

Características de Escoamento Sobre Vertedouros em Degraus

M. G. Marques, IPH; J. F. Gomes, IPH; D. Sanagiotto, IPH; M. Dai Prá, IPH; R. Wiest, IPH; L. A. M. Endres, IPH e J. C. Q. Bastos, FURNAS

Resumo- O presente trabalho faz parte da pesquisa “Características de Escoamentos sobre Vertedouros em Degraus”, desenvolvida pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS em parceria com Furnas Centrais Elétricas S.A. Este documento, por sua vez, tem como objetivo apresentar um resumo dos resultados obtidos em vertedouros em degraus com declividades 0,75 H : 1,00 V (53,13°) e 1,00 H : 1,00 V (45,00°). Para cada uma das declividades foram ensaiados geometrias de calhas com degraus com 3 cm, 6 cm e 9 cm de alturas. Foram analisados a posição de início de aeração, as velocidades médias, o fator de resistência, a dissipação de energia e as pressões médias ao longo da calha.

Palavras-chave—vertedouro em degraus, dissipação de energia, dissipador de energia, vertedouro escalonado e escoamento aerado.

I. INTRODUÇÃO

Há mais de 3000 anos, canais e calhas vertentes, cujos fundos são formados pela sucessão de degraus, têm sido utilizados pelas diversas civilizações. O mais antigo vertedouro em degraus que se tem notícia está localizado em Akarnanian – Grécia - construído por volta de 1300 A.C.. Ele tinha 10,5 m de altura, 25 m de comprimento, declividade média de 45° e degraus variando entre 60 e 90 cm de altura [8].

A referência [8] relata a existência de outras duas barragens antigas no Iraque providas de vertedouros em degraus. Segundo o autor, as barragens foram construídas pelos Assírios por volta de 694 A.C. e seus objetivos eram garantir o abastecimento de água da capital assíria Niniveh (atual Mossul). Mais tarde, o império romano construiu estruturas

deste tipo na Síria, Líbia e Tunísia (barragem de Kasserine, por exemplo). Posteriormente, os muçulmanos executaram barragens na Espanha.

Após a reconquista da Espanha, engenheiros espanhóis, beneficiados pelo conhecimento das civilizações anteriores, construíram também barragens com vertedouros em degraus, tais como as barragens de Almansa e de Alicante. Os espanhóis foram os responsáveis pelas primeiras barragens com calhas em degraus na América, decorrentes da colonização do território mexicano [8].

Conforme [8], a adoção de calhas em degraus nas barragens da Antigüidade se deu, muito provavelmente, por questões estruturais de estabilidade do maciço. Todavia, esse trabalho relatou canais de irrigação dotados de degraus responsáveis pela dissipação da energia do escoamento. A barragem de New Croton (1906) foi, segundo [8], a primeira construída sob esse conceito de dissipação de energia em calhas de vertedouros.

A partir da década de 70, com o surgimento de novos materiais e técnicas construtivas, como o concreto compactado a rolo (CCR) e as estruturas em gabiões, o interesse por calhas em degraus tornou-se objeto de estudo de pesquisadores e profissionais da engenharia hidráulica. Foi, então, desta forma que essas estruturas passaram a ser comumente utilizadas em barragens em CCR, devido a vantagens econômicas e construtivas inerentes.

No Brasil, a difusão do CCR despertou o interesse nos paramentos 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°.

O escoamento sobre calhas, canais e vertedouros em degraus pode ser dividido nas seguintes classes associadas às concentrações de vazões sobre as mesmas: *nappe flow* e *skimming flow*, de acordo com [16] e [13]. A nomenclatura aqui utilizada será respectivamente, escoamento em quedas sucessivas (*nappe flow*) e escoamento deslizante sobre turbilhões (*skimming flow*), conforme denominação de [14].

Este trabalho tem como objetivo apresentar um resumo dos resultados obtidos em vertedouros em degraus com declividades 0,75H:1,00V (53,13°) e 1,00H:1,00V (45,00°). Para cada uma das declividades foram ensaiados geometrias de calhas com degraus com 3 cm, 6 cm e 9 cm de alturas. Foram analisados a posição de início de aeração, as velocidades médias, o fator de resistência, a dissipação de energia e as pressões médias ao longo da calha.

Este trabalho foi apoiado por Furnas Centrais Elétricas S.A.

M.G.Marques, trabalha no Instituto de Pesquisas Hidráulicas (e-mail: mmarques@iph.ufrgs.br.br).

J. F. Gomes, Aluno de doutorado do Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do IPH/UFRGS (e-mail: jaimefg@bol.com.br).

D. Sanagiotto, Aluna de doutorado do Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do IPH/UFRGS (e-mail: danielas@ppgiph.ufrgs.br).

M. Dai Prá, Aluno de mestrado do Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do IPH/UFRGS (e-mail: daipra@myway.com.br).

R. Wiest, Aluno de mestrado do Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do IPH/UFRGS (e-mail: rafa.wiest@bol.com.br).

L.A. M. Endres, trabalha no Instituto de Instituto de Pesquisa Hidráulicas (e-mail: endres@iph.ufrgs.br).

J. C. Quito trabalha em Furnas Centrais Hidrelétricas S.A. (e-mail: Jbastos@furnas.com.br).

II. METODOLOGIA

A. Considerações gerais

Neste trabalho foram analisados a posição do início da aeração, os níveis do escoamento, as velocidades e as pressões ao longo dos perfis dos vertedouros sob o regime de escoamento deslizante sobre turbilhões. Foram ensaiadas 8 calhas com diferentes formatos de cristas: perfil liso e escalonado com degraus de 3, 6 e 9 cm de alturas (duas de cada). Para cada perfil testado, um tinha declividade 0,75H:1V e a outra 1V:1H. A altura máxima e largura das calhas eram de 2,50 m e 0,40 m, respectivamente. Maiores detalhes sobre a metodologia adotada podem ser vistos em [17] e [11]. As instalações experimentais limitaram o valor máximo de vazão específica em $0,70 \text{ m}^3/(\text{s.m})$. Como escala sugerida para transposição dos resultados, recomenda-se valores de 1:10 e a lei de semelhança de Froude.

B. Medição dos níveis de água

Os níveis de água foram medidos de duas formas: através da utilização de ponta linimétrica móvel perpendicular ao fundo do canal e por meio de imagens digitalizadas obtidas com câmara de vídeo digital. Os perfis médios das linhas de água ao longo da calha foram caracterizados em diversas seções ao longo das calhas.

C. Medição 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.

D. Medição de pressões

Foram medidas pressões médias e instantâneas, em cada estrutura e em locais previamente fixados (no piso e no espelho de diferentes degraus ao longo da calha). As medições foram efetuadas através da utilização de transdutores de pressão com frequência de aquisição de 50 Hz e amostra de 9000 pontos e com piezômetros, de maneira a permitir a comparação dos valores das pressões médias.

III. RESULTADOS ALCANÇADOS

Os resultados aqui apresentados fazem parte da dissertações de mestrado de [17] e [11]. As análises realizadas baseiam-se nos principais medições supracitadas na metodologia.

A. Posição de início da aeração do escoamento

Conforme descrito em [5], o desenvolvimento da aeração ao longo da calha escalonada pode ser caracterizada em três zonas diferentes. Observando o escoamento, nota-se que o processo de aeração inicia-se com uma perturbação na superfície da água - posição caracterizada pelo desenvolvimento da camada limite, ou seja, a mesma atinge a superfície livre. Imediatamente a jusante deste ponto, visualiza-se no escoamento a aeração intermitente dos turbilhões nos degraus. A partir desse trecho, o escoamento rapidamente torna-se aerado por completo. Esse processo de aeração introduz no escoamento, principalmente na região de entrada de ar, grande instabilidade na superfície de água que,

após alguns degraus, se estabiliza em um zona uniforme. Os dados apresentados neste trabalho referem-se ao início da posição onde o escoamento apresenta-se aerado e uniforme, conforme ilustra a Figura 1.

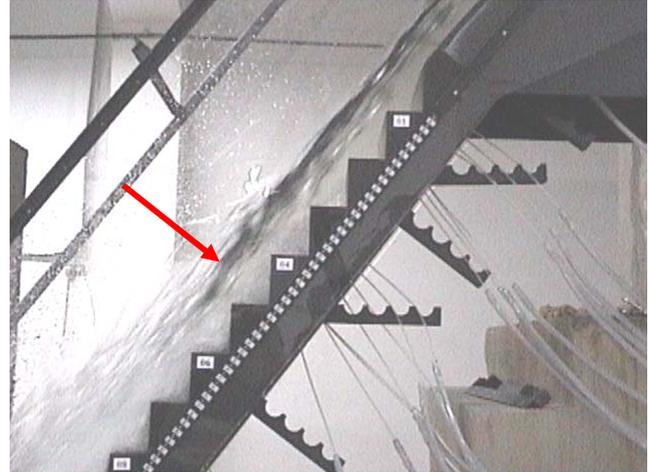


Figura 1- Início da aeração considerada como aeração uniforme do fluxo (recirculação estável na cavidade do degrau). Foto correspondente à vazão de $0,20 \text{ m}^3/(\text{s.m})$, na calha com degraus de 9 cm de altura, declividade $53,13^\circ$, início da aeração uniforme no quinto degrau.

Os dados de comprimento de início de aeração (L_A) foram adimensionalizados em relação à rugosidade de cada estrutura (k) e foram agrupados em função do número de Froude do degrau ($F^* = q / \sqrt{gk^3 \text{sen} \alpha}$, onde q é a vazão específica, g é a aceleração da gravidade e α é a declividade do paramento de jusante da calha).

Na Figura 2, são apresentados os resultados do presente estudo juntamente com os dados de diferentes pesquisadores [2], [15], [17], [18] e [20]. É importante salientar que os mesmos foram obtidos em estruturas com calhas com declividades entre $50,00^\circ$ e $53,13^\circ$. Com estes dados e os resultados encontrados nesta pesquisa, propõe-se uma equação para o cálculo do comprimento de início da aeração (equação 1). Observa-se que a equação proposta representa um bom ajuste aos dados, com um coeficiente de correlação igual a 0,94.

$$\frac{L_A}{k} = 9,7721F^{*0,7014} \quad (1)$$

B. Altura de água na posição do início de aeração

Após a avaliação do início da aeração, em conjunto com a análise do nível de água, foram avaliadas as alturas de água na posição do início da aeração. A Figura 3 compara os resultados de altura de água no local de início da aeração deste estudo com os dados de outros pesquisadores. Observa-se que os valores encontrados no presente estudo seguem a mesma tendência dos dados da bibliografia, apresentando um comportamento muito semelhante ao de [18] e [20], e um pouco inferior ao de [2].

Devido à concordância entre os resultados observados na Figura 3, propõe-se a equação 2 (coeficiente de correlação igual a 0,96) para avaliar a profundidade do escoamento na posição do início do escoamento aerado uniforme (h_A).

$$\frac{h_A}{k} = 0,3965F^{*0,5975} \quad (2)$$

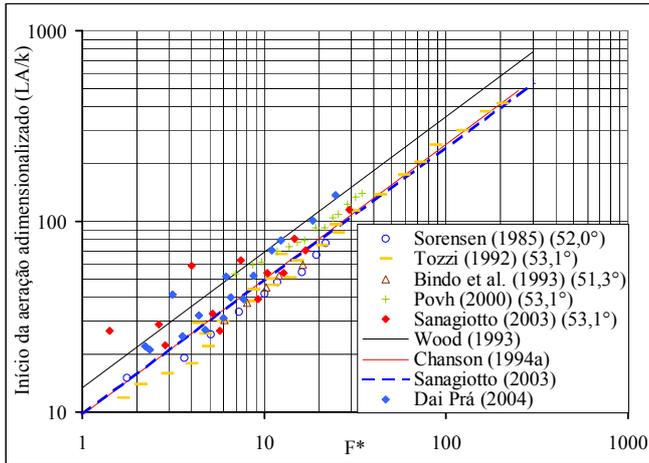


Figura 2 - Comparação da posição do início da aeração do escoamento entre os resultados obtidos no presente estudo ([11] e [17]), com os dados de outros pesquisadores.

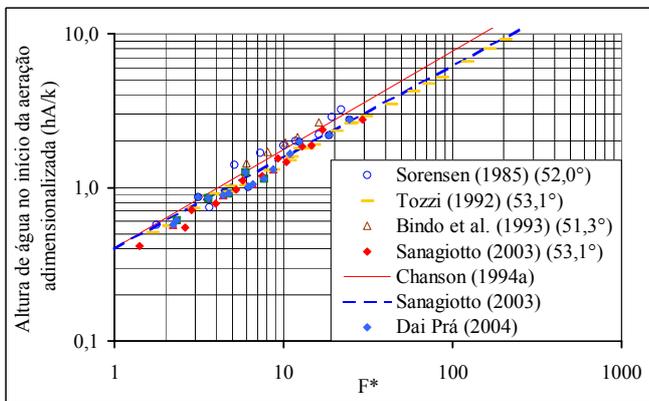


Figura 3 - Comparação da profundidade do escoamento na posição do início da aeração do fluxo, entre os resultados obtidos no presente estudo ([11] e [17]), com os dados de outros pesquisadores e a equação 2.

C. Velocidades

Nos perfis analisados, as velocidades são menores quando próximas ao fundo do escoamento e maiores a distâncias maiores do fundo da calha, tendendo a um valor constante. Estes perfis gerados não apresentam, como citado por [20], uma região de valores menores próximos à superfície livre, isto devido a não terem sido realizadas medições nesta região. Segundo [21], na região da camada limite turbulenta os perfis de velocidades têm um comportamento logarítmico com relação à profundidade (h). Este comportamento também foi observado na maioria dos perfis de velocidades aqui encontrados. Quando se compara os valores de velocidades obtidos para a calha lisa com os das calhas em degraus, observa-se que há uma redução das velocidades médias com a inserção dos degraus sobre as calhas. A Figura 4 ilustra essa comparação. Os resultados são apresentados para a posição relativa da calha, definida através da relação entre a altura de queda (Y) e a carga hidráulica (Hd) de projeto da ogiva do vertedouro igual a 2,84.

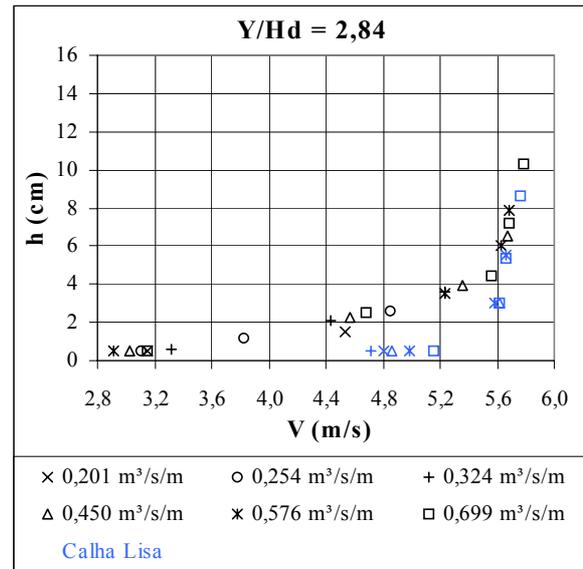


Figura 4 -Perfis de velocidade média do escoamento na calha com degraus de 3 cm de altura, declividade 45° frente aos perfis obtidos na calha lisa, para a posição relativa ao longo da calha a $Y/Hd=2,84$

A Figura 5 ilustra os perfis de velocidades encontrados para as estruturas com declividade de 45° e 53,13°. Percebe-se que na região próxima ao pseudofundo as velocidades têm valores muito semelhantes, entretanto a velocidade média da calha de 45° apresenta velocidades menores ao longo da altura da lâmina de água.

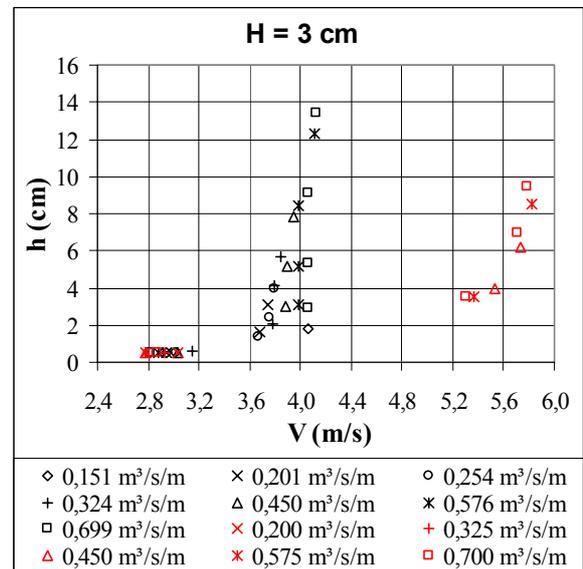


Figura 5 – Comparação entre os perfis de velocidade para degraus com 3 cm de altura para a declividade de 45° (em preto) conforme [11] e com declividade de 53,13° (em vermelho), conforme [17].

D. Avaliação do fator de resistência

A partir da definição das alturas normais na região de escoamento aerado uniforme (h_n), pode-se avaliar o valor do fator de resistência. Na Figura 6 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 [19] e [6] e aproxi-

mam-se bastante da proposição de [3].

Na Figura 7, os mesmos resultados de fator de resistência são comparados com os dados da bibliografia (obtidos de [7]) em função da rugosidade (k) e do diâmetro hidráulico (D_H). A referência [7] propôs um valor médio igual a 1,0 para o fator de resistência, com base em dados de vários pesquisadores, que apresentam variações entre 0,17 e 5,00. Os valores do fator de resistência obtidos neste estudo, apresentam uma variação entre 0,18 e 0,45, com um valor médio em torno de 0,25.

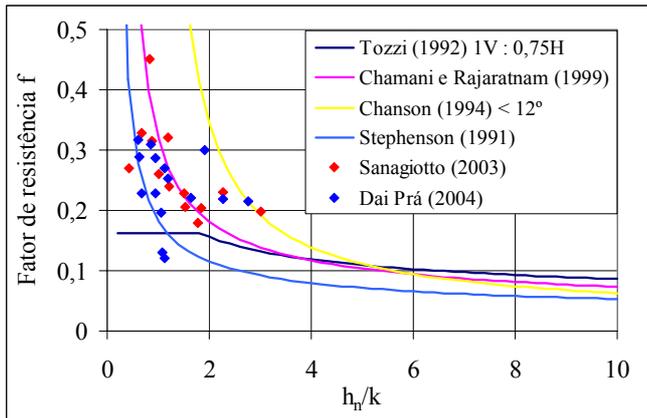


Figura 6 - Valores do fator de resistência obtidos neste estudo em comparação com algumas proposições de outros pesquisadores.

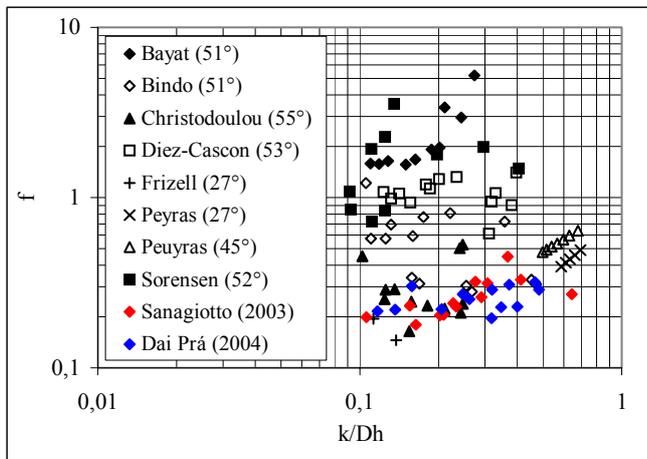


Figura 7 - Valores do fator de resistência obtidos neste estudo ([11] e [17]) em comparação com dados de outros pesquisadores.

E. Análise da dissipação de energia

A Figura 8 apresenta os resultados de dissipação de energia em relação à energia a montante, comparando-os com os propostos por outros pesquisadores.

Os resultados encontrados no presente estudo mostraram, em geral, valores de dissipação de energia bastante semelhantes aos encontrados por [19], [2] e [10], superiores à avaliação de [15] e inferiores aos resultados em [18].

F. Análise das pressões médias

O estudo das pressões ao longo da calha é relevante, uma vez que verifica a possibilidade da ocorrência de cavitação nos degraus, fenômeno responsável por desgastes em estruturas hidráulicas.

Em decorrência dos avanços tecnológicos recentes do CCR, o estudo de fenômenos de cavitação vem suprir uma necessidade técnico-científico nos projetos de novas estruturas escalonadas. Atualmente, os projetos estão enfatizando estruturas e degraus mais altos e permitindo elevadas concentrações de vazões escoando sobre os descarregadores. A combinação inadequada destes fatores pode fazer com que os degraus dos vertedouros sejam submetidos a maiores velocidades que proporcionarão características muito favoráveis para a ocorrência da cavitação.

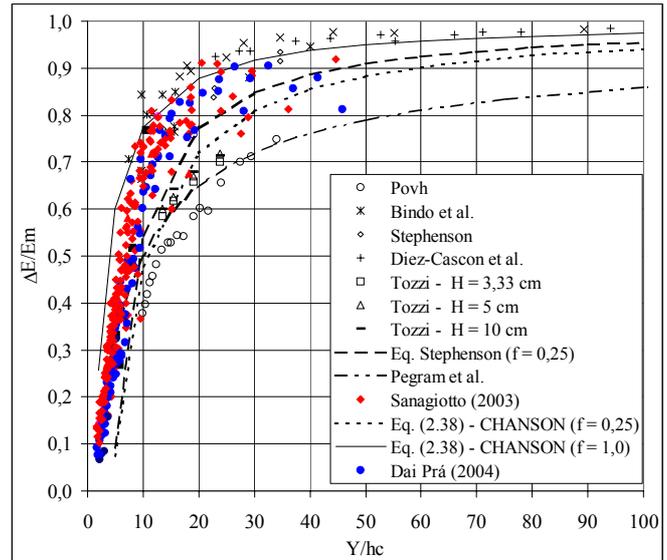


Figura 8 - Resultados experimentais de dissipação de energia em relação à energia de montante, comparados com os dados e proposições de outros pesquisadores.

Sanagiotto (2003) avaliou as pressões médias ao longo de vertedouros em degraus com declividade de 1V:0,75H dotados de três diferentes alturas de rugosidade ($k = 18, 36$ e 54 mm). Foi detectados um aumento das pressões no piso do degrau com o aumento do tamanho destes. As pressões médias máximas foram verificadas nas posições mais externas do piso do degrau e variaram entre $-0,014$ e $0,455$ m.c.a., no modelo. Já as pressões médias mínimas foram detectadas no espelho dos degraus, nas posições próximas ao vértice superior que delimita o pseudofundo. Os valores ficaram compreendidos entre $-0,062$ e $0,245$ m.c.a.. A escala de transposição 1:10 é sugerida no estudo de [9].

A Figura 9 mostra as pressões adimensionalizadas, em função da altura adimensionalizada do degrau, confirmando a posição das pressões médias extremas tanto no piso quanto no espelho.

O estudo das pressões médias nos degraus permitiu a confirmação do comportamento, de acordo com a bibliografia. As pressões médias máximas foram verificadas junto ao canto externo do piso do degrau, ao passo que as médias mínimas foram verificadas junto ao vértice externo do espelho do degrau.

G. Avaliação qualitativa dos vórtices de recirculação

A partir da visualização do fluido abaixo do pseudofundo identificaram-se algumas características referentes ao comportamento dos vórtices nesta região. Estas características

puderam ser mais bem observadas nas regiões próximas à posição de início de aeração firme, porém mais a jusante elas foram também detectadas, apesar de não serem tão evidentes. As bolhas de ar presentes nesta região, especialmente nos vórtices, permitiram que estas observações fossem feitas. Supõe-se a partir disso que ao longo de toda a calha o comportamento do fluido na rugosidade dos degraus seja semelhante, independente de haver ou não presença de ar.

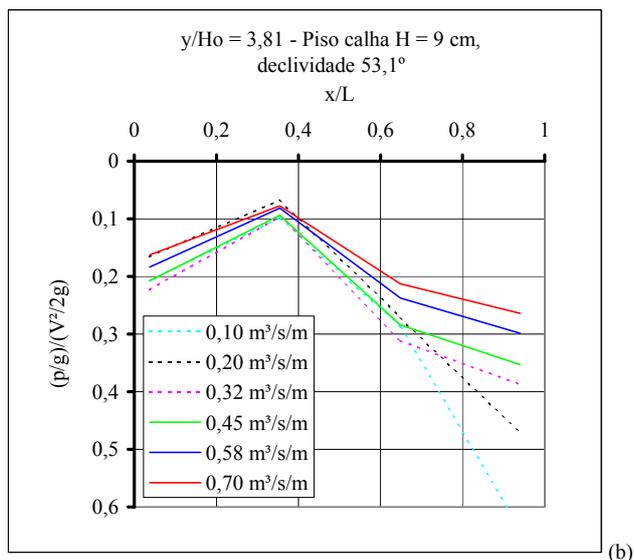
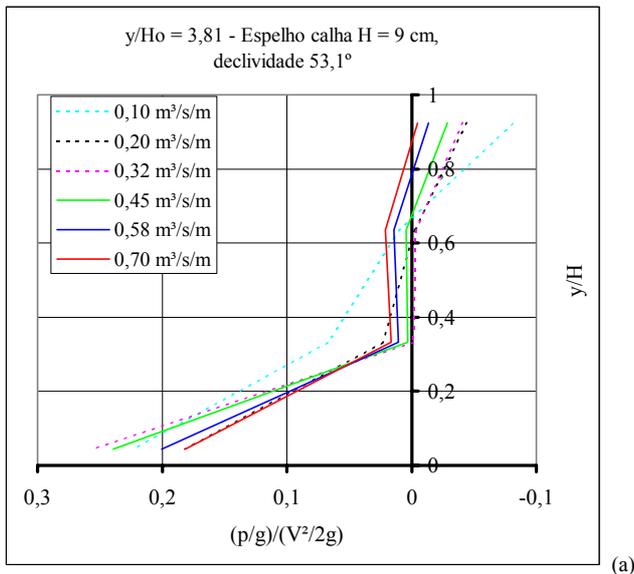


Figura 9 – Distribuição das pressões adimensionalizadas pela energia cinética do escoamento no degrau: (a) espelho e (b) piso. As vazões discriminadas nas legendas são dadas em L/s e a largura da calha é de $0,4$ m. As linhas tracejadas referem-se a escoamentos aerados. Fonte: Sanagiotto (2003).

Analisando um degrau A na Figura 10 (a) percebeu-se um vórtice 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.

Avaliando um degrau B (Figura 10a), percebeu-se que o centro do vórtice situava-se junto ao espelho, oscilando ora em direção ao piso do degrau, ora em direção à extremidade superior do espelho, porém a sua forma era mais achatada do que aquele verificado no piso do degrau A.

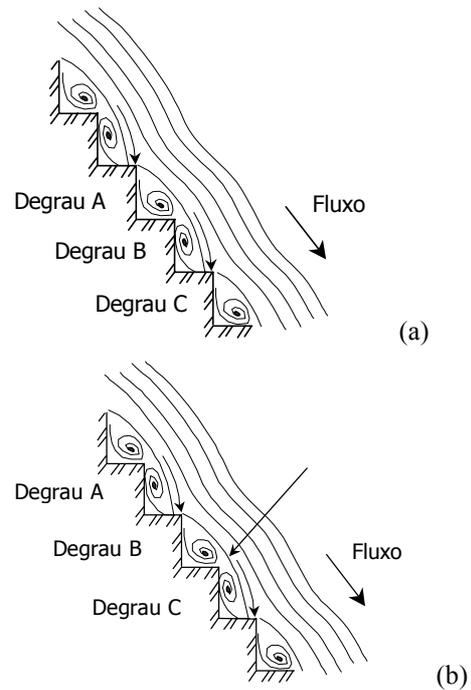


Figura 10 – Comportamento dos vórtices no pseudofundo: (a) situação 1 e (b) situação 2.

Observando um degrau C (Figura 10a), imediatamente a jusante do degrau B, observou-se um comportamento geral do turbilhão muito semelhante àquele detectado no degrau A. Após algum tempo, observa-se uma inversão do comportamento dos vórtices nos degraus, quando aqueles mais arredondados do piso deslocam-se para o espelho, assumindo uma forma mais alongada. Por outro lado, os vórtices alongados do espelho arredondam-se mais à medida que se deslocam para o piso dos degraus (Figura 10b). Avaliando um trecho da calha continuamente por um longo tempo percebe-se essa inversão constante de comportamento dos vórtices.

O formato arredondado dos vórtices no piso (degrau B da Figura 10b) poderia ser atribuído ao impacto do fluxo principal na extremidade do degrau, quando uma pequena parte do jato desloca-se no sentido de montante ao longo do comprimento do degrau proporcionando o movimento rotacional no sentido do escoamento verificado.

O comportamento descrito pode ser confirmado a partir das oscilações das pressões médias visualizadas nos quadros de piezômetros, onde se pode acompanhar o aumento da pressão média na extremidade do piso do degrau quando o vórtice deslocava-se em direção ao espelho.

IV. CONCLUSÃO

Neste estudo foram apresentadas algumas características gerais dos escoamentos sobre vertedouros em degraus, propondo uma análise mais aprofundada na caracterização do comportamento do fluxo sobre calhas com declividade de 45° e $53,13^\circ$.

Contudo, permanecem muitas indagações e questionamentos a respeito do funcionamento hidráulico dos vertedouros em degraus, cabendo ao meio técnico e científico a continuidade e o aprimoramento das investigações acerca do tema.

Sugere-se, então, algumas propostas a serem estudadas tendo em vista dificuldades encontradas a partir deste trabalho, e também, a partir dos novos questionamentos que se fizeram presentes ao longo do seu desenvolvimento. Julga-se importante, então: a) Propor modelos físicos de maior porte, maior altura da calha vertente. b) Avaliar degraus com alturas maiores do que as propostas neste estudo, tendo em vista o avanço da tecnologia do CCR, que permite a execução de camadas cada vez maiores. c) Estudar o comportamento de declividades diferentes a 45° (1V:1H) e $53,13^\circ$ (1V:0,75H), na busca de critérios gerais de dimensionamento. d) Ater-se mais à avaliação das pressões extremas, bem como da flutuação de pressão nos degraus, como forma de estabelecer critérios de risco de ocorrência de cavitação. e) Observar com mais detalhes o comportamento do fluido na rugosidade formada pelos degraus buscando, a partir disso, definições mais concretas acerca do fator de resistência. f) Analisar mais detalhadamente os perfis de velocidade ao longo da calha.

Apesar das sugestões apresentadas, salienta-se a importância de que dados de protótipos venham a ser incorporados aos estudos, para assim determinar o efeito de escala.

V. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio e as contribuições do Eng. Alexandre Teodoro Mahler, dos técnicos Sérgio Nicolau Flores e Maximiliano Messa recebidas durante a elaboração desta pesquisa, assim como dos profissionais do DEC.T/LAHE de Furnas Centrais Elétricas S.A. em especial a Eng^a. Alba Valeria Brandão Canellas, Eng. Igor Fragoso e Eng. Marcos da Rocha Botelho que sempre se mostraram receptivos na troca de informações e experiências de laboratório.

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BEITZ, E., e LAWLESS, M., Hydraulic Model Study for dam on GHFL 3791 Isaac River at Burton Gorge. **Water Resources Commission Report**, Ref. No. REP/24.1, Sept., Brisbane, Australia, 1992.
- [2] BINDO, M., GAUTIER, J., LACROIX, F., The Stepped Spillway of M'Bali Dam. **Water Power & Dam Construction**, p. 35-36, January, 1993.
- [3] CHAMANI, M. R.; RAJARATNAM, N., Characteristics of Skimming Flow over Stepped Spillways. **Journal of Hydraulic Engineering**, ASCE, New York, v. 125, n. 4, p. 361-368, 1999a.
- [4] CHAMANI, M. R.; RAJARATNAM, N., Onset of Skimming Flow on Stepped Spillways. **Journal of Hydraulic Engineering**, ASCE, New York, v. 125, n. 9, p. 969-971, 1999b.
- [5] CHANSON, H., Hydraulics of Skimming Flows over Stepped Channels and Spillways. **Journal of Hydraulic Research**, IAHR, Delft, v. 32, n. 3, p. 445-460, 1994a.
- [6] CHANSON, H., Hydraulic Design of Stepped Cascades, Channels, Weirs and Spillways. **Pergamon**, Oxford, UK, Jan., 261 p., 1994b.
- [7] CHANSON, H., Comparison of Energy Dissipation between Nappe and Skimming Flow Regimes on Stepped Chutes. **Journal of Hydraulic Research**, IAHR, Delft, v. 32, n. 2, p. 213-218, 1994c.
- [8] CHANSON, H., History of Stepped Channels and Spillways: a Rediscovery of the "Wheel". **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 22, p. 247-259, 1995a.
- [9] CHANSON, H.; YASUDA, Y.; OHTSU, I., Flow Resistance in Skimming Flows in Stepped Spillways and its Modelling. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 29, p. 809-819, 2002.
- [10] CHRISTODOULOU, G. C., Energy dissipation on stepped spillways. **Journal of Hydraulic Engineering**, ASCE, New York, v.119, n.5, p.644-650, 1993.
- [11] DAI PRA, M., Características de Escoamentos em Vertedouros em Degraus de Declividade 1V:1H. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS, 2004. **Dissertação de Mestrado** (a ser publicado).
- [12] DIEZ-CASCON, J.; BLANCO, J. L.; REVILLA, J.; GARCIA, R., Studies on the Hydraulic Behavior of Stepped Spillways. **Water Power & Dam Construction**, Sutton, v. 43, n. 9, p. 22-26, 1991.
- [13] FAEL, C.; PINHEIRO, A. N., Escoamentos em Quedas Successivas. Condições de Ocorrência e Energia Residual. **Associação Portuguesa de Recursos Hídricos**, v. 24, n. 1, p. 39-50, 2003.
- [14] MATOS, J. S. G.; QUINTELA, A. C., Descarregadores de Cheias em Degraus: Posição Actual da Avaliação da Dissipação de Energia. In: **XI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 1995, Recife. Anais. Recife: ABRH, 1995. v. 4, p. 65-71.
- [15] POVH, P. H., Avaliação da Energia Residual a Jusante de Vertedouros em Degraus com Fluxo em Regime Skimming Flow. **Dissertação de Mestrado**, 141 p., 2000.
- [16] RAJARATNAM, N., Skimming Flow in Stepped Spillways. **Journal of Hydraulic Engineering**, ASCE, New York, v. 116, n. 4, p. 587-591, 1990.
- [17] SANAGIOTTO, D. G., Características do Escoamento sobre Vertedouros em Degraus de Declividade 1V:0,75H. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS, 2003. **Dissertação de Mestrado**, 118 p., 2003.
- [18] SORENSEN, R. M., Stepped Spillway Hydraulic Model Investigation. **Journal of Hydraulic Engineering**, ASCE, New York, v. 111, n. 12, p. 1461-1472, 1985.
- [19] STEPHENSON, D., Energy Dissipation down Stepped Spillways. **Water Power & Dam Construction**, Sutton, v. 43, n. 9, p. 27-30, 1991.
- [20] TOZZI, M. J., Caracterização/Comportamento de Escoamentos em Vertedouros com Paramento em Degraus. São Paulo: USP, 1992. **Tese de Doutorado**, 302 p., 1992.
- [21] CHOW, Ven Te, Open channel hydraulics. New York : McGraw-Hill, 680p, 1959.