longo da calha (E_p) foi realizado a partir da equação (22), para canais de grande declividade:

$$E_p = z_p + h_p \cdot \cos \alpha + \alpha_1 \cdot \frac{V_p^2}{2 \cdot g} \quad (22)$$

onde: z_p é a cota do piso do degrau na seção considerada em relação ao plano de referência; h_p é a profundidade do escoamento medida perpendicularmente na quina superior do degrau considerado; V_p é a velocidade média correspondente (calculada a partir de h_p) e α_1 é o coeficiente de Coriolis (considerado igual a 1,0).

A energia a montante (E_m) foi avaliada através da equação:

$$E_m = Y + 1,5 \cdot h_c \quad (23)$$

onde Y é a diferença entre a cota da crista do vertedouro e a cota da posição onde está sendo avaliada a energia (altura do vertedouro relativa).

O cálculo de energia foi realizado ao longo da calha, considerando em cada degrau um plano de referência diferente. Desta forma, na equação (22) tem-se $z_p = 0$ e na equação (23) tem-se o termo Y , que expressa as diferentes possibilidades de alturas de vertedouros consideradas.

Essa metodologia de cálculo possibilita que sejam avaliadas condições de dissipação de energia em vertedouros de diferentes alturas, menores ou iguais às estruturas ensaiadas nesta pesquisa. O cálculo de dissipação de energia foi realizado até o último ponto de medição de níveis, localizado a 1,88 m (em modelo) abaixo da crista do vertedouro.

Dissipação de energia em relação à energia de montante do vertedouro

A energia a montante foi calculada pela equação (23), relativa a cada uma das tomadas, e a energia em cada ponto foi avaliada pela equação (22). A energia dissipada (ΔE) em relação a energia total de montante é dada por:

$$\frac{\Delta E}{E_m} = \frac{E_m - E_p}{E_m} \quad (24)$$

Esta análise compara, em cada estrutura, a dissipação de energia em determinados pontos em relação à energia a montante correspondente. Na tabela 3 apresentam-se os valores de dissipação de energia para os valores de Y/Hd iguais a 2,01, 2,91, 3,81 e 4,71, correspondentes a vertedouros com alturas (Y) iguais a 0,80 m, 1,16 m, 1,52 m e 1,88 m, respectivamente.

Os resultados de dissipação de energia em relação à energia de montante são apresentados em função da relação adimensional Y/h_c , na figura 10. Esse gráfico mostra um comportamento bem definido da dissipação de energia para a região de escoamentos não aerados. Os pontos relativos ao escoamento aerado (pontos coloridos sem preenchimento) apresentam-se um pouco mais dispersos.

Tabela 3 – Dissipação de energia em relação à energia de montante (valores de modelo) - $\Delta E/E_m$

q (m ³ /s/m)	Y/Hd			
	2,01	2,91	3,81	4,71
0,05	0,88	0,67	0,89	0,88
0,10	0,81	0,72	0,68	0,81
0,20	0,77	0,58	0,37	0,77
0,32	0,61	0,42	0,48	0,61
0,45	0,46	0,33	0,40	0,46
0,58	0,42	0,27	0,36	0,42
0,70	0,38	0,25	0,28	0,38

Através da figura 10 pode-se verificar que a avaliação da dissipação de energia obtida no presente estudo está entre a dispersão de resultados e proposições de outros pesquisadores. Os resultados deste estudo mostram, de uma forma geral, que os valores de dissipação de energia são bastante semelhantes aos encontrados por Stephenson (1991), Bindo *et al.* (1993) e Christodoulou (1993). Também apontam que são superiores à avaliação de Povh (2000), e inferiores aos resultados de Sorensen (1985).

Os resultados encontrados também foram comparados com as equações propostas por Chanson (1994a), Stephenson (1991) e Pegram *et al.* (1999). A proposição de Chanson (1994c) foi apresentada em um gráfico com os valores de fator de resistência de 0,25 e 1,0, e a curva apresentada por Stephenson (1991), com $f = 0,25$. Os valores de $f = 0,25$ e 1,00 são, respectivamente, valores médios encontrados por Sanagiotto (2003) e Chanson (1994b). A equação (10), proposta por Chanson (1994b), utilizando $f = 1,00$, apresenta-se como uma envoltória superior dos dados encontrados neste estudo, e a curva de Stephenson (1991), apresenta-se como uma envoltória inferior.

Analisando o comportamento dos resultados de dissipação de energia em relação à energia de montante, podem-se fazer os seguintes comentários:

- Observa-se que a dissipação de energia é maior para os vertedouros de maior altura e diminui com o aumento da vazão específica.
- Os maiores níveis de dissipação de energia observam-se nos escoamentos aerados. Pode-se verificar que nos ensaios onde ocorreu a aeração do fluxo, os valores de dissipação de energia ficaram entre o valor mínimo de, aproximadamente, 55%, chegando até o valor máximo de 89%. Para as maiores vazões, onde o fluxo não chega a tornar-se aerado (limitado pela altura do vertedouro), a dissipação de energia é bastante reduzida. Dessa análise conclui-se que para a eficiência do vertedouro em degraus, em termos de dissipação de energia, é importante que seja observado se a calha tem comprimento suficiente para que o escoamento da vazão de projeto se torne completamente aerado. Caso contrário, a estrutura de dissipação a jusante deverá prever situações em que os degraus não atuarão com sua total eficiência de dissipação e energia do escoamento.

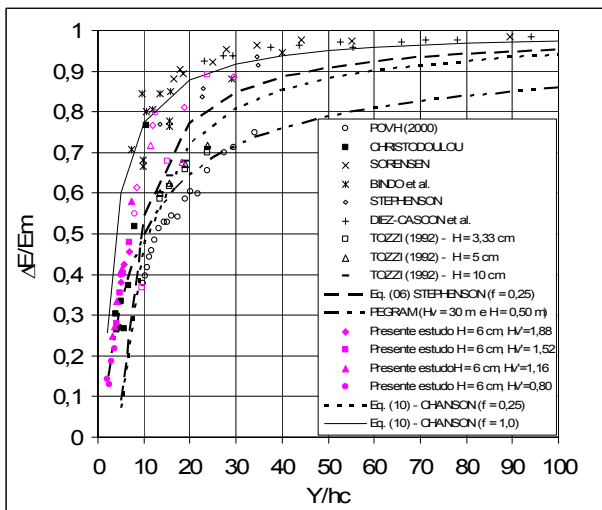


Figura 10 - Resultados experimentais obtidos no presente estudo de dissipação de energia em relação à energia de montante, comparados com os dados e proposições de outros pesquisadores. Os pontos coloridos, sem preenchimento, correspondem a escoamentos aerados (Y = posição vertical em relação à crista e Hd é a carga de projeto = 0,40 m).

Dissipação de energia em relação a um vertedouro de calha lisa

A dissipação de energia em um vertedouro em degraus pode ser analisada em relação à energia, em uma mesma posição, em um vertedouro de calha lisa. Desta forma, avalia-se o efeito na dissipação de energia causada pela inserção dos degraus na calha. A equação (25) descreve a dissipação de energia em um vertedouro em degraus relativa a um de calha lisa.

$$\frac{\Delta E'}{E'} = \frac{(E' - E_p)}{E'} \tag{25}$$

onde: E' é a energia em uma determinada posição do vertedouro de calha lisa e E_p é a energia na posição vertical correspondente no vertedouro de calha em degraus.

Essa análise baseia-se na comparação entre os resultados obtidos nos ensaios realizados nos modelos do vertedouro de calha lisa e calha em degraus. São analisados resultados de dissipação de energia em quatro posições ao longo da calha, para valores de Y/Hd = 2,01; 2,91; 3,81 e 4,71 (correspondentes a vertedouros com alturas (em modelo) iguais a 0,80, 1,16, 1,52 e 1,88 m. Os resultados de dissipação de energia em relação a um vertedouro de calha lisa são apresentados na Tabela 4.

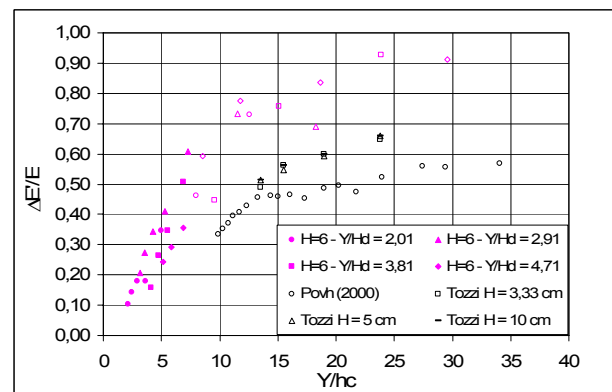


Figura 11 – Dissipação de energia em relação a um vertedouro liso (Y = posição vertical em relação à crista e Hd é a carga de projeto = 0,40 m).

A figura 11 compara os resultados descritos na Tabela 4, em função do valor adimensional Y/hc, com os obtidos por Tozzi (1992) e Povh (2000). A avaliação da energia no vertedouro de calha lisa, nos trabalhos desses autores, foi realizada com base no

método da camada limite e pelo cálculo do perfil de escoamento utilizando o método das diferenças finitas. Os valores encontrados neste trabalho são superiores aos resultados de Tozzi (1992) e Povh (2000). Por exemplo, para um mesmo valor $Y/hc = 20$, o resultado de dissipação de energia relativa de Tozzi (1992) está em torno de 60%, de Povh, aproximadamente 50%, e os resultados do presente estudo estão, aproximadamente, em torno de 80%.

Analisando o comportamento dos resultados de dissipação de energia em vertedouros de calha em degraus em relação à energia em um vertedouro de calha lisa, pode-se fazer o seguinte comentário:

- Confirma-se que a dissipação de energia em escoamentos aerados é muito mais significativa do que em escoamentos não aerados, como já observado na análise anterior. Em escoamentos aerados sobre vertedouros em degraus, os níveis de dissipação de energia, em relação a um vertedouro de calha lisa, variaram neste estudo entre 45 e 93%. Para escoamentos que não atingem a zona aerada ao longo da calha, o ganho na dissipação de energia é menos significativo.

Tabela 4 – Dissipação de energia em relação a energia no vertedouro de calha lisa (valores de modelo) - $\Delta E'/E'$

q (m ³ /s/m)	Y/Hd			
	2,01	2,91	3,81	4,71
0,05	0,73	0,69	0,93	0,91
0,10	0,46	0,73	0,76	0,84
0,20	0,35	0,61	0,45	0,78
0,32	0,18	0,41	0,51	0,59
0,45	0,18	0,34	0,35	0,36
0,58	0,14	0,27	0,26	0,29
0,70	0,10	0,21	0,16	0,24

CONCLUSÕES

Salienta-se, inicialmente, que os resultados nesta pesquisa são válidos, a princípio, para vertedouros com declividade 1V: 0,75H (53,13°) e alturas de até 25 m, respeitando a recomendação da literatura de transposição de resultados até para a escala 1:10, em estudos de escoamentos bifásicos de ar-água. Essa escala resulta em degraus de 0,60 m, que corresponde à configuração geométrica mais utilizada em vertedouros com calha escalonada.

Tem-se que o início da aeração ocorre mais a jusante, à medida que se aumenta a descarga, sendo que a partir de certo valor, para uma determinada altura de estrutura, tem-se o não afloramento da camada limite, que ocorre quando do início da aeração do escoamento. Esse fato, em conjunto com a avaliação da dissipação de energia deve ser bem observado no momento do projeto, já que se observaram menores níveis de dissipação de energia para escoamentos não-aerados.

Avaliando a razão da energia dissipada ao longo da calha pela energia a montante do vertedouro, observou-se que esta relação é tanto mais significativa quanto menor for a vazão específica escoada pelo vertedouro.

A mesma conclusão pode ser obtida quanto à energia dissipada ao longo da calha em degraus em relação à energia em um vertedouro de calha lisa.

A avaliação da energia em vários pontos ao longo da calha, em conjunto com a avaliação do início da aeração, possibilitou concluir que a energia dissipada em escoamentos aerados é bem mais expressiva do que a obtida em escoamentos não aerados. Esse fato mostra a importância de o vertedouro em degraus ser projetado para vazões que atinjam a aeração durante o escoamento pela calha, e o conhecimento da diminuição da dissipação para as maiores descargas, que se desconsideradas, podem prejudicar a estrutura para os eventos máximos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio de Furnas Centrais Elétricas S.A, a partir do financiamento do projeto de Pesquisa e Desenvolvimento "Características dos Escoamentos sobre Vertedouros em Degraus" e a CAPES pela concessão da bolsa de estudos a primeira autora. Os autores também agradecem a colaboração dos demais membros deste projeto: Jaime F. Gomes, Maurício Dai Prá, Rafael Wiest, Sérgio Nicolau Flores e Maximiliano Messa.

REFERÊNCIAS

- AMADOR, A.; SÁNCHEZ-JUNY, M.; DOLZ, J. SÁNCHEZ-TEMBLEQUE, F. e PUERTAS, J. (2004) *Estudo experimental no campo de pressões e de velocidades num descarregador de cheias em degraus*, 7º Congresso de Água de Portugal - Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos.

- BINDO, M., GAUTIER, J., LACROIX, F. (1993) *The stepped spillway of M'Bali dam*. Water Power & Dam Construction, p. 35-36.
- CHAMANI, M. R., RAJARATNAM, N. (1999) *Characteristics of skimming flow over stepped spillways*. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, New York, v. 125, n. 4, p. 361-368.
- CHANSON H. (1993) *Stepped spillway flows and air entrainment*. Canadian Journal of Civil Engineering. v. 20, n. 3, p. 422-435.
- CHANSON, H. (1994a) *Hydraulic design of stepped cascades, channels, weirs and spillways*. Pergamon, Oxford, UK, Jan., 261 p.
- CHANSON, H. (1994b) *Hydraulics of skimming flows over stepped channels and spillways*. Journal of Hydraulic Research, IAHR, Delft, v. 32, n. 3, p. 445-460.
- CHANSON, H. (1994c) *Comparison of energy dissipation between nappe and skimming flow regimes on stepped chutes*. Journal of Hydraulic Research, IAHR, Delft, v. 32, n. 2, p. 213-218.
- CHANSON, H., YASUDA, Y., OHTSU, I. (2002) *Flow resistance in skimming flows in stepped spillways and its modelling*. Canadian Journal of Civil Engineering, v. 29, p. 809-819.
- CHOW, Ven Te (1959) *Open channel hydraulics*. New York : McGraw-Hill, 680p.
- CHRISTODOULOU, G. C. (1993) *Energy dissipation on stepped spillways*. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE, New York, v. 119, n.5, p. 644-650.
- DAI PRÁ, M. (2004) *Características de Escoamentos sobre Vertedouros em Degraus de Declividade 1V: 1H*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: UFRGS, 134p.
- DAI PRÁ, M., WIEST, R. A., SANAGIOTTO, D. G., MARQUES, M. G. (2006) *Verificações em protótipo da posição de início da aeração em vertedouros em degraus*. In: V Simpósio Brasileiro sobre Pequenas e Médias Centrais Hidrelétricas, Florianópolis, SC.
- FERNÁNDEZ, F. M. *Investigacion en modelo hidraulico de un rebosadero escalonado*. In: CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, 16., 1994, Santiago. Memorias. Santiago : IAHR, 1994, p.311-323.
- GOMES, J. F. (2006) *Campo de Pressões: Condições de Incipiência à Cavitação em Vertedouros em Degraus com Declividade 1V: 0,75H*. Tese de Doutorado, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: UFRGS, 173p.
- LEJEUNE, A.; LEJENE, M. (1994). *Some considerations on the hydraulic behaviour of stepped spillways*. Proc. Intl. Conf. Modelling, Testing and Monitoring for Hydro Powerplants, UNESCO-IAHR, Budapest, Hungary. (apud Chanson 1994a)
- MATEOS IGUACEL, C., ELVIRO GARCIA, V. (1999) *Aliviaderos escalonados. Comienzo de la aireación natural. Disipación de energia en la rápida*. Revista Ingeniería Civil, Centro de Estudos e Técnicas Aplicadas, n. 113, Espanha.
- MATOS, J.; SÁNCHEZ, M.; QUINTELA, A.; DOLZ, J (1999) *Characteristic Depth and Pressure Profiles in RDZ over Stepped Spillways*, Proceedings XXVIII IAHR Congress, Graz, Austria.
- OLINGER, J. C. e BRIGHETTI, G. (2002) *Contribuição ao estudo da distribuição de pressões nos vertedouros em degraus*. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, São Paulo.
- OLINGER, J. C. e BRIGHETTI, G. (2004) *Distribuição de pressões em vertedouros em degraus*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 9, n. 1. Porto Alegre/RS: ABRH.
- 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, v.125, n. 5 p.500-510.
- 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 141p.
- RAJARATNAM, N. (1990) *Skimming flow in stepped spillways*. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, New York, v. 116, n. 4, p. 587-591.
- RICE, C. E., KADAVY, K. C. (1996) *Model study of a roller compacted concrete stepped spillways*. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, New York, v. 122, n. 6, p. 292-297.
- SANAGIOTTO, D. G. (2003) *Características do Escoamento sobre Vertedouros em Degraus de Declividade 1V: 0,75H*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: UFRGS, 118p.
- SANAGIOTTO, D. G., GOMES, J.F., DAI PRÁ, M., WIEST, R. A., MARQUES, M.G. (2004) *Posição do início da aeração em escoamentos sobre vertedouros em degraus de declividade 1V;0,75H*. In: IV Simpósio Brasileiro sobre Pequenas e Médias Centrais Hidrelétricas, Porto de Galinhas, PE.
- SÁNCHEZ-JUNY, M. e DOLZ, J. (2003) *Characterization of the pressure field over a stepped spillway in roller compacted concrete dams*. In: IV Intl. Symposium on RCC dams, Madrid, Spain.
- SORENSEN, R. M. (1985) *Stepped spillways hydraulic model investigation*. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, New York, v111, n. 12, p. 1461-1472.

- STEPHENSON, D. (1991) *Energy dissipation down stepped spillways*. Water Power & Dam Construction, Sutton, v. 43, n. 9, p. 27-30.
- TOZZI, M. J. (1992) *Caracterização/comportamento de escoamentos em vertedouros com paramento em degraus*. 302p. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo. São Paulo.
- UNITED STATES DEPARTMENT OF THE INTERIOR BUREAU OF RECLAMATION – USBR (1974) *Design of Small Dams*, Water Resources Technical Publication; Washington.
- WOOD, I. R., ACKERS, P., LOVELESS, J. (1983) *General method for critical point on spillways*. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, v. 109, n. 2, p. 308-312.

Flow Characteristics in a Stepped Spillway with 1V:0,75H slope

ABSTRACT

Stepped spillways are structures that have been much used, mainly in the last 40 years, with the advances in constructive methods, such as roller compacted concrete (RCC) and gabions. Stepped spillways are structures characterized by the significant resistance imposed on the flow and for the increase in the energy dissipation associated with the friction introduced by the steps.

This configuration results in reducing the residual energy at the toe of the structure. When stepped chutes are used, the dimensions of the downstream protection structures have a more economical design compared with those required in conventional chute spillways (smooth chute). However, although there is research on physical models and some observations in prototypes, there is no ultimate approach in the literature dedicated to the design of stepped spillways. In this work, measurements were accomplished in a physical model of a spillway with a slope of 1V: 0,75H (53.13°) and steps height of 0.06 cm. The model was installed in a channel 0.40 m wide and 2.44 m high. The accomplished measurements contemplated specific discharges between 0.025 and 0.700 m³/s/m, that, suggesting a scale of conversion of results of 1:10, correspond to discharges between 0.8 and 22.1 m³/s/m in a prototype. According to the results, a methodology was defined for the evaluation of the inception point of air entrainment, of the friction factor and of the energy dissipation along the flume.

Keywords : stepped spillway; energy dissipation; air-water flow.