UM ESTUDO SOBRE VERTEDOUROS EM DEGRAUS DE DECLIVIDADE 1V:1H

A STUDY OF THE STEPPED SPILLWAYS WITH 1V:1H SLOPE

Mauricio Dai Prá
Dr. Eng. Civil /// mdaipra@gmail.com /// Centro de Desenvolvimento Tecnológico/Engenharia Hídrica – Universidade Federal de Pelotas – UFPEL /// Rua Gomes Carneiro, 01 CEP 96010-610 Pelotas, RS, Brasil

Luis Eduardo Akiyoshi Sanches Suzuki
Dr. Eng. Agrônomo /// dusuzuki@gmail.com /// Centro de Desenvolvimento Tecnológico/Engenharia Hídrica – Universidade Federal de Pelotas – UFPEL /// Rua Gomes Carneiro, 01 CEP 96010-610 Pelotas, RS, Brasil

Alexandre Augusto Mees Alves
Msc. Eng. Civil /// alexandremees@gmail.com /// Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS /// Caixa Postal 15029 CEP 91501-970 Porto Alegre, RS, Brasil

Marcelo Giulian Marques
Dr. Eng. Civil /// mmarques@iph.ufrgs.br /// Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS /// Caixa Postal 15029 CEP 91501-970 Porto Alegre, RS, Brasil

RESUMO: Este estudo visou a caracterização geral dos escoamentos deslizantes sobre turbilhões em vertedouros em degraus com declividade de 45° (1V:1H) através da análise experimental em modelos físicos. Foram avaliados os aspectos gerais do escoamento, especialmente aqueles relacionados aos níveis médios da água, às pressões médias nos degraus e à visualização da aeração do escoamento, permitindo, assim, o estabelecimento de parâmetros qualitativos e quantitativos do escoamento. Foram avaliadas quatro estruturas, sendo uma com calha lisa e três com calhas em degraus de alturas constantes iguais a 0.03m, 0.06m e 0.09m. Tendo em vista a escassa bibliografia relativa à declividade de 45°, procurou-se a comparação com os dados de diferentes declividades procurando estabelecer critérios generalistas. Serão abordados, aqui, os aspectos relativos ao comportamento da superfície livre d'água e dos turbilhões nos degraus, à posição de início de aeração e aqueles relativos às pressões médias atuantes nos degraus.

Palavras-Chave: vertedouros em degraus, estruturas hidráulicas, escoamento deslizante sobre turbilhões.

ABSTRACT: This study aims to characterize the skimming flow on stepped spillways with 45º slope through experimental analysis of physical models. General aspects of the flow were evaluated, notably those related to average water levels, average pressures on the steps and the visualization of the flow aeration, allowing the establishment of qualitative and quantitative flow parameters. Four structures were evaluated, one smooth spillway and three stepped chute spillways with constant step heights of 0.03m, 0.6m and 0.09m. Since the bibliography regarding the 45º slope is scarce, a comparison with data obtained from different slopes was used trying to establish broader criteria. This study will approach the aspects regarding the behavior of the free surface and the skimming flow on stepped spillways to the inception point of air entrainment and those related to the average pressure acting on the steps.

Keywords: stepped spillways, hydraulic structures, skimming flow.

1. 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 busca por estruturas de dissipação de dimensões reduzidas a jusante de vertedouros justifica a necessidade da correta caracterização dos escoamentos neste tipo de estrutura descarregadora em degraus, pela sua consequência imediata na dissipação de energia do escoamento.

Encontram-se diversos trabalhos com calhas com declividades em torno de 1V:0.75H, por ser esta uma configuração típica das barragens executadas em concreto, em que se estuda fundamentalmente o escoamento deslizante sobre turbilhões. Para menores declividades, 1V:3H a 1V:7H, a bibliografia disponível estuda com maior ênfase o escoamento em quedas sucessivas. Poucos trabalhos avaliam a declividade específica de 1V:1H, podendo serem citados Peyras et al. (1992) (degraus executados com gabiões).

A proposta deste artigo, desenvolvido a partir do trabalho de Dai Prá (2004), propõe o estudo de vertedouros em degraus com declividade de 45°, especialmente no regime de escoamento deslizante sobre turbilhões.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Regimes de Escoamento

O escoamento sobre calhas, canais e vertedouros em degraus subdivide-se em duas classes: nappe flow e skimming flow, de acordo com Rajaratnam (1990) e Diez-Cascon *et al.* (1991), entre outros. A nomenclatura aqui utilizada será respectivamente, escoamento em quedas sucessivas (nappe flow) e escoamento deslizante sobre turbilhões (skimming flow), conforme denominação de Matos e Quintela (1995). Uma terceira classificação dos escoamentos foi instituída por Ohtsu e Yasuda (1997), que o denominam por "escoamento de transição" por tratar-se de um regime de escoamento intermediário.

2.2. Escoamento Deslizante sobre Turbilhões

Caracteriza-se por um escoamento principal deslizando sobre os degraus. Turbilhões formados pela recirculação do fluido retido na cavidade entre os degraus funcionam como rolamentos para o escoamento principal. Os cantos externos dos degraus conformam um pseudofundo no qual vórtices de recirculação de fluido se desenvolvem e se mantêm devido à transmissão da quantidade de movimento entre a corrente principal e os turbilhões (Chanson, 2001). Esse processo é o responsável pela dissipação da energia cinética do escoamento.

Segundo Pegram et al. (1999), o escoamento deslizante sobre turbilhões é composto por duas zonas distintas: a primeira, próxima ao vértice dos degraus, é composta por água aerada, ou seja, pela mistura de água com bolhas de ar imersas no escoamento; a segunda, mais afastada dos degraus, é composta por gotas de água de diferentes tamanhos imersas em uma massa de ar circundante ao escoamento.

Chamani e Rajaratnam (1999) definiram o início do escoamento deslizante sobre turbilhões a partir da visualização do escoamento. Os autores perceberam que o escoamento deslizava sobre os degraus antes mesmo da cavidade de ar entre os degraus estar completamente preenchida. Isso ocorre quando o jato proveniente do degrau anterior é paralelo à declividade da calha.

A Figura 1 representa uma coletânea entre trabalhos experimentais que avaliaram as condições limites de escoamentos em quedas sucessivas e/ou deslizante sobre turbilhões.

2.3. Aeração do Escoamento

Nos vertedouros em degraus, a região em que o processo de aeração inicia é caracterizada pela alta turbulência da camada limite que, neste ponto, atinge a superfície do escoamento. Tozzi (1992) e Chanson (1993) definem como comprimento de início de aeração (L_A) aquela distância ao longo do perfil da calha a partir do início da ogiva do vertedouro, onde a camada limite começa a se desenvolver até o ponto onde sua espessura (δ) atinge a superfície livre do escoamento.

A jusante da posição de início de aeração o escoamento apresenta uma mistura não homogênea de água e ar. Mais a jusante, o escoamento apresenta-se completamente aerado, atingindo a condição de escoamento uniforme, no qual a profundidade, a concentração de ar e as distribuições de velocidade não variam ao longo da calha (Chanson, 1993). As regiões descritas anteriormente estão ilustradas pela Figura 2.

O texto deste artigo foi submetido para revisão e possível publicação em Março de 2012, tendo sido aceite pela Comissão de Editores Científicos Associados em Abril de 2012. Este artigo é parte integrante da ***Revista Recursos Hídricos***, Vol. 33, Nº 1, 17-28, Maio de 2012.
© APRH, ISSN 0870-1741 | DOI 10.5894/rh33n1-2

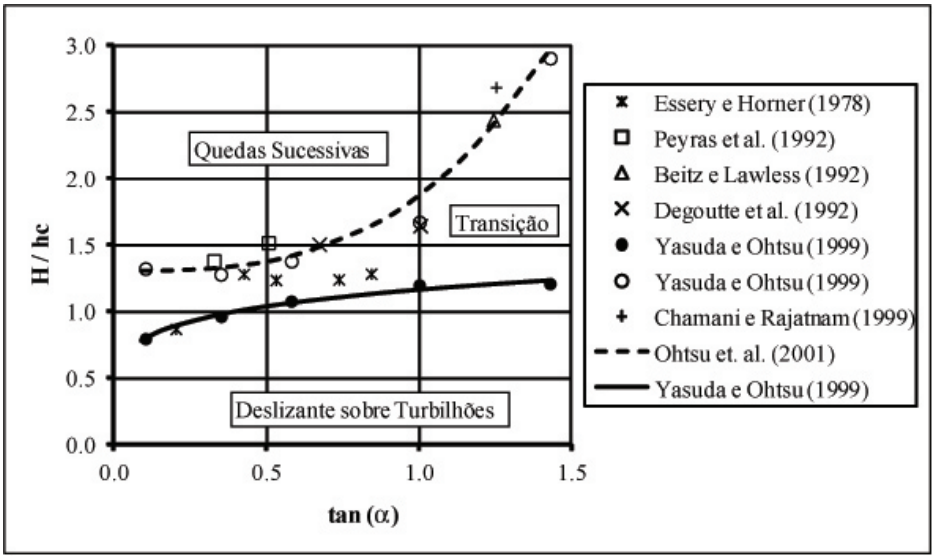


Figura 1 – Escoamentos deslizante sobre turbilhões, de transição e quedas sucessivas. Fonte: Ohtsu et al. (2001).

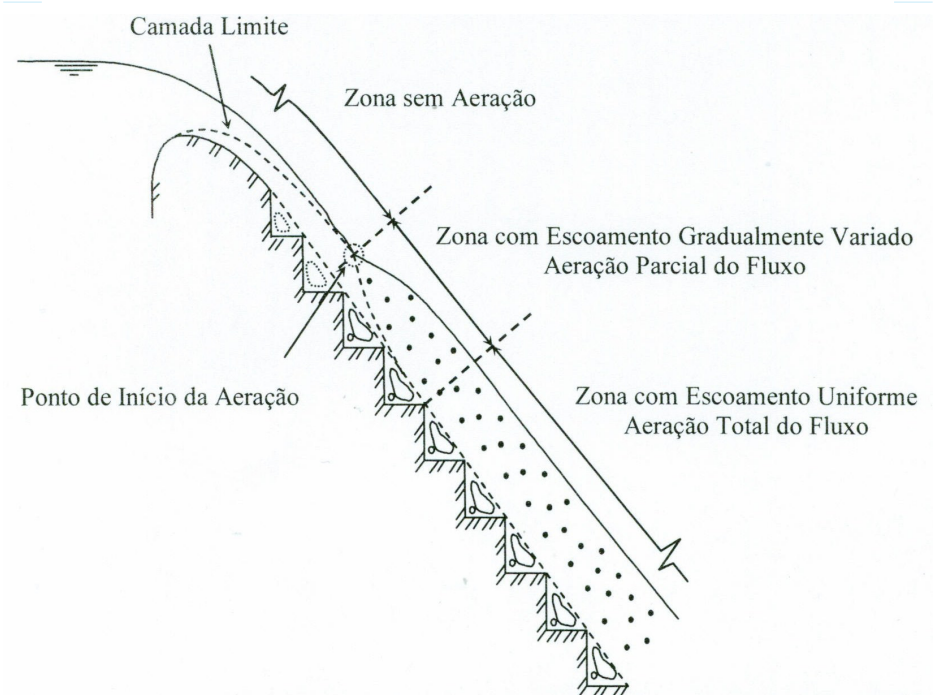


Figura 2 – Regiões do escoamento sobre vertedouros em degraus, conforme Chanson (1993).

Iguacel e Garcia (1999) definem a posição de início de aeração como sendo o degrau onde a presença de bolhas de ar é constante na rugosidade formada abaixo do pseudofundo. Sanagiotto (2003) assume que a posição de início de aeração é aquela a partir da qual foi verificada a estabilidade dos vórtices de recirculação aerados que se formaram na rugosidade proporcionada pelos degraus.
A Tabela 1 apresenta de forma resumida as principais proposições teóricas e experimentais acerca da posição de início de aeração.

2.4. Pressões na Calha em Degraus

A preocupação com as consequências decorrentes da cavitação em vertedouros em degraus ganha importância a partir da tendência de que sejam projetadas estruturas cada vez mais altas, submetidas a maiores vazões e com degraus de grande altura. A combinação inadequada destes fatores pode fazer com que os degraus dos vertedouros estejam submetidos a maiores velocidades e a escoamentos não aerados, o que proporciona características muito favoráveis para a ocorrência da cavitação.
Tozzi (1992) detectou pressões médias positivas no trecho final do piso de degrau, evidenciando uma região de impacto do escoamento. Pressões médias negativas foram verificadas no espelho do degrau devido ao movimento de recirculação do vórtice na rugosidade da calha. A análise das pressões nas estruturas ensaiadas indica a necessidade de se estabelecer um critério limitante para as vazões e para as velocidades médias, como forma de evitar a cavitação nos degraus.
Sanagiotto (2003) avaliou as pressões médias ao longo de vertedouros em degraus no qual foi possível detectar o aumento das pressões no piso do degrau com o aumento do tamanho destes. Já as pressões médias mínimas foram detectadas no espelho dos degraus, nas posições próximas ao vértice superior.
Sánchez-Juny (2001), Amador (2005), Sánchez-Juny e Dolz (2005) detalharam as pressões hidrodinâmicas nos interiores dos degraus e em várias posições ao longo dos vertedouros. As solicitações mais críticas foram localizadas nas extremidades externas dos degraus e nos trechos próximos à seção de afloramento da camada limite.
Gomes (2006) estabelece uma metodologia para estimativa de limites de incipiência à cavitação a partir dos coeficientes de pressão com probabilidade de 0.1% de ocorrência de valores inferiores. A metodologia converge para o estabelecimento de regiões com e sem risco de cavitação, avaliadas ao longo da calha do vertedouro e do ponto de vista da posição de início de aeração.

3. INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL E METODOLOGIA

A pesquisa abordou testes em modelos físicos bidimensionais de vertedouros em degraus com calha de declividade 45º (1V:1H). As estruturas de ensaio tinham desnível de 2.44m, entre a crista do vertedouro e a base do canal de fuga, largura de 0.4m e calhas com degraus de 0.03, 0.06 e 0.09m de altura, além de uma calha lisa convencional. As vazões específicas estavam compreendidas entre 0.025 e 0.700m³/s/m. Os ensaios foram conduzidos no Laboratório de Hidráulica do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

3.1. Instalação Experimental

A ogiva do vertedouro é do tipo Creager e foi projetada 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.
As características das calhas vertentes estudadas neste trabalho são ilustradas pela Figura 3 onde se apresentam as dimensões e os degraus onde foram estabelecidas as seções principais de ensaio.
Foram estabelecidas sete seções de ensaios sobre as quais efetuaram-se medições de nível médio d'água e pressões médias nos degraus. Perfis de velocidades médias e pressões "instantâneas" também foram avaliadas experimentalmente, mas não são abordadas neste artigo.

3.2. Metodologia

3.2.1. Medição dos Níveis de Água

A medição dos níveis da água foi executada através da utilização de ponta linimétrica centralizada na largura do canal e orientada perpendicularmente ao plano da calha formado pelo vértice dos degraus.

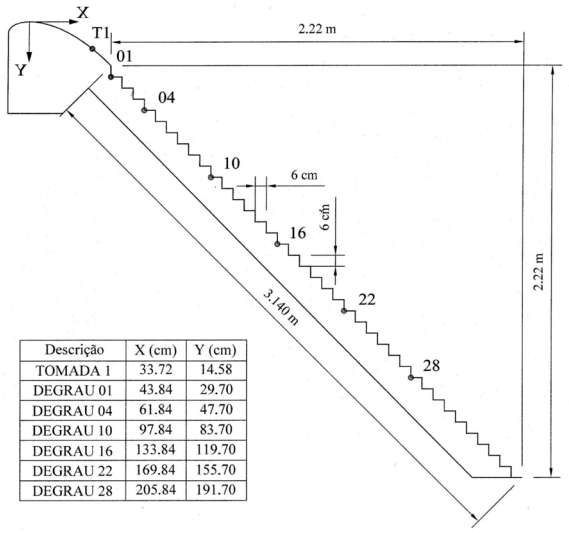
3.2.2. Medição de Pressões

As pressões atuantes nos degraus dos vertedouros foram medidas através de sensores piezoresistivos para medição de pressões instantâneas e através de quadros de piezômetros para a obtenção de pressões médias.

Tabela 1 – Resumo das proposições teóricas e experimentais acerca da posição de início de aeração.

Autor	Características	Equação	
Tozzi (1993)	53.13°	$\frac{\delta}{L_A} = 0.08\left(\frac{L_A}{k}\right)^{-0.233}$	$k = H\cos(\alpha)$
Chanson (1994)	27° a 52°	$\frac{L_A}{k} = 9.8(sen\alpha)^{0.08}(F^*)^{0.71}$	$F^* = q\Big/\sqrt{(gk^3 sen\alpha)}$
		$\frac{h_A}{k} = \frac{0.40}{(sen\alpha)^{0.04}}(F^*)^{0.64}$	
Lejeune e Lejeune (1994)		$L' = 2.2724 + 1.7601q$	
Iguacel e Garcia (1999)	1V:0,75H e 1V:0,8H 0.009 e 0.012m	$\frac{L'}{H} = 5.6\left(\frac{q}{H\sqrt{gH}}\right)^{0.8}$	
Chanson e Toombes (2002)	21.8° 0.1m	$\frac{L_A}{k} = F^{*0.465}\frac{12.34}{(sen\alpha)^{0.0796}}$	
Sanagiotto (2003)	1V:0,75H 0.03m, 0.06m e 0.09m	$\frac{L_A}{k} = 9.7721F^{*0.7014}$	$\frac{h_A}{k} = 0.3965F^{*0.5975}$

onde: H é a altura do degrau; α a declividade da calha; g é a aceleração da gravidade; q é a vazão específica; L´ é a diferença de cotas entre a crista do vertedouro e a altura média do degrau de início de aeração.



Descrição	X (cm)	Y (cm)
TOMADA 1	33.72	14.58
DEGRAU 01	43.84	29.70
DEGRAU 04	61.84	47.70
DEGRAU 10	97.84	83.70
DEGRAU 16	133.84	119.70
DEGRAU 22	169.84	155.70
DEGRAU 28	205.84	191.70

Figura 3 – Modelos dos vertedouros: calha com degraus de 0.06m.

As tomadas de pressão estão alinhadas no sentido do escoamento, centralizadas na largura da calha e equidistantes entre si em ambas as faces do degrau. Desta forma foram previstas três tomadas, tanto no piso quanto no espelho, para o degrau de 0.03m e quatro tomadas em cada face nos degraus de 0.06m (Figura 4) e 0.09m.

3.2.3. Início de Aeração do Escoamento

A posição média de início de aeração do escoamento foi determinada através de visualização. Assumiu-se duas posições distintas de início de aeração: a primeira, mais a montante, quando surgem as primeiras bolhas de ar na rugosidade formada pelos degraus e a segunda, quando a aeração está completamente desenvolvida, através da verificação da estabilidade dos vórtices aerados recirculando entre os degraus.

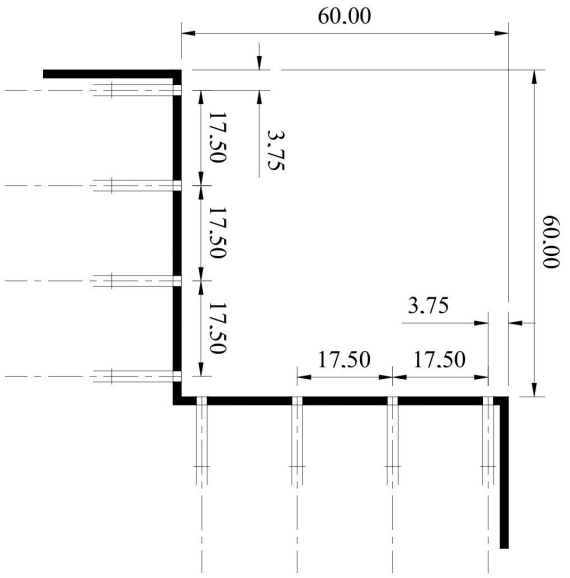


Figura 4 – Posições das tomadas de pressão (medidas em milímetros): H = 0,06m.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste estudo buscaram a caracterização geral do escoamento deslizante sobre turbilhões em vertedouros com calhas de declividade 1V:1H e providas de degraus com altura de 0.03, 0.06 e 0.09m.

4.1. Superfície Livre da Água

A descrição do comportamento da superfície livre foi apresentada através da definição de três zonas distintas:

Na primeira, a montante da posição de início de aeração intermitente, a superfície do escoamento apresentava-se lisa e com pequenas perturbações. À medida que se atingem posições mais a jusante, as profundidades medidas diminuíam até o ponto onde se inicia o processo de aeração.

A segunda região, na zona em que o escoamento não estava completamente aerado, se caracteriza por intensa instabilidade da linha da água. A aeração parcial do escoamento fez com que surgissem pequenas bolhas de ar na rugosidade formada pelos degraus, aumentando em quantidade e em profundidade para posições mais a jusante.

Após o escoamento apresentar aeração constante ao longo da seção transversal (terceira região), o comportamento da linha da água permaneceu mais estável. A grande quantidade de ar incorporada pelo escoamento tornou a superfície livre repleta por respingos, porém de presença constante e uniforme.

Para o escoamento a jusante da posição de início de aeração firme, determinou-se a sua profundidade média constante (h_n), pela média aritmética dos níveis da água nas seções onde o escoamento apresentava-se aerado, admitindo que o escoamento seja uniforme nesta região, seguindo as recomendações de Chanson (1993). O Quadro 1 apresenta os resultados obtidos.

4.2. Posição de Início de Aeração

A verificação das posições de início de aeração do escoamento veio ao encontro das três regiões distintas

Quadro 1 – Profundidades normais (h_n) a partir da consideração de escoamento uniforme, segundo critério de Chanson (1993), para as vazões em que se verificou a plena aeração do escoamento.

q (m³/s/m)	h_n (m)		
	H = 0.03m	H = 0.06m	H = 0.09m
0.025	0.014	*	*
0.050	0.024	0.026	*
0.100	0.040	0.040	0.039
0.150	0.048	0.051	0.054
0.200	0.059	0.048	0.060
0.250	*	0.070	0.067
0.325	*	*	0.069

** Não se atingiu o escoamento deslizante sobre turbilhões ou não se identificou a plena aeração do escoamento.*

detectadas na análise anterior. A posição de início de aeração intermitente dividiu o escoamento entre regiões aeradas e não aeradas. Na região aerada percebeu-se que a incorporação de ar aumentava com o desenvolvimento da calha. No ponto em que a seção transversal encontrava-se completamente aerada se estabeleceu a posição de início de aeração firme a partir da qual o escoamento totalmente aerado pode ser considerado uniforme.

Com o aumento da altura de rugosidade proporcionada pelos degraus, a espessura da camada limite atingiu mais rapidamente a superfície livre da água, antecipando o processo de aeração.

A Figura 5 apresenta a comparação entre os dados relativos ao início da aeração firme obtidos experimentalmente e as proposições teóricas e experimentais constantes na bibliografia.

Efetuou-se também uma comparação baseada nos pressupostos de Iguacel e Garcia (1999), que consideraram a diferença de cotas entre a crista do vertedouro e o degrau onde ocorreu o início da aeração (L'). Propôs-se a adimensionalização da energia a montante do vertedouro (E_A) (Equação 1) responsável pelo início da aeração do escoamento, pela altura de rugosidade (k).

$$E_A = L' + 1.5h_c \qquad (1)$$

A partir da Figura 6, este estudo propôs a Equação 2, determinada com coeficiente de determinação 0.96, para definir a posição de início de aeração do escoamento.

$$\frac{E_A}{k} = 7.0F^{*0.755} \qquad (2)$$

A profundidade do escoamento na posição de início de aeração (h_A) pode ser verificada através da sua adimensionalização pela altura de rugosidade, segundo Wood et al. (1983). A inclusão dos dados do presente estudo na comparação com a proposta de Sanagiotto (2003) (Figura 7) apresentou resultados consistentes, recomendando-se, então, a utilização da Equação 3 proposta por Sanagiotto (2003), ampliando sua faixa de aplicação para calhas com 45° de declividade.

$$\frac{h_A}{k} = 0.3965F^{*0.5975} \qquad (3)$$

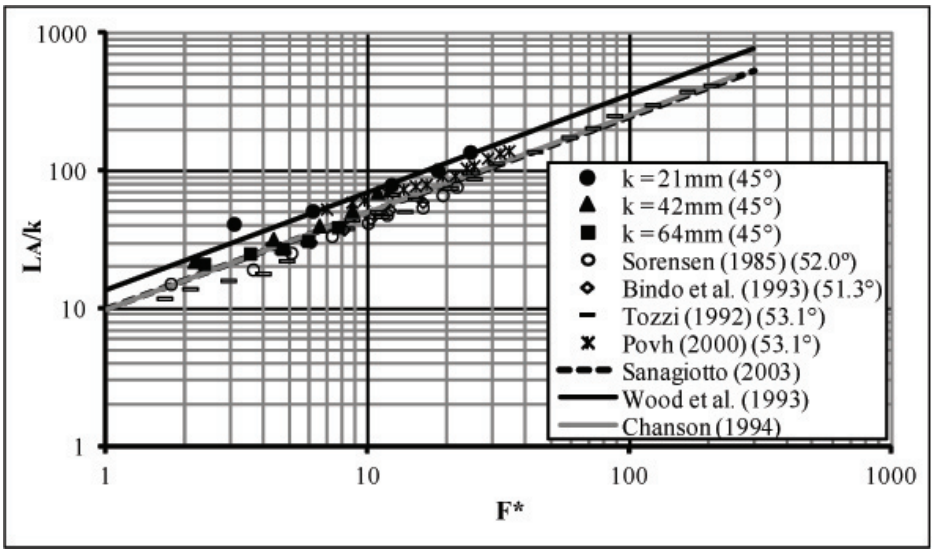


Figura 5 – Posições de início de aeração firme.

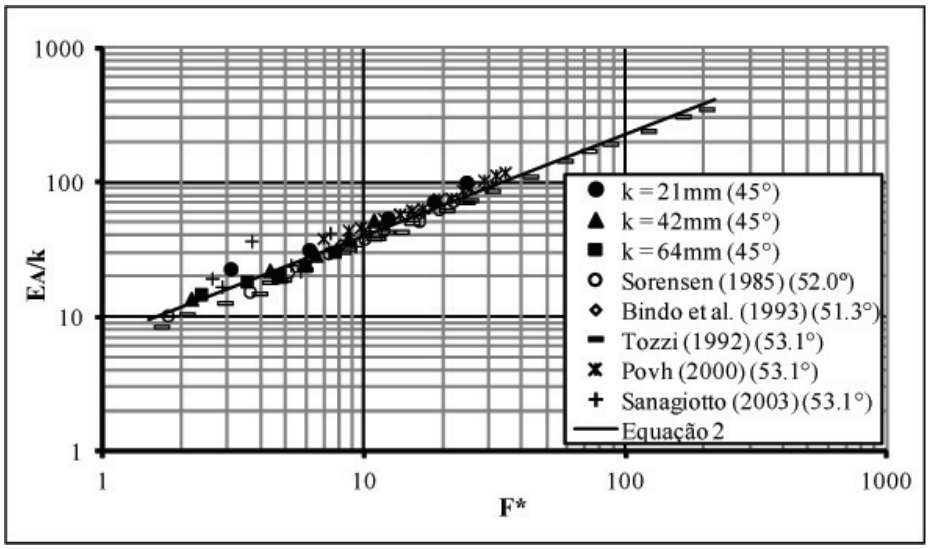


Figura 6 – Comparação entre os dados experimentais a partir da consideração da energia de montante.

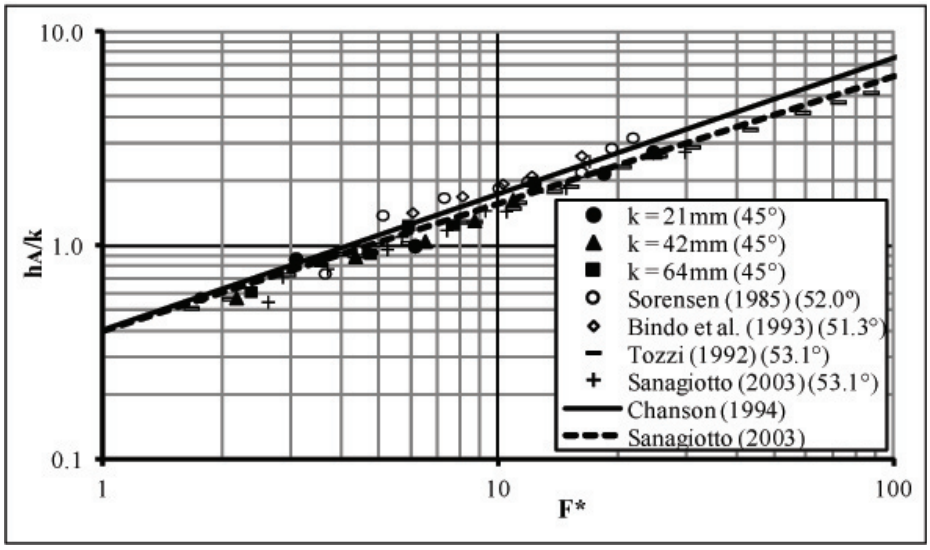


Figura 7 – Profundidades do escoamento na posição de início de aeração.

4.3. Avaliação qualitativa dos turbilhões de recirculação nos degraus

A partir da visualização do fluido abaixo do pseudofundo identificaram-se algumas características referentes ao comportamento dos turbilhões nesta região.
Analisando um degrau A percebeu-se um turbilhão de forma mais arredondada formado no piso do degrau, cujo centro oscilava, ora em direção ao espelho do mesmo degrau, ora para a extremidade do piso. O sentido horário de giro fazia com que o turbilhão funcionasse como um "rolamento" por onde o escoamento principal deslizava.
Avaliando um degrau B mais a jusante, percebeu-se que o centro do turbilhão situava-se junto ao espelho, oscilando ora em direção ao piso do degrau, ora em direção a extremidade superior do espelho. O sentido de giro também era horário, porém a sua forma era mais achatada do que aquele verificado no piso do degrau A.
Observando um degrau C, imediatamente a jusante do degrau B, observou-se um comportamento geral do turbilhão muito semelhante àquele detectado no degrau A.
A Figura 8 ilustra a descrição acima, de onde se conclui que os turbilhões de recirculação se comportam da mesma forma em degraus intercalados ao longo de toda a calha.
Após algum tempo, observou-se uma inversão do comportamento dos turbilhões nos degraus, quando aqueles mais arredondados do piso deslocaram-se para o espelho, assumindo uma forma mais alongada. Por outro lado, os turbilhões alongados do espelho arredondaram-se mais à medida que se deslocaram para o piso dos degraus. Avaliando um trecho da calha continuamente por um longo tempo percebeu-se essa inversão contínua no comportamento dos turbilhões.
O formato arredondado dos turbilhões no piso poderia ser atribuído ao impacto do escoamento principal na extremidade do degrau, quando uma pequena parte do jato pareceu deslocar-se no sentido de montante ao longo do comprimento do degrau, proporcionando o movimento de giro no sentido horário verificado.
Já o formato mais achatado do turbilhão que se observou no espelho pode ser atribuído ao peso do fluido proveniente de montante. Este fluido, que foi impulsionado pelo turbilhão do piso do degrau B, tendeu a impactar no piso do degrau C.

4.4. Pressões Médias

Os máximos valores de pressões médias foram verificados nas tomadas mais extremas do piso do degrau, onde ocorre maior impacto do escoamento. Já os mínimos valores médios foram verificados no espelho do degrau, nas tomadas mais próximas ao vértice externo. A presença de pressões negativas nesta região evidenciou a presença de esforços de tração atuando no espelho do degrau. Verificaram-se pressões negativas aumentando gradativamente com o aumento da vazão até valores positivos.
A ocorrência de pressões médias negativas no espelho do degrau e de pressões positivas no piso veio ao encontro da discussão apresentada no item referente ao comportamento dos turbilhões na rugosidade formada pelos degraus. Assim, o sentido horário de rotação dos turbilhões confirmou o comportamento geral das pressões médias nas faces dos degraus.
Seguindo a proposta de Tozzi (1992), as pressões médias (na forma de altura piezométrica) foram adimensionalizadas pela energia cinética (na forma de altura cinética) do escoamento do degrau

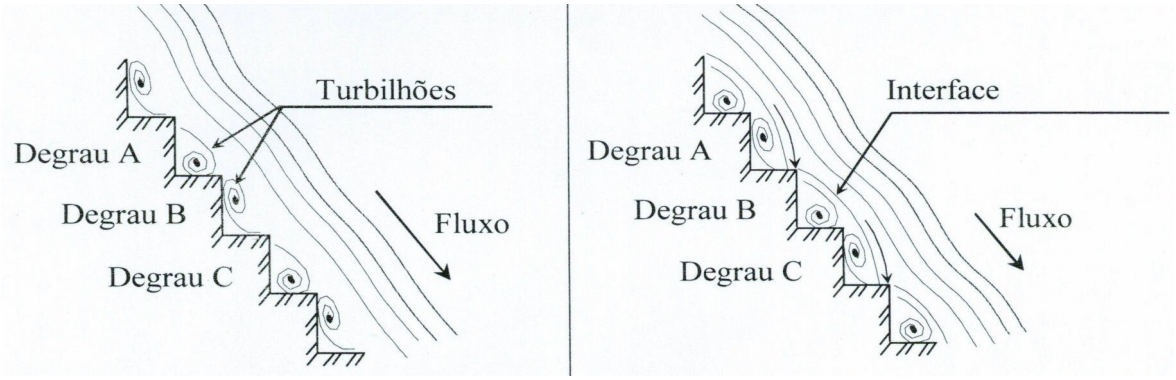


Figura 8 – Comportamento dos turbilhões no pseudofundo.

correspondente (Equação 4). A velocidade foi determinada a partir das profundidades do escoamento medidas junto ao vértice externo dos degraus. A Figura 9 ilustra o comportamento dos coeficientes de pressão na seção de ensaio 6 para a calha com H = 0.09m.

$$K = \frac{p/\gamma}{V^2/(2g)} \qquad (4)$$

onde p/γ é a altura piezométrica, V é a velocidade média do escoamento.

Avaliando os coeficientes de pressão no espelho de todos os degraus, percebeu-se que, para escoamentos não aerados, a distribuição das pressões foi bastante semelhante, ao passo que nos escoamentos que se apresentavam aerados, foram verificadas curvas mais dispersas e nem sempre com a mesma tendência. Situação semelhante pode ser verificada pela avaliação dos coeficientes de pressão no piso dos degraus.

Os resultados obtidos acerca do comportamento das pressões médias nas faces dos degraus vão ao encontro daqueles apresentados por Tozzi (1992), Olinger (2001) e Sanagiotto (2003), que avaliaram calhas com declividade 1V:0.75H. Isso indica que independente da declividade da calha do vertedouro em degraus o comportamento das pressões tende a se comportar de forma bastante semelhante, especialmente quanto à localização nos degraus (piso e espelho) das máximas e mínimas pressões médias.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

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

Recomenda-se que a aplicação dos resultados desta pesquisa fique restrita a vertedouros com alturas de até 25m providos de degraus com altura máxima de 0.9m, desde que utilizada a escala máxima de transposição sugerida igual a 1:10. Tais condicionantes foram estabelecidas a partir das dimensões do modelo físico utilizado neste estudo com vistas a redução dos efeitos de escala verificados em estudos experimentais que envolvem escoamentos aerados.

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 Daniela Sanagiotto, Rafael Wiest e Jaime Gomes.

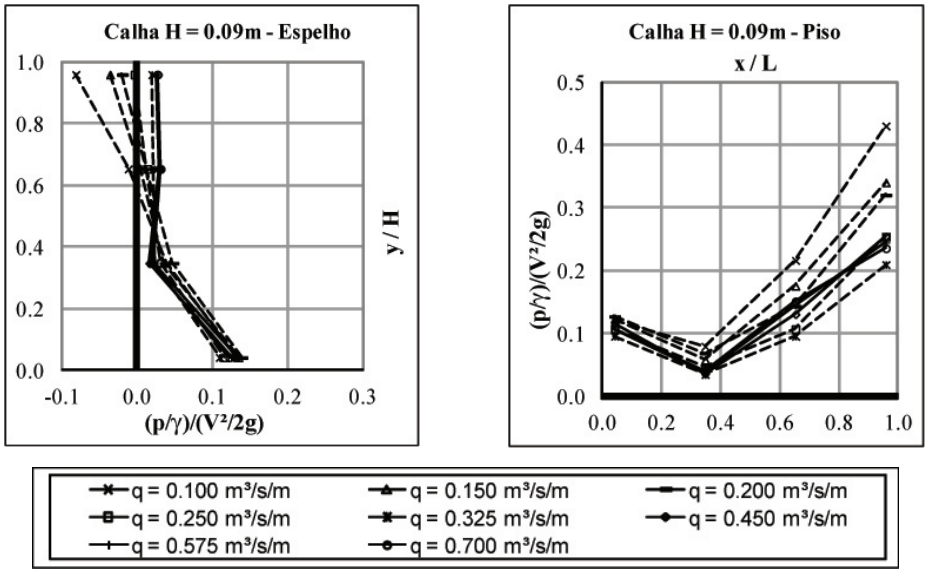


Figura 9 – Coeficientes de pressão na seção de ensaio 6 para a calha com degraus de 0.09m de altura. As linhas tracejadas correspondem a escoamentos aerados e as linhas cheias, a escoamentos não aerados.

BIBLIOGRAFIA

AMADOR, A (2005) - Comportamiento Hidráulico de los Aliaderos escalonados em presas de hormigón compactado. Tese de doutoramento. Universitat Politècnica de Cataluya (UPC), Barcelona.

BINDO, M., GAUTIER, J., LACROIX, F. (1993) - The Stepped Spillway of M'Bali Dam. Water Power & Dam Construction, p. 35-36, January.

CHAMANI, M. R.; RAJARATNAM, N. (1999) - Onset of Skimming Flow on Stepped Spillways. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, New York, v. 125, n. 9, p. 969-971, September.

CHANSON, H. (1993) - Stepped Spillway Flow and Air Entrainment. Canadian Journal of Civil Engineering, v. 20, n. 3, p. 422-435, June.

CHANSON, H. (1994) - Hydraulics of Skimming Flows over Stepped Channels and Spillways. Journal of Hydraulic Research, IAHR, Delft, v. 32, n. 3, p. 445-460.

CHANSON, H. (2001) - Hydraulic Design of Stepped Spillway and Downstream Energy Dissipators. Dam Engineering, v. 11, n. 4, p. 205-242.

CHANSON, H.; TOOMBES, L. (2002) - Experimental Investigation of Air Entrainment in Transition and Skimming Flows down a Stepped Chute. Canadian Journal of Civil Engineering, v. 29, p. 145-156.

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.

DEGOUTTE, G.; PEYRAS, L.; ROYET, P. (1992) - Skimming Flow in Stepped Spillway – Discussion. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, New York, v. 118, n. 1, p. 111-113, January.

DIEZ-CASCON, J.; BLANCO, J. L.; REVILLA, J.; GARCIA, R. (1991) - Studies on the Hydraulic Behavior of Stepped Spillways. Water Power & Dam Construction, Sutton, v. 43, n. 9, p. 22-26, September.

GOMES, J. F. (2006) - Campo de Pressões: condições de incipiência à cavitação em vertedouros em degraus com declividade 1V:0,75H. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: UFRGS, 229 p.

IGUACEL, C. M.; GARCIA, V. E. (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. S. G.; QUINTELA, A. C. (1995) - Descarregadores de Cheias em Degraus: Posição Actual da Avaliação da Dissipação de Energia. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 11., 1995, Recife. Anais. Recife: ABRH, 1995. v. 4, p. 65-71.

OHTSU, I.; YASUDA, Y. (1997) - Characteristics of Flow Conditions on Stepped Channels. Proc. 27th IAHR Congress, theme D, San Francisco, p. 583-588.

OHTSU, I.; YASUDA, Y.; TAKAHASHI, M. (2001) - Onset of Skimming Flow on Stepped Spillways – Discussion. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, New York, v. 127, p. 522-524.

OLINGER, J. C. (2001) - Contribuição ao Estudo da Distribuição de Pressões nos Vertedouros em Degraus. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo. São Paulo: USP, 230 p.

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, May.

PEYRAS, L.; ROYET, P.; DEGOUTTE, G. (1992) - Flow and Energy Dissipation over Stepped Gabion Weirs. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, New York, v. 118, n. 5, p. 707-717, May.

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, April.

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.

SÁNCHEZ-JUNY, M. (2001) - Comportamiento hidráulico de los aliviaderos escalonados em presas de hormigón compactado. Análisis del campo de presiones. Dissertação de doutoramento. Universidade Politécnica da Catalunha.

SÁNCHEZ-JUNY, M. e DOLZ, J. (2005) - Experimental study of transition and skimming flows on stepped spillways in RCC dams: qualitative analysis and pressure measurements. Journal of Hydraulic Research, volume 43, n. 5.

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

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.

WOOD, I. R.; ACKERS, P.; LOVELESS, J. (1983) - General Method for Critical Point on Spillways. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, New York, v. 109, n. 2, p. 308-312.

YASUDA, Y.; OHTSU, I. (1999) - Flow Resistance of Skimming Flow in Stepped Channels. In. Congress IAHR, 28. Graz, Austria, August.