

ANÁLISE DAS PRESSÕES POR ESTÁGIOS DE EROÇÃO DE UMA FOSSA A JUSANTE DE VERTEDOIRO SALTO ESQUI

João Gerda de Borja^{1}; Daniela Guzzon Sanagiotto²; Marcelo Giulian Marques³;
Alba Valéria Brandão Canellas⁴; Cassius Palauro⁵; Maurício Dai Prá⁶;
Vinícius Schwanck⁷ & Eduardo Marzec⁸*

Resumo – O vertedouro salto esquí é uma das alternativas mais adotadas para se dissipar a energia de extravasamentos d'água em médias e grandes barragens. A calha desse tipo de vertedouro comporta elevada vazão específica, concentrando o escoamento em um potente jato que inflige sobre o leito a jusante da barragem, transcendendo a capacidade de suporte das contenções estruturais de engenharia, na medida em que é capaz de erodir massas rochosas íntegras. Desta forma, cabe aos investigadores dos fenômenos hidráulicos em questão compreender os direcionamentos preferenciais de fluxo, suas magnitudes de pressão sobre o leito e, conseqüentemente, as tendências erosivas sobre as variações de material rochoso presentes no local. No presente trabalho são analisadas as pressões médias e flutuações de pressão sobre diferentes estágios de erosão em fundo sólido (fixo), servindo de base para melhor compreensão de como ocorre a evolução da erosão por meio da ação do jato, bem como auxiliar na calibração de modelos numéricos ou em análises de risco de vertedouros existentes. O modelo utilizado possui escala 1:100, seccional, do vertedouro da UHE Luiz Carlos Barreto de Carvalho. Os estudos foram realizados no IPH/UFRGS, com auxílio do LAHE/Furnas.

Palavras-Chave – vertedouro salto esquí, geometria da fossa de erosão, pressões no fundo.

ANALYSIS OF PRESSURES BY EROSION STAGES FROM A SCOUR HOLE DOWNSTREAM OF A SKI JUMP SPILLWAY

Abstract – The ski-jump spillway is one of the most used alternatives to dissipate the energy of water overflows in medium and large dams. The chute of this type of spillway has a high specific flow rate, so the jet power that inflicts on the rock mass downstream of the dam overcome the support capacity of engineering structural containments, as the flow is able to erode intact masses of rocks. Thus, it is incumbent upon researchers of the hydraulic phenomena in question to understand the preferred flow directions, their pressure magnitudes on the rock bed and, consequently, the erosive tendencies on the variations of the material present in the pit. In the present work, the average pressure and pressure fluctuations on different stages of solid (fixed) erosion are analyzed, serving as basis for a better understanding how the evolution of erosion occurs by the action of the jet, as well as assisting in the calibration of numerical models or risk analysis of existing spillways. The studies were performed in IPH/UFRGS with the assistance of LAHE/Furnas.

Keywords – ski-jump spillway, scour hole geometry, pressures on the bottom.

¹ IPH/UFRGS, Porto Alegre – RS, Brasil; e-mail: joao_gerdaudeborja@hotmail.com. * Autor Correspondente.

² IPH/UFRGS, Porto Alegre – RS, Brasil; e-mail: dsanagiotto@ufrgs.br.

³ IPH/UFRGS, Porto Alegre – RS, Brasil; e-mail: mmarques@iph.ufrgs.br.

⁴ LAHE/Furnas, Rio de Janeiro – RJ, Brasil; e-mail: alba.canellas@gmail.com.

⁵ LAHE/Furnas, Rio de Janeiro – RJ, Brasil; e-mail: cassiuspalauro@gmail.com.

⁶ UFPEL, Pelotas – RS, Brasil; e-mail: mauricio.daipra@ufpel.edu.br.

⁷ IPH/UFRGS, Porto Alegre – RS, Brasil; e-mail: vinicius_vms@hotmail.com.

⁸ IPH/UFRGS, Porto Alegre – RS, Brasil; e-mail: eduardomarzec@hotmail.com.

INTRODUÇÃO

A situação privilegiada do país quanto à grande disponibilidade de recursos hídricos foi um dos fatores que favoreceu o desenvolvimento da matriz energética brasileira predominantemente baseada na geração de energia por meio de usinas hidrelétricas de grande porte. Estas barragens exigem um monitoramento contínuo, a fim de garantir a segurança das pessoas e de seus bens, sob a área de risco das barragens. Os esforços técnicos para a análise de riscos em virtude dos períodos de cheia são bastante complexos, pois envolvem os hidrogramas e a influência desse escoamento sobre as estruturas de engenharia, bem como as características do leito rochoso. Canellas et al. (2017), ao empregar uma análise de risco sobre a erosão regressiva ao pé do vertedouros salto esqui, observou que a mesma está relacionada à proporção do fluxo que retorna para montante do impacto do jato, considerando sua inclinação de incidência.

Segundo Marques et al. (2017), as estruturas que compõem as Usinas Hidrelétricas (UHE's) estão sujeitas a falhas ou danos em razão dos esforços provocados pelo escoamento. Esses autores mencionam que as patologias vão desde o desgaste dos materiais que compõem a estrutura até o arrancamentos de lajes ou falhas estruturais propriamente ditas. Chadwick *et al.* (2004) indica as estruturas de transição entre a dissipação em bacia revestida e a dissipação em fossa de erosão, ilustradas na Figura 1 disponibilizada por Pinheiro (2006).

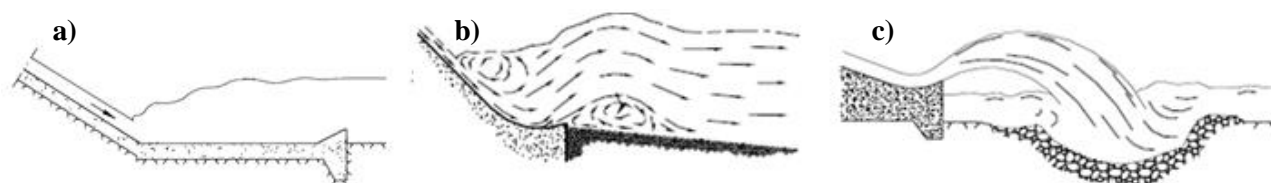


Figura 1 – Representação esquemática dos tipos mais usuais de dissipadores de energia: (a) bacia de dissipação; (b) concha de rolo; (c) salto esqui (FERREIRA, 2011, adaptando PINHEIRO, 2006)

O vertedouro salto esqui (Figura 2) é uma estrutura projetada para comportar o extravasamento da barragem compacta e econômica, pois não necessita de uma obra de revestimento da bacia de dissipação. Porém, seu dimensionamento deve estar baseado no bom desempenho do leito rochoso frente à distribuição de pressões, uma vez que o escoamento moldará no leito do rio a sua própria "bacia de dissipação", ou seja, a fossa de erosão, que pertence ao sistema de dissipação de energia.



Figura 2 – Identificação de elementos básicos de um sistema dissipador – usina hidrelétrica de Luiz Carlos Barreto de Carvalho – Furnas
Fonte: Adhemir Baptista Liporone, no site: <<http://mapio.net/pic/p-5211088/>>.

Como recomendação para manter fossas estáveis, Borja et al. (2013), citados por Palauro et al. (2017), propõem que, em projetos de fossas pré-escavadas, faça parte do dimensionamento a garantia de um comprimento seguro para a extensão da fossa, ao mesmo tempo em que se estima a profundidade de equilíbrio da mesma. A restrição estaria na inclinação do talude de montante da fossa, que proporcionaria mais segurança se adotado em menor valor (graus) para uma dada profundidade visada. Os autores afirmam que uma maior extensão adotada para a fossa pode retardar ou impedir que os processos erosivos ocorram de modo descontrolado.

Dada a complexidade envolvida, o objetivo deste trabalho é a descrição das pressões que ocorrem junto ao fundo da fossa de erosão, levando em consideração seu processo de escavação pela ação do jato (**estágios de erosão**).

PROCESSO DE ESCAVAÇÃO DA FOSSA

O processo de escavação inicia quando o colchão d'água não é profundo o suficiente para que a energia do jato seja dissipada, então, a forte potência do fluxo d'água sobre a rocha provoca sua erosão, e conseqüente aprofundamento da fossa. As fases do processo de erosão têm sua intensidade alterada no decorrer dos estágios de aprofundamento da fossa. Conforme Sawadogo (2010), o processo de escavação pode ser dividido em quatro fases:

Fase Inicial: na fase inicial da formação da fossa de erosão, a capacidade de transporte do fluxo leva o leito original para jusante, causando erosão gradual da proteção do leito de jusante;

Fase de Desenvolvimento: esta fase dura mais tempo do que a fase inicial, e devido ao aumento da profundidade da fossa de erosão, nesta fase inicia a separação de fluxos. Como resultado, forma-se um fluxo de circulação e as velocidades internas dos turbilhões próximas ao fundo são direcionadas para a estrutura;

Fase de Estabilização: a profundidade atingida pela fossa já forma uma coluna de água que é capaz de dissipar a velocidade do fluxo incidente sobre o fundo, não provocando mais o movimento e transporte de blocos de rocha.

Fase de Equilíbrio: as tensões cisalhantes próximas ao fundo decaem ao ponto de não serem mais aptas a carrear sedimentos para fora da fossa. Assim, caracteriza a profundidade máxima da fossa de erosão, de equilíbrio, para uma dada condição de vazão.

MODELAGEM FÍSICA DA FOSSA

O modelo ensaiado neste trabalho possui escala 1:100 em relação a Usina Hidrelétrica Luiz Carlos Barreto de Carvalho (UHE LCBC), possuindo característica bidimensional em uma canal com largura de 40cm (Figura 3). O sistema dissipador modelado refere-se ao vertedouro salto esquí e a fossa de erosão originada a jusante da UHE LCBC.

Para a obtenção das pressões do jato sobre os contornos sólidos da fossa, levando em consideração **estágios de erosão**, foi simulada a fossa ocorrida em protótipo até a profundidade de 27m a partir do leito do rio. As tomadas de pressão foram dispostas, então, junto aos diferentes fundos fixos (metálicos), ensaiados, representando estágios de erosão em protótipo com geometria simplificada.

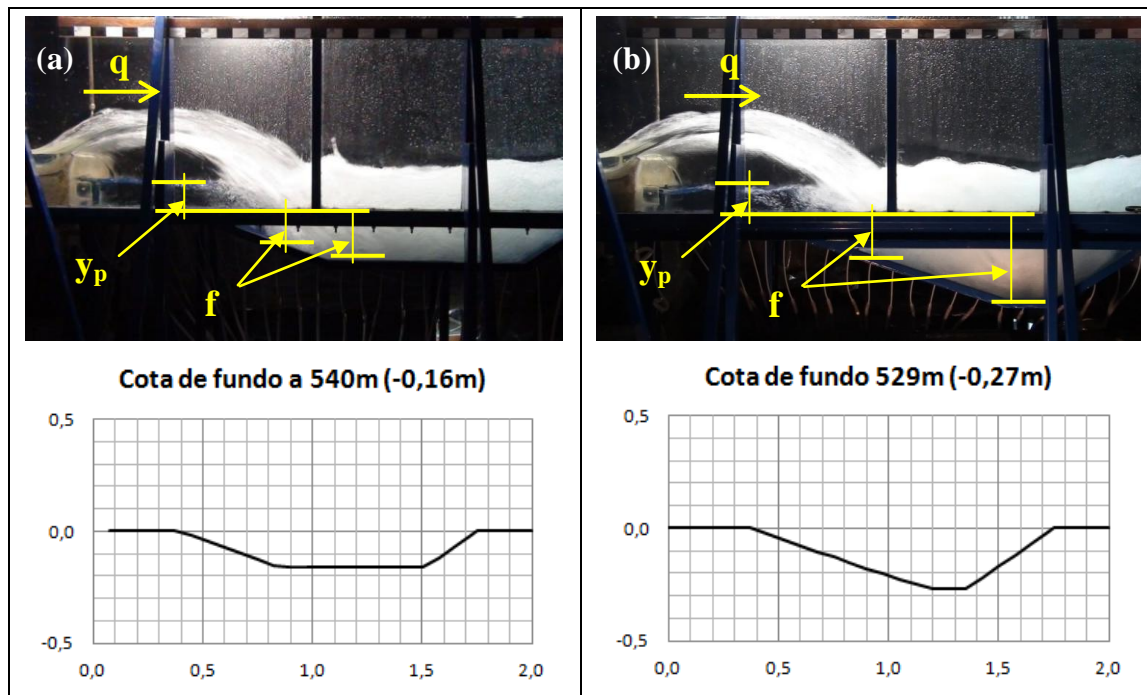


Figura 3 – Modelo em ensaio para condição equivalente ao protótipo com vazão de 4.000m³/s; estágios de erosão nas cotas de fundo 540m (a) e 529m (b); valores em metros; a abscissa em zero indica o ponto de lançamento do jato (lábio do vertedouro salto esqui), e a ordenada em zero indica a cota de referência do canal de jusante (556,3m); ‘q’ indica a vazão específica; ‘y_p’ indica a altura do poço de acumulação e ‘f’ a profundidade da fossa, estes dois últimos em relação ao leito do canal de jusante.

Com inauguração e operação a partir do ano de 1969, os levantamentos batimétricos realizados até a data de 1988 já demonstravam que a fossa encontra-se estabilizada para a vazão de 4.000m³/s, com 27m de profundidade. Neste escopo, foram modelados dois estágios de erosão, conforme vistos na Figura 3: um **estágio intermediário**, com a cota de fundo em 540,0m; e um **estágio de estabilização** da fossa, com a cota de fundo em 529,0m. Ou seja, cerca de 16m e 27m de profundidade, respectivamente, em relação a cota de referência do canal de jusante (556,3m).

Para a medição das pressões sobre o fundo, utilizou-se 24 transdutores simultaneamente, com frequência de aquisição de 256Hz e duração de 5 minutos. As tomadas foram espaçadas horizontalmente de 7,5cm ao longo do eixo central do canal, sendo a primeira tomada distanciada de 7,5cm do lábio do vertedouro (ponto de lançamento do jato). Assim, abrangeu-se toda a fossa, incluindo ainda a área a montante da fossa chamada “poço de acumulação”.

CONDIÇÕES DE ESCOAMENTO

Nesta modelagem bidimensional, o vertedouro salto esqui foi confeccionado em fibra de vidro, sendo uma representação em forma seccional com largura nas mesmas dimensões do canal, isto é, de 40cm (Figura 4). Apesar na semelhança geométrica com a calha do vertedouro de protótipo (UHE LCBC), na seção junto ao perfil Creager do modelo foram desprezadas suas singularidades, por isso, a comporta instalada no modelo abrange toda a seção sem a presença de pilares. No entanto, o final da calha do vertedouro condiz com a geometria de protótipo, havendo, em escala 1:100, uma concha de lançamento com raio de 20cm, a qual possui deflexão de 50° e ângulo de lançamento de 42° com a horizontal. A altura de lançamento do jato (Z_{concha}) modelado é de 20,77cm, em relação à cota de referência a jusante.

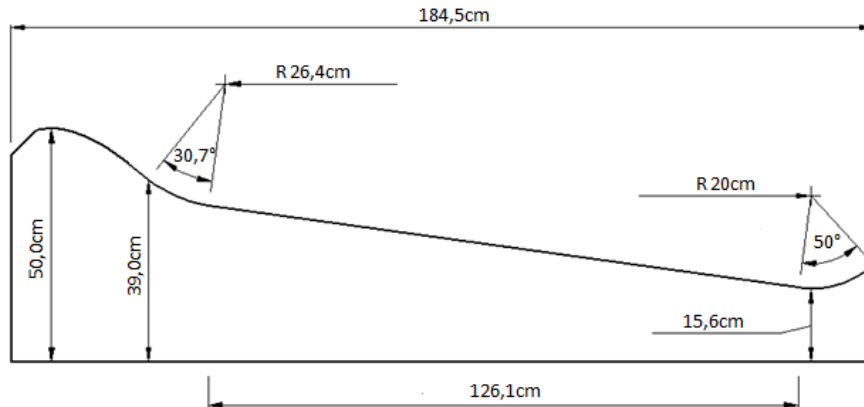


Figura 4 – Perfil do vertedouro salto esquí, em escala 1:100, da UHE LCBC

Devido a diferente configuração entre o presente modelo e o protótipo na seção junto ao perfil Creager (ausência de pilares neste modelo), há uma diferença nas relações de vazão específica (q) que deve ser considerada entre a seção de lançamento do jato (lábio do vertedouro) e a vazão específica (q) mensurada na seção do perfil Creager. Desta maneira, as condições de vazão específica do jato que incide sobre o leito da fossa são melhores correlacionadas às condições de lançamento no ar, ou seja, do fluxo d'água na seção do lábio do vertedouro. Estas condições e seus parâmetros de referência utilizados nas análises do presente trabalho são vistas na Tabela 1, e explicadas na sequência.

Tabela 1 – Vazões de referência para o modelo bidimensional 1:100

F_0 [-]	Q [m ³ /s]*	Q [L/s]**	q [m ² /s]**	H_m [m]**	h'_0 [m]**
13,3	1.000	5,8	0,015	0,650	0,0095
9,3	2.000	11,6	0,029	0,651	0,0143
7,6	3.000	17,4	0,043	0,654	0,0186
6,5	4.000	23,2	0,058	0,651	0,0240
4,4	8.000	46,4	0,116	0,649	0,0460
4,2	9.000	52,2	0,130	0,661	0,0512

*Vazão de referência de protótipo, sendo a largura da calha junto às comportas de 69m, e na seção de lançamento de 84m;

**Parâmetros de referência dos ensaio em modelo.

Os parâmetros de contorno utilizados nas análises são os seguintes:

$$F_0 = \frac{V_0}{\sqrt{g \cdot h_0}}, \text{ com } V_0 = \sqrt{2 \cdot g \cdot (H_m - Z_{concha} - q/V_0)} \quad (1)$$

Onde:

F_0 = Número de Froude do escoamento teórico, no lançamento do jato [-];

V_0 = velocidade de lançamento teórica, em que não é considerada a perda de energia, sendo obtida através de processo iterativo [m/s];

$h_0 = q/V_0$, lâmina de escoamento teórico, no lançamento do jato [m];

H_m = carga de montante em relação à cota do leito do rio a jusante [m];

Z_{concha} = altura do lábio do vertedouro em relação à cota do leito do rio a jusante [m].

g = aceleração da gravidade [m/s^2];

q = vazão específica escoada [m^2/s];

h'_0 = Altura do escoamento inclinado (normal ao fundo), estimada na seção de lançamento do jato (lábio do vertedouro do modelo), mensuradas sobre fotografias e com o auxílio de ponta linimétrica [m].

ANÁLISE DOS RESULTADOS

As pressões dinâmicas médias ($P_{d,max}$), no ponto de maior magnitude, e as respectivas flutuações de pressões (σ_{max}) são as duas principais variáveis utilizadas para se avaliar os esforços hidrodinâmicos sobre bacias de dissipação, ou, no caso de vertedouros salto esquí, sobre o leito da fossa. Sendo assim, a presente análise verificou os parâmetros adimensionais que melhor representaram estas variáveis, ou seja, que demonstraram melhor relação de causa diante dos fenômenos envolvidos na modelagem em questão.

A determinação das equações de previsão dos esforços hidrodinâmicos provocados no leito da fossa, através de parâmetros explicativos, tem como base as amostras de pressão medidas em ensaio, para cada uma das condições ensaiadas. Neste trabalho, se analisou as pressões dinâmicas médias mais agravantes do fluxo incidente, bem como as flutuações de pressão respectivas.

Em função destas variáveis, ainda, foi utilizada a altura do poço acumulação (y_p), que depende de cada condição de escoamento sobre o modelo. Esta dimensão é ilustrada na Figura 3, sendo obtida, nos ensaios, pela média dos quatro primeiros transdutores, ou seja, até 30cm do pé do vertedouro. O ajuste dos resultados de y_p obtidos, para os estágios de fossa ensaiados, foram expressos em função do número de Froude, como pode ser visto no gráfico seguinte (Figura 5).

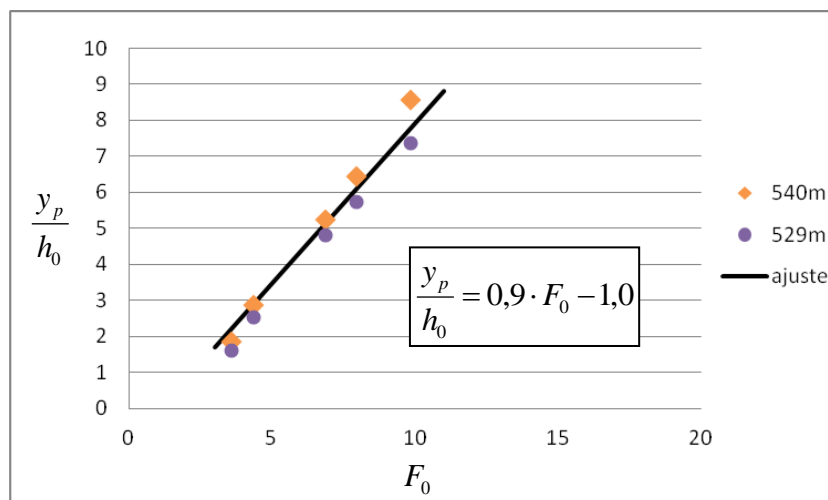


Figura 5 – Ajuste dos dados obtidos de altura do poço de acumulação em função do Número de Froude

Utilizando os dados de y_p , foram ajustadas equações para o coeficiente de pressão (C_p), dado pela equação (2), bem como o respectivo coeficiente de flutuação de pressão (C'_p), dado pela equação (3). Neste último ajuste, se utilizou a profundidade da fossa no local da máxima flutuação de pressão observada ($f_{\sigma,max}$).

$$C_P = \frac{P_{d,\max} + y_p}{V_0^2/2g} \quad (2)$$

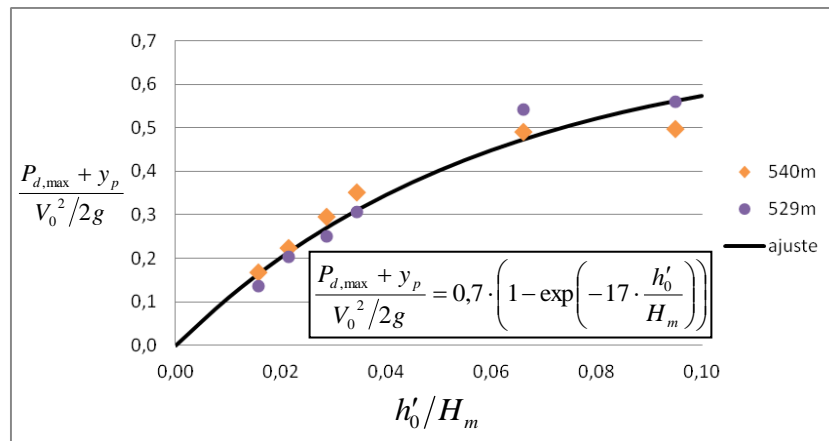


Figura 6 – Ajuste dos dados obtidos de pressão dinâmica média, máxima observada junto ao fundo

$$C'_P = \frac{\sigma_{\max}}{V_0^2/2g} \quad (3)$$

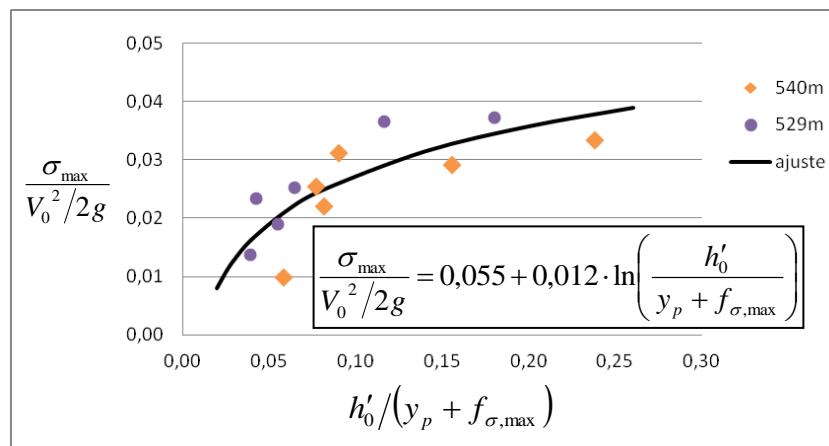


Figura 7 – Ajuste dos dados obtidos de flutuação de pressão, máximo observado junto ao fundo

CONCLUSÃO

Neste trabalho foram analisadas as pressões dinâmicas médias ($P_{d,\max}$), bem como as flutuações de pressão (σ_{\max}) respectivas, causadas pela ação do jato no fundo de uma fossa de erosão a jusante de um vertedouro salto esqui, para dois estágios de profundidade da fossa. Dos ajustes realizados, considera-se que a adimensionalização proposta foi adequada para traduzir o comportamento dos fenômenos envolvidos para se avaliar os esforços hidrodinâmicos sobre fossas de erosão. Os principais parâmetros, levados em consideração, são os correspondentes às alterações das características hidráulicas nas duas geometrias de fossa ensaiadas, mensuráveis através das alterações de nível d'água do poço de acumulação (y_p), bem como a identificação da profundidade da fossa propriamente dita (f) no ponto de maior magnitude (ponto de interesse).

Na continuidade deste estudo serão realizadas análises em modelo de maior escala (1:50). Com isso, espera-se contribuir para a melhor compreensão de como ocorre as tendências de escavação da ação do jato sobre o leito. Ainda, conhecendo os efeitos de escala envolvidos, proporcionará uma maior agilidade na confecção de modelos para acompanhamento dos processos erosivos em fossas de barragens já em operação, mas que estejam sob risco de perda de material rochoso próximo de suas fundações.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à equipe do Laboratório de Obras Hidráulicas (LOH) do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH/UFRGS), e à equipe do Laboratório de Hidráulica Experimental e Recursos Hídricos (LAHE/FURNAS), bem como o apoio financeiro parcial da CAPES - Brasil, CNPq, Finep, Eletrobras Furnas, Fapergs, IPH/UFRGS.

REFERÊNCIAS

BORJA, J. G.; PALAURO, C.; SILVA, L. F.; MARQUES, M. G.; CANELLAS, A. V. B. (2013) Declividade dos taludes de fossas de erosão formadas a jusante de vertedouros salto esquí: UHE Luis Carlos Barreto de Carvalho. In: *XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Bento Gonçalves - RS, 2013.

CANELLAS, A. V.; BORJA, J. G.; SANAGIOTTO, D. G.; MARQUES, M. G. (2017) Análise do Comprimento de Equilíbrio de Fossas de Erosão a Jusante de Vertedouros Salto Esquí. In: *13º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Portuguesa - Silusba*. Porto.

CHADWICK, A.; MORFETT, J.; BORTHWICK, M. (2004) *Hydraulics in civil and environmental engineering*. 4th ed. Oxon: Spon Press, 2004.

FERREIRA, F. M. (2011) *Profundidade de erosão a jusante de dissipador salto de esquí*. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil, UFRGS.

MARQUES, M. G.; HAMPE, R. F.; SOUZA, P. E.; TEIXEIRA, E. D. (2017) Previsão de Pressões Extremas Mínimas em Bacia de Dissipação com Baixo Número de Froude. In: *XXXI - Seminário Nacional de Grandes Barragens - SNGB*. Belo Horizonte, Maio de 2017.

PALAURO, C.; CANELLAS, A. V.; HAMPE, R. F.; MARQUES, M. G.; BORJA, J. G. (2016) Análise da Declividade dos Taludes de Fossas de Erosão: Comparação de Modelo Reduzido com Protótipo. In: *XXVII Congresso Latinoamericano de Hidráulica*. Lima, Perú, Setiembre de 2016.

PALAURO, C.; SANAGIOTTO, D. G.; BORJA, J. G.; CANELLAS, A. V. (2017) Simulação em Modelo dos Fluxos Preferenciais Atuantes sobre os Contornos da Fossa a Jusante de Vertedouro Salto Esquí. In: *XXXI - Seminário Nacional de Grandes Barragens - SNGB*, Belo Horizonte.

PINHEIRO, A. N. (2006) Apostila - curso Mestrado Integrado em Engenharia Civil da *Universidade Técnica de Lisboa*, nov. 2006.

SAWADOGO, O. (2010) *Scour of Unlined Dam Spillways*. Thesis presented in partial fulfilment of the requirements for the degree of Master of Engineering Sciences (Civil) at Stellenbosch University, 144 pages, 2010.