

XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

ANÁLISE DA FLUTUAÇÃO DE PRESSÃO EM RESSALTOS HIDRÁULICOS COM BAIXO NÚMERO DE FROUDE

*Roberta Ferrão Hampe¹, Renato Steinke Júnior², Maurício Dai Prá³, Marcelo Giulian Marques⁴ e
Eder Daniel Teixeira⁵*

RESUMO – Para o dimensionamento seguro e econômico de obras hidráulicas, é necessário que se conheçam os esforços hidrodinâmicos a que tais estruturas serão submetidas, a fim de se minimizar os riscos de danos que podem ocorrer de diversas maneiras. Os desvios-padrão das amostras de pressão, também chamados de flutuações de pressão, são importantes na determinação das pressões extremas que podem ocorrer em uma bacia de dissipação. Neste artigo, são propostos novos ajustes para as flutuações de pressão a partir de dados coletados em ressaltos hidráulicos com números de Froude variando entre 1,73 e 7,56. Os ajustes propostos apresentaram bons resultados quando comparados com um ajuste previamente existente. Recomenda-se que, em estudos futuros, sejam utilizados dados que contemplem a extensão completa do ressalto hidráulico.

ABSTRACT – For the safe and economic design of hydraulic structures, the understanding of hydrodynamic forces acting on those structures is necessary, in order to minimize the risks of damage that may occur in a series of ways. The standard deviations of the pressure samples, also called pressure fluctuations, are important in the determination of extreme pressures that might occur in a dissipation basin. In this paper, novel adjustments for the pressure fluctuations are introduced, derived with data collected in hydraulic jumps with Froude numbers varying between 1.73 and 7.56. The proposed adjustments generated good results when compared to a previously existent equation. It is recommended that, in future studies, series of data comprising the whole extension of the hydraulic jump be used.

Palavras-Chave – Ressalto hidráulico; flutuações de pressão; baixo número de Froude.

INTRODUÇÃO

Sabe-se que o crescimento da economia de um país está intimamente ligado com a expansão da sua capacidade energética. Apesar da tendência de diversificação da matriz elétrica brasileira, ainda grandemente dependente da energia hidráulica, volta-se a atenção para o grande potencial hidroenergético da região norte do país. Conforme o Plano Decenal de Expansão de Energia 2027

1) Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (IPH/UFRGS); roberta_hampe@hotmail.com

2) Mestrando em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (IPH/UFRGS); renato.steinkejunior@gmail.com

3) Professor Doutor DOH/IPH/UFRGS; mauricio.daipra@ufrgs.br

4) Professor Doutor DOH/IPH/UFRGS; mmarques@iph.ufrgs.br

5) Professor Doutor DOH/IPH/UFRGS; eder.teixeira@ufrgs.br

(EPE, 2018), até a próxima década o Brasil planeja elevar a sua capacidade instalada de energia proveniente de fontes hidráulicas em 9.000 MW.

Pelo fato de os rios da bacia hidrográfica amazônica apresentarem baixas quedas e elevadas vazões específicas, as obras hidráulicas lá implementadas tendem a apresentar escoamentos com baixos números de Froude em seus sistemas de segurança. Para o dimensionamento seguro e econômico destas estruturas, faz-se necessário conhecer os esforços a que elas serão submetidas. Entretanto, em se tratando das características internas de ressaltos hidráulicos com números de Froude menores que 4,5 na seção de entrada, a literatura ainda não atingiu um estado da arte.

Apesar dos recentes avanços na área, estruturas hidráulicas estão sujeitas a diversos tipos de danos, que podem ser gerados por cavitação, abrasão, erosão, fissuras, vibrações, entre outros, conforme Marques *et al.* (2017). Um exemplo recente é a expressiva erosão no corpo rochoso a jusante do vertedouro da Barragem Paradise, em Queensland, Austrália, causada por sucessivos eventos de cheia (MCPHERSON *et al.*, 2015). Este e outros casos de danos em obras hidráulicas demonstram a importância de se conhecer os esforços que as estruturas devem suportar.

Assim, este estudo visa propor novas equações de ajuste para as flutuações de pressão em ressaltos hidráulicos operando sob baixos números de Froude, de forma a complementar a metodologia proposta por Teixeira (2003).

METODOLOGIA

Lopardo (2013) afirma que, para o entendimento das características internas e turbulentas do ressalto hidráulico, faz-se necessário conhecer as características médias e flutuantes do escoamento. Conforme Marques *et al.* (1997), a distribuição de probabilidades dos dados de pressão ao longo do ressalto hidráulico não segue uma lei Gaussiana. Assim sendo, uma forma de descrever esta distribuição de probabilidades é conforme a Equação 1, que compila a distribuição de probabilidades por meio de um coeficiente estatístico N .

$$P_{x\%} = P_X + N_{x\%} \cdot \sigma_X \quad (1)$$

Em que:

$P_{x\%}$ é a pressão com probabilidade x de não ser excedida;

P_X é a pressão média na posição X ;

$N_{x\%}$ é o coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades;

σ_X é a flutuação de pressão na posição X .

Esta metodologia é utilizada em combinação com a adimensionalização proposta por Marques *et al.* (1997), por meio da qual é possível agrupar dados de pressão média e flutuação de pressão de ressaltos hidráulicos com diferentes números de Froude em uma só curva, quando plotados contra a posição longitudinal adimensionalizada $\frac{x}{y_2 - y_1}$. A fim de possibilitar a inclusão dos dados provenientes de ressaltos hidráulicos afogados na análise de pressões de ressaltos livres, Marques *et al.* (1999) propuseram a inclusão de um fator de afogamento ($S = T_w/y_2$) nas Equações 2 e 3.

As expressões da metodologia de adimensionalização são dadas pelas equações a seguir.

$$\Psi = \frac{P_{x-y_1}}{y_2 - y_1} \cdot \frac{y_2}{T_w} \quad (2)$$

$$\Omega = \frac{\sigma_x}{H_t} \cdot \frac{y_2}{y_1} \cdot \frac{y_2}{T_w} \quad (3)$$

Em que:

Ψ é a pressão média adimensionalizada;

Ω é a flutuação de pressão adimensionalizada;

y_1 é a altura conjugada rápida;

y_2 é a altura conjugada lenta;

H_t é a perda de carga total ao longo do ressalto hidráulico;

T_w é a altura conjugada lenta do ressalto hidráulico afogado.

A partir disso, Teixeira (2003) utilizou dados de pressões instantâneas coletadas em ressaltos hidráulicos livres e afogados, provenientes tanto de protótipos quanto de modelos de bacias de dissipação, e formulou uma metodologia para a previsão de pressões extremas em bacias de dissipação por ressalto hidráulico. Com este método, válido para números de Froude entre 4,5 e 9,0, é possível estimar os valores das variáveis da Equação 1 para diferentes probabilidades do coeficiente N, obtendo-se assim a pressão extrema com certa probabilidade de não-excedência. As expressões desenvolvidas para a estimativa de pressões médias e flutuações de pressão são descritas conforme as Equações 4, 5 e 6.

$$\Psi = -0,015 \cdot \left(\frac{x}{y_2 - y_1}\right)^2 + 0,237 \cdot \frac{x}{y_2 - y_1} + 0,07 \quad (4)$$

$$\Omega = -0,159 \cdot \left(\frac{x}{y_2-y_1}\right)^2 + 0,573 \cdot \frac{x}{y_2-y_1} + 0,19; \text{ para } 0 \leq \frac{x}{y_2-y_1} \leq 2,4 \quad (5)$$

$$\Omega = 0,017 \cdot \left(\frac{x}{y_2-y_1}\right)^2 - 0,281 \cdot \frac{x}{y_2-y_1} + 1,229; \text{ para } 2,4 \leq \frac{x}{y_2-y_1} \leq 8,25 \quad (6)$$

Os coeficientes estatísticos de distribuição de probabilidade N são obtidos por meio da Equação 7. Os valores de a , b e c para diferentes probabilidades de não-excedência são tabelados e podem ser consultados em Teixeira (2003) e Hampe (2018).

$$N = a \left(\frac{x}{y_2-y_1}\right)^2 + b \frac{x}{y_2-y_1} + c \quad (7)$$

Para o presente estudo, foram utilizados os dados de Hampe (2018). A pesquisadora analisou dados de pressão em ressaltos hidráulicos coletados em dois modelos. Um deles representa o sistema extravasor da UHE Santo Antônio na escala 1:50. O modelo, presente no Laboratório de Hidráulica Experimental de Furnas (LAHE/Furnas), conta com 4 tomadas de pressão no vão central do trecho plano da bacia de dissipação, as quais contemplam a região inicial do ressalto. Foram ensaiados escoamentos com sete vazões diferentes, com números de Froude na entrada do ressalto variando entre 1,73 e 7,56. Estes dados foram utilizados para a determinação da nova equação ajustada para as flutuações de pressão. De forma similar a Teixeira (2003), foi empregado o método dos mínimos quadrados para a determinação de uma equação de segundo grau em função da posição longitudinal adimensionalizada.

Na etapa de validação do ajuste proposto, foram utilizados dados de pressão instantânea coletados em um modelo físico da UHE São Manoel, na escala 1:60, também situado no LAHE/Furnas. Foram ensaiados escoamentos com duas vazões distintas, com números de Froude na seção de entrada do ressalto equivalentes a 3,07 e 3,21, para ressaltos hidráulicos afogados. Transdutores de pressão registraram dados em seis tomadas de pressão durante 10 minutos, a uma taxa de 100 Hz. O erro relativo, expresso por meio da Equação 8, foi empregado para avaliar a qualidade dos dados estimados pelo ajuste em relação aos dados amostrais.

$$E_r = \frac{P_{amostral} - P_{estimada}}{P_{amostral}} \quad (8)$$

RESULTADOS

Para a proposição dos novos ajustes da flutuação de pressão, tomou-se por base a metodologia utilizada por Teixeira (2003), porém utilizando os dados coletados no modelo da UHE Santo Antônio com números de Froude variando entre 1,73 e 7,56, também utilizados por Hampe (2018). O primeiro ajuste baseou-se em todos os sete escoamentos ensaiados, contemplando tanto a faixa do ressalto hidráulico dito estável quando ressalto com baixos números de Froude ($Fr < 4,5$). Já o segundo ajuste foi desenvolvido com base apenas nos ressalto hidráulicos operando sob baixos números de Froude. Atenta-se para o fato de que os ajustes propostos são válidos apenas para o trecho inicial do ressalto, visto não se possuírem dados ao longo de toda a extensão do fenômeno.

Em primeiro lugar, apresenta-se na Figura 1 a comparação da flutuação de pressão (ou desvio padrão) dos dados de Endres (1990), Marques *et al.* (1997), modelo da UHE São Manoel e modelo da UHE Santo Antônio.

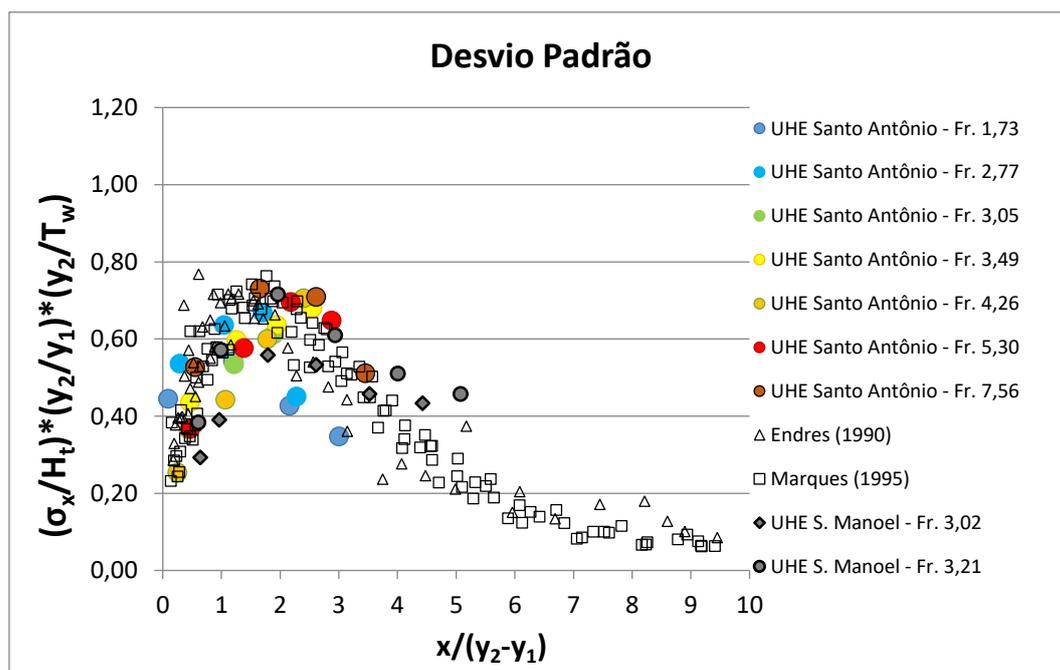


Figura 1 – Comparação entre os desvios-padrão do modelo da UHE Santo Antônio, modelo da UHE São Manoel e dados cedidos por Endres (1990) e Marques *et al.* (1997)

A fim de se levar em conta o afogamento dos ressalto hidráulicos ensaiados no modelo da UHE São Manoel, foi utilizado o fator de afogamento S proposto por Marques *et al.* (1999). Verificou-se que, em geral, os valores da flutuação de pressão analisados no presente estudo apresentaram semelhança em relação aos valores obtidos por Endres (1990) e Marques *et al.* (1997). Os escoamentos com números de Froude 1,73 e 2,77, entretanto, se comportaram de maneira distinta,

com valores superiores aos outros no início do ressalto e com valores inferiores aos outros entre as posições longitudinais 2,0 e 3,0.

Os desvios-padrão referentes às amostras de dados coletados no modelo da UHE São Manoel apresentaram valores superiores aos demais entre as posições adimensionais 4,0 e 5,0. Devido à falta de dados ao longo de toda a extensão do ressalto, não se pode afirmar que as flutuações de pressão verificadas no modelo seguem a mesma tendência observada por Endres (1990) e Marques *et al.* (1997).

➤ Ajuste 1: números de Froude estáveis e baixos

A partir dos dados coletados em ressaltos hidráulicos com números de Froude variando entre 1,73 e 7,56, foi desenvolvido um ajuste quadrático para a flutuação de pressão em função da posição longitudinal adimensionalizada, dado pela Equação 9.

$$\Omega = -0,071 \left(\frac{x}{y_2 - y_1} \right)^2 + 0,292 \left(\frac{x}{y_2 - y_1} \right) + 0,324; \text{ para } 0 \leq \frac{x}{y_2 - y_1} \leq 2,4 \quad (9)$$

Como não se possuíam outras séries de dados de pressão coletadas em ressaltos hidráulicos livres e com baixo número de Froude, foram utilizadas, para a validação do ajuste proposto, as séries de dados coletadas no modelo bidimensional da UHE São Manoel, em que foram ensaiados escoamentos com ressaltos hidráulicos afogados.

Foram plotados os valores do desvio padrão amostral em comparação com os desvios padrão estimados pelo método sugerido por Teixeira (2003) e pelo Ajuste 1. Os resultados são apresentados na Figura 2. Atenta-se para o fato de que os pontos advindos da metodologia de Teixeira (2003) e os pontos do Ajuste 1 sugerido no presente estudo coincidem para as posições longitudinais adimensionalizadas superiores a 2, justamente porque a equação do presente estudo é válida apenas até a posição adimensional 2,4.

Verificou-se que nenhum dos ajustes descreveu os dados da amostra com grande precisão ao longo de todo o trecho estudado. A equação proposta, entretanto, obteve melhores resultados nos trechos iniciais da bacia de dissipação. A Figura 3 apresenta os erros relativos do ajuste proposto neste estudo e da metodologia desenvolvida por Teixeira (2003).

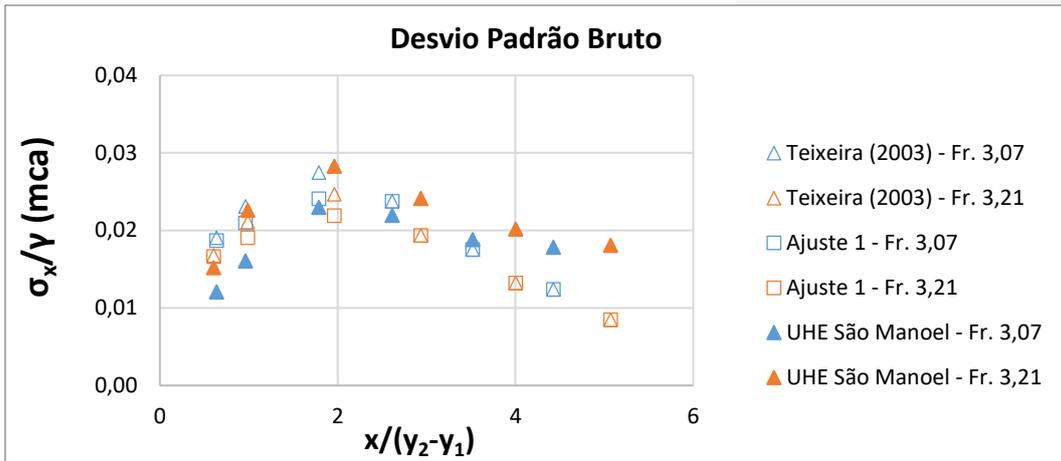


Figura 2 – Desvio padrão bruto da amostra coletada no modelo bidimensional da UHE São Manoel, comparação ao Ajuste 1 e ao ajuste proposto por Teixeira (2003), valores em metro, escala de modelo

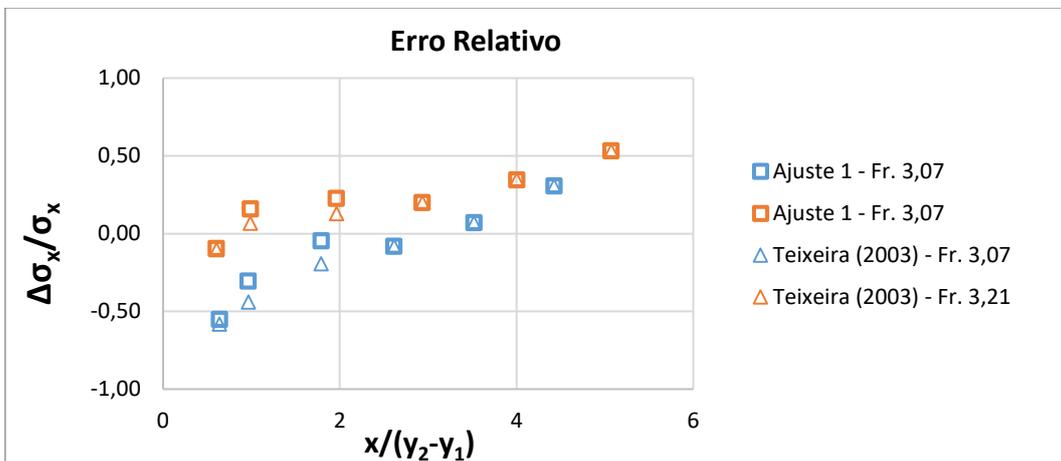


Figura 3 – Erro relativo na estimativa do desvio padrão da UHE São Manoel a partir da metodologia proposta por Teixeira (2003) e o Ajuste 1

➤ Ajuste 2: baixos números de Froude

Para este ajuste, foram empregados os dados coletados em ressaltos hidráulicos operando sob números de Froude compreendidos entre 1,73 e 4,26, abrangendo cinco dos sete escoamentos ensaiados no modelo da UHE Santo Antônio. A expressão desenvolvida é descrita conforme a Equação 10.

$$\Omega = -0,087 \left(\frac{x}{y_2 - y_1} \right)^2 + 0,314 \left(\frac{x}{y_2 - y_1} \right) + 0,320; \text{ para } 0 \leq \frac{x}{y_2 - y_1} \leq 2,4 \quad (10)$$

O ajuste quadrático da flutuação de pressão em função da posição longitudinal adimensionalizada para escoamentos com baixo número de Froude resultou semelhante ao Ajuste 1

descrito anteriormente, sugerindo que, para o caso estudado, os desvios-padrão são pouco dependentes do número de Froude. A comparação dos valores amostrais da UHE São Manoel com o ajuste proposto por Teixeira (2003) e com o Ajuste 2 pode ser vista na Figura 4. Na Figura 5, são apresentados os erros relativos do Ajuste 2 e do ajuste proposto por Teixeira (2003).

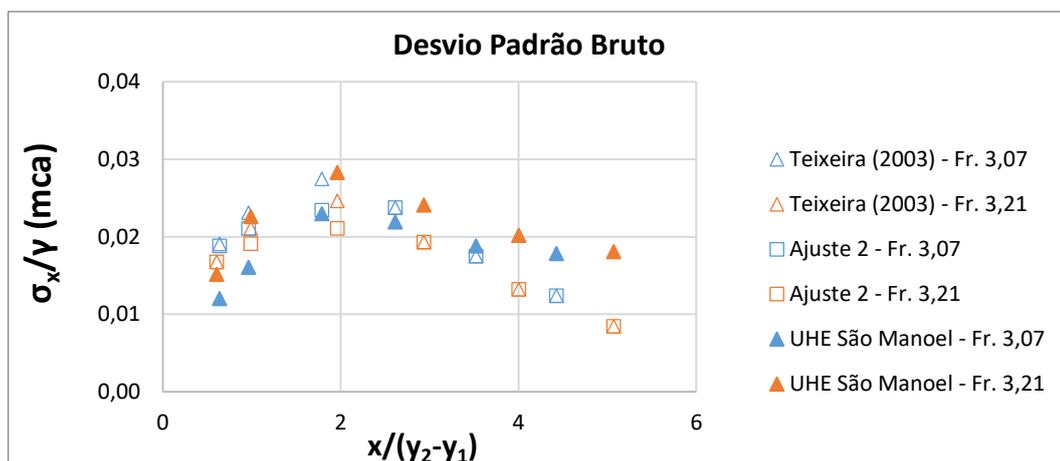


Figura 4 – Desvio padrão bruto da amostra coletada no modelo bidimensional da UHE São Manoel, comparação ao Ajuste 2 e ao ajuste proposto por Teixeira (2003), valores em metro, escala de modelo

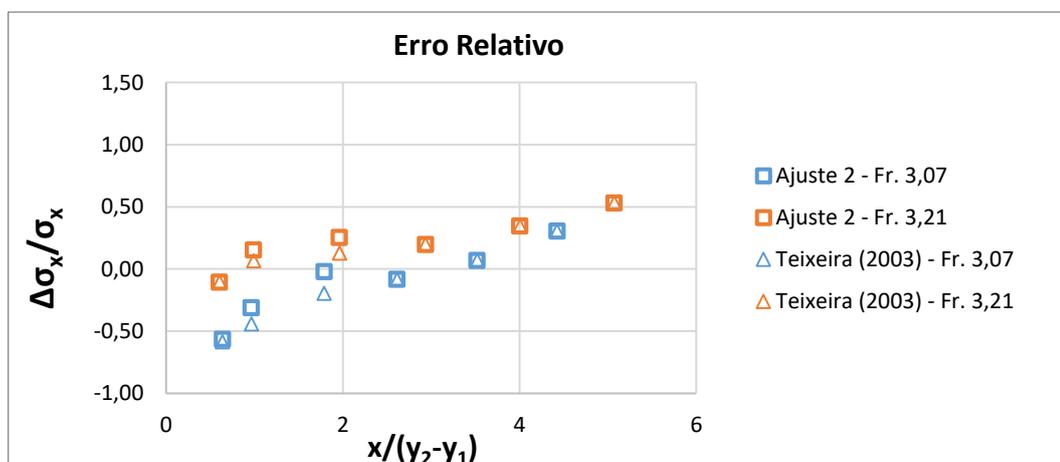


Figura 5 – Erro relativo na estimativa do desvio padrão da UHE São Manoel a partir da metodologia proposta por Teixeira (2003) e o Ajuste 2

CONCLUSÃO

Neste estudo, foram apresentados novos ajustes para a flutuação de pressão no trecho inicial de bacias de dissipação por ressalto hidráulico com baixo número de Froude. Em relação à metodologia desenvolvida por Teixeira (2003), verificou-se que os ajustes propostos apresentaram melhor desempenho na estimativa de flutuações de pressão de ressaltos com baixo número de Froude.

Não houve, entretanto, diferenças significativas entre o ajuste considerando toda a faixa de números de Froude e o ajuste compreendendo os ressaltos hidráulicos com baixo número de Froude, sugerindo que o desvio padrão não é fortemente influenciado por este adimensional.

Recomenda-se que estudos futuros utilizem dados de pressão instantânea coletados ao longo de toda a bacia de dissipação para a formulação de ajustes de flutuações de pressão para baixos números de Froude. Além disso, que investiguem o desempenho da metodologia proposta utilizando, para a validação, dados de pressão instantânea coletados em ressaltos hidráulicos livres, para uma faixa mais abrangente de números de Froude.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos pesquisadores que gentilmente cederam seus dados para o presente trabalho, bem como ao IPH/UFRGS, à Eletrobrás-Furnas, ao CNPq, à CAPES e ao Finep.

REFERÊNCIAS

ENDRES, L. A. M. Contribuição ao desenvolvimento de um sistema para a aquisição e tratamento de dados de pressões instantâneas em laboratório. 104f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Porto Alegre, 1990.

EPE. (2018). *Plano Decenal de Expansão de Energia 2027*. Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro-RJ, 345 p.

HAMPE, R. F. (2018). Previsão de pressões extremas em bacias de dissipação por ressalto hidráulico com baixo número de Froude. 167f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Porto Alegre, 2018.

LOPARDO, R. A. (2013). “*Extreme Velocity Fluctuations below Free Hydraulic Jumps*”. *Journal of Engineering*, v. 2013.

MARQUES, M. G.; DRAPEAU, J.; VERRETTE, J. L. (1997). “*Flutuação de pressão em um ressalto hidráulico*”. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 2, n. 2, pp. 45-52.

MARQUES, M. G.; ALMEIDA, F. M.; ENDRES, L. A. M. (1999). “*Adimensionalização de pressões médias em bacias de dissipação por ressalto hidráulico*” in *Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Belo Horizonte, Nov. 1999, pp. 1-14.

MARQUES, M. G.; HAMPE, R. F.; SOUZA, P. E. A.; TEIXEIRA, E. D. (2017). “*Previsão de pressões extremas mínimas em bacia de dissipação com baixo número de Froude*” in *Anais do XXXI Seminário Nacional de Grandes Barragens*, Belo Horizonte, Maio 2017, pp. 1-15.

MCPHERSON, B. L.; LESLEIGHTER, E. J.; SCRIVEN, D. C.; BOLLAERT, E. F. R. (2015). “*Physical and Computational Scour Modelling System Analysis-Case Study for Paradise Dam*,

Queensland” in Anais do Australian National Committee on Large Dams Conference, Brisbane, Nov. 2015, pp. 1-8.

TEIXEIRA, E. D. (2003). Previsão dos valores de pressão junto ao fundo em bacias de dissipação por ressalto hidráulico. 116f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Porto Alegre, 2003.