

XXIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

PRESSÕES EXTREMAS MÁXIMAS EM BACIAS DE DISSIPAÇÃO POR RESSALTO HIDRÁULICO COM BAIXO NÚMERO DE FROUDE

Renato Steinke Junior¹; Carolina Kuhn Novakoski²; Leandro Broch Ferreira³; Leandro de Sousa Oliveira⁴; Marcos Vinicius Fernandes Trindade⁵; Alexandre Castro Prestes⁶; Mauricio Dai Prá⁷; Marcelo Giulian Marques⁸; Eder Daniel Teixeira⁹

RESUMO - Ressaltos hidráulicos são comumente utilizados como a forma de dissipação de energia nas estruturas de segurança de barragens. Força-se a ocorrência deste fenômeno nas chamadas bacias de dissipação, que são lajes de concreto justapostas, construídas a jusante do vertedouro. Devido à sua turbulência, à incorporação de ar e às bruscas variações de velocidades e pressão, o ressalto hidráulico é capaz de dissipar a energia do escoamento e devolvê-lo ao leito do rio de forma a causar menos impactos. Apesar dos grandes avanços feitos por meio de investigações científicas sobre o assunto nos últimos 70 anos, a maioria dos estudos dedicou atenção aos ressaltos ditos estáveis, mais comuns. Porém, pouco se avançou na compreensão dos ressaltos com baixos números de Froude, que ocorrem em um número significativo de barragens a fio d'água com altas vazões e pequenas quedas. Este artigo aborda a caracterização das pressões hidrodinâmicas em ressaltos hidráulicos com baixos números de Froude, mais especificamente no que diz respeito às pressões máximas. Foram coletados dados experimentais em modelos físicos, que foram comparados com resultados de outros autores por meio de análise estatística adimensional. Verificou-se que os ressaltos com baixos números de Froude apresentam diferenças em relação aos ressaltos estáveis, em partes devido ao jato oscilante presente naqueles e ausente nestes.

Palavras-Chave – Ressalto hidráulico; pressões extremas máximas; baixo número de Froude.

INTRODUÇÃO

Os vertedouros são responsáveis pela descarga segura do volume de água excedente em uma barragem, em época de cheias. Devido à elevada energia cinética que o escoamento desenvolve ao percorrer o vertedouro, até chegar ao pé do barramento, faz-se necessário o uso de estruturas que permitam a dissipação da energia, possibilitando o retorno do escoamento ao ambiente em condições hidráulicas adequadas. As bacias de dissipação, implantadas a jusante dos vertedouros, têm o objetivo de dissipar a energia residual através da formação de um ressalto hidráulico, um fenômeno caracterizado pela sua turbulência e por grandes oscilações de pressão e velocidade. Esse fenômeno é formado pelo encontro entre um escoamento rápido (quando o número de Froude F_1 é maior que

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

2) Doutoranda em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (IPH/UFRGS); carolkn04@gmail.com

3) Graduando em Engenharia Hídrica (UFRGS); leandro.broch@acad.pucrs.br

4) Graduando em Engenharia de Energia (UFRGS); leandro_oliveira18.10.95@hotmail.com

5) Graduando em Engenharia Mecânica (UFRGS); mvfrindade@gmail.com

6) Graduando em Engenharia Hídrica (UFRGS); alexandreastrocastroprestes@gmail.com

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

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

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

um) com um escoamento lento ($F_1 < 1$). O número de Froude é uma grandeza adimensional que representa a razão entre as forças inerciais e as forças gravitacionais do escoamento, e pode ser calculado na seção de entrada do ressalto (seção transversal 1) conforme a Equação 1.

$$F_1 = \frac{v_1}{\sqrt{g \cdot y_1}} \quad (1)$$

Em que:

y_1 é a altura da lâmina de água na seção de entrada da bacia de dissipação (m);

v_1 é a velocidade média (m/s);

g é a aceleração da gravidade (m/s²).

Segundo Chow (1959) e Peterka (1984), o número de Froude na entrada da bacia pode ser utilizado para classificar o ressalto hidráulico em diferentes faixas. As possíveis classificações para o ressalto hidráulico são: pré-ressalto ($1,0 < F_1 < 1,7$), ressalto fraco ($1,7 < F_1 < 2,5$); ressalto oscilante ($2,5 < F_1 < 4,5$), ressalto estável ($4,5 < F_1 < 9,0$) e ressalto forte ($F_1 > 9,0$).

O Brasil possui um potencial hidrelétrico a ser explorado de aproximadamente 68 GW e, na próxima década, deve expandir sua capacidade instalada em 6,4 GW (EPE, 2019; EPE, 2020). Grande parte dessa expansão deverá ser implementada no interior da bacia amazônica, visto que uma parcela representativa do potencial das regiões sul e sudeste já foi aproveitada. A característica de “planície” da Amazônia brasileira e a enorme vazão dos rios lá presentes contribuem para a formação de ressaltos hidráulicos com baixos números de Froude ($F_1 < 4,5$) no pé das barragens.

Para que as bacias de dissipação sejam dimensionadas de forma segura, evitando-se a ocorrência de danos provenientes da instabilidade do ressalto hidráulico, é importante que os esforços atuantes nas estruturas sejam conhecidos. Diversas pesquisas já foram desenvolvidas com o objetivo de mensurar esses esforços em bacias de dissipação com números de Froude maiores que 4,5, podendo-se citar Endres (1990), Marques (1995), Teixeira (2003), Novakoski (2016) e Stojnic (2021). Porém, para o caso de ressalto hidráulico com baixos números de Froude, existem ainda poucas pesquisas disponíveis, dentre as quais se pode citar Liu et al. (2004), Lopardo (2013), Li et al. (2015), Hampe (2018) e Steinke (2021).

O objetivo deste trabalho é apresentar as pressões extremas máximas que ocorrem em uma bacia de dissipação, exercidas pelo ressalto hidráulico com baixo número de Froude. Dessa forma, serão apresentadas as pressões com probabilidade de não-excedência de 99% e 99,9% e também o coeficiente estatístico de probabilidade N para as mesmas porcentagens. O coeficiente N é utilizado para descrever a distribuição de probabilidade, já que as pressões desenvolvidas em um ressalto hidráulico não seguem uma distribuição gaussiana (TEIXEIRA, 2003).

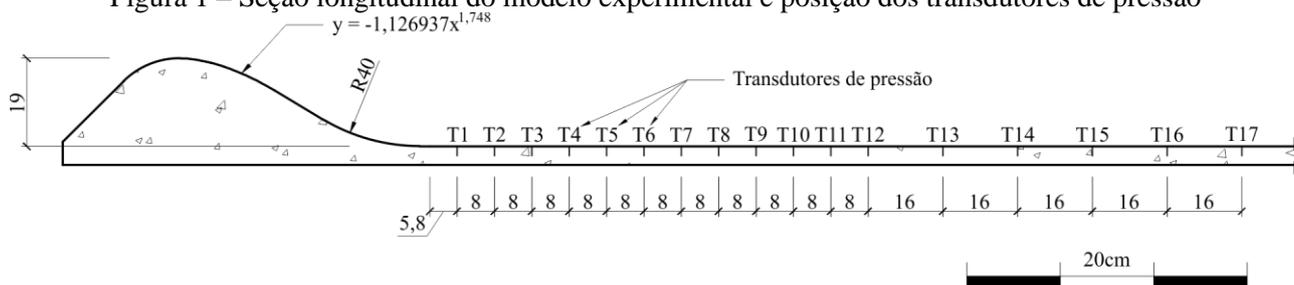
MATERIAIS

Os dados deste estudo foram coletados em um modelo físico presente no Laboratório de Obras Hidráulicas – LOH, do Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH/UFRGS. O modelo é constituído de um canal de 40 cm de largura e 80 cm de altura, no qual foi instalada uma ogiva de acrílico que reproduz, na escala 1:50, o vertedouro da Usina Hidrelétrica de Santo Antônio, em Porto Velho/RO. A jusante do vertedouro, uma placa de acrílico de 185 cm de comprimento representa a bacia de dissipação, servindo como fundo para o canal. Ressalta-se que o modelo é descaracterizado de sua

estrutura protótipo pelo fato de esta contar com pilares, comportas e diferentes condições de jusante. A fim de tornar o estudo mais genérico, decidiu-se não incluir estes elementos no modelo.

Ao longo do eixo longitudinal da placa, foram instalados 17 transdutores de pressão da marca Omega, modelo PX419. Os sensores adquiriram valores de pressão instantânea a uma frequência de 100 Hz, durante 600 segundos, totalizando 60.000 dados por tomada de pressão por ensaio. A Figura 1 apresenta a seção transversal do modelo utilizado, a equação do perfil vertente e a posição longitudinal de cada um dos transdutores de pressão. Um medidor de vazão eletromagnético com precisão de até $\pm 5\%$ foi utilizado para medir as vazões, que variaram de 13 a 150 L/s.

Figura 1 – Seção longitudinal do modelo experimental e posição dos transdutores de pressão



Foram conduzidos seis ensaios sob diferentes vazões, as quais resultaram nas condições hidráulicas apresentadas resumidamente na Tabela 1, sendo Q a vazão total, q a vazão específica, y_2 a altura conjugada lenta, R_1 o número de Reynolds e W_1 o número de Weber. A Figura 2 apresenta o ressalto hidráulico formado no modelo para a vazão de 100 L/s. A lâmina de água a jusante foi ajustada com o auxílio de uma comporta, de forma que todos os ressaltos hidráulicos ensaiados fossem livres (não-afogados), ou seja, a sua seção de entrada coincide com o início da bacia de dissipação.

Tabela 1 – Condições de ensaio

Q (m ³ /s)	q (m ² /s)	F_1	y_1 (m)	y_2 (m)	R_1	W_1
0,013	0,033	4,6	0,017	0,106	$3,3 \times 10^4$	891
0,025	0,064	3,8	0,030	0,150	$6,4 \times 10^4$	1.848
0,035	0,088	3,4	0,041	0,178	$8,8 \times 10^4$	2.655
0,050	0,126	3,0	0,057	0,211	$1,3 \times 10^5$	3.852
0,100	0,252	2,3	0,108	0,296	$2,5 \times 10^5$	8.137
0,150	0,377	1,9	0,162	0,350	$3,8 \times 10^5$	12.208

Figura 2 – Ressalto hidráulico formado para $Q = 100$ L/s e $F_1 = 2,3$



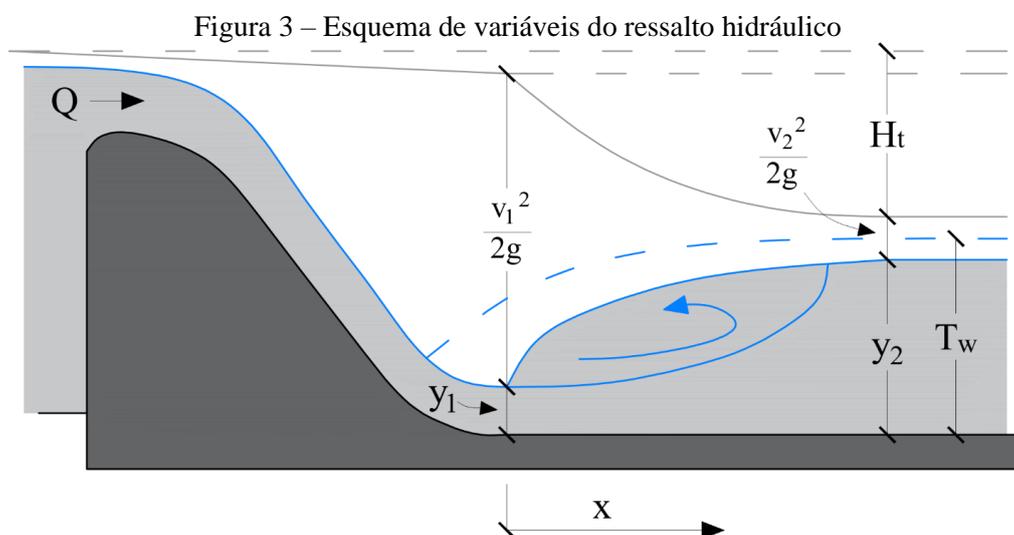
Além dos valores de pressão coletados, mencionados acima, foram também empregados na análise os dados de outros pesquisadores que, de forma semelhante, analisaram pressões instantâneas em bacias de dissipação por ressalto hidráulico, seja este com número de Froude dito estável ($4,5 < F_1 < 9,0$) ou baixo ($F_1 < 4,5$). As condições de ensaio desses pesquisadores são apresentadas na Tabela 2. Com exceção dos ensaios realizados por Hampe (2018) no modelo da UHE São Manoel (SM), todos os ensaios foram conduzidos com ressaltos livres. Este modelo e o modelo da UHE Santo Antônio (SA), também utilizado por Hampe (2018), possuem pilares e comportas, enquanto os outros não.

Tabela 2 – Condições de ensaio dos estudos utilizados para comparação

Estudo	Frequência de aquisição (Hz)	Tempo de amostragem (s)	nº de transdutores	nº de vazões	Faixa do F_1	Faixa do R_1
Endres (1990)	100	100	11	5	$4,3 < F_1 < 8,6$	$6,9 \times 10^4 < R_1 < 3,5 \times 10^5$
Marques (1995)	50	200	22	6	$4,2 < F_1 < 9,3$	$5,8 \times 10^4 < R_1 < 2,7 \times 10^5$
Dai Prá (2011)	500	600	14	6	$4,38 < F_1 < 9,26$	$4,3 \times 10^4 < R_1 < 2,2 \times 10^5$
Hampe (2018) SA	100	600	4	7	$1,73 < F_1 < 7,56$	$6,9 \times 10^4 < R_1 < 4,4 \times 10^5$
Hampe (2018) SM	100	600	6	2	$3,07 < F_1 < 3,21$	$1,6 \times 10^5 < R_1 < 2,1 \times 10^5$

MÉTODO DE ANÁLISE DOS DADOS

A partir das amostras de pressão instantânea coletadas e reunidas, foi conduzida uma análise estatística abrangendo os quantis das pressões extremas máximas e os coeficientes estatísticos de distribuição de probabilidades N , que permitem descrever distribuições de probabilidades não gaussianas. Essas grandezas foram plotadas em gráficos com o eixo das abcissas representando a posição longitudinal adimensionalizada, calculada segundo Marques et al. (1997), conforme mostrado na Equação 2. A Figura 3 é uma representação esquemática do ressalto hidráulico e contém alguns dos parâmetros aqui utilizados: a vazão Q , a posição longitudinal x , as alturas conjugadas y_1 e y_2 , a lâmina de água de jusante T_w e a energia dissipada ao longo do ressalto H_t .



Os quantis de pressão extrema máxima, expressos em metros de coluna d'água, foram adimensionalizados conforme a Equação 3 (MARQUES et al., 1997). A análise abrangeu as probabilidades 99% e 99,9%. Para estas mesmas probabilidades, também foram calculados os valores do coeficiente estatístico de probabilidade N , segundo apresentado por Teixeira (2003) e conforme a Equação 4. Conforme sugerido por Marques et al. (1999), foi introduzido o fator y_2/T_w na Equação 3 a fim de se lidar com os dados provenientes dos ressaltos afogados de Hampe (2018).

$$\Gamma = \frac{x}{y_2 - y_1} \quad (2)$$

$$\Psi_{x\%} = \frac{P_{x\%} - y_1}{y_2 - y_1} \frac{y_2}{T_w} \quad (3)$$

$$N_{x\%} = \frac{P_{x\%} - P_x}{\sigma_x} \quad (4)$$

Em que:

P_x é a pressão média da amostra, em metros de coluna d'água (m);

$P_{x\%}$ é o quantil "x" de pressão extrema, em metros de coluna d'água (m);

σ_x é o desvio padrão das pressões instantâneas, em metros de coluna d'água (m);

Γ é a posição longitudinal adimensional;

$\Psi_{x\%}$ é o quantil "x" de pressão extrema adimensional;

$N_{x\%}$ é o coeficiente estatístico de distribuição de probabilidade, referente à porcentagem "x".

RESULTADOS

Uma das maneiras de se compreender as cargas dinâmicas devido às flutuações de pressão no ressalto hidráulico é usando pressões com uma certa probabilidade de não-excedência (grandeza estatística também chamada de percentil, ou quantil), por exemplo 1% (TOSO, BOWERS, 1988). As pressões extremas mínimas e os coeficientes estatísticos N das amostras de dados aqui utilizadas (porcentagens 1% e 0,1%) estão apresentados em Steinke et al. (2021). Aqui, serão apresentados apenas os resultados para as porcentagens 99% e 99,9%.

A Figura 4 e a Figura 5 mostram as pressões extremas máximas. Até a posição longitudinal adimensionalizada 4, a distribuição dos pontos segue o mesmo padrão observado por Hampe (2018), porém se apresenta inferior aos dados de Endres (1990) e Marques (1995). Além disso, percebe-se que os valores das pressões máximas aumentam conforme o número de Froude. Sugere-se que este efeito se deva ao amortecimento proporcionado pelo jato oscilante sob o rolo do ressalto (Figura 2), o qual se torna mais espesso à medida que o número de Froude diminui. A influência da geometria do modelo também pode ser um fator que contribui para este comportamento, conforme indicado por Hampe (2018). Na parte final do ressalto ($\Gamma > 5$), os valores encontrados são superiores aos dos outros autores.

Sabe-se que a distribuição de probabilidades das pressões flutuantes ao longo do ressalto hidráulico não é gaussiana, uma vez que o coeficiente de assimetria é diferente de 0 e o coeficiente de curtose é diferente de 3 ao longo da bacia (TOSO; BOWERS, 1988; MARQUES et al., 1997; TEIXEIRA, 2003). Assim, o coeficiente estatístico N se torna útil para descrever tal distribuição.

Figura 4 – Quantil 99% da distribuição de pressões

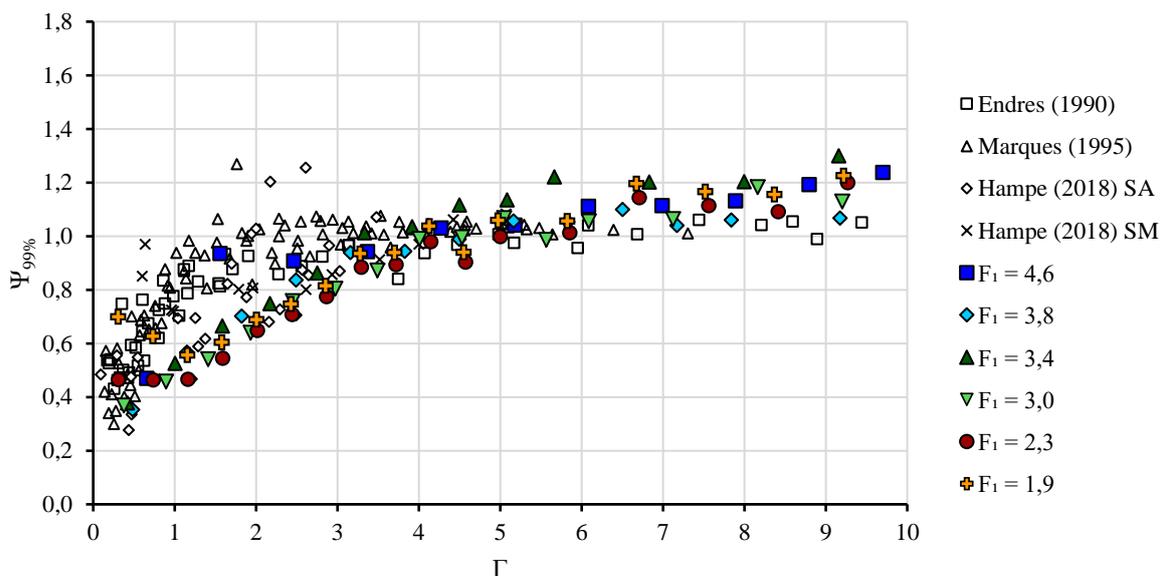
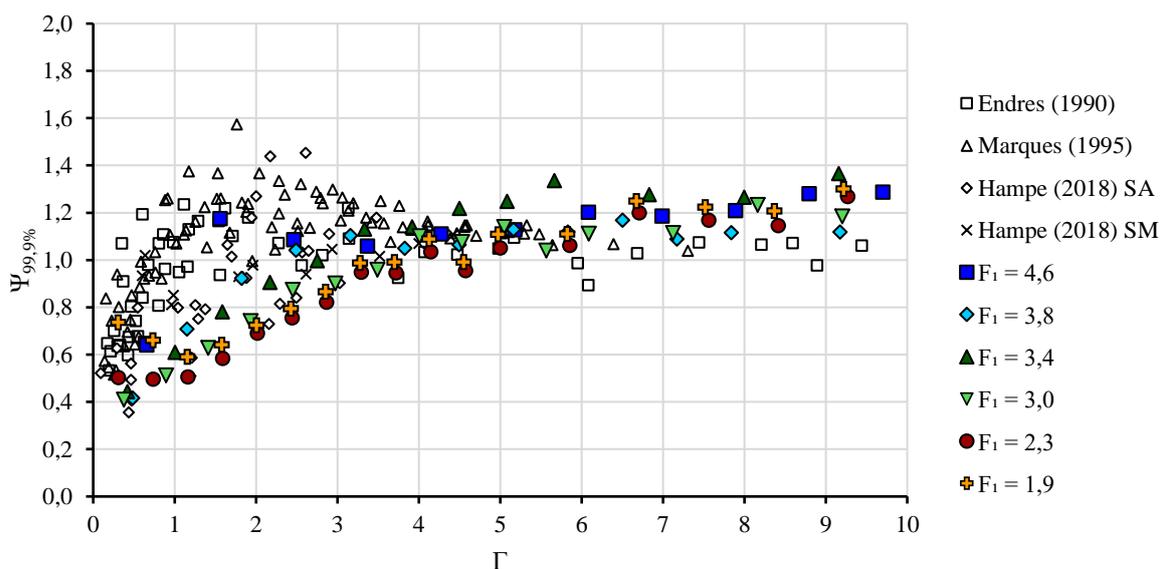


Figura 5 – Quantil 99,9% da distribuição de pressões



Os valores do coeficiente N são apresentados na Figura 6 e na Figura 7, para as probabilidades 99% e 99,9%, respectivamente. Verifica-se uma influência do número de Froude na região $0 < \Gamma < 2$, principalmente na Figura 7: quanto maior o número de Froude, maiores os coeficientes N . De fato, os pontos correspondentes a $F_1 = 4,6$ e $F_1 = 3,8$ são relativamente semelhantes aos resultados encontrados por Dai Prá (2011), enquanto os valores encontrados para os menores números de Froude se aproximam da tendência verificada por Hampe (2018). Esse comportamento pode ser explicado pela Equação 4, a qual foi empregada para calcular os coeficientes N . Sabe-se que para $\Gamma < 4$ os valores do desvio padrão de ressaltos estáveis ($4,5 < F_1 < 9,0$) são maiores do que os de ressaltos com baixo número de Froude ($1,7 < F_1 < 4,5$), conforme Steinke et al. (2021). Mesmo assim, as pressões extremas máximas daqueles são muito maiores do que as destes, fazendo com que os valores de $\Psi_{99\%}$ e $\Psi_{99,9\%}$ sejam menores nos ressaltos de baixo número de Froude. Para $\Gamma > 2$, há uma concordância geral dos pontos.

Figura 6 – Coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades $N_{99\%}$

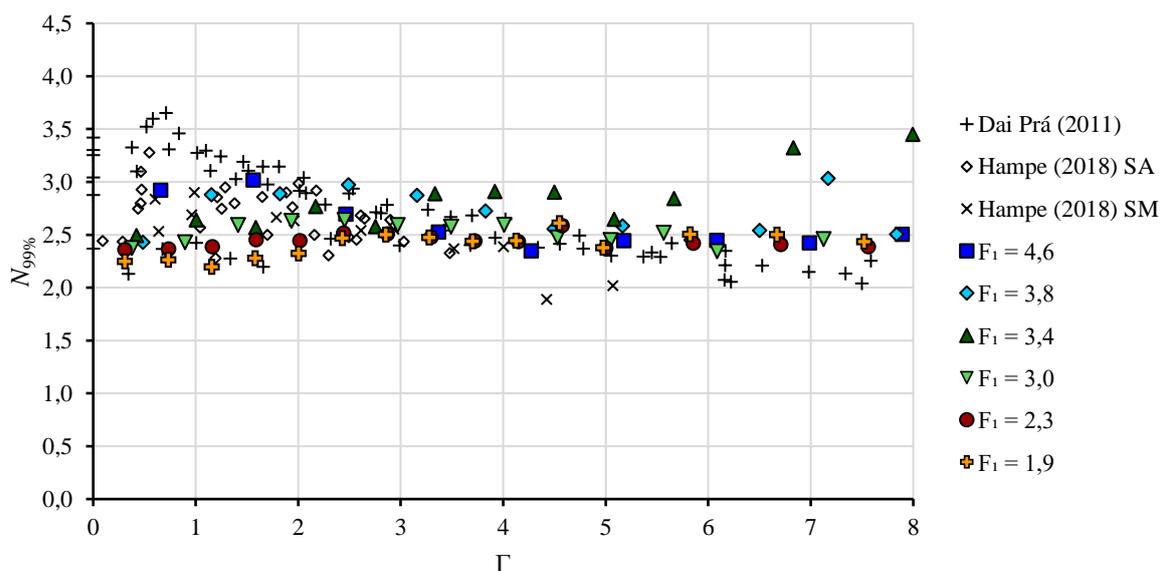
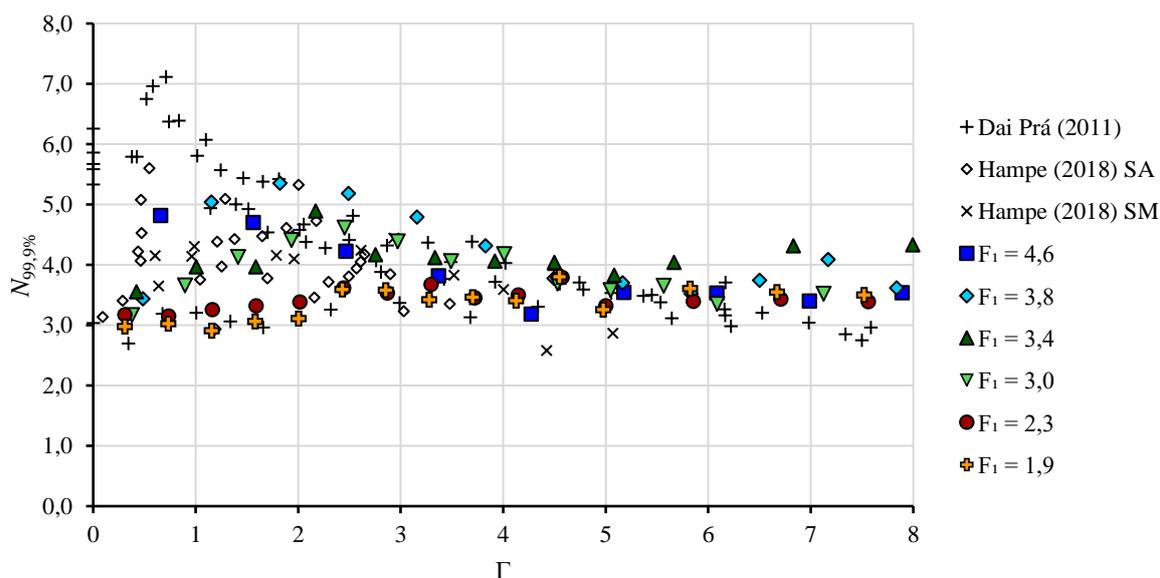


Figura 7 – Coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades $N_{99,9\%}$



CONCLUSÃO

A partir de dados experimentais de pressão instantânea, foi conduzida uma análise estatística visando determinar os valores extremos das amostras, bem como o coeficiente estatístico que descreve tais distribuições de probabilidade. Foram empregados dados provenientes de ressaltos hidráulicos estáveis ($4,5 < F_1 < 9,0$) e de ressaltos com baixos números de Froude ($F_1 < 4,5$).

Os resultados encontrados revelam que o jato oscilante presente nos ressaltos hidráulicos com baixos números de Froude atenua os valores de pressão máxima, principalmente na primeira metade da bacia. Além disso, na região inicial da bacia verificou-se uma dependência dos valores de N com respeito ao número de Froude e uma maior discrepância em relação aos pontos relativos aos ressaltos estáveis. Para $\Gamma > 2$, de forma geral, os valores de N resultam em torno de 2,5 e 3,5 para as probabilidades de 99% e 99,9%, respectivamente.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos pesquisadores que gentilmente cederam seus dados para a condução deste estudo, bem como ao IPH/UFRGS, a Furnas Centrais Elétricas S.A., à Foz do Chapecó Energia S.A., ao CNPq e à CAPES.

REFERÊNCIAS

- CHOW, V. T. (1959). *Open-Channel Hydraulics*. McGraw-Hill, New York, 680 p.
- DAI PRÁ, M. *Uma abordagem para determinação das pressões junto ao fundo de dissipadores de energia por ressalto hidráulico*. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, 2011.
- ENDRES, L. A. M. *Contribuição ao desenvolvimento de um sistema para a aquisição e tratamento de dados de pressões instantâneas em laboratório*. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, 1990.
- EPE. (2019). *Plano Decenal de Expansão de Energia 2029*. Empresa de Pesquisa Energética – EPE, Rio de Janeiro, 393 p.
- EPE. (2020). *Plano Nacional de Energia 2050*. Empresa de Pesquisa Energética – EPE, Rio de Janeiro, 243 p.
- HAMPE, R. F. *Previsão de pressões extremas em bacias de dissipação por ressalto hidráulico com baixo número de Froude*. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, 2018.
- LI, L.; LIAO, H.; LIU, D.; JIANG, S. (2015). “*Experimental investigation of the optimization of stilling basin with shallow-water cushion used for low Froude number energy dissipation*”. *Journal of Hydrodynamics* 27(4), pp. 522-529.
- LIU, M.; RAJARATNAM, N.; ZHU, D. Z. (2004). “*Turbulence Structure of Hydraulic Jumps of Low Froude Numbers*”. *Journal of Hydraulic Engineering* 130(6), pp. 511-520.
- LOPARDO, R. A. (2013). “*Presiones mínimas y velocidades máximas instantâneas en un dissipador a resalto hidráulico oscilante*” in *Anais do XXIV Congresso Nacional Del Agua*, San Juan, 2013.
- MARQUES, M. G. *Nouvelle approche pour le dimensionnement des dissipateurs à auge*. Tese (Doutorado) – Quebec: Faculté des sciences et génie de La Université Laval, 1995.
- 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, 1999.
- MARQUES, M. G.; DRAPEAU, J.; VERRETTE, J.-L. (1997). “*Flutuação de pressão em um ressalto hidráulico*”. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 2(2), pp. 45-52.
- NOVAKOSKI, C. K. *Análise da distribuição longitudinal das pressões em um ressalto hidráulico formado a jusante de vertedouro em degraus*. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, 2016.
- PETERKA, A. J. (1984). *Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators*. USBR, Denver, 222 p.
- STEINKE, R. J.; DAI PRÁ, M.; LOPARDO, R. A.; MARQUES, M. G.; MELO, J. M.; PRIEBE, P. S.; TEIXEIRA, E. D. (2021). “*Low Froude Number Stilling Basins – Hydrodynamic Characterization*”. *Journal of Hydraulic Engineering* 147(4): 04021010.

STOJNIC, I.; PFISTER, M.; MATOS, J.; SCHLEISS, A. J. (2021). “*Effect of 30-Degree Sloping Smooth and Stepped Chute Approach Flow on the Performance of a Classical Stilling Basin*”. Journal of Hydraulic Engineering 147(2): 04020097.

TEIXEIRA, E. D. *Previsão dos valores de pressão junto ao fundo em bacias de dissipação por ressalto hidráulico*. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, 2003.

TOSO, J. W.; BOWERS, E. (1988). “*Extreme pressures in hydraulic-jump stilling basins*”. Journal of Hydraulic Engineering 114(8), pp. 829-843.