

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO
AMBIENTAL

RENATO STEINKE JÚNIOR

**CARACTERIZAÇÃO DAS PRESSÕES EM BACIAS DE DISSIPAÇÃO POR
RESSALTO HIDRÁULICO LIVRE COM BAIXO NÚMERO DE FROUDE**

Porto Alegre
2020

RENATO STEINKE JÚNIOR

**CARACTERIZAÇÃO DAS PRESSÕES EM BACIAS DE DISSIPAÇÃO POR
RESSALTO HIDRÁULICO LIVRE COM BAIXO NÚMERO DE FROUDE**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Eder Daniel Teixeira

Coorientador: Prof. Dr. Mauricio Dai Prá

Porto Alegre

2020

Steinke Junior, Renato

Caracterização das pressões em bacias de dissipação por ressalto hidráulico livre com baixo número de Froude / Renato Steinke Junior. -- 2020.
163 f.

Orientador: Eder Daniel Teixeira.

Coorientador: Mauricio Dai Prá.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2020.

1. Ressalto hidráulico. 2. Baixo número de Froude. 3. Bacia de dissipação. 4. Pressões hidrodinâmicas. I. Teixeira, Eder Daniel, orient. II. Dai Prá, Mauricio, coorient. III. Título.

RENATO STEINKE JÚNIOR

**CARACTERIZAÇÃO DAS PRESSÕES EM BACIAS DE DISSIPÇÃO POR
RESSALTO HIDRÁULICO LIVRE COM BAIXO NÚMERO DE FROUDE**

Esta Dissertação foi desenvolvida no Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob orientação do Professor Eder Daniel Teixeira e sob coorientação do Professor Maurício Dai Prá, ambos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, fevereiro de 2020

Prof. Dr. Eder Daniel Teixeira
Doutor pela UFRGS
Orientador

Prof. Dr. Mauricio Dai Prá
Doutor pela UFRGS
Coorientador

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Raúl Antônio Lopardo (UNLP/AR)
Doutor pela Université de Toulouse

Dr. José Falcão de Melo (LNEC/PT)
Doutor pela Universidade de Lisboa

Prof. Dr. Marcelo Giulian Marques (UFRGS)
Doutor pela Université Laval

AGRADECIMENTOS

Este trabalho, sem dúvida, não poderia ter sido executado sem a contribuição de diversas pessoas. Os meus sinceros agradecimentos:

Ao professor Eder Daniel Teixeira, pela orientação, pelo incentivo e pela confiança em mim depositada.

Ao professor Mauricio Dai Prá, pela prestatividade, pelo tempo disponibilizado e pelas indispensáveis contribuições.

Aos professores Luiz Augusto Magalhães Endres e Marcelo Giulian Marques, pelos conhecimentos transmitidos, pela didática e pela paciência.

A todos os colegas do Laboratório de Obras Hidráulicas, em especial àqueles que me deram essencial apoio na etapa de coleta de dados: Alexandre Castro Prestes, Leandro Broch Ferreira, Leandro de Sousa Oliveira e Marcos Fernandes Trindade. Agradeço também ao amigo Hugo Oliveira Fagundes, pelo auxílio indispensável no registro fotográfico dos ensaios.

Ao CNPq, pela bolsa de estudos concedida.

Um agradecimento especial à minha família, por todo o apoio, incentivo e compreensão. Muito obrigado.

E por último, porém mais importante, a Deus, que me presenteou com saúde, ânimo, perseverança e capacidade durante todo o período de mestrado. Somente a Ele sejam dadas glória e honra.

RESUMO

Estruturas hidráulicas vêm sendo, há algumas décadas, tema de grande interesse por parte da comunidade técnico-científica. Apesar dos avanços feitos nessa área, ainda há muito o que se investigar para atingir um grau de conhecimento adequado no projeto e execução dessas obras. Prova disso são os recentes danos ocorridos principalmente nas estruturas de extravasamento de barragens. Devido ao potencial hidrelétrico brasileiro e às tendências de crescimento econômico e populacional previstas para as próximas décadas, evidencia-se a importância de serem investigados os efeitos hidrodinâmicos do escoamento sobre estruturas hidráulicas. Assim, esta pesquisa teve por objetivo investigar o comportamento das pressões provenientes de ressaltos hidráulicos com baixo número de Froude, de forma a contribuir para o dimensionamento e projeto de bacias de dissipação seguras e econômicas. Após a implementação de uma instalação experimental constituída de vertedouro e bacia de dissipação, foram coletados valores de pressão instantânea ao longo da extensão do ressalto hidráulico para diferentes vazões. As amostras de dados foram analisadas por meio de parâmetros estatísticos adimensionais: média, desvio padrão, coeficientes de assimetria e curtose, valores extremos e coeficiente de distribuição de probabilidade. A análise também contemplou uma etapa de comparação com dados provenientes de outras pesquisas, tanto para ressaltos operando com baixo número de Froude quanto para ressaltos estáveis. Constatou-se que muitos desses parâmetros se comportam diferentemente para ressaltos com baixo número de Froude, em especial as flutuações de pressão. Além disso, foram testadas metodologias de previsão de pressões extremas existentes na literatura. Verificou-se que algumas das equações introduzidas pelos outros autores não descreviam suficientemente bem o comportamento dos valores de pressão provenientes de ressaltos com baixo número de Froude. Diante disso, foram propostos novos ajustes, os quais foram testados por meio de sua aplicação em amostras de pressão coletadas em outro modelo. O equacionamento proposto descreveu com maior precisão a tendência geral dos dados, especialmente na região final do ressalto. Por fim, como estudo de caso, as contribuições da presente pesquisa foram aplicadas no dimensionamento real de uma bacia de dissipação.

Palavras-chave: Ressalto hidráulico; Baixo número de Froude; Bacia de dissipação.

ABSTRACT

Hydraulic structures have been, for some decades, a topic of interest for the technical and scientific community. Despite the advances in the field, there is still a lot to investigate in order to reach a reasonable state-of-the-art on the design and construction of these structures. The recent damages occurred mainly in discharge structures of dams are a proof of this. Due to the Brazilian hydropower potential and due to the trends of economic and populational grow foreseen for the next decades, the importance of investigating hydrodynamic effects over hydraulic structures becomes clear. Thus, the objective of this study was to investigate the behavior of pressures generated by low Froude number hydraulic jumps, contributing to the design of safe and economic stilling basins. After the assembly of a physical model, composed by a spillway and a stilling basin, instantaneous pressures were sampled along the hydraulic jump for different flowrates. The data were analyzed using dimensionless statistical coefficients: mean, standard deviation, skewness and kurtosis coefficients, extreme values and probability distribution coefficients. The analysis also comprised a comparison with data from other researches, for both stable jumps and low Froude number jumps. Results show that many of these parameters behave differently in low Froude number hydraulic jumps, especially pressure fluctuations. In addition, methodologies already existent in the literature for the estimation of extreme pressure were tested. It was verified that some of the equations proposed by other authors do not describe the behavior of pressure values occurring in low Froude number jumps properly. Therefore, novel equations were proposed and tested, by applying them in pressure samples from another model. The proposed equations describe the data behavior more accurately, especially in the final part of the jump. Finally, as a case study, the contributions of the present research were applied on the design of an actual stilling basin.

Keywords: Hydraulic jump; Low Froude number; Stilling basin.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ressalto hidráulico formado na UHE de Porto Colômbia. Fonte: Marques, Almeida e Endres (1999).....	28
Figura 2 – Esquema de um ressalto hidráulico por Leonardo da Vinci. Fonte: Reti (1974) <i>apud</i> Teixeira (2003).....	29
Figura 3 – Raio adimensional do ressalto para diferentes vazões, líquidos e orientações. Fonte: adaptado de Bhagat <i>et al.</i> (2018)	31
Figura 4 – Os parâmetros do ressalto hidráulico a jusante de um vertedouro. Fonte: Dai Prá (2011).....	32
Figura 5 – As formas do ressalto hidráulico. Fonte: adaptado de Peterka (1984) e Teixeira (2008)	38
Figura 6 – Distinção entre o ressalto afogado e o ressalto submerso.....	39
Figura 7 – Graus de afogamento de um ressalto hidráulico. Fonte: adaptado de Hager (1992).....	40
Figura 8 – Porcentagem da energia dissipada em função da posição longitudinal do ressalto. Fonte: Marques <i>et al.</i> (1998).....	43
Figura 9 – Perfil de pressões no ressalto hidráulico. Fonte: Rajaratnam (1965).....	47
Figura 10 – Pressões instantâneas ao longo da estrutura de extravasamento. Fonte: adaptado de Bowers e Tsai (1969)	48
Figura 11 – Variação do desvio padrão das pressões ao longo do ressalto. Fonte: adaptado de Abdul Khader e Elango (1974)	50
Figura 12 – Flutuações de pressão adimensionalizadas. Fonte: Marques <i>et al.</i> (1997)	51
Figura 13 – Critérios para o cálculo da espessura da laje da bacia de dissipação. Fonte: Fiorotto e Rinaldo (1992).....	52
Figura 14 – Média (<i>a</i>) e desvio padrão (<i>b</i> até <i>f</i>) das forças hidrodinâmicas para diferentes comprimentos de laje e Fr_1 igual a 6. Fonte: Pinheiro, Quintela e Ramos (2007).....	53
Figura 15 – Flutuações de pressão adimensionalizadas. Fonte: Mees (2008)	54
Figura 16 – Flutuações de pressão adimensionalizadas. Fonte: Souza (2012)	55
Figura 17 – Pressões médias adimensionalizadas. Fonte: Hampe (2018)	56
Figura 18 – Flutuações de pressão adimensionalizadas. Fonte: Hampe (2018).....	57

Figura 19 – Pressões extremas registradas versus tempo de coleta. Fonte: Toso e Bowers (1988).....	59
Figura 20 – Pressões adimensionalizadas com probabilidade de não-excedência de 0,1%. Fonte: Hampe (2018)	60
Figura 21 – Pressões adimensionalizadas com probabilidade de não-excedência de 99,9%. Fonte: Hampe (2018)	60
Figura 22 – Distribuição longitudinal do coeficiente estatístico N. Fonte: Teixeira (2003)	62
Figura 23 – Dissociação e sobreposição de efeitos sobre a pressão média. Fonte: Dai Prá (2011)	63
Figura 24 – Comparação dos coeficientes estatísticos N. Fonte: Hampe (2018).....	64
Figura 25 – Vertedouro da Barragem de Oroville, escala 1:50. Fonte: “Miniaturizing America’s Tallest Dam”, 2017	65
Figura 26 – Exemplo de <i>aliasing</i> , ou dobramento. Fonte: adaptado de Bendat e Piersol (2010).....	70
Figura 27 – Planta e corte da instalação experimental (medidas em centímetros) ...	73
Figura 28 – Elementos do circuito hidráulico.....	75
Figura 29 – Ressalto hidráulico: vazão de 13 l/s e $Fr_1 = 4,6$	76
Figura 30 – Ressalto hidráulico: vazão de 25 l/s e $Fr_1 = 3,8$	76
Figura 31 – Ressalto hidráulico: vazão de 35 l/s e $Fr_1 = 3,4$	77
Figura 32 – Ressalto hidráulico: vazão de 50 l/s e $Fr_1 = 3,0$	77
Figura 33 – Ressalto hidráulico: vazão de 100 l/s e $Fr_1 = 2,3$	78
Figura 34 – Ressalto hidráulico: vazão de 150 l/s e $Fr_1 = 1,9$	78
Figura 35 – Esquema de energia ao longo do ressalto hidráulico.....	79
Figura 36 – Quadro de piezômetros. Vazão de 150 l/s e $Fr_1 = 1,9$	82
Figura 37 – Ampliação do quadro de piezômetros, mostrando o desenvolvimento das pressões médias	82
Figura 38 – Tomadas equipadas com transdutores de pressão.....	83
Figura 39 – Instalação dos transdutores no canal de ensaios.....	84
Figura 40 – Esquema do sistema de aquisição.....	84
Figura 41 – Perfil longitudinal do modelo utilizado e posição das tomadas de pressão. Fonte: Endres (1990).	91
Figura 42 – Perfil longitudinal do modelo utilizado e posição das tomadas de pressão. Fonte: Marques (1995).....	91

Figura 43 – Vertedouro, bacia de dissipação e tomadas de pressão de Dai Prá (2011)	92
Figura 44 – Perfil longitudinal do modelo utilizado e posição das tomadas de pressão. Fonte: Souza (2012).	92
Figura 45 – Perfil longitudinal do modelo da UHE São Manoel e posição das tomadas de pressão. Fonte: Hampe (2018).	93
Figura 46 – Planta e corte do canal de ensaios (medidas em centímetros)	97
Figura 47 – Esquema de variáveis do ressalto hidráulico	97
Figura 48 – Pressões médias adimensionalizadas: comparação entre este artigo e dados de outros autores	98
Figura 49 – Comporta plana instalada sobre a ogiva	99
Figura 50 – Pressões médias adimensionalizadas: comparação entre este artigo para soleira livre e com comporta e dados de Hampe (2018)	99
Figura 51 – Flutuações de pressão adimensionalizadas: comparação entre este artigo e dados de outros autores	100
Figura 52 – Altura do colchão de água para os números de Froude ensaiados	100
Figura 53 – Flutuações de pressão adimensionalizadas: comparação entre este artigo para soleira livre e com comporta e dados de Hampe (2018)	101
Figura 54 – Coeficiente de flutuação de pressão: comparação entre este artigo e dados de outros autores	101
Figura 55 – Coeficiente de assimetria: comparação entre este artigo e dados de outros autores	102
Figura 56 – Coeficiente de curtose: comparação entre este artigo e dados de outros autores	103
Figura 57 – Pressões com probabilidade de não-excedência de 0,1%: valores encontrados no presente artigo em comparação com demais autores	103
Figura 58 – Pressões com probabilidade de não-excedência de 1%: valores encontrados no presente artigo em comparação com demais autores	104
Figura 59 – Pressões com probabilidade de não-excedência de 99%: valores encontrados no presente artigo em comparação com demais autores	104
Figura 60 – Pressões com probabilidade de não-excedência de 99,9%: valores encontrados no presente artigo em comparação com demais autores	105
Figura 61 – Coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades N: dados do presente artigo em comparação com outros autores para o percentil 0,1%	105

Figura 62 – Coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades N: dados do presente artigo em comparação com outros autores para o percentil 1%	106
Figura 63 – Coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades N: dados do presente artigo em comparação com outros autores para o percentil 99%	106
Figura 64 – Coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades N: dados do presente artigo em comparação com outros autores para o percentil 99,9%	106
Figura 65 – Danos por cavitação na bacia de dissipação da UHE Porto Colômbia. Fonte: Teixeira (2008)	110
Figura 66 – As formas do ressalto hidráulico. Adaptado de Peterka (1984) e Teixeira (2008).....	111
Figura 67 – Planta e corte do modelo físico (medidas em centímetros).....	112
Figura 68 – Esquema de um ressalto hidráulico e suas variáveis.....	113
Figura 69 – Pressões médias adimensionalizadas em comparação com o ajuste proposto por Teixeira (2003)	114
Figura 70 – Erro relativo: metodologia proposta por Teixeira (2003) em relação aos dados amostrados.....	114
Figura 71 – Desvio padrão adimensionalizado em comparação com os ajustes propostos por Teixeira (2003) e Hampe (2018).....	115
Figura 72 – Erro relativo: metodologia proposta por Teixeira (2003) e Hampe (2018) com relação ao desvio padrão amostrado	115
Figura 73 – Dados amostrais de flutuação de pressão em comparação com o ajuste final proposto.....	116
Figura 74 – Erros relativos para o ajuste final proposto	116
Figura 75 – Desvio padrão dimensional para a UHE São Manoel: dados amostrais, ajustes de Teixeira (2003) e Hampe (2018) e novo ajuste proposto	117
Figura 76 – Erros dos ajustes propostos em relação aos dados amostrais	117
Figura 77 – Coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades N: dados deste artigo em comparação com os ajustes propostos por Teixeira (2003) e Hampe (2018) para as probabilidades de 0,1%, 1%, 99% e 99,9%.....	118
Figura 78 – Aplicação da metodologia de Teixeira (2003) e Hampe (2018) para os dados do presente estudo: percentil $P_{0,1\%}$	119
Figura 79 – Erro relativo entre a metodologia de Teixeira (2003) e Hampe (2018) e os dados do presente estudo: percentil $P_{0,1\%}$	119

Figura 80 – Aplicação da metodologia proposta para os dados do presente estudo: percentil $P_{0,1\%}$	119
Figura 81 – Erro relativo entre a metodologia proposta e os dados do presente estudo: percentil $P_{0,1\%}$	120
Figura 82 – Aplicação da metodologia de Teixeira (2003) e Hampe (2018) para os dados do presente estudo: percentil $P_{99,9\%}$	120
Figura 83 – Erro relativo entre a metodologia de Teixeira (2003) e Hampe (2018) e os dados do presente estudo: percentil $P_{99,9\%}$	120
Figura 84 – Aplicação da metodologia proposta para os dados do presente estudo: percentil $P_{99,9\%}$	121
Figura 85 – Erro relativo entre a metodologia proposta e os dados do presente estudo: percentil $P_{99,9\%}$	121
Figura 86 – Aplicação das metodologias para os dados da UHE São Manoel: percentil $P_{0,1\%}$	122
Figura 87 – Erros entre as metodologias e os dados do presente estudo: percentil $P_{0,1\%}$	122
Figura 88 – Aplicação das metodologias para os dados da UHE São Manoel: percentil $P_{99,9\%}$	123
Figura 89 – Erros entre as metodologias e os dados do presente estudo: percentil $P_{99,9\%}$	123
Figura 90 – Esquema construtivo das lajes de uma bacia de dissipação (MEES, 2008)	136
Figura 91 – Configuração das lajes ao longo do modelo da presente pesquisa	139
Figura 92 – Configuração das lajes ao longo do modelo de Dai Prá (2011)	139
Figura 93 – Redução do empuxo de montante devido à drenagem.....	140
Figura 94 – Diagrama de forças dos Cenários 1a e 1b	141
Figura 95 – Diagrama de forças dos Cenários 2a e 2b	142
Figura 96 – Diagrama de forças dos Cenários 3a e 3b	143
Figura 97 – Diagrama de forças do Cenário 5.....	144
Figura 98 – Diagrama de forças do Cenário 6.....	145
Figura 99 – Espessura mínima das lajes para $Fr1 = 3,0$	147
Figura 100 – Espessura mínima das lajes para $Fr1 = 4,6$	148
Figura 101 – Espessura mínima das lajes para $Fr1 = 6,9$	149

Figura 102 – Aplicação da metodologia de Teixeira (2003) e Hampe (2018) para os dados do presente estudo: percentil $P_{1\%}$	153
Figura 103 – Erro relativo entre a metodologia de Teixeira (2003) e Hampe (2018) e os dados do presente estudo: percentil $P_{1\%}$	154
Figura 104 – Aplicação da metodologia proposta para os dados do presente estudo: percentil $P_{1\%}$	154
Figura 105 – Erro relativo entre a metodologia proposta e os dados do presente estudo: percentil $P_{1\%}$	155
Figura 106 – Aplicação da metodologia de Teixeira (2003) e Hampe (2018) para os dados do presente estudo: percentil $P_{99\%}$	156
Figura 107 – Erro relativo entre a metodologia de Teixeira (2003) e Hampe (2018) e os dados do presente estudo: percentil $P_{99\%}$	156
Figura 108 – Aplicação da metodologia proposta para os dados do presente estudo: percentil $P_{99\%}$	157
Figura 109 – Erro relativo entre a metodologia proposta e os dados do presente estudo: percentil $P_{99\%}$	157
Figura 110 – Aplicação das metodologias para os dados da UHE São Manoel: percentil $P_{1\%}$	158
Figura 111 – Erros entre as metodologias e os dados do presente estudo: percentil $P_{1\%}$	158
Figura 112 – Aplicação das metodologias para os dados da UHE São Manoel: percentil $P_{99\%}$	159
Figura 113 – Erros entre as metodologias e os dados do presente estudo: percentil $P_{99\%}$	159
Figura 114 – Ajustes inicialmente encontrados para a flutuação de pressão adimensionalizada.....	160
Figura 115 – Ajustes inicialmente encontrados para a flutuação de pressão adimensionalizada, para cada número de Froude.....	161
Figura 116 – Comportamento dos coeficientes a , b , c e d , e curvas ajustadas.....	162
Figura 117 – Dados amostrais de flutuação de pressão em comparação com o ajuste final proposto.....	163

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Alguns dissipadores brasileiros com baixo número de Froude	23
Tabela 2 – Resumo dos principais danos observados em obras hidráulicas	24
Tabela 3 – Contribuições de diversos pesquisadores para o ressalto hidráulico	32
Tabela 4 – Relação entre as alturas conjugadas para canal retangular com fundo plano horizontal.....	34
Tabela 5 – Equações para o comprimento do ressalto hidráulico	36
Tabela 6 – Frequência de aquisição e tempo de amostragem dos dados	71
Tabela 7 – Resumo das características da instalação experimental.....	75
Tabela 8 – Resumo da campanha de ensaios	80
Tabela 9 – Relação dos modelos de transdutores utilizados	83
Tabela 10 – Condições de ensaio	96
Tabela 11 – Condições de ensaio dos autores cujos dados foram utilizados para comparação.....	97
Tabela 12 – Características do ensaio com comportas.....	99
Tabela 13 – Condições de ensaio	112
Tabela 14 – Coeficientes do polinômio de terceiro grau	115
Tabela 15 – Parâmetros a, b e c para determinação do coeficiente N para ressaltos hidráulicos com baixo número de Froude	118
Tabela 16 – Fonte das equações utilizadas na estimativa das pressões extremas	118
Tabela 17 – Espessura mínima das lajes para $Fr_1 = 3,0$	146
Tabela 18 – Espessura mínima das lajes para $Fr_1 = 4,6$	148
Tabela 19 – Espessura mínima das lajes para $Fr_1 = 6,9$	149
Tabela 20 – Contribuição relativa das forças considerando a hipótese “a”	150
Tabela 21 – Contribuição relativa das forças considerando a hipótese “b”	151
Tabela 22 – Coeficientes do polinômio de terceiro grau	160

LISTA DE SIGLAS

CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

FURNAS – Furnas Centrais Elétricas S. A.

IPH – Instituto de Pesquisas Hidráulicas

LAHE – Laboratório de Hidráulica Experimental e Recursos Hídricos

LOH – Laboratório de Obras Hidráulicas

PVC – Policloreto de vinila

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UHE – Usina Hidrelétrica

USBR – United States Bureau of Reclamation

LISTA DE SÍMBOLOS

- A_d : coeficiente de assimetria;
- C_p : coeficiente de pressões extremas;
- C'_p : coeficiente de flutuação de pressão;
- E_L : perda de carga teórica ao longo do ressalto;
- E'_L : perda de carga de fato dissipada ao longo do ressalto;
- Fr : número de Froude (obs.: o subscrito "1" refere-se à seção de entrada do ressalto, neste e nos demais números adimensionais)
- f_a : frequência de aquisição dos dados;
- f_N : frequência de Nyquist, ou frequência de corte;
- g : aceleração devido à gravidade;
- h : carga piezométrica;
- H_t : perda de energia ao longo da estrutura de dissipação;
- K : coeficiente de curtose;
- K_f : coeficiente de atrito, função de Fr_1 ;
- L_j : comprimento do ressalto propriamente dito;
- L_r : comprimento do rolo;
- L_{sj} : comprimento do ressalto hidráulico afogado ou submergido;
- $N_{x\%}$: coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades;
- P : pressão instantânea junto ao fundo do ressalto hidráulico (altura piezométrica equivalente);
- \bar{P} ou P_x : valor médio das pressões instantâneas (altura piezométrica equivalente);
- P' : parcela da pressão instantânea chamada de flutuação de pressão (altura piezométrica equivalente);
- $P_{x\%}$: percentil x da amostra de pressões (altura piezométrica equivalente);
- Re : número de Reynolds;
- S^* : fator de submergência ou afogamento conforme Rajaratnam (1967);
- S : fator de submergência ou afogamento conforme Marques *et al.* (1999);
- T_w : lâmina de água a jusante do ressalto hidráulico submergido ou afogado;
- v : velocidade média do escoamento;
- We : número de Weber;
- x : distância longitudinal a partir da seção de entrada do ressalto hidráulico

y : altura da lâmina de água;

y_1 : lâmina de água na entrada do ressalto hidráulico (rápida);

y_2 : lâmina de água na saída do ressalto hidráulico (lenta);

y_3 : lâmina de água na entrada do ressalto hidráulico afogado ou submerso;

α : coeficiente de Coriolis para a correção da carga cinética;

β : coeficiente relativo à quantidade de movimento;

γ : peso específico da água;

Γ : posição longitudinal adimensionalizada;

ΔE_r : energia relativa dissipada;

ΔP : diferença entre a pressão (máxima ou mínima) e a média, em metros de coluna d'água;

η : eficiência do ressalto hidráulico;

λ : proporção de escala entre modelo e protótipo;

Ψ : pressão média adimensionalizada;

$\Psi_{x\%}$: percentil x de pressão adimensionalizado;

σ_x : desvio padrão das pressões instantâneas na posição longitudinal x ;

Ω : flutuação de pressão adimensionalizada;

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	MOTIVAÇÃO.....	22
1.2	OBJETIVOS	24
1.2.1	Objetivo principal.....	24
1.2.2	Objetivos secundários.....	25
1.2.3	Limitações	25
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	27
2.1	DESCRIÇÃO DO RESSALTO HIDRÁULICO	27
2.2	PARÂMETROS DE UM RESSALTO HIDRÁULICO.....	32
2.2.1	Alturas conjugadas.....	33
2.2.2	Comprimento do ressalto hidráulico.....	35
2.2.3	Comprimento do rolo.....	36
2.3	FORMAS DO RESSALTO HIDRÁULICO QUANTO AO NÚMERO DE FROUDE	37
2.4	GRAU DE AFOGAMENTO	39
2.5	DISSIPACÃO DE ENERGIA	42
2.6	ESFORÇOS HIDRODINÂMICOS AO LONGO DO RESSALTO.....	46
2.6.1	Pressões hidrodinâmicas.....	46
2.6.2	Pressões extremas.....	57
2.6.3	Previsão de pressões	61
2.7	MODELAGEM FÍSICA	65
2.8	AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DE DADOS.....	68
3	MATERIAIS E MÉTODOS	72
3.1	INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL.....	72
3.2	AQUISIÇÃO DE DADOS.....	81

3.3	ANÁLISE E TRATAMENTO DE DADOS	85
3.3.1	Valores de pressão média, flutuações de pressão e coeficientes de assimetria e curtose.....	85
3.3.2	Pressões extremas.....	87
3.3.3	Coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades N.....	88
3.4	COMPARAÇÃO COM OUTROS AUTORES	88
4	ARTIGO 1: CARACTERIZAÇÃO DAS PRESSÕES JUNTO AO FUNDO DE BACIAS DE DISSIPACÃO POR RESSALTO HIDRÁULICO LIVRE COM BAIXO NÚMERO DE FROUDE	94
5	ARTIGO 2: ESTIMATIVA DE PRESSÕES EXTREMAS EM BACIAS DE DISSIPACÃO POR RESSALTO HIDRÁULICO COM BAIXO NÚMERO DE FROUDE	109
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	125
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	128
	APÊNDICE A – DIMENSIONAMENTO DAS LAJES DE UMA BACIA DE DISSIPACÃO: ESTUDO DE CASO.....	134
	APÊNDICE B – GRÁFICOS E TABELAS COMPLEMENTARES.....	153
	APÊNDICE C – AJUSTE DAS EQUAÇÕES DE FLUTUAÇÃO DE PRESSÃO	160

1 INTRODUÇÃO

A prática da construção de barragens para fins de contenção e acumulação de água já é antiga na história da humanidade, remontando às civilizações mesopotâmicas e egípcias. Com o avanço das sociedades, outros usos foram sendo incorporados às barragens, como, por exemplo, a irrigação, a recreação, a contenção de rejeitos de mineração e, mais recentemente, a geração de energia elétrica.

Uma barragem, entretanto, interpõe-se ao rio como uma barreira artificial antes inexistente, pois impede que o escoamento siga seu fluxo natural. A energia hidráulica que seria transformada em energia cinética é, por meio da reservação de água, retida como energia potencial.

Quando a vazão afluente em uma barragem é maior do que a sua capacidade de geração, o escoamento excedente deve ser vertido. Isso é feito por meio de estruturas conhecidas como vertedouros, ou sangradouros, componentes do sistema de segurança da barragem. É ao longo destas estruturas que ocorre a transformação da energia potencial em energia cinética. Antes de o escoamento ser devolvido ao rio, entretanto, tal energia deve ser dissipada, pois, ao se alterar o escoamento de um rio por meio da construção de uma barragem, é importante que as características do escoamento a jusante destas obras voltem a ser como eram antes, ou o mais próximo possível disso. Para isso, são construídas estruturas cuja finalidade é dissipar a energia hidráulica em excesso, porque um escoamento com mais energia que o normal pode ocasionar sérios danos ao leito do rio. Dentre os tipos existentes de estruturas com esta função, as bacias de dissipação por ressalto hidráulico são soluções recorrentemente empregadas.

Por envolverem grandes quantidades de concreto e aço, bem como obras de terraplenagem e fundação, as bacias de dissipação são estruturas caras. Para que essas obras sejam projetadas de forma eficiente e econômica é necessário que sejam conhecidos os esforços a que essas estruturas serão submetidas.

A dissipação de energia em uma bacia de dissipação ocorre principalmente por meio de um fenômeno conhecido como ressalto hidráulico. Neste fenômeno, o escoamento com elevada energia cinética passa por uma região altamente turbulenta, constituída de vórtices e variações rápidas de pressão e velocidade. O mecanismo de dissipação de energia é, em última análise, uma transformação de energia cinética, parte em energia potencial e parte em turbulência. A turbulência, então, por meio da

viscosidade, se transforma em calor. Finalmente, a jusante do ressalto, o escoamento retorna ao regime lento.

A estrutura deste trabalho está dividida em seis capítulos. O presente capítulo faz uma apresentação breve sobre a pesquisa, sua motivação e seus objetivos.

O segundo capítulo contém a revisão da bibliografia, na qual se apresenta o conhecimento científico já existente sobre o ressalto hidráulico, suas características internas e externas, e as conclusões de outras pesquisas recentes e relevantes sobre o assunto.

O terceiro capítulo contém uma descrição dos métodos e dos materiais que foram empregados na presente pesquisa. São apresentados detalhes sobre a instalação experimental na qual os dados foram coletados, bem como a abordagem adotada na etapa de análise que foi feita a partir destes dados. Comenta-se também sobre os dados de outros trabalhos, gentilmente cedidos pelos respectivos autores, que foram utilizados na etapa de comparação.

O quarto capítulo é um artigo em que se discute sobre as diferenças entre dados de pressão instantânea em bacias de dissipação, provenientes de ressalto hidráulicos estáveis e aqueles com baixo número de Froude, por meio de uma análise de parâmetros estatísticos adimensionais, abrangendo: os quatro momentos estatísticos (média, desvio padrão, assimetria e curtose); coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades; e percentis extremos de pressão.

No quinto capítulo, em formato de artigo, é feita uma comparação entre metodologias já existentes de previsão de pressões extremas em bacias de dissipação por ressalto hidráulico e uma nova metodologia sugerida, específica para ressalto com baixo número de Froude.

Por fim, um fechamento do estudo como um todo é apresentado no sexto capítulo, como conclusão.

Nos apêndices, em forma de estudo de caso, é apresentada uma aplicação dos resultados encontrados neste estudo e de outros estudos que abordam pressões de ressalto hidráulicos em bacias de dissipação, com vistas a exemplificar o dimensionamento de uma bacia de dissipação quanto à sua espessura.

1.1 MOTIVAÇÃO

A energia proveniente de usinas hidrelétricas é responsável por 68,1% da matriz elétrica brasileira (EPE, 2017), e acredita-se que ela continue sendo a principal fonte de energia elétrica do Brasil por um bom tempo, apesar do avanço de outras fontes renováveis de energia, como a energia solar e a eólica.

Os rios e lagos da região norte correspondem a aproximadamente 80% da água doce nacional disponível (“Quantidade de água”, 2018). Como naquela região existem poucas usinas hidrelétricas já construídas, em comparação com outras regiões do Brasil, verifica-se que o norte do país possui um alto potencial de geração de energia hidrelétrica.

O sistema hidrográfico da bacia amazônica possui características que, em geral, a diferenciam das outras: rios com elevadíssimas vazões específicas, pouco desnível e baixas velocidades, em praticamente toda a sua extensão. Estas características, somadas ao fato de que os aproveitamentos lá implementados são, em geral, constituídos de baixas quedas, fazem com que, a jusante das barragens, na estrutura de extravasamento, sejam formados ressaltos hidráulicos com baixos números de Froude (mais adiante, serão dadas as definições de ressalto hidráulico e de número de Froude). Apesar disso, são poucos os estudos em bacias de dissipação que tratam deste tipo de escoamento.

A Tabela 1 contém a relação de algumas barragens brasileiras que operam sob baixo número de Froude.

O estudo das pressões junto ao fundo em bacias de dissipação é importante tanto para o engenheiro hidráulico, que estabelecerá as dimensões da bacia, quanto para o engenheiro estrutural, que dimensionará a estrutura da bacia. Não raramente são verificados danos nas estruturas de dissipação ou então junto ao leito a jusante dos rios.

Lopardo (1986) cita alguns exemplos de danos em estruturas de extravasamento: o arrancamento de 720 toneladas de concreto no dissipador da barragem Netzahualcoyotl, no México; a destruição do sistema de drenagem da barragem Home, nos Estados Unidos; os estragos nos blocos e nos filtros do dissipador da barragem de Xavantes, no Brasil; destruição de parte da estrutura devido a cavitação intermitente nas barragens norte-americanas Pit 6 e Pit 7; danos

nos muros de separação da bacia de dissipação das barragens de Bhakra, na Índia, e Texarkana, nos Estados Unidos; dentre outros.

Tabela 1 – Alguns dissipadores brasileiros com baixo número de Froude

Nome	Rio	Estado (s)	Vazão específica máxima (m ³ /s/m)	Fr ₁
Porto Primavera	Paraná	MS e SP	220,0	1,4
Rosana	Paranapanema	SP e PR	176,0	1,5
Igarapava	Grande	MG e SP	145,2	2,0
Coaracy Nunes	Araguari	AP	96,0	2,0
Taquaruçu	Paranapanema	SP e PR	121,2	2,3
Balbina	Uatumã	AM	143,1	2,9
Porto Colômbia	Grande	MG e SP	98,0	3,2
Jirau	Madeira	RO	162,4	3,2
Santo Antônio	Madeira	RO	187,2	3,5
Funil	Grande	MG	147,1	3,6
Aimorés	Doce	MG	92,6	3,7
Nova Avanhadava	Tietê	SP	104,4	3,7
Belo Monte	Xingu	PA	86,7	4,5

Fonte: adaptado de Tamada (1989) e Mees (2008)

Teixeira (2008) menciona dois exemplos de danos em estruturas de dissipação brasileiras: UHE Jaguará e UHE Porto Colômbia. Na primeira delas, uma vazão equivalente a 32% da descarga máxima prevista ocasionou erosões a jusante do vertedouro. Na outra, foram observados danos por cavitação nas proximidades dos blocos presentes na bacia, quando do vertimento de uma vazão de 5.700 m³/s, correspondente a 36% da vazão máxima prevista em projeto 15.800 m³/s. As porcentagens mencionadas levam a crer que ainda há muito a ser investigado no que diz respeito ao projeto de estruturas de dissipação.

Marques *et al.* (2017) organizou alguns tipos de danos observados em obras hidráulicas conforme a Tabela 2.

A fim de possibilitar o dimensionamento seguro e, ao mesmo tempo, econômico de estruturas hidráulicas, é necessário conhecer os esforços a que estas estruturas serão submetidas. Verifica-se que há vasta literatura sobre os mecanismos internos e externos do ressalto hidráulico estável, ou seja, com número de Froude na faixa compreendida entre 4,5 e 9,0. Não existe, entretanto, tão grande conhecimento

quando se trata de ressaltos hidráulicos com baixo número de Froude (entre 1,7 e 4,5).

Assim, diante da raridade das pesquisas abrangendo ressaltos hidráulicos com baixo número de Froude; da importância de se conhecerem os efeitos hidrodinâmicos causados pelo fenômeno sobre bacias de dissipação; e da tendência nacional de expandir o seu parque hidrelétrico em direção à região norte do país, fica evidente a relevância do presente trabalho no meio técnico e científico. Neste sentido, a presente pesquisa intenta preencher as lacunas do conhecimento no que tange às pressões extremas que deverão ser suportadas pelas lajes de bacias de dissipação por ressalto hidráulico com baixo número de Froude.

Tabela 2 – Resumo dos principais danos observados em obras hidráulicas

Natureza do dano	Tipo de dano observado
Movimento estrutural	Subpressão em lajes, canais e barragens de gravidade
	Instabilidade estrutural
	Recalque
Problemas de fluxo hidráulico	Projeto inadequado
	Cavitação
	Abrasão
	Transiente hidráulico
Erosão e assoreamento	Vibrações
	Erosão causada pelo escoamento superficial
Deficiência de materiais	Erosão causada pela descarga de obras hidráulicas
	Fissuras ou deterioração do concreto
	Corrosão dos componentes metálicos

Fonte: Marques *et al.* (2017)

1.2 OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho estão subdivididos em principal e secundários, conforme segue.

1.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal desta pesquisa é investigar o comportamento do ressalto hidráulico com baixo número de Froude ($Fr_1 < 4,5$), de forma a avaliar, para esta faixa, a aplicabilidade do método de previsão de valores de pressão com diferentes probabilidades de não-excedência junto ao fundo em bacias de dissipação por ressalto hidráulico proposto por Teixeira (2003) válido para ressaltos com número de Froude dito estável ($4,5 < Fr_1 < 9,0$).

1.2.2 Objetivos secundários

A fim de atingir o objetivo principal, alguns objetivos secundários foram estabelecidos.

- Implementar uma instalação experimental que represente uma bacia de dissipação por ressalto hidráulico com baixo número de Froude, na qual seja possível dados de pressão ao longo da bacia, abrangendo a extensão completa do ressalto;
- Comparar estes dados com aqueles obtidos em outras pesquisas, em termos dos parâmetros estatísticos (pressão média, flutuação de pressão, assimetria, curtose e coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades N para diferentes porcentagens de não-excedência), para números de Froude considerados baixos ($Fr_1 < 4,5$) e estáveis ($4,5 < Fr_1 < 9,0$), e investigar as diferenças entre as duas faixas;
- Verificar, com os dados obtidos neste estudo, a validade dos ajustes propostos por Hampe (2018) para previsão de pressões em ressaltos hidráulicos com baixos números de Froude, principalmente no que tange ao desvio padrão, que, conforme apontado pela autora, não é suficientemente bem descrito por meio do ajuste proposto por Teixeira (2003);
- Propor novos ajustes de previsão de pressões para bacias de dissipação por ressalto hidráulico com baixo número de Froude, caso identificada a necessidade;
- Disponibilizar, em forma de tabelas e gráficos, informações que facilitem as estimativas das pressões mínimas e máximas que podem ocorrer em protótipo.

1.2.3 Limitações

Algumas limitações deste estudo são:

- Os dados foram coletados em uma única instalação experimental, compreendendo apenas uma geometria;

- A faixa de vazões foi selecionada de tal maneira que o ressalto pudesse ser compreendido como fraco ou oscilante, conforme a classificação quanto ao número de Froude;
- A maior vazão ensaiada foi determinada pela máxima capacidade suportada pelo canal e pelo limite da faixa do número de Froude. Um pequeno incremento na vazão ocasionaria extravasamentos na extremidade de montante do modelo, além de alterar a classificação do ressalto de fraco para ondular, fugindo do escopo da presente pesquisa.
- A menor vazão foi selecionada para que o número de Froude resultasse no limiar entre o ressalto oscilante e o estável. Com isso, para os dois maiores valores de número de Froude, foram observadas lâminas de água pequenas na entrada do ressalto. Isso indica que, possivelmente, há significativa influência dos efeitos viscosos atuando sobre os fenômenos analisados. Como as velocidades eram elevadas nessa região, decidiu-se desprezar esse efeito. Além disso, para as menores vazões, o número de Reynolds na entrada do ressalto resultou menor do que o recomendado ($Re_1 > 10^5$);
- O curto comprimento do vertedouro possivelmente não garante o desenvolvimento completo da camada limite;
- Considerou-se que não ocorre efeito de parede, uma vez que as lâminas ensaiadas são menores do que a largura do canal.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Conforme Marques *et al.* (1998), o mais conhecido processo de dissipação de energia cinética do escoamento em canais é o ressalto hidráulico.

Chow (1959) enumera algumas das aplicações práticas do ressalto hidráulico:

- Dissipar energia em escoamentos sobre vertedouros e pequenas barragens, assim prevenindo danos a jusante das estruturas;
- Recuperar o nível d'água a jusante de um canal de medição, de forma a manter a lâmina de água elevada no canal para fins de irrigação ou outros fins de distribuição de água;
- Indicar condições especiais de escoamento, como a existência de escoamento supercrítico ou a presença de seções de controle;
- Misturar substâncias químicas utilizadas para a purificação de água;
- Aerar a água para fins de abastecimento de água municipal;
- Remover bolsões de ar das linhas de distribuição.

De uma perspectiva prática, o ressalto hidráulico é uma das formas mais úteis de dissipação de energia em escoamentos supercríticos. Sua grande vantagem está em prevenir uma possível erosão a jusante de comportas e vertedouros, pois ele rapidamente reduz a velocidade do escoamento sobre uma bacia de dissipação a um ponto em que o escoamento se torna incapaz de erodir o leito do canal a jusante (CHOW, 1959).

Os tópicos a seguir abordam características do ressalto hidráulico, gerais e específicas, tanto internas quanto externas. Além disso, discorre-se sobre a sua aplicação na modelagem física e sobre os cuidados que devem ser tomados para o estudo deste fenômeno em laboratório.

2.1 DESCRIÇÃO DO RESSALTO HIDRÁULICO

Segundo Hager (1992), o ressalto hidráulico é um fenômeno rapidamente variado em escoamentos a superfície livre. Corresponde a uma transição descontínua de um escoamento supercrítico para um escoamento subcrítico, a superfície livre.

Escoamentos a superfície livre podem ser classificados quanto ao número de Froude, que representa a proporção entre as forças inerciais e as forças gravitacionais. Este parâmetro adimensional é dado pela Equação 1:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot y}} \quad \text{Equação 1}$$

Em que:

v é a velocidade média do escoamento (m/s);

y é a altura da lâmina de água (m);

g é a aceleração devido à gravidade (m/s²).

Escoamentos com número de Froude acima de um são chamados de supercríticos. Já escoamentos com número de Froude abaixo da unidade são chamados subcríticos. Quando há uma transição daquele para este, ocorre o ressalto hidráulico. A Figura 1 mostra o ressalto hidráulico que ocorre na Usina Hidrelétrica de Porto Colômbia, na divisa entre os municípios de Planura (MG) e Guaíra (SP), com vazão de 4000 m³/s e número de Froude igual a 3,88.



Figura 1 – Ressalto hidráulico formado na UHE de Porto Colômbia. Fonte: Marques, Almeida e Endres (1999)

As primeiras observações e representações do ressalto hidráulico foram feitas provavelmente por Leonardo da Vinci no século XV, conforme O'Malley (1969) *apud* Marques *et al.* (1998). A Figura 2 mostra um esquema do fenômeno desenhado pelo renascentista. Entretanto, foi só no começo do século XIX, com Bidone (1820), que tiveram início as investigações experimentais sobre as características e condições do fenômeno de forma detalhada. Poucos anos depois, Bélanger (1828) realizou uma abordagem matemática sobre o ressalto, baseando-se no princípio da conservação de energia e na equação da quantidade de movimento. Uma de suas equações é recorrentemente utilizada ainda hoje e será apresentada mais adiante.

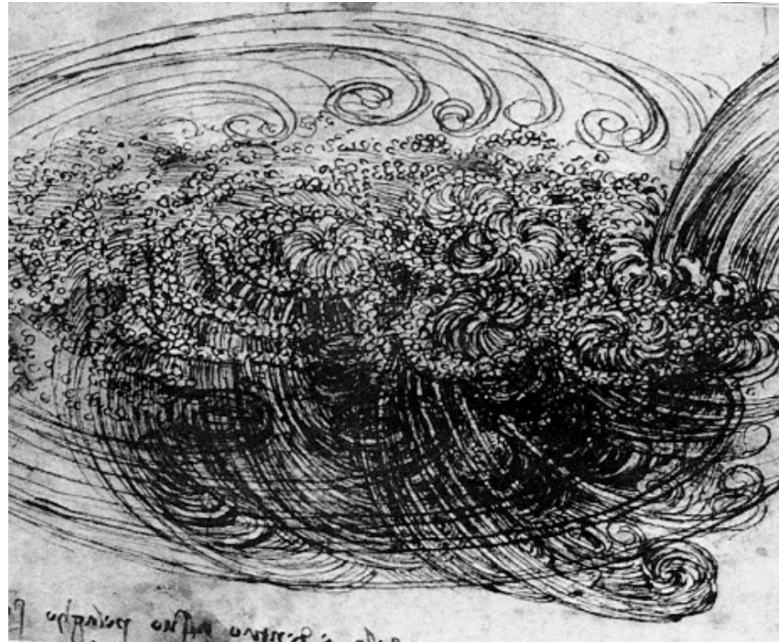


Figura 2 – Esquema de um ressalto hidráulico por Leonardo da Vinci. Fonte: Reti (1974) *apud* Teixeira (2003)

Desde então, diversos pesquisadores direcionaram esforços no sentido de investigar e descrever de forma empírica as características externas do ressalto, tais como o comprimento do rolo, o comprimento do ressalto propriamente dito e as alturas conjugadas rápida e lenta, na entrada e na saída do ressalto respectivamente (MARQUES *et al.*, 1998).

Com o advento dos anemômetros a fio-quente, Rouse, Siao e Nagarathnam (1959) deram início às investigações sobre as características internas do ressalto, ou seja, a turbulência e as bruscas variações de pressões e velocidades, bem como a ergodicidade do fenômeno. Devido à falta de equipamentos capazes de medir o escoamento bifásico água-ar do ressalto, os pesquisadores simularam um ressalto

hidráulico em um modelo de ar. Entretanto, há controvérsias sobre a validade de seus estudos.

A partir da década de 1960, com o surgimento dos transdutores de pressão, alguns pesquisadores passaram a publicar trabalhos sobre flutuações de pressão em um ressalto hidráulico genuíno. Entre eles, pode-se citar Vasiliev e Bukreyev (1967), King (1967), Resch e Leutheusser (1971), Abdul Khader e Elango (1974), Toso e Bowers (1988), entre outros.

No que diz respeito ao ressalto hidráulico, a tendência das pesquisas mais recentes é abordar o fenômeno de forma numérica e computacional, enquanto os estudos em modelos físicos reduzidos vêm se tornando cada vez mais raros. Estes, porém, mantêm seu valor científico porque, apesar de os estudos numéricos avançarem ano após ano, ainda não conseguem reproduzir fidedignamente os valores flutuantes e extremos presentes neste fenômeno hidráulico.

Por mais de um século, acreditou-se que todo ressalto hidráulico era causado por forças gravitacionais. Isto implicaria que o local de formação do ressalto deveria depender da orientação da superfície. Bhagat *et al.* (2018) estudaram o impacto de um jato perpendicular sobre superfícies orientadas em diversas direções e verificaram que, para as mesmas condições de escoamento, o impacto de um pequeno jato gera um ressalto hidráulico circular de lâmina fina com mesmo raio inicial, independentemente da orientação da superfície. A Figura 3 mostra a relação do raio do ressalto adimensionalizado (R/R_0), plotado contra diferentes vazões, para diferentes líquidos atingindo superfícies em diferentes orientações. A partir disso, verificou-se que o ressalto não é causado exclusivamente por forças gravitacionais, mas também pela tensão superficial e pelas forças viscosas presentes no escoamento. Os pesquisadores definiram que a transição do escoamento supercrítico para o subcrítico ocorre quando a condição da Equação 2 é atendida.

Dentro da engenharia civil, entretanto, esta descoberta não apresenta relevância, uma vez que os escoamentos observados em estruturas hidráulicas apresentam números de Weber muito elevados, fazendo com que o ressalto hidráulico ocorra quando o número de Froude seja praticamente igual a 1.

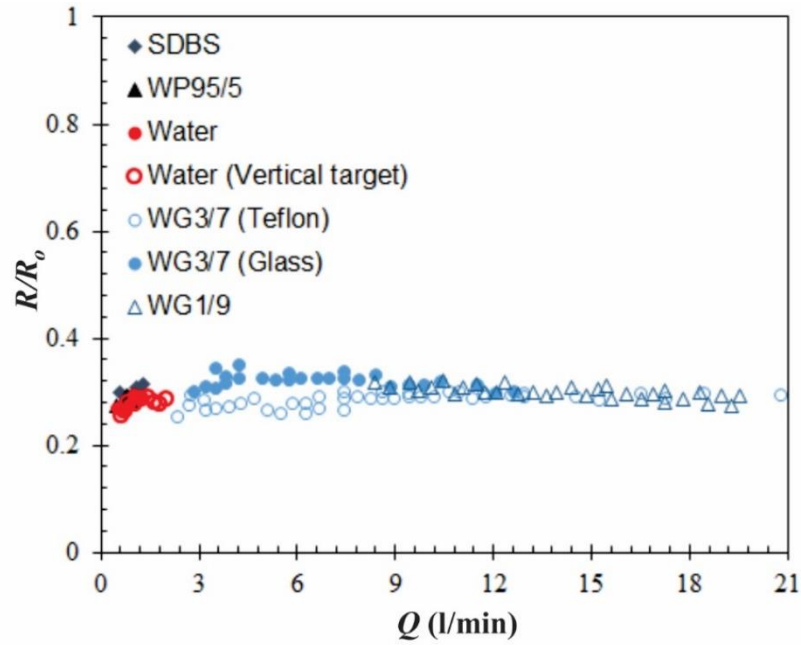


Figura 3 – Raio adimensional do ressalto para diferentes vazões, líquidos e orientações. Fonte: adaptado de Bhagat *et al.* (2018)

$$We^{-1} + Fr^{-2} = 1$$

Equação 2

Em que:

We é o número de Weber;

Fr é o número de Froude.

A Tabela 3 reúne alguns trabalhos cujos tópicos são de caráter relevante para o ressalto hidráulico em geral e para a presente pesquisa.

Tabela 3 – Contribuições de diversos pesquisadores para o ressalto hidráulico

Contribuição	Autor	Ano
Determinação das alturas conjugadas	Bélanger	1828
Medições de turbulência em um modelo de ar	Rouse, Siao e Nagaratnam	1959
Dissipadores de energia hidráulica	Elevatorski	1959
Características externas do ressalto hidráulico	Rajaratnam	1967
Análise estatística da flutuação de pressão	Vasiliev e Bukreyev	1967
Cavitação no ressalto hidráulico	Lopardo	1982
Pressões extremas em bacias de dissipação	Toso e Bowers	1988
Aquisição e tratamento de dados de pressões	Endres	1990
Dissipadores de energia e o ressalto hidráulico	Hager	1992
Esforço sobre as estruturas	Pinheiro	1995
Flutuação de pressão em um ressalto hidráulico	Marques <i>et al.</i>	1997
Dissipação de energia ao longo do ressalto	Marques <i>et al.</i>	1998
Adimensionalização de pressões médias em bacias de dissipação	Marques <i>et al.</i>	1999
Previsão de pressões em bacias de dissipação	Teixeira	2003
Esforços em lajes de bacias de dissipação por ressalto hidráulico com baixo número de Froude	Wiest	2008
Dissociação de esforços em um ressalto hidráulico	Dai Prá	2011
Flutuação de pressão em um ressalto hidráulico com baixo número de Froude	Souza	2015
Pressões extremas em ressalto hidráulico com baixo número de Froude	Zanoni	2015
Forças e momentos em uma laje abaixo de um ressalto hidráulico	González-Betancourt	2016
Previsão de pressões extremas para ressalto hidráulico com baixo número de Froude	Hampe	2018

2.2 PARÂMETROS DE UM RESSALTO HIDRÁULICO

O ressalto hidráulico formado a jusante de vertedouros costuma ser descrito quanto à sua geometria conforme os parâmetros da Figura 4. Muitas dessas grandezas serão mencionadas recorrentemente ao longo deste trabalho.

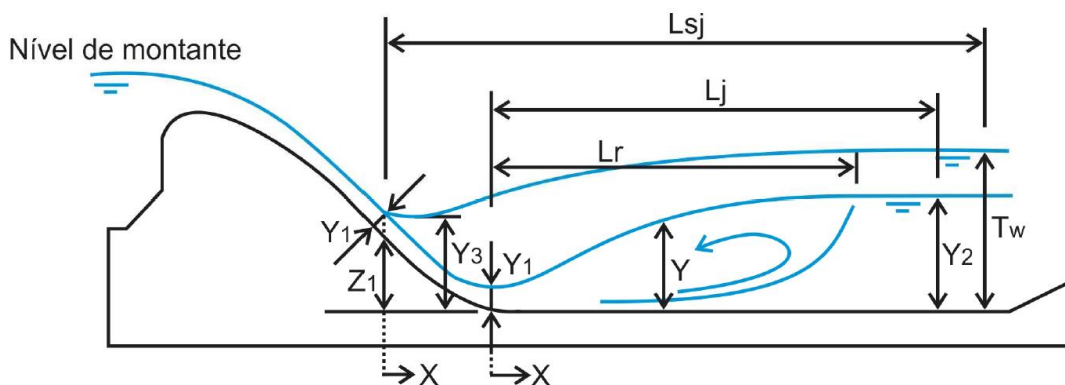


Figura 4 – Os parâmetros do ressalto hidráulico a jusante de um vertedouro. Fonte: Dai Prá (2011)

Onde:

X é a distância horizontal tomada a partir da seção transversal de início do ressalto;

Y é a distância entre a superfície do escoamento e a soleira da estrutura, tomada perpendicularmente a esta;

Y_1 é a profundidade do escoamento na entrada do ressalto hidráulico (altura conjugada rápida);

Y_2 é a profundidade do escoamento na saída do ressalto hidráulico (altura conjugada lenta);

Y_3 é a profundidade do escoamento na entrada do ressalto hidráulico submerso ou afogado;

T_w é a profundidade do escoamento na saída do ressalto hidráulico submerso ou afogado;

L_r é o comprimento do rolo;

L_j é o comprimento do ressalto hidráulico livre;

L_{sj} é o comprimento do ressalto hidráulico submerso ou afogado.

A seguir, serão apresentados, em detalhe, três parâmetros característicos de um ressalto: as alturas conjugadas e os comprimentos do ressalto e do rolo.

2.2.1 Alturas conjugadas

Às lâminas d'água imediatamente a montante e a jusante do ressalto hidráulico dá-se o nome de altura conjugada na entrada do ressalto, ou rápida (Y_1), e altura conjugada na saída do ressalto, ou lenta (Y_2), respectivamente. O conhecimento destas grandezas é necessário para se definir o tipo de ressalto, bem como para se obter estimativas do comprimento do ressalto hidráulico e do rolo.

Diversas tentativas foram feitas no sentido de se formular relações das alturas conjugadas com parâmetros, como a velocidade na entrada do ressalto, ou o número de Froude. Algumas destas relações foram catalogadas por Teixeira (2003) e Trierweiler (2006), conforme pode ser verificado na Tabela 4.

Tabela 4 – Relação entre as alturas conjugadas para canal retangular com fundo plano horizontal

Autor	Ano	Equação
Bélanger	1828	$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + 8 \cdot Fr_1^2} - 1 \right]$
Andrew	1928	$y_2 = \frac{V_1^2}{2g} \pm \left[\frac{V_1^2 \cdot y_1}{g} \left(\frac{V_1^2}{2g} \right)^2 \right]^{1/2}$
Unwin	1928	$y_2 = \pm \left[\frac{2y_1 V_1^2}{g} + \frac{y_1^2}{4} \right]^{1/2} - \frac{y_1}{2}$
Silvester	1964	$\left(\frac{y_2}{y_1} \right)^2 = 1 + 2Fr_1^2 \left[1 - \frac{y_1}{y_2} \right]$
Rajaratnam	1965	$\left(\frac{y_2}{y_1} \right)^3 - \left(\frac{y_2}{y_1} \right) (1 - K_f + 2Fr_1^2) + 2Fr_1^2 = 0$
Leutheusser e Kartha	1972	$Fr_1^2 = \frac{\frac{y_2}{y_1} \left(\frac{y_2^2}{y_1^2} - 1 \right)}{2,06 \left[\frac{y_2}{y_1} - 1 \right] - 0,0244 \left(\frac{y_2}{y_1} \right)^2}$
Merriman	1984	$y_2 = \pm \left(\frac{y_1 V_1^2}{g} \right)^{1/2}$

Fonte: adaptado de Bhutto, Mirani e Chandio (1989)

Em que:

K_f é o coeficiente de atrito, função de Fr_1 ;

Apesar de não haver consenso quanto à equação mais adequada, a mais utilizada é a de Bélanger (1828), Equação 3, que pode ser deduzida a partir da equação da conservação da quantidade de movimento entre as seções de controle 1 e 2. A equação de Bélanger se baseia nas seguintes hipóteses:

- canal de seção transversal retangular;
- fundo do canal horizontal;
- escoamento permanente e fluido incompressível;
- distribuição uniforme de velocidade imediatamente a montante e a jusante das seções de controle;
- ausência de forças devido à viscosidade;
- distribuição hidrostática de pressões nas seções de controle.

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + 8 \cdot Fr_1^2} - 1 \right] \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

Fr_1 é número de Froude na entrada do ressalto.

Alguns estudos foram feitos buscando desenvolver metodologias para a determinação das alturas conjugadas em um ressalto hidráulico afogado, ou seja, com início em um plano inclinado (tipo B). Destacam-se os trabalhos de Elevatorski (1959), Hager (1988) e Wiest (2008). O presente trabalho abrange apenas ressaltos hidráulicos livres (tipo A) e, por isso, este tópico não será discutido de forma mais aprofundada.

Rajaratnam e Subramanya (1968) desenvolveram um método para a determinação do perfil de linha d'água de ressaltos hidráulicos em canais lisos, horizontais e retangulares. A partir de um ábaco desenvolvido com dados coletados por diversos pesquisadores, é possível encontrar os valores da lâmina de água para qualquer ponto dentro do comprimento do ressalto, utilizando os valores das alturas conjugadas.

2.2.2 Comprimento do ressalto hidráulico

Dentre as grandezas do ressalto hidráulico, dois comprimentos despertam grande interesse do ponto de vista da dissipação de energia: o comprimento do rolo e o comprimento do ressalto hidráulico propriamente dito. O conhecimento destes parâmetros propicia um dimensionamento econômico e seguro das bacias de dissipação. Apesar da relevância técnico-científica destes parâmetros, não há consenso na literatura quanto à sua determinação.

Devido ao seu grande porte e às variáveis geotécnicas, hidrológicas e topográficas envolvidas, as bacias de dissipação são obras com alto custo associado. Para que esta obra não seja sub ou superdimensionada, o engenheiro hidráulico deverá conhecer o comprimento ao longo do qual o ressalto exerce influência, ou seja, onde ocorrem a dissipação de energia e os efeitos macroturbulentos do fenômeno (TEIXEIRA, 2003).

Conforme Rajaratnam e Subramanya (1968) e Dai Prá (2011), a posição de início do ressalto hidráulico é de identificação relativamente fácil: a seção onde ocorre

mudança brusca de comportamento da linha média d'água. A posição do final do ressalto, entretanto, é de diferente interpretação para diversos autores. Elevatorski (1959) afirma ser o local onde não há grandes variações de níveis. Segundo Rajaratnam (1967), o ressalto termina na seção em que a superfície da água torna-se essencialmente plana e a altura média da superfície é máxima. Alguns investigadores consideram o fim do rolo como sendo o fim do ressalto propriamente dito, mas para o caso de ressaltos em canais horizontais retangulares, já foi demonstrado que a profundidade do escoamento ao final do rolo é levemente menor do que a altura conjugada subcrítica (RAJARATNAM, 1965). Lopardo *et al.* (2004) defenderam que o fim do ressalto, quanto ao seu interesse prático de definir a estrutura de proteção ao pé de uma obra hidráulica, é o local onde a turbulência causada pelo ressalto cessa e torna a se igualar aos níveis de turbulência do escoamento normal.

A Tabela 5 contém algumas fórmulas utilizadas para a determinação do comprimento do ressalto, sendo que a mais utilizada é a de Elevatorski (1959).

Tabela 5 – Equações para o comprimento do ressalto hidráulico

Autor	Ano	Equação
Elevatorski	1959	$L_j = 6,9 (y_2 - y_1)$
Marques <i>et al.</i>	1997	$L_j = 8,5 (y_2 - y_1)$
Teixeira	2003	$L_j = 8,0 (y_2 - y_1)$

2.2.3 Comprimento do rolo

O rolo é a região do ressalto hidráulico onde se processa a maior parte da dissipação de energia, das turbulências e das variações de pressão, nível e velocidade.

Hager, Bremen e Kawagoshi (1990) afirmaram que, dentre os comprimentos avaliados para o ressalto hidráulico, o mais fácil de se observar e o propriamente definido para escoamento estacionário é o comprimento do rolo. Entretanto, até mesmo este comprimento não é de definição consensual, conforme Dai Prá (2011).

Hager (1988) utilizou dois métodos para a determinação do comprimento do rolo: o primeiro consistia em observar a ascensão de bolhas até a superfície ao longo do ressalto. O segundo consistia em posicionar uma esfera flutuante ao longo do ressalto. A posição em que a esfera não se movesse nem para a frente, nem para

trás, era escolhida como sendo o fim do rolo. Já Rajaratnam (1965) utilizou corante para determinar a posição do fim do rolo.

Vários pesquisadores estudaram o comprimento do rolo L_r de um ressalto hidráulico. Uma vasta revisão do assunto foi feita por Hager (1990), que reuniu e sintetizou diversos trabalhos. A partir de seus próprios dados, ele desenvolveu a Equação 4:

$$\frac{L_r}{y_1} = 8 (Fr_1 - 1,5), \quad 2,5 \leq Fr_1 \leq 8 \quad \text{Equação 4}$$

Rajaratnam (1967) ajustou curvas a partir de seus próprios dados e dos dados coletados em outros dois trabalhos para o comprimento total do ressalto e para o comprimento do rolo. Ele mostrou que o comprimento do rolo se aproxima do comprimento total do ressalto com o aumento do número de Froude.

Coletando dados de escoamentos com números de Froude entre 4,9 e 9,3, Marques *et al.* (1997) analisaram a distribuição longitudinal da pressão média, da flutuação de pressão, do coeficiente de assimetria e do coeficiente de curtose ao longo da soleira de fundo de uma bacia de dissipação, e desenvolveram relações para alguns pontos característicos do ressalto hidráulico. Para o comprimento do rolo, sugeriram a Equação 5.

$$L_r = 6 (y_2 - y_1) \quad \text{Equação 5}$$

2.3 FORMAS DO RESSALTO HIDRÁULICO QUANTO AO NÚMERO DE FROUDE

Conforme Peterka (1984), há pelo menos quatro diferentes formas em que o ressalto hidráulico pode ocorrer em uma bacia de dissipação (Figura 5). As características internas do ressalto e a energia dissipada ao longo do fenômeno variam de caso a caso. Estas formas, das quais algumas são desejáveis e outras não, podem ser divididas convenientemente com respeito ao número de Froude relativo à seção de entrada do ressalto.

Para que o ressalto seja formado, é necessário que o escoamento passe do regime supercrítico para o regime subcrítico, ou seja, o número de Froude na entrada do ressalto deverá ser maior que a unidade.

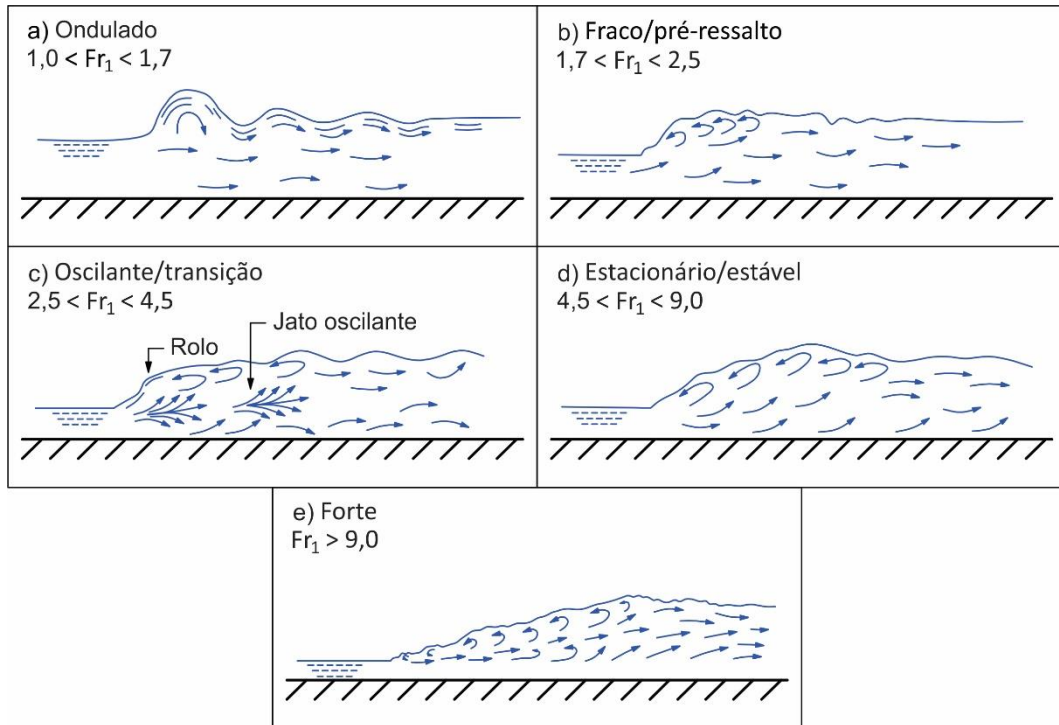


Figura 5 – As formas do ressalto hidráulico. Fonte: adaptado de Peterka (1984) e Teixeira (2008)

Para valores entre 1,0 e 1,7, há apenas uma pequena diferença entre as profundidades a montante e a jusante, como pode ser observado na Figura 5a. Pequenas ondas na superfície da água são a única característica aparente que diferencia este escoamento daquele à profundidade crítica. As perdas de carga são decorrentes do atrito nas paredes e no fundo.

Em escoamentos com número de Froude entre 1,7 e 2,5, o ressalto hidráulico (recorrentemente chamado de pré-ressalto) apresenta pequenos rolos que são formados na superfície, conforme indicado na Figura 5b. Neste intervalo, a superfície da água ainda é suavemente ondulada, a velocidade através da seção transversal é relativamente uniforme e a energia dissipada é menor do que 20%.

A Figura 5c apresenta o tipo de ressalto que ocorre para números de Froude entre 2,5 e 4,5, em estruturas de pouca carga hidráulica. No ressalto de transição, a superfície da água é mais irregular do que no pré-ressalto, havendo turbulência próxima ao fundo da bacia num primeiro instante e inteiramente na superfície ao final do ressalto. A dissipação de energia pode chegar a 45%.

Um ressalto bem estabilizado ocorre para números de Froude de 4,5 a 9,0, conforme apresentado na Figura 5d. Este ressalto também é chamado de ressalto estável, e produz uma dissipação entre 45% e 70%. A maioria dos dissipadores de energia opera dentro desta faixa.

Quando o número de Froude supera 9,0, as velocidades crescem, o nível relativo de água na entrada do ressalto diminui e a diferença entre as alturas conjugadas aumenta, conforme Figura 5e. A dissipação de energia pode alcançar valores de até 85%, porém recomenda-se evitar este tipo de ressalto devido ao alto risco de danos sobre as estruturas de dissipação, como processos abrasivos ou mesmo cavitação (TEIXEIRA, 2008).

Vale ressaltar que os intervalos de número de Froude acima para os diferentes tipos de ressalto não são limites absolutos, mas se sobrepõem em uma certa faixa dependendo das condições locais (CHOW, 1959).

2.4 GRAU DE AFOGAMENTO

Aqui, em primeiro lugar, há que se fazer uma distinção quanto à nomenclatura de termos que, frequentemente, são empregados como intercambiáveis. Alguns autores, como Rajaratnam (1967), Marques *et al.* (1999), Wiest (2008) e outros, não diferenciam um ressalto afogado de um ressalto submergido, muitas vezes utilizando o mesmo termo para situações diferentes, ou incluindo os dois tipos sob uma mesma classificação. No presente trabalho, decidiu-se empregar a nomenclatura também utilizada por Dai Prá (2011), exemplificada na Figura 6.

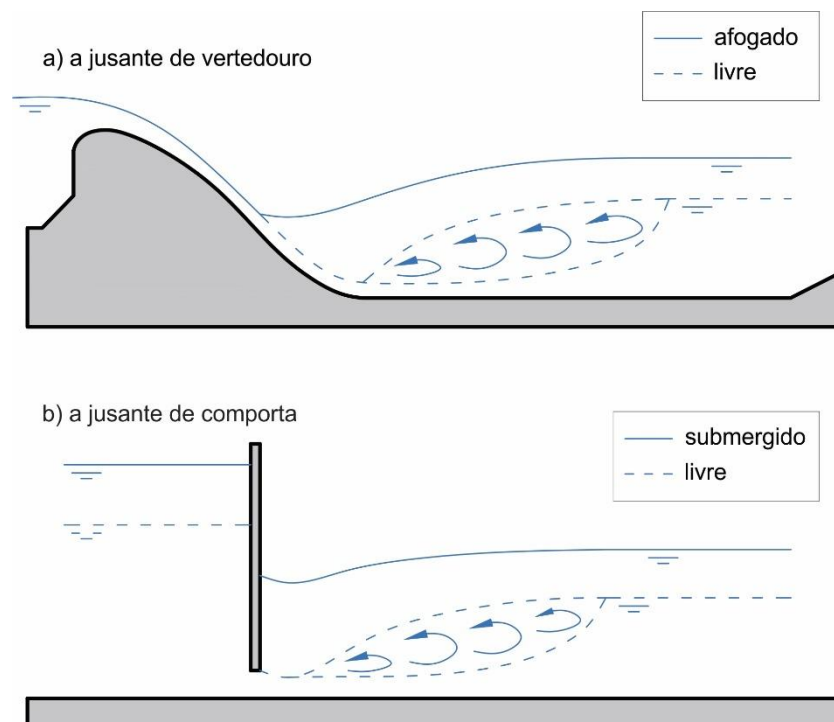


Figura 6 – Distinção entre o ressalto afogado e o ressalto submergido

- a) O ressalto afogado é aquele que se desenvolve parcial ou integralmente sobre o paramento inclinado que antecede o trecho plano horizontal do canal;
- b) O ressalto submergido é aquele formado a jusante de comportas de fundo submersas.

Algumas formulações, entretanto, são válidas tanto para um tipo de ressalto hidráulico quanto para outro, como, por exemplo, o fator de afogamento ou submergência, mencionado mais adiante.

Conforme Hager (1988), as condições a jusante de um ressalto hidráulico, bem como a vazão do escoamento, podem alterar o posicionamento do ressalto em relação à bacia de dissipação, deslocando-o para jusante ou para montante. Dependendo da sua posição, o ressalto é classificado em diferentes graus de afogamento. A Figura 7 apresenta os possíveis graus de afogamento de um ressalto hidráulico a jusante de um vertedouro.

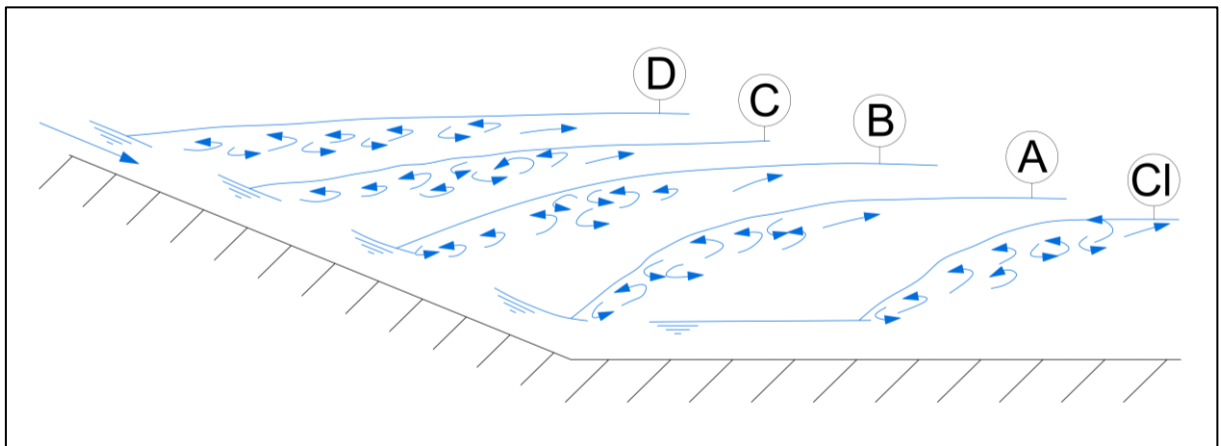


Figura 7 – Graus de afogamento de um ressalto hidráulico. Fonte: adaptado de Hager (1992)

O ressalto hidráulico clássico (Cl) ocorre a jusante do encontro do trecho mais inclinado com o trecho horizontal.

O ressalto hidráulico tipo A ocorre quando o início do fenômeno coincide com o início do trecho horizontal. Neste caso, a altura conjugada y_2 coincide com a lâmina de água a jusante T_w . Mahmood (1964) *apud* Hager (1992) estudou ressaltos ocorrendo em diferentes inclinações. Foi demonstrado que as dimensões principais do ressalto hidráulico tipo A e do tipo clássico são iguais.

No ressalto hidráulico tipo B, a lâmina a jusante T_w é maior que y_2 , levando-o a um afogamento. O ressalto inicia sobre o trecho mais inclinado e termina sobre o trecho horizontal.

O ressalto hidráulico tipo C consiste no desenvolvimento do fenômeno ao longo do trecho mais inclinado, culminando no seu término exatamente acima do ponto de concordância.

O ressalto hidráulico tipo D ocorre completamente sobre o trecho mais inclinado, terminando antes ainda do ponto de concordância. A altura T_w torna-se maior em relação a y_2 quanto maior for o grau de afogamento.

Hager (1988) estudou o ressalto hidráulico do tipo B e desenvolveu equações para as alturas conjugadas e para o comprimento do rolo. A partir de seus ensaios, ele concluiu que a eficiência do ressalto afogado, em termos de dissipação de energia, é menor que a do ressalto livre para números de Froude elevados. Para baixos números de Froude, Rajarantam (1967) mostrou que um ressalto submerso dissipa mais energia que um ressalto livre.

Uma das principais diferenças que ocorre no ressalto hidráulico a jusante de uma comporta, em relação a ressaltos a jusante de um vertedouro, é que a comporta limita o deslocamento do ressalto para montante (TEIXEIRA, 2008).

Quanto às dimensões do ressalto submerso, Rajaratnam (1967) demonstrou que, conforme o fator de submergência aumenta, o comprimento do ressalto também aumenta. O autor estabeleceu a Equação 6 para a determinação do fator de submergência (S^*) de um ressalto, a qual retorna valores altos para ressaltos profundamente afogados e zero para ressaltos livres.

$$S^* = \frac{T_w - y_2}{y_2} \quad \text{Equação 6}$$

Já para Marques *et al.* (1999), o grau de submergência, ou afogamento, (S) é dado pela Equação 7, que também retorna valores elevados para ressaltos acentuadamente afogados, porém tem como limite inferior o valor da unidade, correspondendo este ao ressalto livre.

$$S = \frac{T_w}{y_2} \quad \text{Equação 7}$$

É evidente que o fator de submergência calculado conforme Marques *et al.* (1999) será sempre maior que o de Rajaratnam (1967), sendo a diferença entre eles igual a 1. Este fator pode ser utilizado na adimensionalização de ressaltos afogados, e, para que não haja divisão por zero no caso de um ressalto livre, foi empregada a definição dada por Marques *et al.* (1999).

2.5 DISSIPACÃO DE ENERGIA

Fundamentalmente, dissipadores de energia ou bacias de dissipação que proporcionam a redução de energia convertem energia cinética em turbulência e, finalmente, em calor. A dissipação de energia em uma bacia de dissipação ocorre também no atrito da água com o canal, ou da água com o ar, mas é principalmente efetuada por meio do ressalto hidráulico (TUNG; MAYS, 1982). Segundo Elevatorski (1959), a porcentagem de energia dissipada em um ressalto hidráulico pode chegar a 80% da energia inicial, fazendo dele um dos melhores métodos de dissipação de energia ao pé de estruturas hidráulicas.

Segundo Chow (1959), o ressalto hidráulico utilizado para fins de dissipação de energia é normalmente limitado parcial ou integralmente a um trecho do canal conhecido como bacia de dissipação. O fundo desta bacia é reforçado para resistir à erosão. Na prática, uma bacia de dissipação raramente é projetada para abrigar a extensão completa do ressalto, pois tal bacia teria custos excessivamente altos. Assim, é frequente a construção de bacias com comprimento menor do que o do ressalto.

De acordo com Hager (1992), as seguintes condições estão presentes em um ressalto hidráulico:

- Escoamento altamente turbulento com velocidades e pressões dinâmicas significativas;
- Pulsações tanto das pressões como das velocidades, e o desenvolvimento de ondas a jusante do ressalto;
- Escoamento bifásico devido à incorporação de ar;
- Padrões erosivos devido à formação de vórtices de grande escala;

- Produção de som e dissipação de energia como resultado das turbulências.

Todos os itens acima contribuem para uma significativa perda de carga ao longo do pequeno trecho em que o ressalto ocorre. Conforme Marques *et al.* (1998, p. 1):

Parte da energia cinética é transformada em energia potencial, provocando uma brusca mudança na evolução do nível de água da superfície livre. Esta mudança é acompanhada da formação de um rolo com eixo horizontal e normal ao escoamento de aproximação que é responsável pelo surgimento de um alto grau de agitação da superfície e pela incorporação de certa quantidade de ar no escoamento. Esta agitação ocasiona uma perda de carga considerável que é característica deste fenômeno.

Marques *et al.* (1998) propuseram um método para avaliar a parcela de energia dissipada no interior de um ressalto hidráulico a jusante de um vertedouro, analisando um parâmetro associado às flutuações de pressão no fundo do canal. Segundo eles, a parcela da dissipação de energia em uma dada posição do ressalto é proporcional à parcela da flutuação de pressão até aquele ponto. A partir de seus estudos, pode-se estimar, conforme a Figura 8, que aproximadamente metade da energia é dissipada em aproximadamente um quarto do comprimento total do ressalto. Considerando que o rolo termina na distância correspondente a $6(Y_2 - Y_1)$, verifica-se que este é responsável por aproximadamente 90% da dissipação de energia do ressalto.

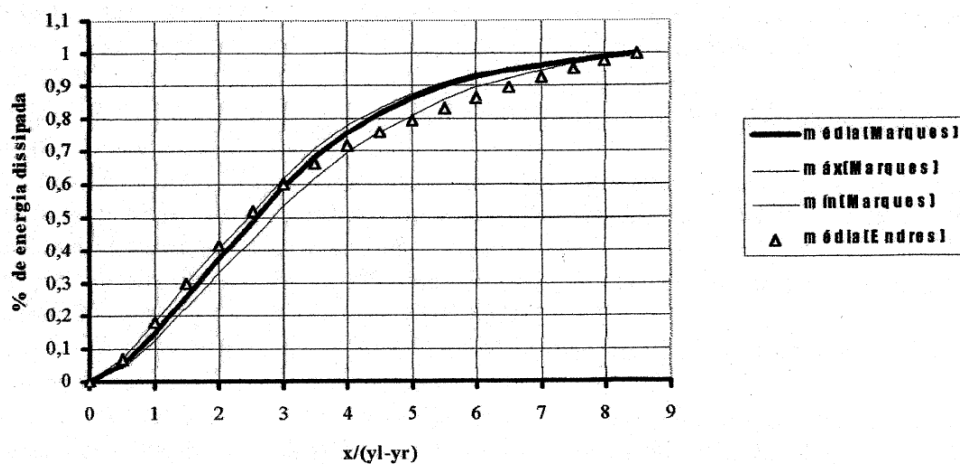


Figura 8 – Porcentagem da energia dissipada em função da posição longitudinal do ressalto. Fonte: Marques *et al.* (1998)

Conforme Marques *et al.* (1998), a perda de carga no ressalto é igual à diferença das energias específicas a montante e a jusante do ressalto. Se o coeficiente de correção da carga da velocidade, α , e o coeficiente de correção da quantidade de movimento, β , forem considerados como sendo iguais à unidade, a perda de carga teórica, E_L , no ressalto hidráulico em um escoamento horizontal em canal retangular é dada pela Equação 8.

$$E_L = E_1 - E_2 = \frac{(y_2 - y_1)^3}{4y_1y_2} \quad \text{Equação 8}$$

Os estudos da caracterização da dissipação interna do ressalto tiveram início simultaneamente com os estudos da flutuação de pressão, na década de 50, com Rouse, Siao e Nagaratnam (1959). Apesar dos muitos estudos na área, os mecanismos dissipativos que ocorrem internamente ao fenômeno ainda requerem investigação. Alguns estudos têm analisado a dissipação de energia de ressaltos que ocorrem em bacias rugosas. Outros trabalhos analisam o ressalto em bacias com inclinações positivas ou negativas. Palermo e Pagliara (2018) propuseram uma abordagem semi-teórica para a estimativa da dissipação de energia em canais inclinados e rugosos. Obtiveram boa concordância para a expressão que desenvolveram (Equação 9). Esta equação teve suas capacidades preditivas testadas contra aproximadamente 500 pontos de dados e resultou em boa concordância na etapa de comparação.

$$\Delta E_r = \frac{(E_1 - E_2)}{(E_1 - z_1)} = \frac{2\lambda \tan(\alpha^*) + \frac{Fr_1^2}{\cos(\alpha^*)} (1 - Y^{-2}) + 2(1 - Y)}{\frac{Fr_1^2}{\cos(\alpha^*)} + 2} \quad \text{Equação 9}$$

Em que:

ΔE_r é a energia relativa dissipada;

$\lambda = L_j/y_1$ é o comprimento relativo do ressalto hidráulico;

α^* é o ângulo de inclinação do canal com a horizontal;

$Y = y_2/y_1$ é a proporção das alturas conjugadas para canais lisos. Para canais rugosos, há uma equação especial.

z_1 é a cota da soleira na seção de entrada do ressalto;

Chen, Liao e Liu (2013) analisaram a dissipação de energia em um ressalto hidráulico ocorrendo após uma queda livre em um canal de expansão gradual. Eles verificaram que a dissipação de energia de um ressalto em um canal que expande gradualmente é maior do que aquela em um ressalto que ocorre em um canal prismático. Além disso, quanto mais acentuada for a expansão do canal, maior a eficiência da dissipação de energia. Este mecanismo é limitado, na prática, pelo seu elevado custo.

Garg e Sharma (1971) também investigaram a eficiência da dissipação de energia no ressalto hidráulico. Diferentemente de outros pesquisadores, que sugeriram o cálculo da eficiência como sendo a relação entre as energias a jusante e a montante, ou então como sendo a relação entre a energia dissipada e a energia a montante, eles propuseram o cálculo da eficiência como sendo a razão entre a energia de fato dissipada e a energia analítica máxima que poderia ser dissipada de forma teórica, conforme a Equação 10.

$$\eta = \frac{E'_L}{E_L} = \frac{(E_L - E_t)}{E_L} \quad \text{Equação 10}$$

Onde:

E'_L é a energia de fato dissipada ao longo do ressalto;

E_L é a energia total que poderia teoricamente ser dissipada ao longo do ressalto;

E_t é a energia de macroturbulência que deixou de ser dissipada.

Os autores constataram que há um grande incremento da eficiência do ressalto hidráulico conforme o número de Froude na entrada aumenta até 4. Depois deste valor, o aumento na eficiência é praticamente insignificante. Essa constatação difere do que está mencionado na descrição das formas do ressalto quanto ao número de Froude. Isso se dá justamente porque a definição de eficiência do ressalto é diferente de Garg e Sharma (1971) para Peterka (1984).

2.6 ESFORÇOS HIDRODINÂMICOS AO LONGO DO RESSALTO

O conhecimento científico sobre as características externas do ressalto já é bem consolidado. Uma extensa revisão da bibliografia foi feita por Rajaratnam (1967) e, desde então, muitos outros trabalhos têm sido publicados sobre o assunto.

Existe grande interesse, tanto por parte da comunidade científica quanto por parte da engenharia hidráulica e estrutural, pela caracterização dos esforços hidrodinâmicos causados pelo ressalto, ou seja, pelo conhecimento das suas características internas. Não há, entretanto, um estado da arte tão avançado quando se trata deste assunto.

2.6.1 Pressões hidrodinâmicas

O estudo das pressões hidrodinâmicas no ressalto hidráulico iniciou contemporaneamente aos estudos de dissipação de energia no fenômeno, no clássico trabalho publicado por Rouse, Siao e Nagaratnam (1959). Os autores simularam um ressalto hidráulico em um modelo de ar, devido à falta de equipamentos capazes de medir pressões e velocidades em escoamentos bifásicos (água-ar) na época. Desde então, com o avanço da tecnologia, propagaram-se os estudos das pressões hidrodinâmicas em ressaltos hidráulicos genuínos.

Rajaratnam (1965) estudou o ressalto hidráulico que se forma com o lançamento de um jato de líquido tangencialmente (ou em um certo ângulo) a uma superfície, cercado por um fluido estacionário (ou em movimento). O autor coletou valores de pressão, velocidade, linha d'água e tensão limite de cisalhamento.

Conforme o autor, era comum assumir que, se $y = y(x)$ representa o perfil da linha d'água longitudinal, em que y é a profundidade da água em uma seção localizada a uma distância x do começo do ressalto, e se $p = p(x)$ é a pressão ao fundo do ressalto, então:

$$p(x) = \gamma y(x) \qquad \text{Equação 11}$$

Onde:

γ é o peso específico da água.

Isso significa assumir que a distribuição de pressões é hidrostática ao longo do desenvolvimento do ressalto. Rajaratnam (1965) testou essa hipótese. Se a

distribuição é hidrostática, a proporção de h' para h (onde h é a carga piezométrica no fundo do canal e h' é carga piezométrica a uma altura y' do fundo do canal) deveria acompanhar a proporção de y' para y . A Figura 9 mostra que não é isso o que acontece na prática.

É possível verificar que há uma região próxima ao fundo do canal, para os menores valores de y' , em que a distribuição de pressões é, de fato, hidrostática. Quando se distancia do fundo do canal, entretanto, a situação não se mantém. Essa verificação se acentua para a região próxima do início do ressalto, e aumenta conforme o número de Froude aumenta.

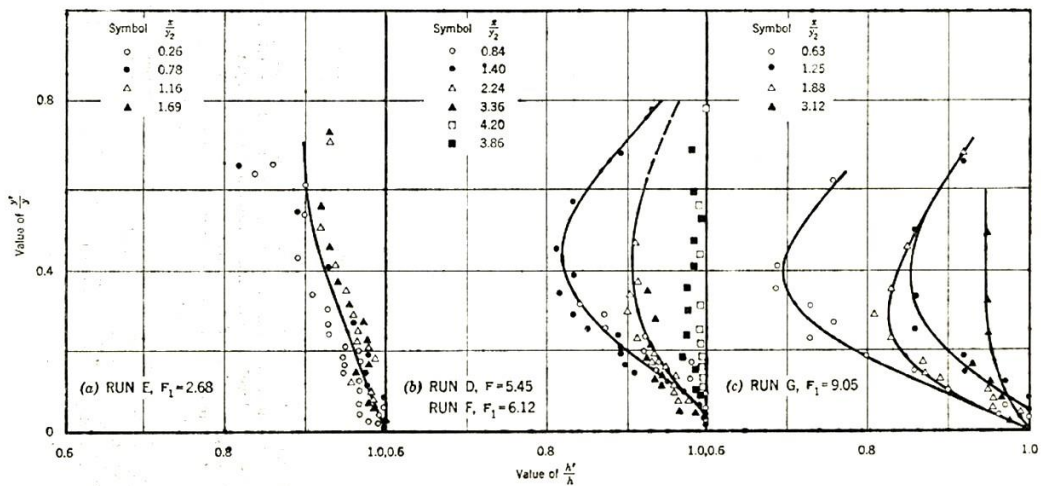


Figura 9 – Perfil de pressões no ressalto hidráulico. Fonte: Rajaratnam (1965)

Rajaratnam e Subramanya (1968) estudaram mais especificamente o perfil longitudinal da linha d'água do ressalto hidráulico. Conforme os autores, este conhecimento é útil no dimensionamento econômico das paredes laterais da bacia de dissipação, enquanto o conhecimento do perfil de pressões é útil no dimensionamento do fundo da bacia de dissipação. Isso porque as flutuações de pressão abaixo de um ressalto hidráulico podem impor elevados esforços às lajes dessas estruturas, resultando em danos por meio de fadiga, ressonância, erosão e cavitação (ABDUL KHADER; ELANGO, 1974).

O ressalto é um fenômeno altamente turbulento que conta com variações súbitas de pressões e velocidades. Bowers e Tsai (1969) coletaram dados de pressão instantânea no trecho final da calha de um vertedouro e ao longo da bacia de dissipação. É possível observar na Figura 10 como as pressões pouco oscilam ao

longo do vertedouro e passam a oscilar cada vez mais conforme o ressalto se desenvolve.

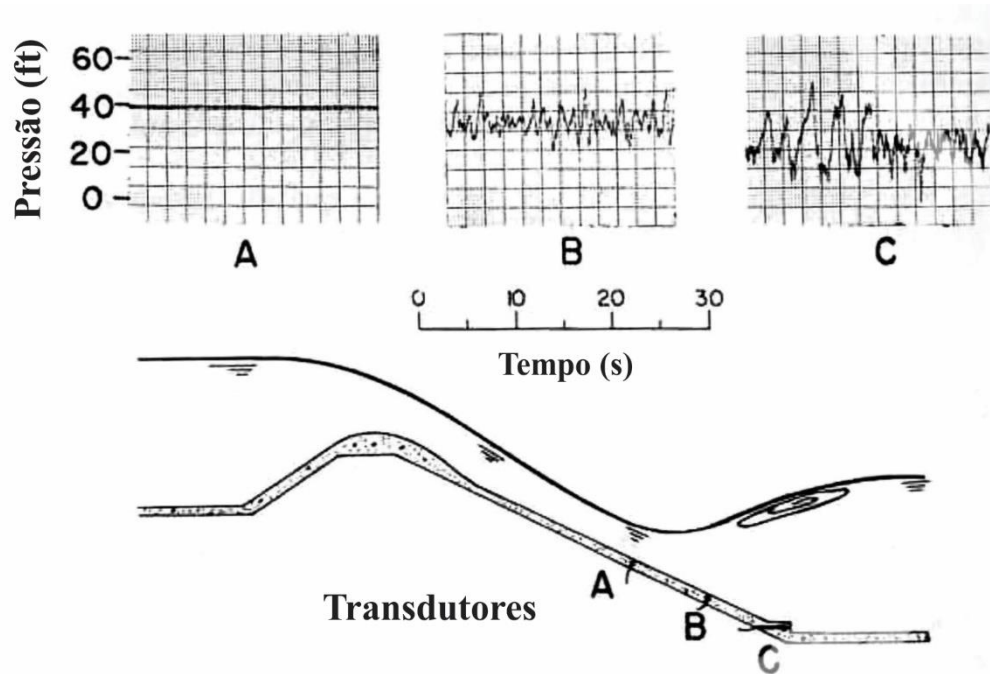


Figura 10 – Pressões instantâneas ao longo da estrutura de extravasamento. Fonte: adaptado de Bowers e Tsai (1969)

Os autores defenderam que pressões extremas agudas e de curta duração têm menos potencial de causar danos à estrutura do que pressões não tão extremas que são aplicadas por uma duração mais longa. Também sugeriram que se considerem as pressões flutuantes em projetos estruturais de bacias de dissipação.

Lopardo (1986) afirma que, matematicamente, as flutuações de pressão macroturbulentas em fluidos reais podem ser consideradas como um processo estocástico, estacionário e ergódico. Devido à natureza aleatória do fenômeno em estudo, não é possível descrevê-lo a partir de uma função explícita e analítica do tempo. Por isso, faz-se necessário caracterizar este processo aleatório mediante análises estatísticas. As análises mais adequadas normalmente são o espectro de densidades e a função de densidade de probabilidades.

É comum (AKBARI; MITTAL; PANDE, 1982; LOPARDO, 1986) que, no estudo das pressões hidrodinâmicas, se separe o valor médio do valor flutuante da pressão, conforme a equação a seguir:

$$P = \bar{P} + P'$$

Equação 12

Em que:

P é a pressão instantânea junto ao fundo do ressalto hidráulico;

\bar{P} é o valor médio das pressões instantâneas;

P' é a parcela da pressão instantânea chamada de flutuação da pressão.

Alguns autores (ABDUL KHADER; ELANGO, 1974; AKBARI; MITTAL; PANDE, 1982; LOPARDO, 1986) sugeriram uma forma de avaliar a parcela flutuante da pressão P' através da análise dimensional, em que C'_p é o coeficiente de flutuação de pressão, sendo função da posição longitudinal, do número de Froude e do número de Reynolds na entrada do ressalto, conforme a Equação 13.

$$C'_p = \frac{\sigma_x}{\frac{v_1^2}{2g}} = C'_p(x/y_1, Fr_1, Re_1)$$

Equação 13

Na qual:

σ_x é o desvio padrão da amostra de pressões, em m;

Conforme Lopardo (1986), o parâmetro C'_p indica qualitativamente a proporção de energia cinética incidente que se transforma em flutuação macroturbulenta devido ao ressalto. Os processos macroturbulentos não são fortemente influenciados pelas ações viscosas, de modo que, na Equação 13, pode-se desprezar o número de Reynolds sempre que a turbulência estiver plenamente desenvolvida no escoamento ($Re_1 > 10^5$).

Abdul Khader e Elango (1974) estudaram as pressões presentes em uma bacia de dissipação por ressalto hidráulico para três diferentes números de Froude. Mediram pressões instantâneas em 11 tomadas de pressão ao longo da bacia. Os autores analisaram os quatro primeiros momentos estatísticos (média, desvio padrão, curtose e assimetria) e desenvolveram gráficos de autocorrelação e de densidade espectral. As análises da autocorrelação e da densidade espectral permitem avaliar o comportamento das pulsações e como se dá o desenvolvimento dos vórtices ocorrendo internamente ao ressalto hidráulico. Na presente pesquisa, estas análises

não foram contempladas pela falta de tempo hábil. Porém recomenda-se fortemente que trabalhos futuros abordem não só a autocorrelação dos valores de pressão de cada tomada, mas também a correlação cruzada entre elas e a função de densidade espectral.

Os autores compararam com dois outros estudos os valores de flutuação de pressão adimensionalizada ao longo do ressalto, e obtiveram o gráfico da Figura 11.

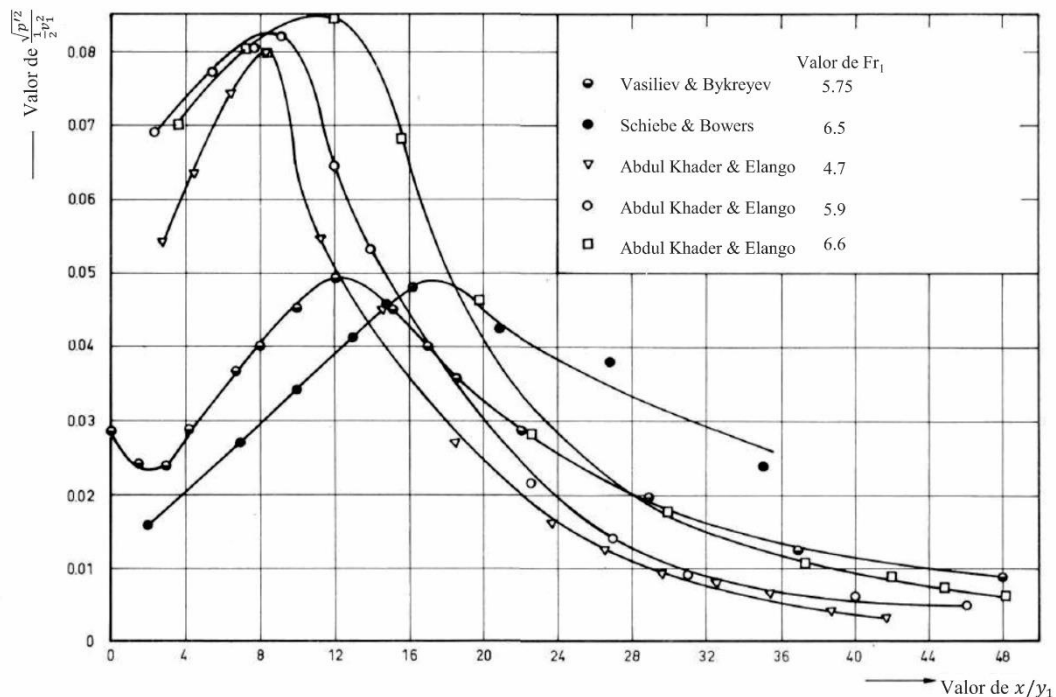


Figura 11 – Variação do desvio padrão das pressões ao longo do ressalto. Fonte: adaptado de Abdul Khader e Elango (1974)

Os resultados dos outros autores não atingiram valores tão altos de flutuação de pressão quanto os de Abdul Khader e Elango (1974). Essa diferença foi justificada pelo estado de desenvolvimento do escoamento supercrítico.

Os autores também verificaram que as flutuações de pressão mais intensas ocorrem sob a região do rolo. Além disso, constataram que, próximo ao fim do ressalto, a pressão média se aproximava de um valor constante.

Marques, Drapeau e Verrette (1997) propuseram uma outra forma de adimensionalizar os valores da flutuação de pressão, por meio da energia total dissipada ao longo do ressalto H_t . Utilizando o ajuste sugerido por Marques *et al.* (1999) para ressaltos afogados, a flutuação de pressão adimensionalizada pode ser calculada através da seguinte expressão:

$$\Omega = \frac{\sigma_x y_2 y_2}{H_t y_1 T_w}$$

Equação 14

Em que:

Ω é a flutuação de pressão adimensionalizada;

σ_x é o desvio padrão da amostra de pressões na posição longitudinal x ;

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

T_w é a lâmina de água no final do ressalto submerso ou afogado.

Esta forma de adimensionalizar as flutuações de pressão permite agrupar os resultados em praticamente uma única curva, como pode ser visto na Figura 12.

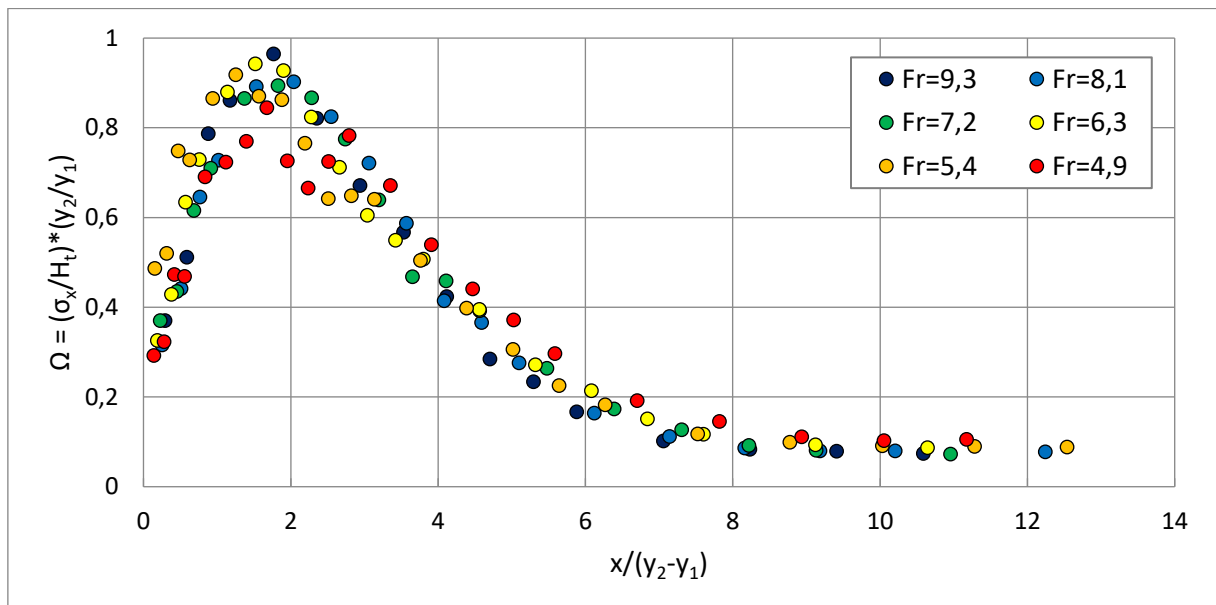


Figura 12 – Flutuações de pressão adimensionalizadas. Fonte: Marques *et al.* (1997)

Além das flutuações de pressão, Marques *et al.* (1997) analisaram pressões médias, coeficientes de assimetria e de curtose. Propuseram com sucesso uma forma de adimensionalizar a distância longitudinal, por meio da diferença entre a altura conjugada lenta e a altura conjugada rápida. Os autores também sugeriram a utilização de um coeficiente estatístico N , através do qual se pode descrever a distribuição de probabilidades ao longo do ressalto. Mais adiante, este coeficiente será melhor explicado e analisado.

Fiorotto e Rinaldo (1992) defenderam que a espessura da laje de uma bacia de dissipação deve ser função, dentre outras variáveis, das flutuações de pressão que

ocorrem junto ao fundo da bacia. A Figura 13 ilustra esse conceito. Segundo os autores, duas posições críticas devem ser analisadas:

- a) a posição onde ocorre a máxima diferença entre as flutuações de pressão negativas e positivas;
- b) a posição onde ocorre a máxima flutuação de pressão negativa atuando sobre a laje.

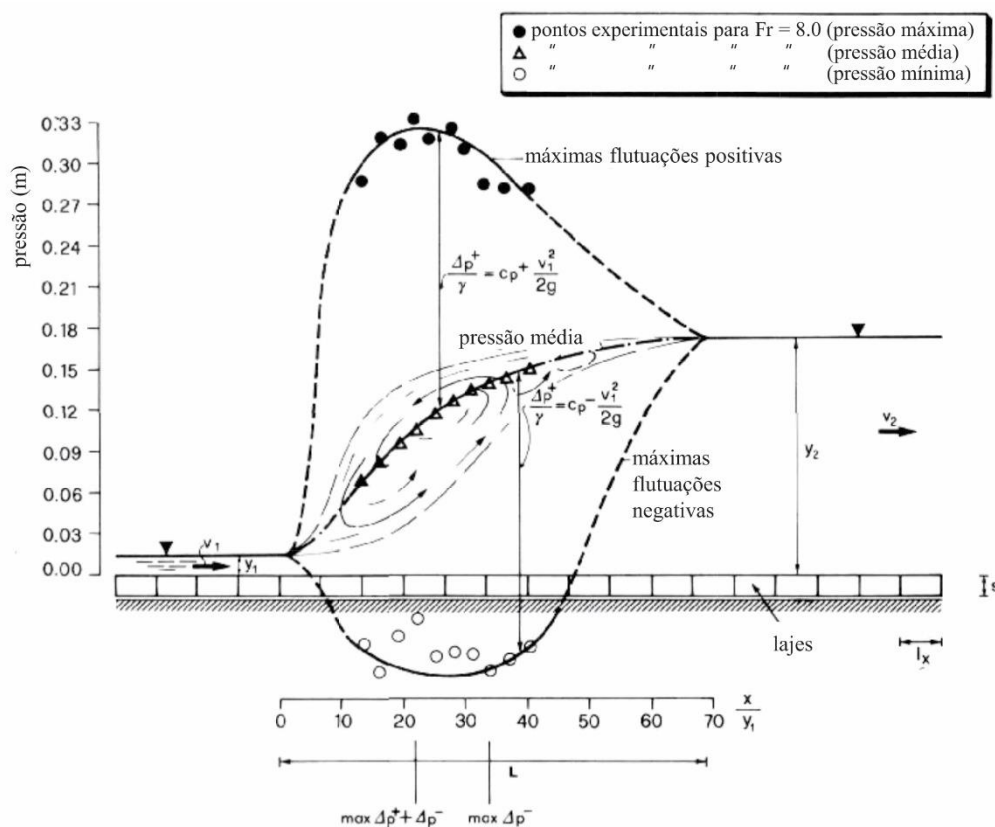


Figura 13 – Critérios para o cálculo da espessura da laje da bacia de dissipação. Fonte: Fiorotto e Rinaldo (1992)

Pinheiro, Quintela e Ramos (2007) avaliaram flutuações de pressão e força atuando junto ao fundo de bacias de dissipação por ressalto hidráulico. Foram coletados dados de pressão instantânea utilizando transdutores piezorresistivos, para números de Froude iguais a 6 e 10. Com tubos de Pitot, verificou-se que, para $Fr_1 = 6$, o escoamento na entrada do ressalto era parcialmente desenvolvido. Já para $Fr_1 = 10$, o escoamento era completamente desenvolvido. Os autores compararam seus dados de pressão aos de outros pesquisadores, com respeito ao desvio padrão e assimetria, e verificaram boa concordância com a bibliografia. Estes dados de pressão

foram transformados em força por meio da aplicação da Equação 15, que diz respeito à parcela flutuante da força $F'(t)$ atuante sobre uma laje de área A_S .

$$F' = \sum_{i=1}^N A_{S_i} P'_i, \text{ com } \sum_i A_{S_i} = A_S \quad \text{Equação 15}$$

Em que:

F' é a parcela flutuante da força;

P' é a parcela flutuante da pressão (em unidade de pressão);

A_S é a área da laje;

i é o índice de cada sub-área.

A partir dos valores encontrados, Pinheiro, Quintela e Ramos (2007) calcularam a média e o desvio padrão das forças hidrodinâmicas atuantes sobre lajes retangulares de diferentes comprimentos L_S e larguras B_S , em diferentes posições X_S sob o ressalto. Os resultados para $Fr_1 = 6$ podem ser vistos na Figura 14.

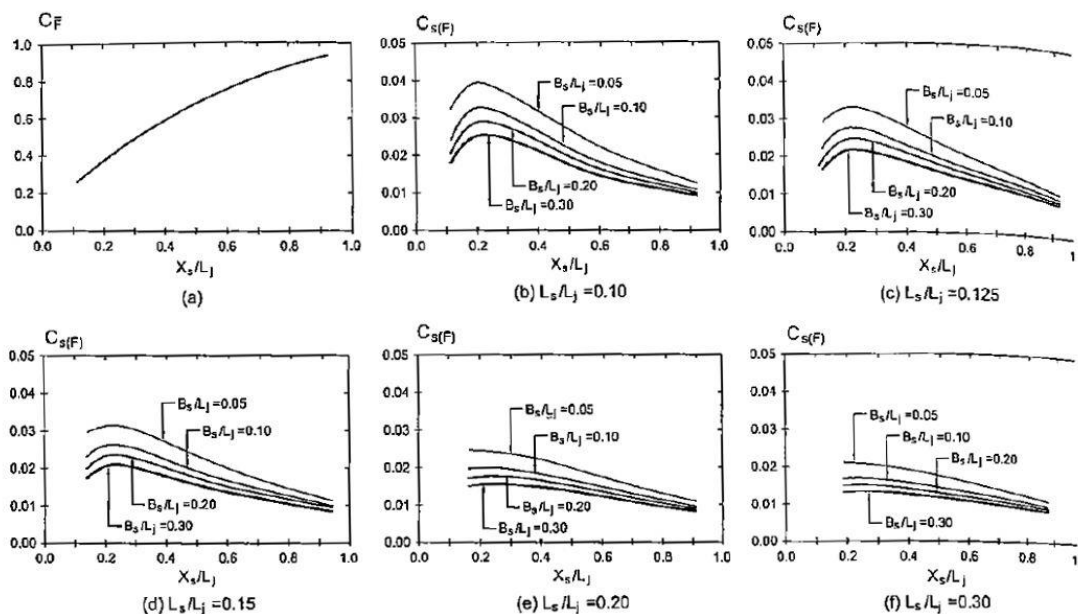


Figura 14 – Média (a) e desvio padrão (b até f) das forças hidrodinâmicas para diferentes comprimentos de laje e Fr_1 igual a 6. Fonte: Pinheiro, Quintela e Ramos (2007)

Na figura:

C_F é a força hidrodinâmica média, adimensionalizada por meio da área da laje e da lâmina de água a jusante;

$C_{S(F)}$ é o desvio padrão da força hidrodinâmica, adimensionalizada pela área da laje e pela carga cinética na entrada do ressalto;

L_j é o comprimento do ressalto (m);

Os autores ainda propuseram uma metodologia de estimativa de forças extremas atuantes sobre lajes, baseando-se nos gráficos de desvio padrão da Figura 14.

Mees (2008) trabalhou com dados coletados nas bacias de dissipação de dois modelos reduzidos do vertedouro de Porto Colômbia nas escalas 1:100 e 1:85, sendo o primeiro tridimensional e o outro bidimensional. A partir de ensaios feitos com números de Froude variando entre 3,69 e 4,77, o autor caracterizou os esforços médios, flutuantes e extremos que ocorrem sob o ressalto hidráulico e propôs um método para a previsão de esforços extremos atuantes sobre uma laje. Mees (2008) também sugeriu uma terceira forma de adimensionalizar os valores da flutuação de pressão, baseando-se no grau de afogamento e nas alturas conjugadas de um ressalto hidráulico afogado. A distribuição dos dados pode ser vista na Figura 15.

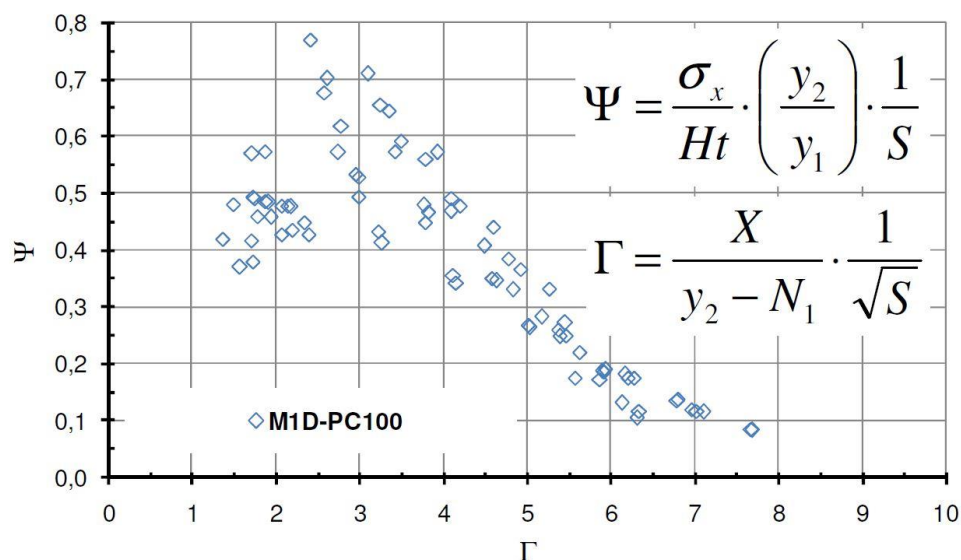


Figura 15 – Flutuações de pressão adimensionalizadas. Fonte: Mees (2008)

Em que:

N_1 é a altura (na vertical) da lâmina de água na seção de entrada do ressalto.

Souza (2012) e Souza *et al.* (2015) coletaram dados de pressão instantânea em um modelo reduzido do sistema de extravasamento da UHE Santo Antônio. As tomadas de pressão se restringiram à região inicial e média do ressalto hidráulico, não sendo coletados valores na região final. A análise dos dados ao longo de toda a extensão do ressalto é importante porque, conforme Peterka (1984), para baixos números de Froude, há a formação de ondas irregulares capazes de se propagar por grandes trechos, podendo causar danos a taludes e enrocamentos. Foi feita uma análise estatística dos quatro primeiros momentos, bem como do coeficiente estatístico N.

Souza (2012) comparou os dados de flutuação de pressão de diversos autores conforme a adimensionalização proposta por Marques *et al.* (1997). O resultado pode ser visto na Figura 16. É possível verificar que a tendência dos seus dados, dentro do limite da região inicial do ressalto, é acompanhar os pontos dos outros pesquisadores.

Além dessa análise, Souza (2012) também comparou seus dados com os de outros trabalhos através da adimensionalização pela energia cinética. Verificou-se que esta comparação era melhor compreendida separando-se os resultados em diferentes gráficos por faixas de números de Froude. As diferenças entre os dados coletados por Souza (2012) e os coletados por outros autores foram justificadas pela dificuldade na medição do Y_1 (e conseqüentemente no cálculo de Y_2), pela dificuldade na determinação da posição de início do ressalto e pela influência do afogamento.

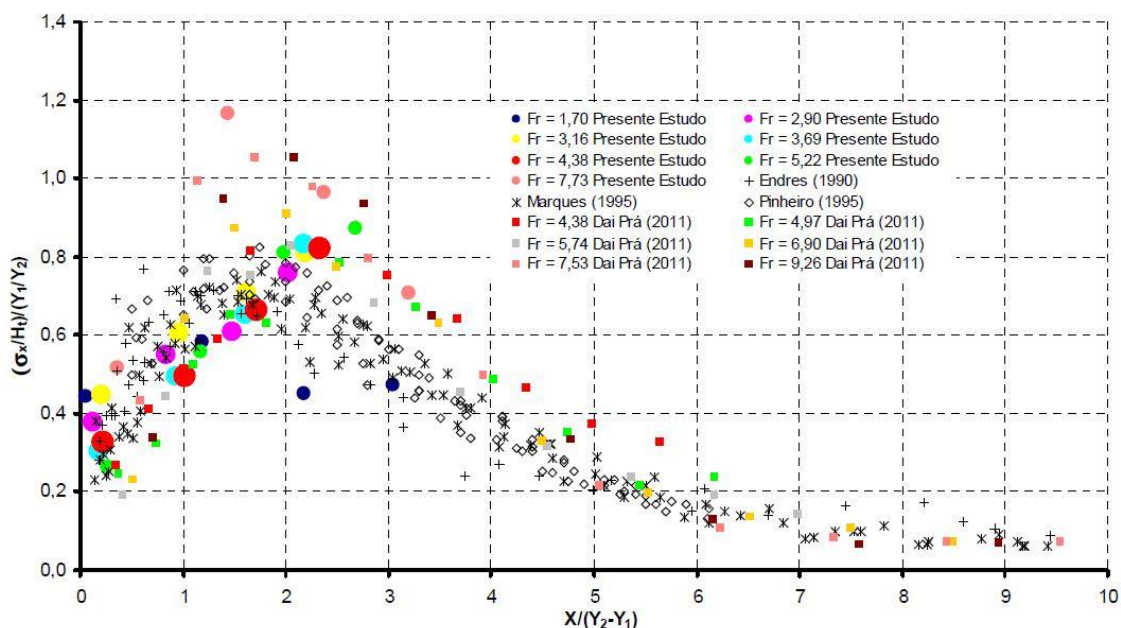


Figura 16 – Flutuações de pressão adimensionalizadas. Fonte: Souza (2012)

Pelo fato de as tomadas de pressão de Souza (2012) se limitarem à região inicial da bacia, seus resultados são pouco conclusivos, não permitindo afirmar se ressaltos com baixo número de Froude apresentam o mesmo comportamento de ressaltos estáveis. Além disso, a partir de dados coletados numa repetição dos ensaios de Souza (2012), Hampe (2018) afirmou que as amostras da primeira campanha utilizadas pelo autor são de baixa qualidade, sugerindo a possibilidade de haver falha nos ensaios ou nos equipamentos de medição.

Hampe (2018) analisou pressões instantâneas coletadas em uma nova campanha de ensaios realizados em 2016, no mesmo modelo utilizado por Souza (2012). Estes ensaios contemplaram sete vazões distintas, abrangendo números de Froude entre 1,73 e 7,56, faixa semelhante à de Souza (2012). Hampe (2018) também utilizou, em sua análise, dados coletados em um modelo bidimensional do sistema extravasor da UHE São Manoel. Os valores de pressão média adimensionalizados, plotados contra a posição longitudinal adimensionalizada podem ser vistos na Figura 17. Assim como no estudo de Souza (2012), as tomadas de pressão não abrangem a extensão completa do ressalto.

Constatou-se que as pressões médias obtidas no modelo da UHE Santo Antônio apresentaram valor igual ou superior aos de Endres (1990) e Marques (1995), inclusive para faixas de número de Froude semelhante ($4,5 < Fr_1 < 9,0$). A autora sugeriu que este fato pode indicar que as diferenças nos dados provêm não da faixa do número de Froude, mas sim da geometria do modelo.

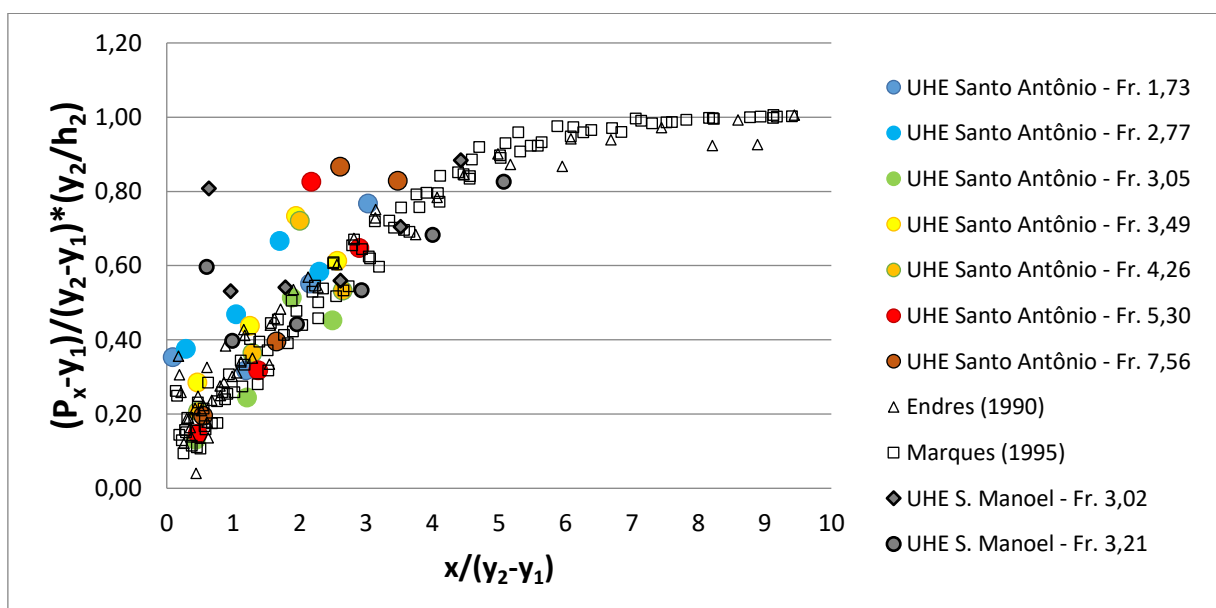


Figura 17 – Pressões médias adimensionalizadas. Fonte: Hampe (2018)

Os dados de desvio padrão adimensionalizados são mostrados na Figura 18. Percebe-se que para os menores números de Froude (1,73 e 2,77), os valores de desvio padrão se mostraram inferiores em relação aos outros. Além disso, Hampe (2018) verificou que os valores de flutuação de pressão provenientes dos dados da UHE São Manoel apresentaram valores superiores aos demais a partir da posição adimensional 4.

Assim como em Souza (2012), os resultados de Hampe (2018) são inconclusivos, pelo fato de não terem sido coletados valores de pressão ao longo de toda a extensão do ressalto. Não se pode afirmar que os valores dos modelos da UHE São Manoel e da UHE Santo Antônio seguem a mesma tendência dos dados de Endres (1990) e Marques (1995), ou seja, não se pode afirmar que pressões provenientes de ressalto com baixo número de Froude obedecem o comportamento de pressões coletadas em ressalto estáveis.

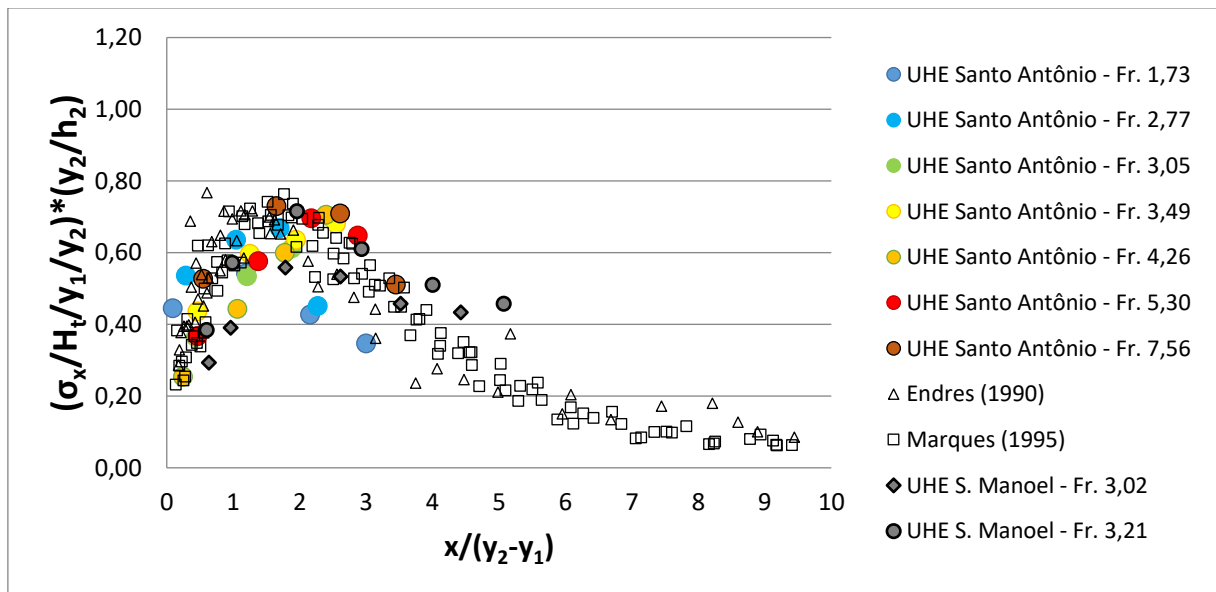


Figura 18 – Flutuações de pressão adimensionalizadas. Fonte: Hampe (2018)

2.6.2 Pressões extremas

Lopardo (2013) afirmou que, visto que os valores mínimos extremos instantâneos de pressão são determinantes para se definir a probabilidade de cavitação intermitente em bacias de dissipação, o coeficiente de flutuação de pressões C'_p é insuficiente para o dimensionamento seguro de estruturas hidráulicas, não estando este valor a favor da segurança. Segundo o autor, pode-se atribuir uma série de danos estruturais às pressões instantâneas extremas.

No clássico trabalho de Toso e Bowers (1988), foi conduzida uma série exaustiva de experimentos ao longo de dois anos. Foram coletados dados de pressão instantânea para ressaltos hidráulicos livres e afogados, com números de Froude variando entre 3 e 10, escoamento incidente desenvolvido e subdesenvolvido, inclinações do vertedouro de 0°, 15°, 30° e 45°, com e sem acessórios ao longo da bacia.

Sendo o ressalto hidráulico um fenômeno ergódico, estacionário e aleatório, é comum que se assuma que as pressões instantâneas sejam regidas por alguma distribuição de probabilidade conhecida. Além disso, sabe-se que podem ser extraídos, das curvas de densidade de probabilidade, valores que tendem ao infinito. Em contraste a isso, Toso e Bowers (1988) introduziram a hipótese de que, como a energia do escoamento incidente no ressalto é finita, também deve existir um limite prático finito para os valores extremos que podem ser alcançados junto ao fundo das bacias de dissipação. Para os autores, durações entre 12 e 24 horas são suficientes para que sejam registradas magnitudes de pressão com um limite prático máximo. Já Pinheiro (1995) afirmou que ensaios com duração de 6h são suficientes para atingir valores extremos representativos. A Figura 19 ilustra como pressões cada vez mais extremas são registradas conforme aumenta o tempo da coleta de dados. Para demonstrar este conceito, os autores introduziram um novo parâmetro adimensional. Enquanto o C'_p refere-se ao desvio padrão das pressões, o C_p diz respeito às pressões extremas, conforme a Equação 16:

$$C_p = \frac{\Delta P}{\frac{v^2}{2g}} \quad \text{Equação 16}$$

Em que:

C_p é o coeficiente de pressões extremas;

ΔP é a diferença entre a pressão (máxima ou mínima) e a média, em metros de coluna d'água.

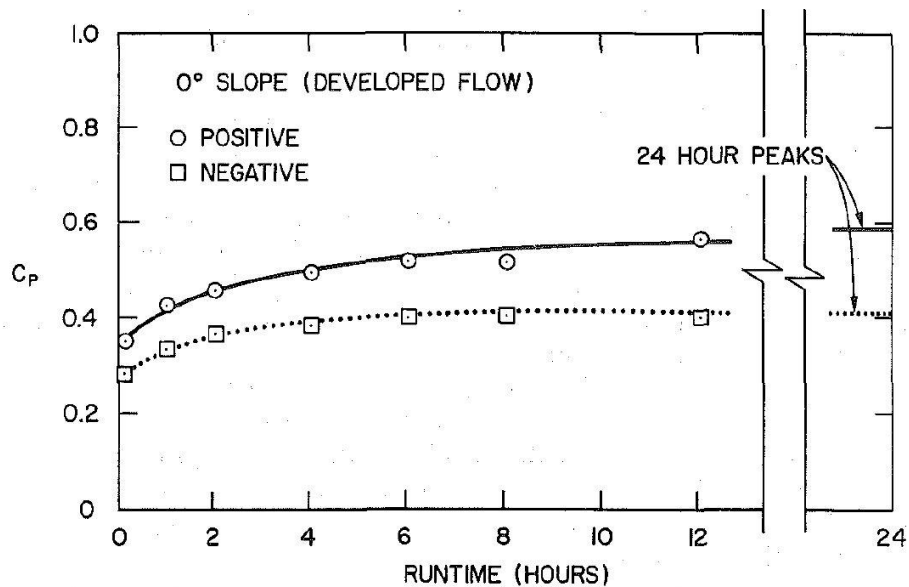


Figura 19 – Pressões extremas registradas versus tempo de coleta. Fonte: Toso e Bowers (1988)

Conforme Toso e Bowers (1988), durante muito tempo, foi comum utilizar, para o dimensionamento de bacias de dissipação, pressões compreendidas na faixa entre 1% e 99% de probabilidade de não-excedência, a partir da média e do desvio padrão da amostra de dados, considerando que os valores são descritos pela lei Gaussiana. Os pesquisadores argumentaram contra esta prática, afirmando que a função densidade de probabilidade das pressões instantâneas não segue a lei normal, e que a probabilidade de 1% não produz uma pressão suficientemente conservativa, ou grande para o dimensionamento.

Lopardo (1985) também recomenda que sejam usadas, no dimensionamento de bacias de dissipação, pressões mais extremas do que aquelas com probabilidade de ocorrência entre 1% e 99%, defendendo que a pressão com 0,1% de probabilidade de não-excedência é a que melhor representa a tendência a cavitação. Conforme Lopardo (2002), dados de laboratório e protótipo mostraram que esta probabilidade é um bom parâmetro para se avaliar a tendência de ocorrer cavitação.

Hampe (2018) analisou pressões com diferentes probabilidades de não-excedência, variando entre 0,1% e 99,9%. A comparação de seus resultados com os de outros pesquisadores para a probabilidade de 0,1% pode ser vista na Figura 20.

Verifica-se que as pressões extremas obtidas nos modelos da UHE Santo Antônio e da UHE São Manoel apresentam valores semelhantes ou superiores aos dados obtidos por Endres (1990) e Marques (1995), principalmente na região inicial do ressalto. A falta de dados abrangendo a extensão completa do ressalto

impossibilita afirmar se os dados seguem uma mesma tendência geral em relação aos outros pesquisadores.

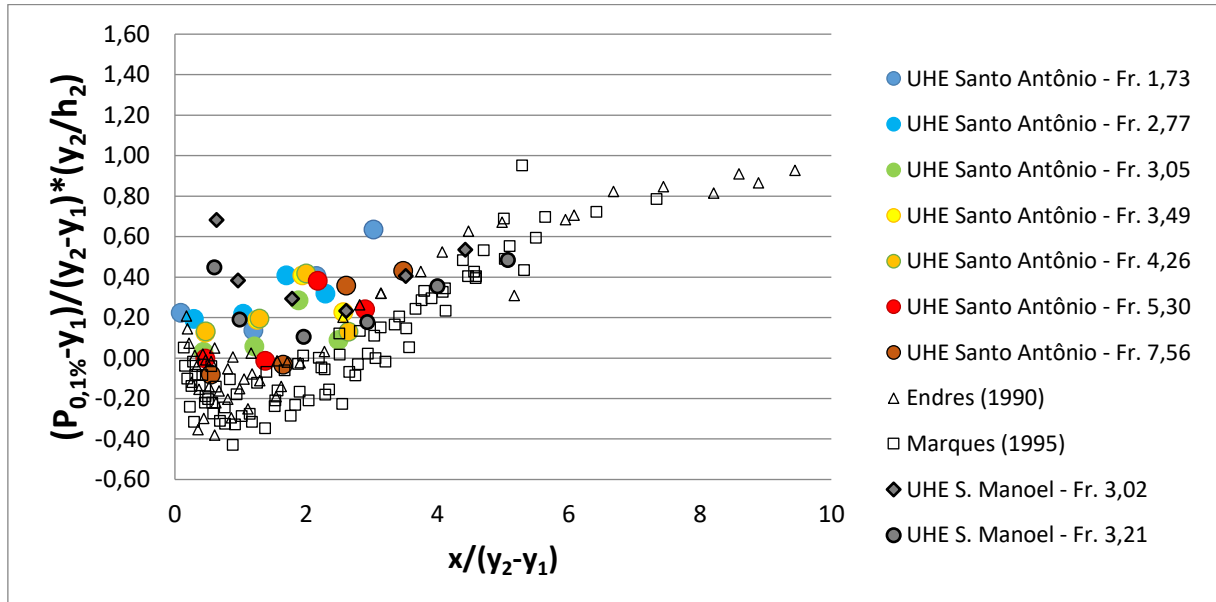


Figura 20 – Pressões adimensionalizadas com probabilidade de não-excedência de 0,1%. Fonte: Hampe (2018)

A Figura 21 mostra a comparação dos valores de pressão com probabilidade de não-excedência de 99,9%. Pode-se perceber que os dados usados por Hampe (2018) possuem valor semelhante ou inferior aos dos outros autores.

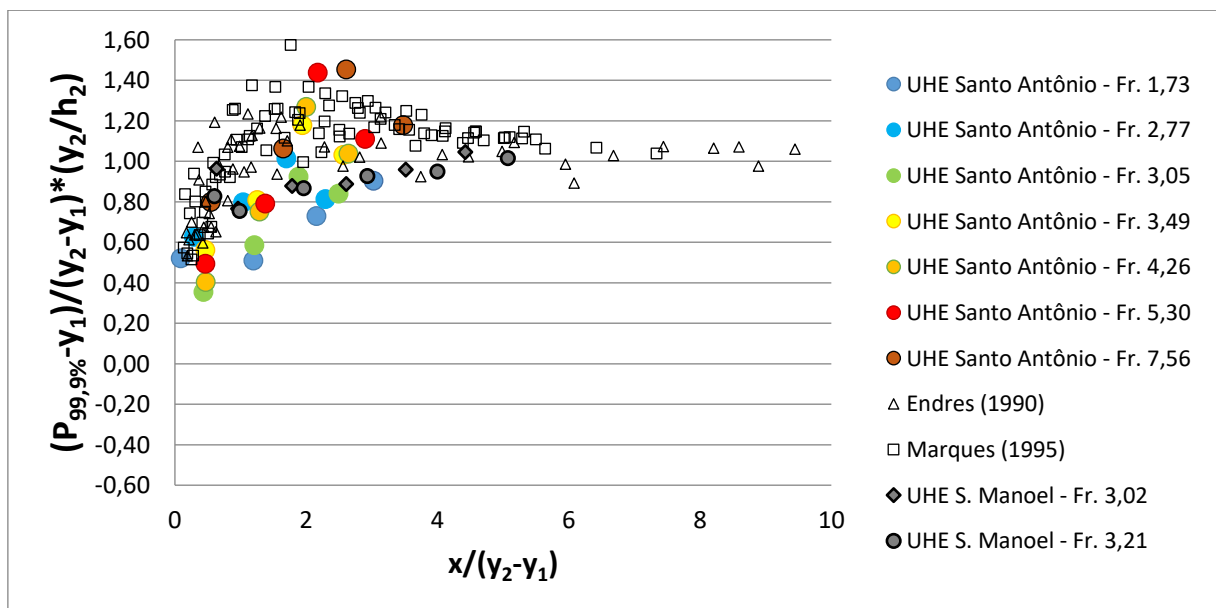


Figura 21 – Pressões adimensionalizadas com probabilidade de não-excedência de 99,9%. Fonte: Hampe (2018)

2.6.3 Previsão de pressões

Há grande interesse, por parte dos projetistas e da engenharia hidráulica e estrutural, pelo conhecimento das pressões que atuam sobre a laje de uma bacia de dissipação, a fim de possibilitar um dimensionamento seguro e econômico. Estas pressões, entretanto, variam em termos de média, desvio padrão, assimetria, curtose, valores máximos e mínimos conforme a posição longitudinal ao longo do ressalto. Esse fato faz do ressalto hidráulico um fenômeno de difícil caracterização.

Teixeira (2003) introduziu um método de previsão dos valores de pressão ocorrentes junto ao fundo de uma bacia de dissipação por ressalto hidráulico, defendendo que esta grandeza pode ser compreendida como uma combinação de três outros parâmetros, conforme a Equação 17 proposta por Marques *et al.* (1997):

$$P_{x\%} = P_x \pm N_{x\%} \cdot \sigma_x \quad \text{Equação 17}$$

Onde:

$P_{x\%}$ é o percentil x da amostra de pressões (altura piezométrica equivalente);

P_x é o valor médio das pressões instantâneas (altura piezométrica equivalente) na posição longitudinal x ;

σ_x é o desvio padrão das pressões instantâneas na posição longitudinal x ;

$N_{x\%}$ é o coeficiente estatístico de distribuição de probabilidade.

Utilizando a distribuição de probabilidades dos dados de Endres (1990) para ressalto livre, o autor obteve os valores de N para diferentes probabilidades e para diferentes posições ao longo do ressalto. Os resultados podem ser vistos na Figura 22. A partir deste método, utilizando simplesmente a média, o desvio padrão e o coeficiente N , é possível estimar pressões com diversas probabilidades de não-excedência ao longo de toda a extensão do ressalto hidráulico, para uma faixa de percentis entre 1% e 99%.

A média e o desvio padrão das pressões junto ao fundo de bacias de dissipação podem ser calculadas por meio da Equação 18, da Equação 19 e da Equação 20, propostas por Teixeira (2003).

$$\Psi = -0,015 \cdot \Gamma^2 + 0,237 \cdot \Gamma + 0,07 \quad \text{Equação 18}$$

$$\Omega = 0,19 + 0,573.\Gamma - 0,159.\Gamma^2 \quad (\text{para } 0 \leq \Gamma \leq 2,4) \quad \text{Equação 19}$$

$$\Omega = 1,229 - 0,281.\Gamma + 0,017.\Gamma^2 \quad (\text{para } 2,4 \leq \Gamma \leq 8,25) \quad \text{Equação 20}$$

Em que:

$\Gamma = \frac{x}{(y_2 - y_1)}$ é a posição longitudinal adimensionalizada;

$\Psi = \frac{(P_x - y_1)}{(y_2 - y_1)} \cdot \frac{y_2}{T_w}$ é a pressão média adimensionalizada;

$\Omega = \left(\frac{\sigma_x}{H_t}\right) \cdot \left(\frac{y_2}{y_1}\right) \cdot \left(\frac{y_2}{T_w}\right)$ é a flutuação de pressão adimensionalizada.

Para os valores dos coeficientes estatísticos N, também foram propostos ajustes do segundo grau em função da posição longitudinal adimensionalizada, conforme a Equação 21. Os coeficientes a , b e c estão tabelados para diferentes percentis e podem ser consultados em Teixeira (2003) e Hampe (2018).

$$N_{x\%} = a \cdot \Gamma^2 + b \cdot \Gamma + c \quad \text{Equação 21}$$

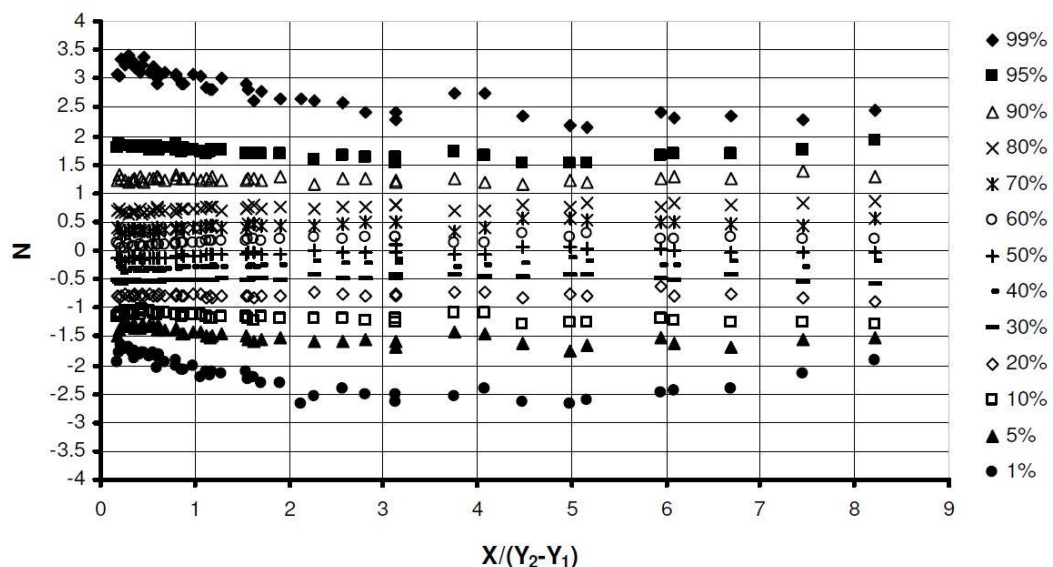


Figura 22 – Distribuição longitudinal do coeficiente estatístico N. Fonte: Teixeira (2003)

Dai Prá (2011) analisou o ressalto hidráulico considerando-o como uma sobreposição de efeitos hidráulicos, e avaliou estes efeitos de forma individual a partir

de diferentes condições de escoamento. Esta análise é ilustrada pela Figura 23. Os efeitos avaliados foram:

- A influência da curva de concordância entre o perfil vertente e a bacia de dissipação;
- O escoamento em regime rápido sobre um plano horizontal;
- A macroturbulência presente no ressalto livre;
- O grau de afogamento do ressalto.

A partir de seus próprios dados, Dai Prá (2011) também disponibilizou os coeficientes de distribuição de probabilidades N, para ressaltos hidráulicos livres e afogados, compreendendo uma faixa entre 0,1% e 99,9%. Estes valores, limites do intervalo, foram considerados como sendo os que geram as pressões extremas do ressalto. O autor verificou, a partir desta análise, que a montante da posição adimensional $3X/(Y_2 - Y_1)$ o coeficiente N é maior para ressaltos livres, indicando que o afogamento exerce uma influência amortecedora sobre as pressões extremas de ressaltos afogados. A jusante desta posição, os coeficientes N possuem um mesmo comportamento, tanto para ressaltos livres quanto para ressaltos afogados.

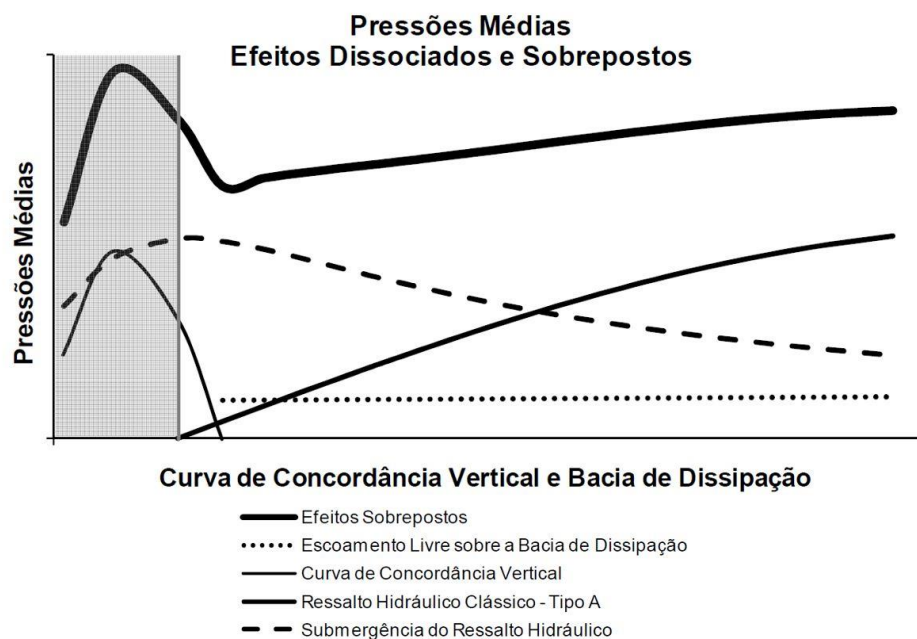


Figura 23 – Dissociação e sobreposição de efeitos sobre a pressão média. Fonte: Dai Prá (2011)

Hampe (2018) acrescentou à análise feita por Teixeira (2003) os valores de N para as pressões extremas $P_{0,1\%}$ e $P_{99,9\%}$ e comparou estes valores aos coeficientes estatísticos obtidos a partir de seus próprios dados. O resultado pode ser visto na Figura 24.

Percebe-se que os resultados compreendidos entre a faixa de 5% e 95% aderiram bem ao ajuste proposto por Teixeira (2003). Para os valores de N mais extremos, entretanto, não há tanta concordância entre os dados.

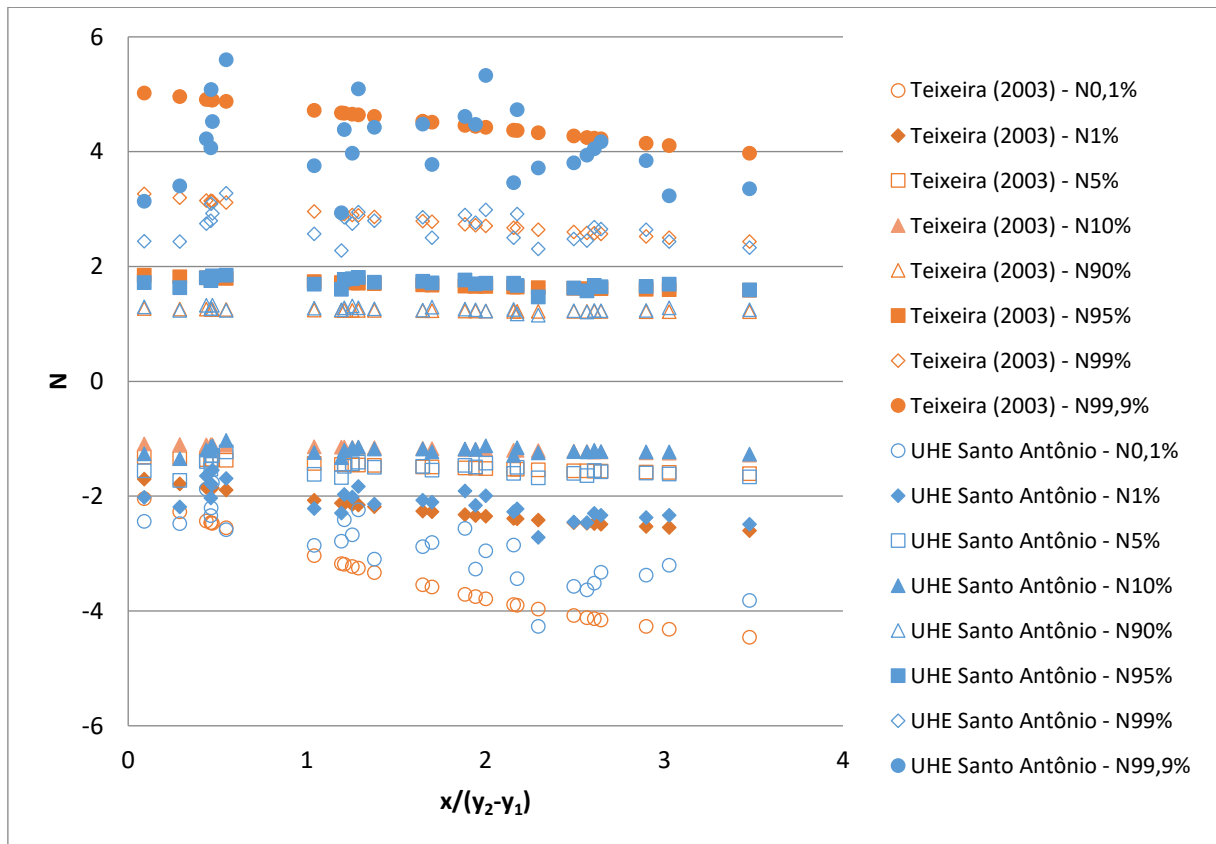


Figura 24 – Comparação dos coeficientes estatísticos N . Fonte: Hampe (2018)

A autora também verificou a aplicabilidade das equações propostas por Teixeira (2003) para a média e para o desvio padrão. Quanto à média, os valores amostrais apresentaram semelhança com os valores estimados. Quanto ao desvio padrão, entretanto, houve grande distanciamento da estimativa em relação aos dados coletados em modelo. Para contornar esta situação, foram propostos três novos ajustes para a estimativa desse parâmetro estatístico: um deles utilizando dados de todos os ensaios ($1,73 < Fr_1 < 7,56$); outro, a partir dos ensaios com número de

Froude inferior a 4,5 (Equação (48); um terceiro a partir do menor número de Froude ensaiado ($Fr_1 = 1,73$).

2.7 MODELAGEM FÍSICA

Um modelo físico é uma reprodução, geralmente em escala menor, de um objeto de estudo chamado de protótipo, no qual se aplica o método de simulação física direta do fenômeno, no mesmo meio que no protótipo, com o objetivo de produzir, técnica e economicamente, soluções ótimas para problemas de engenharia (NOVÁK, 1984). Conforme Kobus (1980), foi no início do século XX que a modelagem física começou a ganhar reconhecimento no meio da engenharia hidráulica, quando os laboratórios de estudos fluviais se multiplicaram pela Europa.

Modelos físicos são soluções comumente empregadas na análise e resolução de problemas complexos da engenharia hidráulica. A grande utilidade das técnicas de modelagem reside na sua capacidade de possibilitar um dimensionamento correto e, conseqüentemente, um projeto econômico, uma vez que tanto o subdimensionamento quanto o superdimensionamento acarretam em severos custos adicionais ao orçamento final da obra (ELDER, 1984). Um exemplo de um modelo físico hidráulico tridimensional pode ser visto na Figura 25.



Figura 25 – Vertedouro da Barragem de Oroville, escala 1:50. Fonte: “Miniaturizing America’s Tallest Dam”, 2017

Segundo Proudovsky (1984), generalidades entre os diferentes fenômenos naturais são a base para a modelagem física. Estes fenômenos possuem tanto características gerais, comuns entre um e outro, quanto específicas, que os diferenciam entre si. São as características gerais que permitem a aplicação da teoria da similaridade, conforme a qual dois fenômenos são similares se:

- O modelo e o protótipo são descritos pelo mesmo sistema de equações normalizadas;
- As condições para a não-ambiguidade do modelo e do protótipo são similares;
- Os grupos adimensionais são iguais para o modelo e para o protótipo.

Ao simular qualquer fenômeno complexo em um modelo, é inevitável que se faça, propositadamente ou não, desvios de algumas condições de similaridade, causando a sua violação. A partir disso, é razoável questionar se o modelo tem validade representativa do fenômeno original ou não. Em geral, nenhum modelo reproduz fidedignamente o fenômeno do protótipo. Entretanto, isso não diminui a validade do modelo. Na prática, considera-se que um modelo possui similaridade aproximada se ele garante a determinação de quantidades esperadas a certo nível de precisão, ainda que com a violação de algumas condições de similaridade (PROUDOVSKY, 1984).

Conforme Novak (1984), um modelo é utilizado baseando-se em algumas leis determinantes principais, enquanto outras leis são negligenciadas. Como consequência, nem todos os números adimensionais serão os mesmos no protótipo e no modelo, e essa não-similaridade gera os chamados efeitos de escala.

Teixeira (2008) estudou os efeitos de escala na previsão de valores extremos junto ao fundo de bacias de dissipação por ressalto hidráulico. O autor sugeriu proporções de escalas mínimas para o estudo deste fenômeno em modelos.

Com frequência, é necessário se distanciar de uma ou mais leis de escala devido a uma série de condições complexas na relação protótipo-laboratório. A estas alterações, dá-se o nome de distorção. O termo é usado normalmente para se referir a distorções geométricas, ou seja, quando a escala vertical e a horizontal são diferentes, por exemplo (NOVÁK *et al.*, 2010).

A análise dimensional é uma ferramenta muito útil na mecânica dos fluidos experimental, através da qual podem ser encontrados os números característicos dos fenômenos hidráulicos como, por exemplo, os números de Weber, Mach, Reynolds e Froude. Recorrentemente, escolhe-se um destes números para servir de lei principal para o modelo, de acordo com o fenômeno que se deseja estudar. Como consequência, perde-se a similaridade para os outros números característicos (KOBUS, 1980; NOVÁK *et al.*, 2010).

O número de Froude exerce um papel dominante na modelagem hidráulica e sempre possui caráter relevante quando a influência da gravidade governa o fenômeno como, por exemplo, em todos os escoamentos a superfície livre (KOBUS, 1980). De acordo com o autor, o mais importante requisito de similaridade quando se trata de modelagem de escoamentos a superfície livre é que se reproduza o mesmo número de Froude do protótipo no modelo.

Quando se define que um modelo deverá seguir a lei de Froude, alguns cuidados devem ser tomados em relação a outros números característicos. O número de Reynolds, por exemplo, diminui da ordem de $\lambda^{3/2}$ vezes do protótipo em relação ao modelo, sendo $1:\lambda$ a escala geométrica do modelo. Em geral, define-se que o número de Reynolds do modelo deve sempre continuar grande o bastante para garantir condições de escoamento turbulento no modelo, quando o escoamento no protótipo for turbulento (KOBUS, 1980; NOVÁK *et al.*, 2010). Lopardo (1985) afirma que um modelo na escala 1:50 com número de Reynolds incidente no ressalto $Re_1 \geq 1 \times 10^5$ simula adequadamente amplitudes e frequências das pressões flutuantes, permitindo inferir a tendência de cavitação por pulsos de pressão com uma probabilidade de ocorrência similar àquela registrada em protótipo.

Outra limitação da modelagem se dá pela influência da tensão superficial. Em problemas de engenharia hidráulica, os números de Weber que ocorrem na natureza são tão grandes que a influência da tensão superficial pode ser desprezada. O mesmo não é verdade em modelos pequenos, em que a influência desta grandeza deve ser analisada. O usual é que se limite as lâminas de água em modelo a um valor mínimo de três centímetros (KOBUS, 1980).

Vischer (1984, p. 5, tradução nossa) sintetizou o conteúdo acima explanado da seguinte forma:

Dissipadores de energia com um escoamento a superfície livre dominante são reproduzidos conforme a lei de semelhança de Froude, porque o escoamento é principalmente influenciado pela gravidade. Em contraste com modelos fluviais, por exemplo, a maioria dos modelos de dissipadores são tão curtos que a rugosidade e, conseqüentemente, o número de Reynolds, exercem um papel pequeno. Se a lâmina de água ultrapassa alguns centímetros, os efeitos da tensão superficial e, logo, o número de Weber, podem ser desprezados.

Chanson (2006) afirmou que há grandes efeitos de escala atuando sobre ressaltos hidráulicos de dimensões reduzidas, principalmente no que tange à aeração na região do rolo. Segundo o autor, relativamente há uma maior difusão de ar em escoamentos com menores números de Reynolds, e, por conseguinte, uma menor aeração total na região do rolo.

2.8 AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DE DADOS

Conforme Bendat e Piersol (2010), a aquisição e o processamento de dados podem ser divididos em algumas etapas: a aquisição propriamente dita, a conversão de dados analógicos para digitais, a qualificação dos dados (que contempla a classificação, a validação e a edição dos mesmos) e, por último, a análise.

O elemento primário em um sistema de aquisição de dados é o transdutor. Em termos de engenharia, pode-se dizer que um transdutor faz a translação de um fenômeno físico medido para um sinal elétrico. Na maioria dos sistemas de aquisição de dados, o fenômeno físico é uma quantidade mecânica, como por exemplo força, pressão ou movimento. Nestas situações, o transdutor normalmente consiste de um elemento mecânico que converte o fenômeno físico em uma deformação de um elemento sensível que, por sua vez, produz uma quantidade elétrica proporcional à magnitude do fenômeno físico (BENDAT; PIERSOL, 2010).

O conversor analógico-digital (ADC) é o dispositivo utilizado para transformar o sinal elétrico gerado pelo transdutor em uma série discretizada de valores digitais (série temporal). Depois de armazenados, os dados são identificados quanto à sua estacionariedade, periodicidade e normalidade. Então, é feita uma validação que objetiva localizar anomalias nos dados (no caso de erros na etapa da aquisição) e, subsequentemente, eliminá-las (BENDAT; PIERSOL, 2010). Goldstein (1996) afirma que há um balanço entre a resolução e a taxa de aquisição dos dados, limitado pelo

ADC. Se a resolução aumenta, a taxa de aquisição de dados diminui, e vice-versa. Este problema, entretanto, não é mais preocupante na atualidade para aquisição de dados em experimentos usuais de hidráulica. Com o avanço tecnológico, os conversores se tornaram capazes de coletar dados com altas resoluções e elevadas taxas de aquisição.

Depois disso, as séries de dados estão prontas para serem analisadas. É comum que os dados sejam avaliados quanto aos quatro primeiros momentos estatísticos (média, desvio padrão, coeficiente de assimetria e de curtose), cujas equações estão explicitadas mais adiante no item 3.3. Nesta etapa também é removida a tendenciosidade dos dados, normalmente através do ajuste de um polinômio de pequeno grau (BENDAT; PIERSOL, 2010).

Conforme Bendat e Piersol (2010), talvez a mais importante característica descritiva de dados aleatórios estacionários é a função de densidade autoespectral, que define a composição de frequências dos dados. Medições do autoespectro podem fornecer informações quanto às características dinâmicas do sistema, periodicidades e distribuição de energia. A partir desta análise de densidade espectral, também é possível identificar a frequência dominante do fenômeno, importante para que o projetista compare com a frequência natural da estrutura, a fim de se evitar o fenômeno chamado de ressonância.

De acordo com Tropea, Yarin e Foss (2007), a função de densidade autoespectral é produto da Transformada de Fourier que, por sua vez, é uma transformação integral com funções de base senoidal ortogonal de diferentes frequências.

A análise de densidade de probabilidades é frequentemente omitida em procedimentos de análise de dados devido à tendência de se assumir que todos os dados aleatórios seguem a distribuição normal (BENDAT; PIERSOL, 2010). Para o caso das pressões em um ressalto hidráulico, acreditava-se que elas seguiam uma lei Gaussiana, até que esta teoria foi refutada por Rajaratnam (1965) e, posteriormente, por outros, como Lopardo (1986), Marques *et al.* (1997), e Pinheiro, Quintela e Ramos (2007).

Conforme Tropea, Yarin e Foss (2007) e Bendat e Piersol (2010), um problema recorrente que diz respeito à frequência de aquisição de dados é o dobramento, também chamado de *aliasing*. Frequências muito altas aparecerão, na análise de densidade espectral, “dobradas” sobre as frequências que estão dentro da faixa de

aquisição de dados. A Figura 26 é um exemplo de um caso de dobramento. Isso acontece para taxas acima da frequência de Nyquist, ou frequência de corte, que é dada pela Equação 22 a seguir:

$$f_N = \frac{f_a}{2} \quad \text{Equação 22}$$

Em que:

f_N é a frequência de Nyquist, ou frequência de corte;

f_a é a frequência de aquisição dos dados.

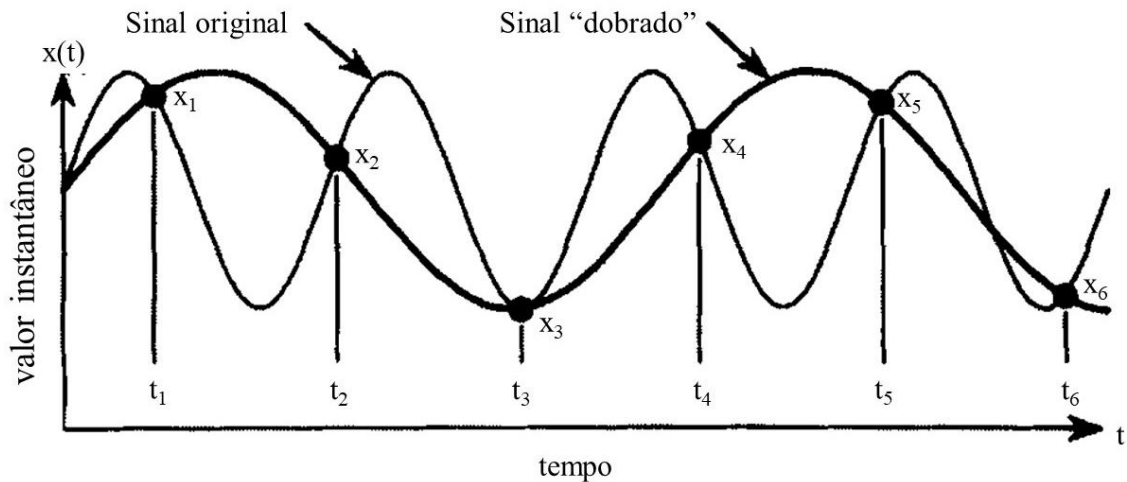


Figura 26 – Exemplo de *aliasing*, ou dobramento. Fonte: adaptado de Bendat e Piersol (2010)

Erros de dobramento podem ser evitados por meio da aplicação de um filtro analógico de baixas frequências, também chamado de passa-baixas ou *anti-aliasing*. Com efeito anterior à aquisição dos dados, um filtro deste tipo remove as frequências mais altas que a frequência de Nyquist (TROPEA; YARIN; FOSS, 2007).

Quanto à frequência e ao tempo de aquisição de dados, Teixeira (2008, p. 158) afirma o seguinte:

Recomenda-se que em estudos de laboratório que visam à determinação do campo de pressões atuantes em bacias de dissipação, as amostras sejam coletadas em frequência de 50 Hz e duração de 10 minutos (valores mínimos). Já nos estudos que visam determinar as correlações entre os

valores de pressão (considerando tomadas consecutivas), sugere-se que sejam coletadas amostras com frequência de aquisição igual a 100 Hz.

Goldstein (1996) recomenda que a coleta de dados seja feita a uma frequência de pelo menos 3 vezes a maior frequência do fenômeno, a fim de evitar o *aliasing*, ou dobramento. Além disso, dados coletados a frequências baixas são pobres em informações. Por outro lado, dados coletados com frequências muito altas ocasionam um desperdício de recurso, tanto computacional quanto analítico. Portanto, deve-se buscar uma frequência intermediária, que atenda tanto a um critério quanto a outro. Sabe-se que a macroturbulência que ocorre no ressalto hidráulico possui frequências geralmente abaixo de 10 Hz, conforme Pinheiro, Quintela e Ramos (2007).

A Tabela 6 reúne as frequências e o tempo de aquisição de dados de alguns pesquisadores.

Tabela 6 – Frequência de aquisição e tempo de amostragem dos dados

Autor	Frequência de aquisição (Hz)	Tempo de amostragem (min)
Toso e Bowers (1988)	50	10
Endres (1990)	100	1,67
Marques (1995)	50	3,33
Pinheiro, Quintela e Ramos (2007)	50	2
Mees (2008)	200	7,50
Dai Prá (2011)	500	10
Souza (2012)	100	10
Novakoski (2016)	128	15
Hampe (2020) - Santo Antônio	100	10
Hampe (2020) - São Manoel	100	10

Lopardo (1986) recomenda que o intervalo de amostragem se mantenha entre 0,01 s e 0,02 s, ou seja, frequências de aquisição entre 50 Hz e 100 Hz. Além disso, o autor também demonstrou que, para comprimentos de mangueira de até 5 centímetros, não há atenuação nos valores de pressão registrados.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A fim de possibilitar a caracterização dos esforços atuantes junto ao fundo de uma bacia de dissipação por ressalto hidráulico com baixo número de Froude, foi preparado um modelo físico bidimensional, no qual se obtiveram dados de pressão média e instantânea. A partir desses dados, duas metodologias tiveram sua aplicabilidade avaliada: o equacionamento introduzido por Teixeira (2003), desenvolvido para ressaltos hidráulicos ditos estáveis ($4,5 < Fr_1 < 9,0$); e a metodologia proposta por Hampe (2018), para ressaltos hidráulicos com baixos números de Froude ($Fr_1 < 4,5$). Os tópicos a seguir contêm a descrição do modelo e dos métodos empregados.

3.1 INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

Os ensaios e a coleta de dados foram realizados em um modelo físico reduzido bidimensional presente no Laboratório de Obras Hidráulicas (LOH) do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da UFRGS, situado em Porto Alegre – Rio Grande do Sul. A instalação experimental constitui-se por um canal metálico de 15,5 metros de comprimento, 39,5 centímetros de largura e 80 centímetros de altura e está representado em planta e corte na Figura 27.

A alimentação do canal é feita por um conjunto de três bombas centrífugas de 25 cv, 50 cv e 75 cv, equipadas com inversores de frequência, com as quais é possível injetar no sistema uma vazão de até 200 l/s, aproximadamente. A vazão, provinda de um reservatório de aproximadamente 600 m³, foi medida utilizando-se um medidor de vazão instalado na tubulação de alimentação.

O sistema de estabilização do nível de água é realizado por dois tranquilizadores, constituídos de tubos de PVC. Verificou-se que duas placas dispostas entre os tranquilizadores, colocadas na parte mais superficial do escoamento, exerciam papel significativo na tranquilização das lâminas de água para as vazões mais elevadas.

O vertedouro, de 19 centímetros de altura e 78 centímetros de comprimento na base, tem um perfil semelhante ao da UHE Santo Antônio (Porto Velho – Rondônia) na escala 1:50. Enquanto o protótipo conta com 15 comportas, o modelo não possui nenhuma.

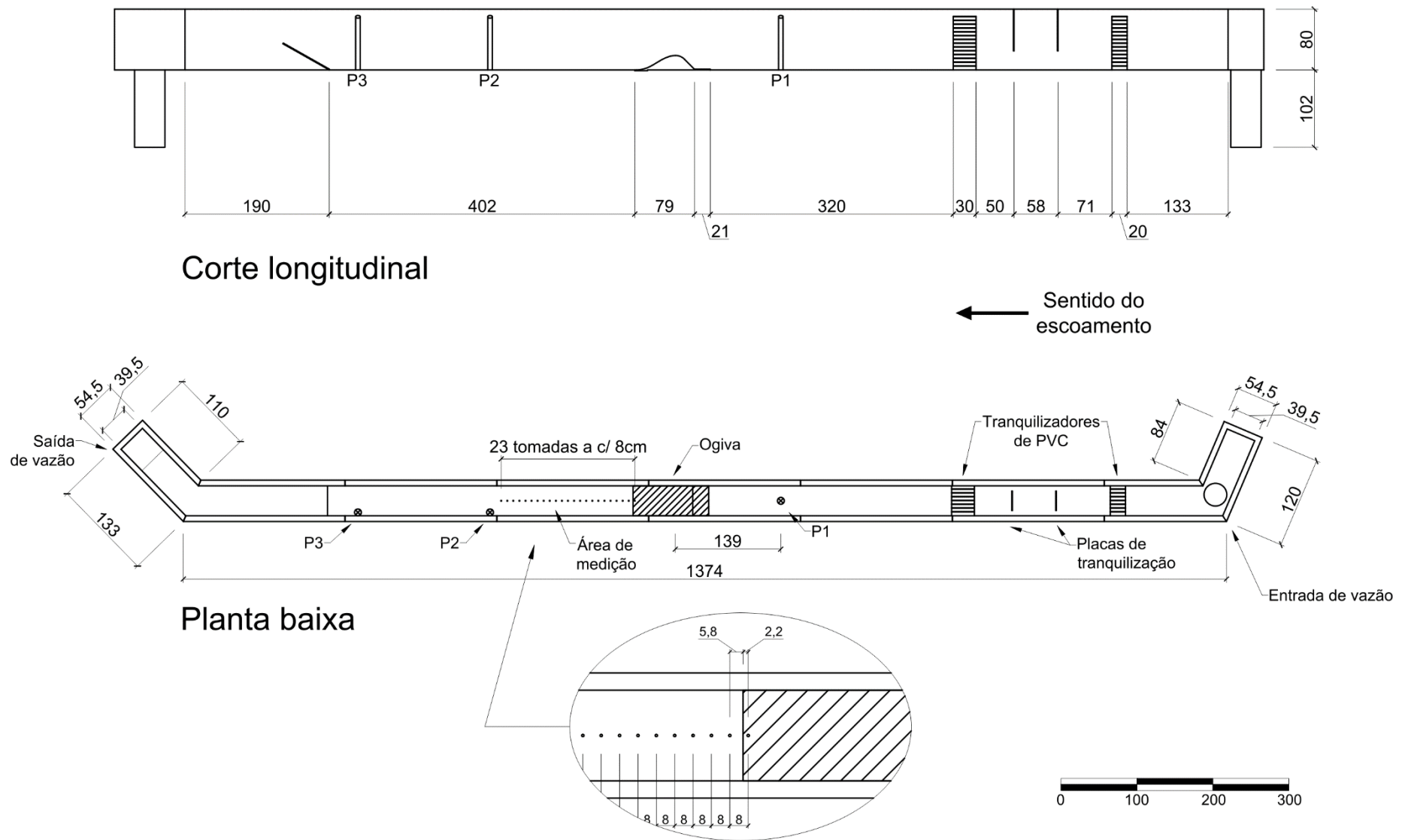


Figura 27 – Planta e corte da instalação experimental (medidas em centímetros)

O trecho intermediário do canal tem paredes de acrílico e possui 4 metros de comprimento, permitindo a visualização do fim do canal de aproximação, do vertedouro e da bacia de dissipação. Junto ao fundo da bacia de dissipação, 23 tomadas de pressão, espaçadas de 8 em 8 centímetros e centralizadas em relação à largura do canal, permitem o registro da distribuição longitudinal de pressões. Não há elementos de dissipação ao longo da bacia (blocos ou *endsill*, por exemplo), o que a caracteriza como uma bacia do tipo I segundo a classificação do USBR. Uma vez que as profundidades do escoamento na bacia de dissipação são todas menores do que a largura do canal, considerou-se que não há efeito de parede atuando sobre as pressões coletadas no eixo longitudinal central do modelo.

Para a medição das lâminas de água na região do ressalto, dispõe-se de uma ponta linimétrica montada em uma plataforma móvel (no sentido longitudinal do canal), que consiste de uma escala graduada dotada de vernier, com precisão de até 0,1 mm. Como as lâminas de água eram oscilantes, devido ao escoamento rápido, ou supercrítico, escolheu-se como posição ideal da ponta linimétrica aquela em que ela ficava metade do tempo em contato e metade do tempo sem contato com a água.

Três piezômetros instalados fora do quadro de piezômetros auxiliam na medição de lâminas de água em pontos específicos (Figura 27). P1 está instalado a 1,39 m de distância da soleira do vertedouro, a montante, com o objetivo de medir a energia hidráulica antes da dissipação causada pelo sistema de extravasamento. Este piezômetro se comunica com o escoamento através de uma mangueira, conectada no fundo do canal. P2 e P3 estão instalados a jusante do ressalto, a fim de medir o valor de Y_2 . Estes dois piezômetros são conectados ao canal por meio de mangueiras, inseridas na parede lateral do modelo.

Uma comporta a jusante da bacia de dissipação permite o posicionamento do ressalto hidráulico em relação ao vertedouro e a imposição de diferentes graus de afogamento. Por fim, uma tubulação de retorno conduz a água ao reservatório.

A Figura 28 ilustra alguns dos elementos descritos acima, enquanto a Tabela 7 contém um resumo das características da instalação experimental.



a) conjunto moto-bomba



b) medidor de vazão



c) registro do modelo



d) tranquilizador



e) ponta limimétrica



f) comporta de jusante

Figura 28 – Elementos do circuito hidráulico

Tabela 7 – Resumo das características da instalação experimental

Característica	Dimensão
Comprimento total do canal (m)	15,50
Comprimento total do canal de aproximação (m)	5,35
Comprimento total da bacia de dissipação (m)	1,85
Comprimento da zona de medição na bacia de dissipação (m)	1,76
Largura do canal e da bacia de dissipação (m)	0,395
Diferença de nível entre a soleira do vertedouro e a bacia de dissipação (m)	0,19
Equação do perfil vertente (m)	$y = -1,126937x^{1,748}$
Raio da curva de concordância vertical (m)	0,40
Concordância entre o perfil vertente e a curva de concordância vertical (graus)	31°

A Tabela 8 contempla a campanha de ensaios realizados neste estudo. O ressalto hidráulico formado em cada uma das vazões ensaiadas pode ser visto na Figura 29 e seguintes.



Figura 29 – Ressalto hidráulico: vazão de 13 l/s e $Fr_1 = 4,6$

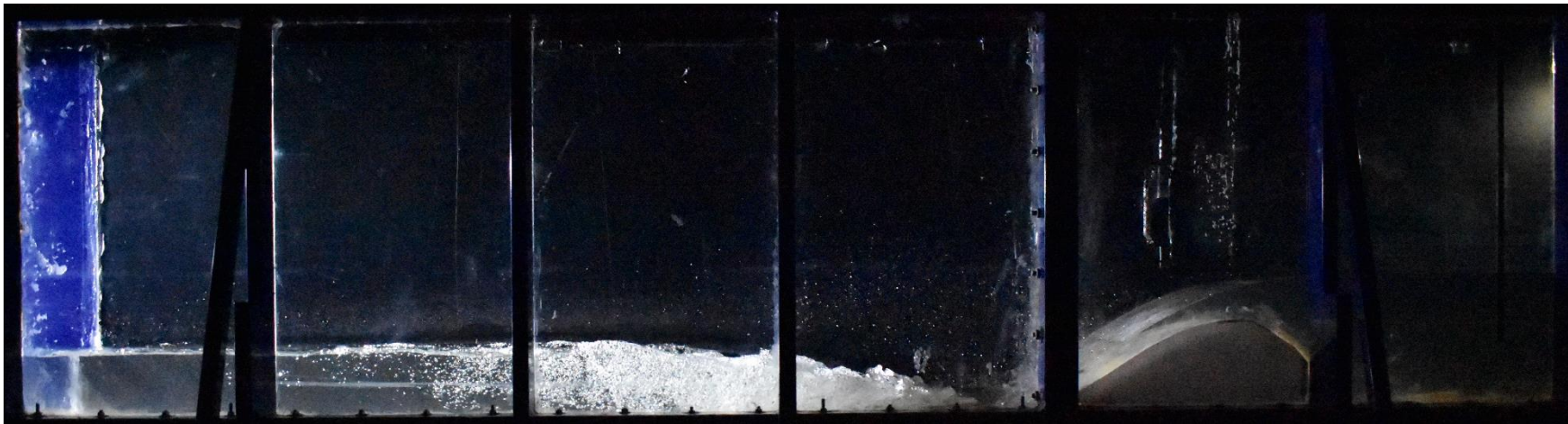


Figura 30 – Ressalto hidráulico: vazão de 25 l/s e $Fr_1 = 3,8$



Figura 31 – Ressalto hidráulico: vazão de 35 l/s e $Fr_1 = 3,4$



Figura 32 – Ressalto hidráulico: vazão de 50 l/s e $Fr_1 = 3,0$



Figura 33 – Ressalto hidráulico: vazão de 100 l/s e $Fr_1 = 2,3$



Figura 34 – Ressalto hidráulico: vazão de 150 l/s e $Fr_1 = 1,9$

Os valores de y_1 foram medidos utilizando a ponta limimétrica, conforme procedimento descrito mais adiante. Esta e outras métricas relevantes para a análise da energia ao longo do ressalto hidráulico podem ser vistas na Figura 35.

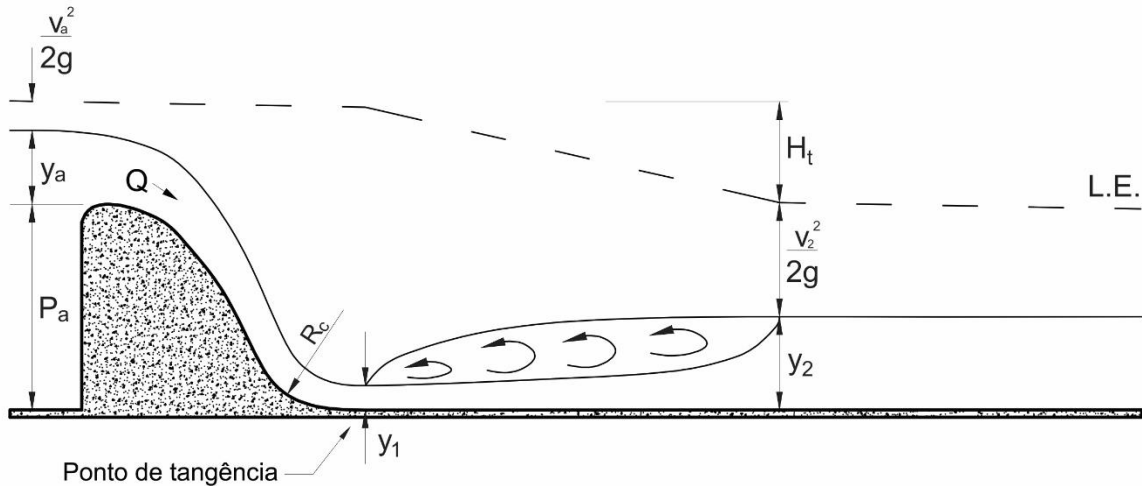


Figura 35 – Esquema de energia ao longo do ressalto hidráulico

A velocidade na entrada do ressalto foi calculada dividindo-se a vazão pela área da seção, conforme a Equação 23:

$$v_1 = \frac{Q}{B \cdot y_1} \quad \text{Equação 23}$$

O número de Reynolds é a relação entre a velocidade do escoamento, um comprimento característico e a viscosidade cinemática do fluido. Este número adimensional rege se o escoamento será laminar ou turbulento e é calculado conforme a Equação 24.

$$Re_1 = \frac{v_1 \cdot y_1}{\nu} \quad \text{Equação 24}$$

Em que:

v_1 é a velocidade na entrada do ressalto (m/s);

y_1 é a lâmina de água na entrada do ressalto (m);

ν é a viscosidade cinemática da água (m²/s).

O número de Weber é calculado conforme a Equação 25. Pode ser entendido como a relação entre a inércia do fluido e sua tensão superficial, e se faz importante na análise da formação de gotas, bolhas e na incorporação de ar ao escoamento.

$$We_1 = \frac{\rho \cdot v_1^2 \cdot y_1}{\sigma} \quad \text{Equação 25}$$

Onde:

ρ é a massa específica da água (kg/m³);

v_1 é a velocidade na entrada do ressalto (m/s);

y_1 é a lâmina de água na entrada do ressalto (m);

σ é a tensão superficial entre ar e água (N/m).

Tabela 8 – Resumo da campanha de ensaios

Vazão total (m ³ /s)	Vazão específica (m ² /s)	NA _{mont} ^(*) (m)	NA _{jus} ^(*) (m)	y ₁ (m)	v ₁ (m/s)	Fr ₁	Re ₁	We ₁
0,013	0,033	0,257	0,103	0,017	1,916	4,6	3,3E+04	891
0,025	0,064	0,300	0,148	0,030	2,089	3,8	6,4E+04	1848
0,035	0,088	0,312	0,174	0,041	2,166	3,4	8,8E+04	2655
0,050	0,126	0,341	0,213	0,057	2,208	3,0	1,3E+05	3852
0,100	0,252	0,416	0,305	0,108	2,327	2,3	2,5E+05	8137
0,150	0,377	0,474	0,376	0,162	2,332	1,9	3,8E+05	12208

(*) Os níveis de montante e jusante são em relação ao fundo da bacia de dissipação na elevação 0,00m.

A maior vazão foi escolhida com base no número de Froude ($Fr_1 = 1,9$) e na capacidade do canal de ensaios. Para $Fr_1 < 1,7$, o ressalto passa a ser classificado como ondulado, conforme a classificação de Peterka (1984), fugindo do escopo da presente pesquisa. Ademais, vazões um pouco maiores já são suficientes para que ocorram extravasamentos na extremidade de montante da instalação experimental. A menor vazão foi selecionada de forma que o número de Froude ficasse no limite entre o ressalto estável e o de transição. Para as menores vazões, a lâmina de água incidente é considerada pequena, visto que os efeitos viscosos relacionados ao número de Weber passam a exercer significativa influência em escoamentos de até 3 cm de altura. Apesar disso, verifica-se que este adimensional resultou em valores sempre maiores do que 500, faixa para a qual, segundo Pinto (1984), não há efeitos de escala na aeração do fenômeno. Também observa-se que o número de Reynolds

na entrada do ressalto extrapola a recomendação de Lopardo (1985) ($Re_1 \geq 1 \times 10^5$) para três vazões. Decidiu-se, mesmo assim, proceder com os experimentos, analisando estas vazões com certa ressalva, diante desses fatos.

3.2 AQUISIÇÃO DE DADOS

Ainda na etapa de planejamento de qualquer experimento, é necessário que se conheçam os requisitos do problema, a fim de se utilizarem dispositivos apropriados. Neste trabalho, foram coletados dados de pressão, lâminas de água e vazões. As primeiras foram coletadas com piezômetros e transdutores piezorresistivos de pressão. As lâminas foram medidas com pontas linimétricas. E as vazões foram quantificadas utilizando medidores de vazão.

Faz-se necessário, também, conhecer o propósito da medição. A partir dos dados coletados, foi feita uma análise de pressões extremas, o que demandou uma discretização temporal grande. Por isso, foram utilizados transdutores de pressão, equipamentos capazes de registrar valores em altas frequências.

Por último, conhecer uma estimativa da resposta que se deseja encontrar é também um item importante a se observar antes do começo de um experimento. Toso e Bowers (1988), por exemplo, afirmam que existem limites (máximo e mínimo) para as pressões ocorrentes em um ressalto hidráulico, que dependem da energia presente no escoamento. Alguns trabalhos nos quais a presente pesquisa se apoia para estimar seus resultados são: Teixeira (2003), Dai Prá (2011), Souza (2012) e Hampe (2018).

Foram coletados dados de pressão média utilizando piezômetros, conectados às tomadas de pressão por meio de mangueiras cujos comprimentos variam entre 3 e 5 metros. O conjunto de piezômetros foi montado em um quadro em cujo fundo foi colado um papel milimetrado, o qual permite a leitura dos resultados, em metros de coluna d'água, conforme pode ser visto na Figura 36. A Figura 37 mostra, de forma ampliada, o desenvolvimento das pressões médias ao longo do ressalto. Os valores de pressão lidos com piezômetros serviram para validar as amostras de dados coletadas com transdutores de pressão.



Figura 36 – Quadro de piezômetros. Vazão de 150 l/s e $Fr_1 = 1,9$



Figura 37 – Ampliação do quadro de piezômetros, mostrando o desenvolvimento das pressões médias

O registro das flutuações de pressão e das pressões extremas foi feito utilizando transdutores de pressão piezorresistivos, da marca Omega. O modelo e a faixa de aquisição de cada um dos transdutores pode ser visto na Tabela 9. Na Figura

38, apresenta-se a posição de cada um deles ao longo da bacia de dissipação da instalação experimental. Os traços compridos e fortes referem-se às tomadas de pressão nas quais foram instalados transdutores. Nas tomadas indicadas por traços mais curtos, somente foram instalados piezômetros.

Tabela 9 – Relação dos modelos de transdutores utilizados

Tomadas	Modelo	Faixa de aquisição (psi)	Faixa de aquisição (mca)	Precisão
1 a 6	Omega - PX419	-1 a +1	-0,703 a +0,703	0,08% FE
7 a 21	Omega - PX419	-2,5 a +2,5	-1,758 a +1,758	0,08% FE
23	Omega - PX419	-5 a +5	-3,515 a +3,515	0,08% FE

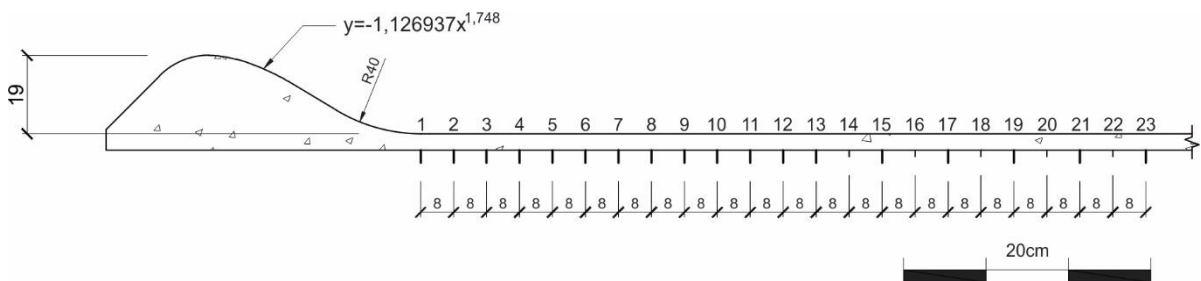


Figura 38 – Tomadas equipadas com transdutores de pressão

Os transdutores foram conectados aos tubos das tomadas de pressão por meio de conectores de vidro em forma de “T”, de modo que ficassem o mais próximo possível do fundo do canal. Assim, são amenizados os efeitos de amortecimento das pressões instantâneas causadas pelo comprimento da mangueira. A forma como os transdutores foram instalados no fundo do canal pode ser visto na Figura 39. As mangueiras têm comprimento variando entre 10 e 13 cm. Somando-se este comprimento ao dos conectores em “T”, totaliza-se uma distância de aproximadamente 20 cm entre o fundo do canal e o transdutor, valor este que está dentro da faixa recomendada por Lopardo (1986), de 55 cm.

Foi utilizado um sistema de aquisição de dados da marca *National Instruments*. Uma placa de aquisição, composta por um chassi (modelo cDAQ-9178) equipado com três módulos (modelo NI-9203, cada um deles capaz de receber os sinais de oito transdutores ao mesmo tempo) foi utilizada para converter o sinal de corrente gerado pelos transdutores em um sinal digital armazenado pelo *software* LabVIEW 2010. Além disso, uma caixa de alimentação foi utilizada para fazer comunicação entre os

transdutores e a placa de aquisição. A Figura 40 ilustra o funcionamento do sistema de aquisição.



Figura 39 – Instalação dos transdutores no canal de ensaios

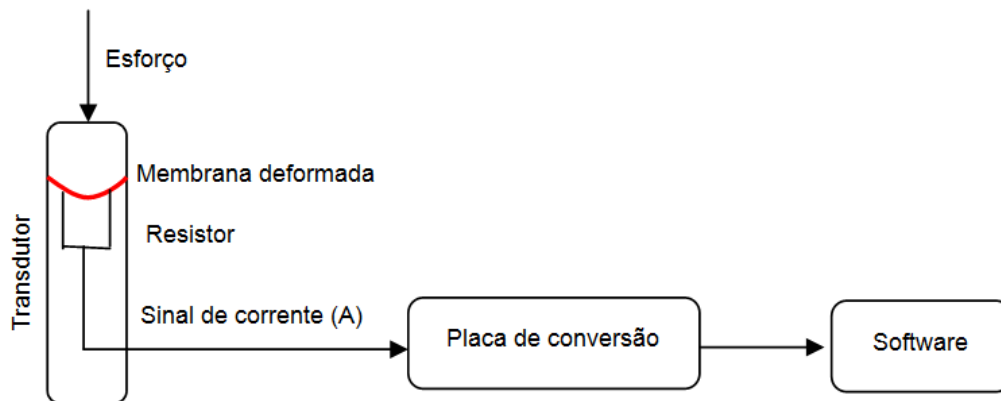


Figura 40 – Esquema do sistema de aquisição

Com base na experiência de outros autores, alguns dos quais citados na Tabela 6, e nas práticas do laboratório, foram escolhidos o tempo de amostragem de 10 minutos e a frequência de aquisição de 100 Hz, resultando em 60.000 dados por tomada, por ensaio. A aquisição foi feita de forma simultânea para todas as tomadas.

Na etapa de coleta dos valores instantâneos de pressão, foram utilizadas curvas de calibração previamente desenvolvidas para cada transdutor, por meio de procedimentos realizados em uma câmara de calibração, com a qual se podem impor

pressões positivas e negativas aos sensores. Para verificar a validade das curvas de calibração, os transdutores foram instalados no próprio modelo e diferentes níveis de água foram impostos no canal, com o auxílio de uma bomba-sapo e com as extremidades do canal vedadas. Os valores registrados pelos transdutores foram comparados com as lâminas de água conhecidas e verificou-se que as curvas estavam bem ajustadas.

Para a obtenção da altura conjugada rápida y_1 de cada ensaio, o seguinte procedimento foi adotado: após a estabilização da vazão, mantinha-se a comporta de jusante totalmente aberta. Assim, não era formado o ressalto hidráulico. No próprio escoamento livre (regime rápido), eram feitas três leituras da linha d'água, com auxílio da ponta linimétrica, no ponto de tangência entre a curva de concordância e a bacia de dissipação (local onde se posicionava a seção de entrada do ressalto). A média destes três valores foi adotada como sendo o y_1 . Decidiu-se proceder desta maneira devido à dificuldade de se medir a lâmina de água na seção de entrada do ressalto, sendo esta posição oscilante. A altura conjugada lenta y_2 foi calculada por meio da equação de Bélanger (Equação 3).

3.3 ANÁLISE E TRATAMENTO DE DADOS

A partir dos dados de pressão coletados na campanha de ensaios acima descrita, foram analisados os seguintes parâmetros:

- Pressão média;
- Flutuação de pressão (desvio padrão);
- Coeficiente de assimetria;
- Coeficiente de curtose;
- Pressões com diferentes probabilidades de não-excedência;
- Coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades;

3.3.1 Valores de pressão média, flutuações de pressão e coeficientes de assimetria e curtose

Os valores de pressão média, as flutuações de pressão e os coeficientes de assimetria e curtose obtidos a partir dos dados coletados na instalação experimental foram adimensionalizados conforme proposto por Marques *et al.* (1997) e plotados em

função da sua posição longitudinal adimensionalizada, segundo a Equação 26 e seguintes. Na pressão média e na flutuação de pressão, foi empregado o fator de submersão $S = \frac{T_w}{y_2}$, conforme proposto por Marques *et al.* (1999), para que os dados provenientes do modelo da UHE São Manoel pudessem ser contemplados.

- Pressão média adimensionalizada:

$$\Psi = \frac{P_x - y_1}{y_2 - y_1} \frac{y_2}{T_w} = f\left(\frac{x}{y_2 - y_1}\right) \quad \text{Equação 26}$$

- Flutuação de pressão adimensionalizada:

$$\Omega = \frac{\sigma_x}{H_t} \frac{y_2}{y_1} \frac{y_2}{T_w} = f\left(\frac{x}{y_2 - y_1}\right) \quad \text{Equação 27}$$

- Assimetria:

$$A_d = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{(P - P_x)^3}{n \times \sigma_x^3} = f\left(\frac{x}{y_2 - y_1}\right) \quad \text{Equação 28}$$

- Curtose

$$K = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{(P - P_x)^4}{n \times \sigma_x^4} = f\left(\frac{x}{y_2 - y_1}\right) \quad \text{Equação 29}$$

Em que:

x é a distância longitudinal a partir do início do ressalto (m);

y_1 é a altura conjugada rápida (m);

y_2 é a altura conjugada lenta (m);

T_w é a lâmina de água a jusante do ressalto hidráulico submerso ou afogado (m);

P_x é o valor médio das pressões instantâneas (altura piezométrica equivalente) na posição x (m);

P é a pressão instantânea junto ao fundo do ressalto hidráulico (m);

σ_x é o desvio padrão das pressões instantâneas na posição x (m);

H_t é a perda de energia ao longo da estrutura de dissipação (m);

A_d é o coeficiente de assimetria;

K é o coeficiente de curtose;

n é o número de pontos medidos;

Para a análise da flutuação de pressão, além da Equação 27, também foi empregada a Equação 30, na qual este parâmetro é adimensionalizado por meio da carga de velocidade, conforme em Lopardo (1986).

$$C'_p = \frac{\sigma_x}{\frac{v_1^2}{2g}} = f\left(\frac{x}{y_2 - y_1}\right) \quad \text{Equação 30}$$

Em que:

v_1 é a velocidade média na seção de entrada do ressalto (m/s);

g é a aceleração devido à gravidade (m/s²).

3.3.2 Pressões extremas

Os percentis de pressão para diferentes probabilidades foram obtidos a partir da análise da distribuição de probabilidades. Para estas pressões (pressões extremas), foi empregada uma expressão semelhante à utilizada para adimensionalizar as pressões médias, conforme a Equação 31 utilizada por Novakoski (2016). Para que os dados do modelo da UHE São Manoel pudessem ser incluídos na análise, o fator de submergência $S = \frac{T_w}{y_2}$ foi implementado.

$$\Psi_{x\%} = \frac{P_{x\%} - y_1}{y_2 - y_1} \frac{y_2}{T_w} = f\left(\frac{x}{y_2 - y_1}\right) \quad \text{Equação 31}$$

Em que:

$P_{x\%}$ é o percentil x da amostra de pressões (altura piezométrica equivalente) (m).

3.3.3 Coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades N

O coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades, utilizado por Teixeira (2003), é um recurso do qual se pode dispor a fim de se contornar uma dificuldade encontrada por diversos pesquisadores: o fato de a distribuição de pressões ao longo do ressalto hidráulico não seguir a lei gaussiana e, além disso, variar conforme a posição longitudinal. Este coeficiente também foi analisado em função da posição longitudinal, e para as mesmas probabilidades contempladas nas pressões extremas. Pode ser calculado conforme a seguinte expressão:

$$N_{x\%} = \frac{P_{x\%} - P_x}{\sigma_x} \quad \text{Equação 32}$$

Em que:

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

A partir da análise do coeficiente estatístico N, é possível estimar, por meio da Equação 17, a pressão com uma certa probabilidade de não-excedência, uma vez conhecidos a pressão média, o desvio padrão (flutuação de pressão) e o coeficiente N.

3.4 COMPARAÇÃO COM OUTROS AUTORES

A seguir, são descritas as condições de ensaio de autores cujos dados foram utilizados como comparação para o presente trabalho.

Endres (1990) estudou o ressalto hidráulico livre com cinco números de Froude diferentes, variando de 4,3 a 8,6, em um modelo situado no Laboratório de Hidráulica do IPH – UFRGS em Porto Alegre/RS (largura do canal igual a 0,72 m). Coletou dados em 11 tomadas de pressão com frequência de 100 Hz durante 100 segundos. Os valores da lâmina de água na entrada do ressalto (y_1) foram obtidos de forma analítica. Um esquema do modelo utilizado pode ser visto na Figura 41.

Marques (1995) realizou ensaios em um canal de 0,60 metros de largura por 12 metros de comprimento situado no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia Civil da Université Laval, em Quebec – Canadá. Coletou amostras de pressão a uma taxa de 50 Hz durante 200 segundos em 22 tomadas de pressão, para

ressaltos hidráulicos livres com seis vazões diferentes, para números de Froude variando entre 4,2 e 9,3. Efetuou medições de velocidade e da lâmina de água (y_1) na entrada do ressalto. A Figura 42 é um esquema do canal de ensaios utilizado para a coleta de dados de seu trabalho.

Os dados de pressão instantânea de Dai Prá (2011) foram coletados em um canal de 1,150 m de largura, no qual foi instalada uma ogiva que representa, na escala 1:32, o vertedouro da UHE Porto Colômbia. O modelo bidimensional não descreve fidedignamente a estrutura de protótipo, por ser desprovido de pilares, comportas e de soleira terminal. O autor amostrou valores de pressão instantânea em 14 tomadas ao longo do vertedouro e da bacia de dissipação, nas quais foram instalados transdutores de pressão que registraram dados a uma taxa de 500 Hz durante 10 minutos. Na Figura 43, apresenta-se o perfil longitudinal do modelo onde foram conduzidos os ensaios do autor, com ressaltos tanto livres quanto afogados. No presente estudo foram empregados apenas os dados de ressaltos na condição livre.

Os ensaios de Souza (2012) contemplaram ressaltos hidráulicos livres com sete diferentes números de Froude, variando entre 1,70 e 7,73. A coleta de dados foi feita em um canal de 31,00 metros de comprimento por 1,20 metro de largura situado na Subestação São José de Eletrobrás Furnas, em Belford Roxo/RJ. Um vertedouro representava o protótipo da UHE Santo Antônio na escala 1:50. Uma das diferenças da presente pesquisa para o estudo realizado por Souza se dá pela presença de comportas e pilares no seu modelo. Coletou dados em quatro tomadas de pressão situadas na bacia de dissipação, com os transdutores operando a uma taxa de 100 Hz, durante 10 minutos. Um perfil longitudinal do modelo utilizado, contendo a posição das tomadas de pressão, é apresentado na Figura 44.

No mesmo modelo utilizado por Souza (2012), foi realizada em 2016 uma nova campanha de ensaios para vazões e números de Froude muito próximos àqueles ensaiados pelo autor. Foram verificados comportamentos diferentes para os dados da nova campanha em comparação com os dados originalmente coletados, no que diz respeito a pressão média, desvio padrão e pressões extremas, principalmente na menor e na maior vazão ensaiada. Hampe (2018) utilizou estes dados em seus estudos.

Hampe (2018) também fez uso de dados coletados em um modelo físico da UHE São Manoel, na escala 1:60 situado no Laboratório de Hidráulica Experimental e Recursos Hídricos – LAHE, em FURNAS no Rio de Janeiro/RJ. Um perfil longitudinal

deste modelo pode ser visto na Figura 45, com medidas de protótipo. Os ensaios foram feitos para duas condições de escoamento: ressaltos hidráulicos afogados com números de Froude iguais a 3,07 e 3,21. O modelo, de 0,87 m de largura, era dotado de seis tomadas de pressão na parte plana da bacia de dissipação, instaladas no eixo longitudinal do canal. Transdutores de pressão registraram dados durante 10 minutos, a uma taxa de 100 Hz.

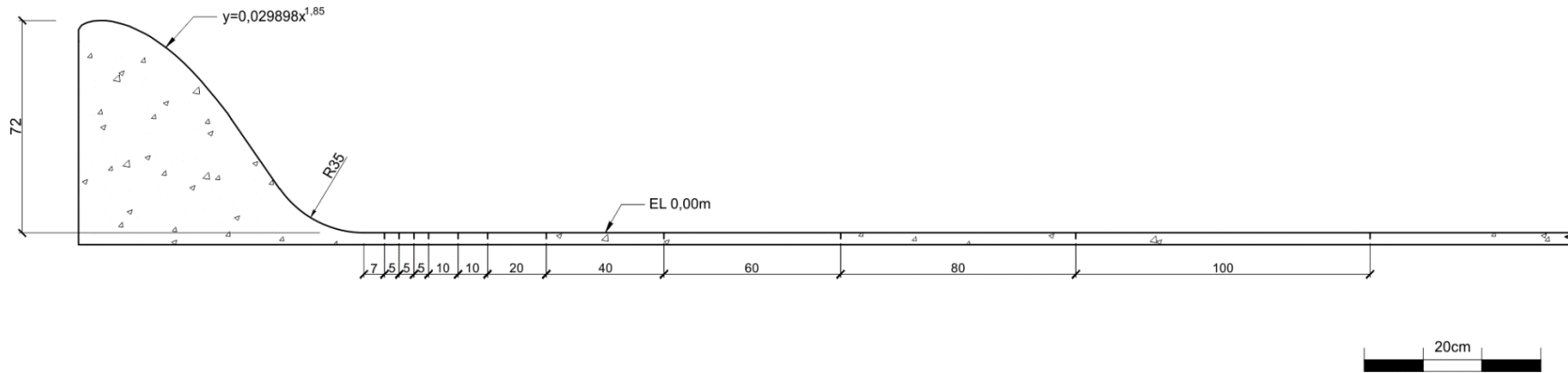


Figura 41 – Perfil longitudinal do modelo utilizado e posição das tomadas de pressão. Fonte: Endres (1990).

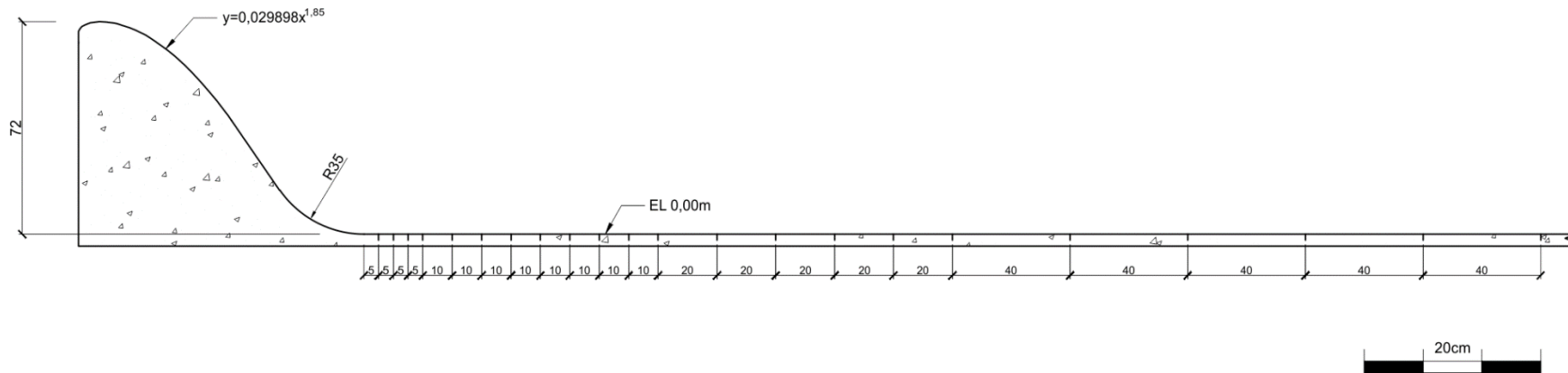


Figura 42 – Perfil longitudinal do modelo utilizado e posição das tomadas de pressão. Fonte: Marques (1995).

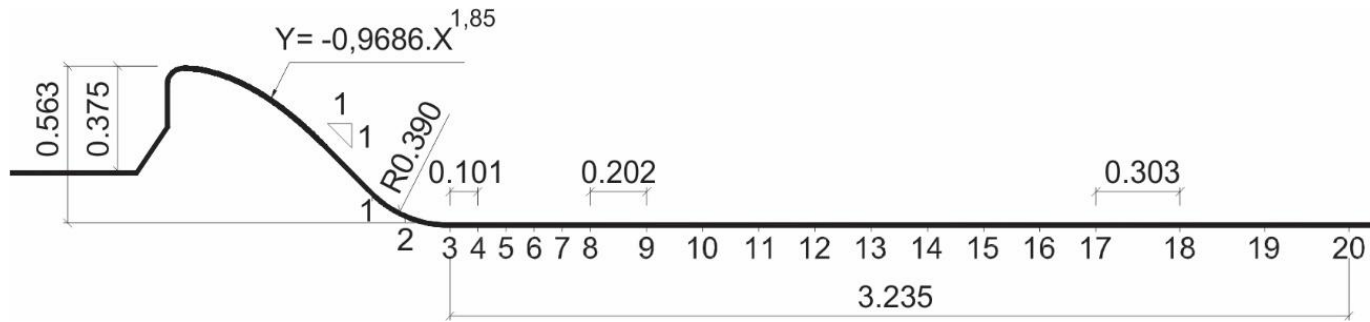


Figura 43 – Vertedouro, bacia de dissipação e tomadas de pressão de Dai Prá (2011)

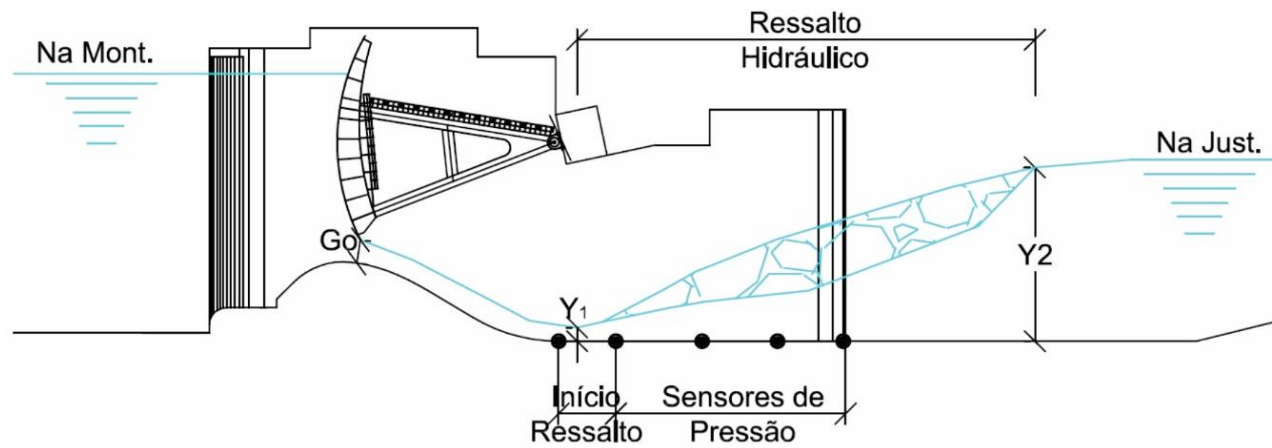


Figura 44 – Perfil longitudinal do modelo utilizado e posição das tomadas de pressão. Fonte: Souza (2012).

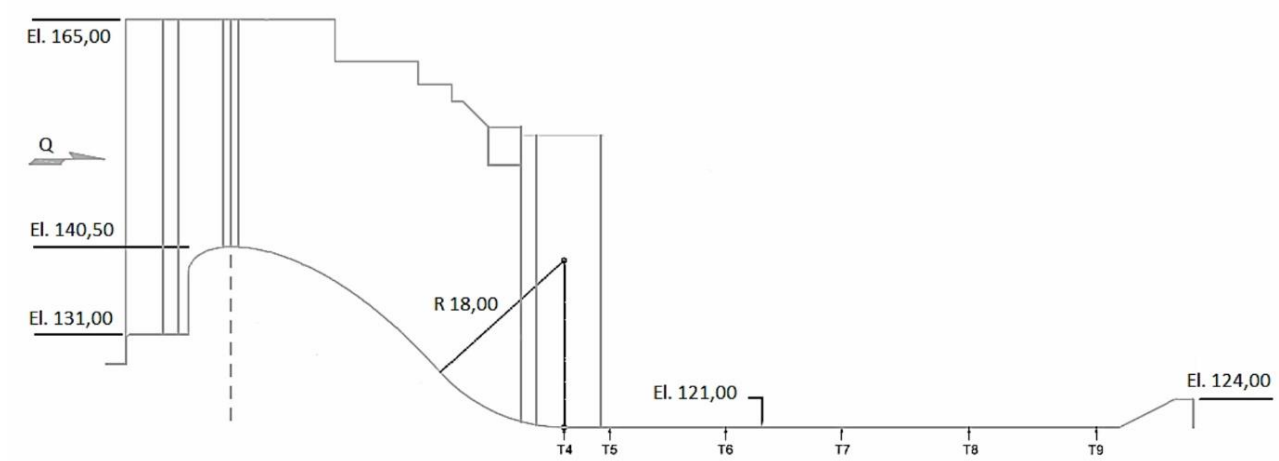


Figura 45 – Perfil longitudinal do modelo da UHE São Manoel e posição das tomadas de pressão. Fonte: Hampe (2018).

4 ARTIGO 1: CARACTERIZAÇÃO DAS PRESSÕES JUNTO AO FUNDO DE BACIAS DE DISSIPÇÃO POR RESSALTO HIDRÁULICO LIVRE COM BAIXO NÚMERO DE FROUDE

Neste artigo, são apresentados valores de pressão instantânea provenientes de ressaltos hidráulicos com baixo número de Froude, coletados na bacia de dissipação da instalação experimental. As amostras de dados, coletadas com transdutores de pressão, foram comparadas com dados de outras pesquisas, tanto de ressaltos com baixo número de Froude quanto de ressaltos estáveis, por meio de parâmetros estatísticos adimensionais, como a média, o desvio padrão, os coeficientes de assimetria e curtose e os percentis extremos de pressão.

CARACTERIZAÇÃO DAS PRESSÕES JUNTO AO FUNDO DE BACIAS DE DISSIPAÇÃO POR RESSALTO HIDRÁULICO LIVRE COM BAIXO NÚMERO DE FROUDE

Renato Steinke Junior¹, Mauricio Dai Prá¹, Eder Daniel Teixeira¹

¹Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil

E-mails: renato.steinkejunior@gmail.com (RSJ), mauricio.daipra@ufrgs.br (MDP), eder.teixeira@ufrgs.br (EDT)

RESUMO

Ressaltos hidráulicos, muitas vezes presentes em estruturas de dissipação de energia, vêm sendo investigados há bastante tempo. O conhecimento das velocidades e pressões geradas pelo fenômeno sobre as estruturas é importante para que sejam evitados danos nas mesmas. Apesar disso, são raros os estudos que tratam sobre ressaltos hidráulicos com baixo número de Froude. A presente pesquisa buscou investigar este tipo de ressalto, a partir de valores de pressão instantânea coletados em um modelo físico bidimensional. Os dados foram comparados com outros estudos, conduzidos com diferentes faixas de número de Froude. Verificou-se que, para vários parâmetros estatísticos adimensionais, os ressaltos com baixo número de Froude se comportam de forma diferente do que os ressaltos estáveis.

Palavras-chave: Ressalto hidráulico; Baixo número de Froude; Pressões extremas; Bacia de dissipação.

ABSTRACT

Hydraulic jumps, frequently present in energy dissipation structures, have been investigated for a long time. The knowledge of the velocities and pressures generated by the phenomenon on these structures is important in order to avoid damages over them. Nonetheless, studies covering low Froude number hydraulic jumps are rare. The present research was an attempt to investigate this type of jump, using instantaneous pressure values sampled in a bidimensional physical model. The data were compared to other studies, carried out with different Froude number ranges. It was verified that, for many statistical dimensionless parameters, the low Froude number jumps behave differently than stable jumps.

Keywords: Hydraulic jump; Low Froude number; Extreme pressures; Stilling basin.

INTRODUÇÃO

À transição entre o escoamento supercrítico e o escoamento subcrítico dá-se o nome de ressalto hidráulico. Este fenômeno tem sido objeto de estudo desde longa data, remontando às primeiras descrições feitas por Leonardo da

Vinci na passagem do século XV para o XVI (HAGER, 1992). Entretanto, as investigações experimentais e científicas sobre o ressalto só tiveram início no século XIX, com Bidone (1820) e Bélanger (1828). Este último foi o responsável por introduzir uma relação, como função do número de Froude (Fr_1), para as alturas conjugadas (y_1 e y_2) que é utilizada até hoje (Equação 33).

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + 8 \cdot Fr_1^2} - 1 \right] \quad (33)$$

As características externas do ressalto hidráulico, como seu comprimento, as alturas conjugadas e a linha d'água, foram o tema dos primeiros trabalhos publicados sobre o fenômeno. Elevatorski (1959) e Rajaratnam (1967) compilaram o conhecimento atingido até então sobre as grandezas externas do fenômeno, para diferentes condições: ressalto livre, afogado (a jusante de vertedouros), submerso (a jusante de comportas de fundo), em canais inclinados e em canais de diferentes geometrias.

Foi só na segunda metade do século XX, com o advento dos anemômetros a fio-quente, que foram iniciadas as pesquisas sobre as características internas do fenômeno, ou seja, o estudo das velocidades, pressões, turbulência e ergodicidade intrínsecas ao ressalto (ROUSE; SIAO; NAGARANTAM, 1959).

Com o surgimento dos transdutores de pressão, na década de 1960, diversos pesquisadores passaram a publicar trabalhos sobre flutuações de pressão em ressaltos hidráulicos genuínos. Aqui, mencionam-se Vasiliev e Bukreyev (1967), King (1967), Resch e Leutheusser (1971), Abdul Khader e Elango (1974), Toso e Bowers (1988), entre outros.

Uma das finalidades do ressalto hidráulico é dissipar a energia da vazão excedente em estruturas de segurança de barragens. De acordo com Chow (1959), sua grande vantagem está em prevenir uma erosão a jusante de comportas e vertedouros, pois ele rapidamente reduz a velocidade do escoamento a um ponto em que o mesmo se torna incapaz de erodir o leito do canal a jusante. Tal transformação de energia ocorre sobre uma laje de concreto chamada de bacia de dissipação.

Pelo fato de as bacias de dissipação envolverem grandes volumes de concreto e obras de terraplenagem, estas estruturas são caras e representam uma parcela significativa do custo total de uma barragem. Assim sendo, é do interesse dos projetistas hidráulicos e estruturais que tal obra seja projetada de forma econômica, mas também segura.

Não raro são registrados danos em estruturas de barragens. Um exemplo recente é o ocorrido na Paradise Dam, em Queensland, Austrália, na qual uma sucessão de cheias erodiu o maciço rochoso a jusante do vertedouro (MCPHERSON et al., 2015). Nisto reside a importância de se conhecer os efeitos a que as bacias de dissipação estarão sujeitas. De posse do conhecimento das pressões extremas que ocorrem junto ao fundo de bacias de dissipação por ressalto hidráulico, torna-se possível fazer o dimensionamento econômico e seguro de tais estruturas, evitando danos como aqueles mencionados por Marques *et al.* (2017): erosão, cavitação, abrasão, fissuras, vibrações, entre outros.

Já são relativamente bem conhecidos os efeitos sobre bacias de dissipação causados por ressaltos hidráulicos ditos

estáveis, ou seja, que operam com números de Froude entre 4,5 e 9,0. Conforme Peterka (1984), ressaltos deste tipo possuem uma dissipação de energia entre 45% e 70%, e são os mais comumente encontrados em aproveitamentos hidrelétricos. A seguir, são mencionados alguns trabalhos que abordam esta faixa do fenômeno.

Pinheiro (1995) analisou a caracterização das forças hidrodinâmicas atuantes sobre lajes de bacias de dissipação, a partir de dados coletados em um modelo físico reduzido. O que diferencia seu trabalho de outros, em termos de inovação, é o estudo do emulsionamento de ar no ressalto. Marques *et al.* (1997) coletaram dados de pressão junto ao fundo de uma bacia de dissipação. As séries de dados foram analisadas com respeito ao seu valor médio, desvio padrão e coeficientes de assimetria e curtose. Os autores propuseram metodologias de adimensionalização dos valores de pressão que tornam possível agrupar os pontos em uma mesma tendência.

Teixeira (2003) desenvolveu uma metodologia para a estimativa de pressões extremas em bacias de dissipação. Dados tanto de modelo quanto de protótipo foram utilizados no desenvolvimento do equacionamento proposto, que se baseou nas relações adimensionais propostas por Marques *et al.* (1997). Por meio deste método, é possível obter estimativas de pressões médias e flutuantes ao longo do ressalto, assim como pressões com diferentes probabilidades de não-excedência. O método é válido para ressaltos livres em bacias sem acessórios, dentro da faixa estável do número de Froude.

Dai Prá (2011) introduziu uma nova metodologia para a determinação de pressões ocorrendo junto ao fundo de ressaltos hidráulicos a jusante de vertedouros. De acordo com o autor, as pressões devem ser analisadas como uma sobreposição de diferentes efeitos hidrodinâmicos atuando sobre a bacia: a curva de concordância, o escoamento supercrítico, a macroturbulência do ressalto e o grau de submergência do fenômeno.

Para ressaltos hidráulicos com números de Froude entre 1,7 e 4,5, entretanto, ainda não se atingiu um estado da arte. O fenômeno ocorre dentro dessa faixa principalmente em aproveitamentos de baixa queda e elevadas vazões específicas, como aqueles encontrados na região norte do país, direção para a qual há forte tendência de expansão do parque hidrelétrico brasileiro (EPE, 2018). Aqui, mencionam-se dois estudos contemplando este tipo de ressalto: Souza (2012) e Hampe (2018).

Em um modelo físico bidimensional do sistema extravasador da UHE Santo Antônio, na escala 1:50, Souza (2012) coletou dados de pressão em uma bacia de dissipação utilizando quatro transdutores de pressão, contemplando apenas a região inicial do ressalto. O autor realizou uma análise estatística dos dados registrados e comparou seus resultados com o de outros autores. Em 2016, foi realizada uma nova campanha de ensaios no mesmo modelo dos ensaios de Souza (2012), para as mesmas condições de ensaio. Os dados registrados foram utilizados por Hampe (2018). A autora também fez uso de dados coletados em um modelo da UHE São Manoel, na escala 1:60. Em nenhum dos modelos, entretanto, foi abrangida a extensão completa do ressalto, pois as tomadas de pressão foram instaladas apenas na região inicial da bacia. Hampe (2018) defendeu que as equações propostas por Teixeira (2003) para a estimativa de flutuação de pressão não são válidas para

ressaltos com baixo número de Froude, e introduziu um novo equacionamento para a faixa.

O presente trabalho tem como objetivo verificar a semelhança ou não do comportamento de ressaltos hidráulicos com baixo número de Froude, quando comparados com valores de pressão provenientes de ressaltos ditos estáveis. São apresentados dados coletados em um modelo físico de uma bacia de dissipação a jusante de um vertedouro. As amostras coletadas foram analisadas e comparadas com os dados de outros pesquisadores por meio de coeficientes estatísticos adimensionais.

MATERIAIS

A fim de se obter os dados necessários para este artigo, foi construída uma instalação experimental que representasse o sistema de extravasamento de uma barragem. O canal, de 40 cm de largura e 80 cm de altura (Figura 46), foi construído no Laboratório de Obras Hidráulicas (LOH) do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Três bombas centrífugas de 25cv, 50cv e 75cv podem ser utilizadas em paralelo para a alimentação do canal, podendo-se chegar a vazões de até 200 l/s, bombeados a partir de um reservatório inferior. A tubulação de alimentação possui um medidor de vazão eletromagnético que foi utilizado para medir esta grandeza.

A ogiva instalada no canal representa, na escala 1:50, o vertedouro presente na UHE Santo Antônio, em Porto Velho, Rondônia. A diferença do protótipo para o modelo é que este não possui pilares nem comportas, o que o constitui como um vertedouro de soleira livre.

A jusante do vertedouro, uma placa de acrílico de 185 cm de comprimento representa a bacia de dissipação (Tipo I, ou seja, sem acessórios), contando com 23 tomadas de pressão no eixo longitudinal do canal, espaçadas de 8 em 8 cm ao longo de sua extensão. Foram instalados 18 transdutores da marca Omega, que coletaram dados de pressão a uma taxa de 100 Hz durante 10 minutos para cada ensaio. Ao todo foram ensaiadas seis vazões, com o número de Froude na entrada do ressalto variando entre 1,9 e 4,6.

Uma comporta ao final do canal permite a imposição do nível de jusante e, conseqüentemente, o posicionamento do ressalto ao longo da bacia. Só foram ensaiados ressaltos livres. Os valores da altura conjugada rápida foram medidos por meio de pontas linimétricas dotadas de vernier. Utilizou-se a Equação 33, de Bélanger (1828), para o cálculo da altura conjugada lenta. A Tabela 10 contém a relação dos ensaios realizados, e seus respectivos valores das alturas conjugadas e do número de Froude.

Tabela 10 – Condições de ensaio

Q (m ³ /s)	q (m ² /s)	Fr ₁	y ₁ (m)	y ₂ (m)
0,013	0,033	4,6	0,017	0,106
0,025	0,064	3,8	0,030	0,150
0,035	0,088	3,4	0,041	0,178
0,050	0,126	3,0	0,057	0,211
0,100	0,252	2,3	0,108	0,296
0,150	0,377	1,9	0,162	0,350

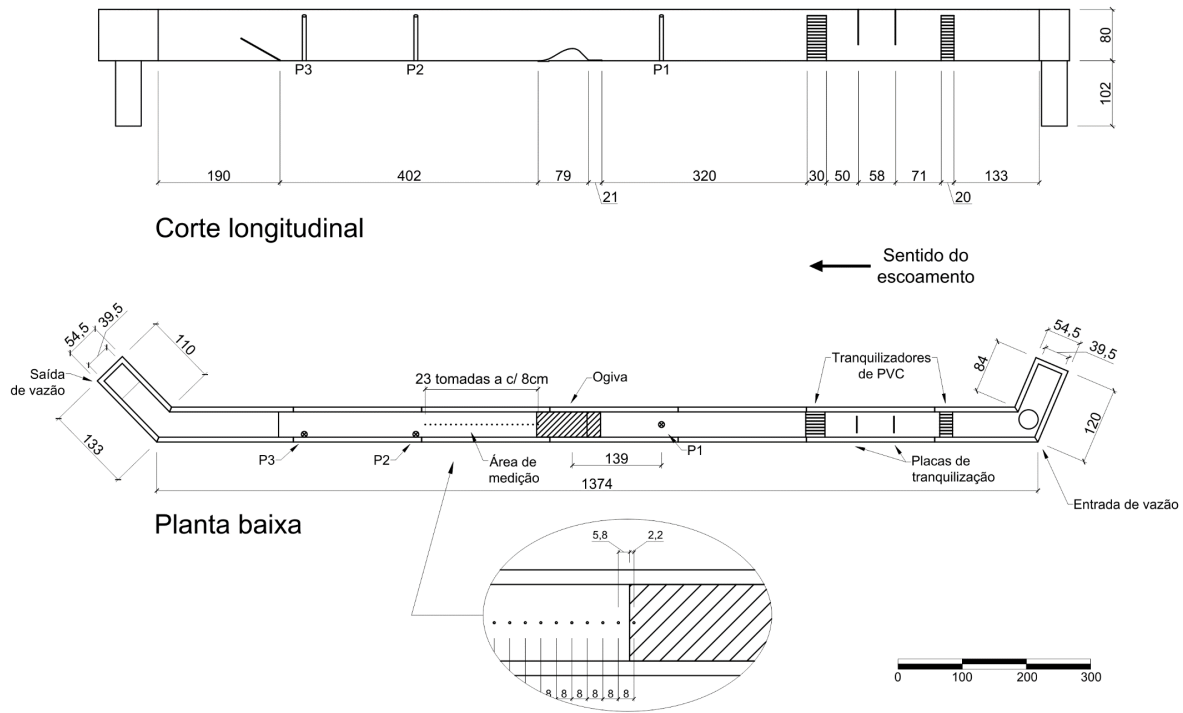


Figura 46 – Planta e corte do canal de ensaios (medidas em centímetros)

A fim de comparar os dados do presente artigo, foram utilizadas séries de dados gentilmente cedidas por outros autores. A Tabela 11 é um resumo das condições de ensaio de cada um desses autores. Com exceção dos ensaios realizados por Hampe (2018) no modelo da UHE São

Manoel (SM), todos os outros foram feitos com ressalto hidráulicos livres. Este modelo é o da UHE Santo Antônio (SA), utilizado tanto por Souza (2012) quanto por Hampe (2018) possuem pilares e comportas, sendo os outros de soleira livre.

Tabela 11 – Condições de ensaio dos autores cujos dados foram utilizados para comparação

Autor	Frequência de aquisição (Hz)	Tempo de amostragem (s)	Transdutores	Vazões ensaiadas	Fr1
Endres (1990)	100	100	11	5	4,3 a 8,6
Marques (1995)	50	200	22	6	4,2 a 9,3
Dai Prá (2011)	500	600	14	6	4,38 a 9,26
Souza (2012)	100	600	4	7	1,70 a 7,73
Hampe (2018) SA	100	600	4	7	1,73 a 7,56
Hampe (2018) SM	100	600	6	2	3,07 e 3,21

MÉTODOS

Para a comparação dos valores de pressão instantânea coletados em ressalto com baixos números de Froude com aqueles provenientes de ressalto estáveis, foram analisados os seguintes parâmetros estatísticos: valor médio, desvio padrão, assimetria, curtose, percentis extremos e o coeficiente estatístico de distribuição de probabilidade N. Tais métricas foram plotadas em gráficos em cujo eixo das abscissas se representa a posição longitudinal adimensionalizada conforme Marques *et al.* (1997), expressa por meio da Equação 34. Na Figura 47, são apresentadas algumas variáveis relevantes para a análise das características do ressalto.

Os valores de pressão média, flutuação de pressão (desvio padrão) e percentis extremos de pressão também foram adimensionalizados conforme sugerido por Marques *et al.* (1997), por meio das Equações 35, 36 e 37, respectivamente. O desvio padrão também foi adimensionalizado por meio da carga de velocidade (Equação 38), conforme Lopardo

(1986). Por fim, o coeficiente estatístico N foi calculado por meio da Equação 39, utilizada por Teixeira (2003). Quando aplicável, foi empregado o fator $\frac{y_2}{T_w}$ relativo ao grau de submersão do ressalto, sugerido por Marques *et al.* (1999), para que os dados coletados no modelo da UHE São Manoel pudessem ser comparados.

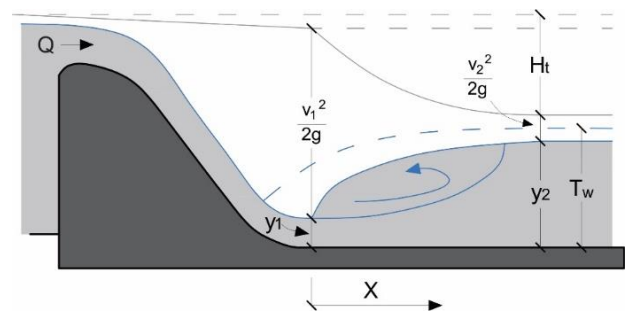


Figura 47 – Esquema de variáveis do ressalto hidráulico

Em que:

Q é a vazão (m^3/s);
 x é a posição longitudinal a partir do início da bacia de dissipação (m);
 y_1 e y_2 são as alturas conjugadas rápida e lenta (m);
 v_1 e v_2 são as velocidades de entrada e saída do ressalto (m/s)
 T_w é lâmina de água a jusante do ressalto (m);
 H_t é a energia dissipada ao longo do ressalto (m);

$$\Gamma = \frac{x}{y_2 - y_1} \quad (34)$$

$$\Psi = \frac{P_x - y_1 y_2}{y_2 - y_1 T_w} \quad (35)$$

$$\Omega = \frac{\sigma_x y_2 y_2}{H_t y_1 T_w} \quad (36)$$

$$\Psi_{x\%} = \frac{P_{x\%} - y_1 y_2}{y_2 - y_1 T_w} \quad (37)$$

$$C_p^i = \frac{\sigma_x}{v_1^2 / 2g} \quad (38)$$

$$N_{x\%} = \frac{P_{x\%} - P_x}{\sigma_x} \quad (39)$$

Em que:

P_x é o valor médio das pressões instantâneas (altura piezométrica equivalente) (m);

σ_x é o desvio padrão das pressões instantâneas (m);

$P_{x\%}$ é o percentil x da amostra de pressões (altura piezométrica equivalente) (m);

Γ é a posição longitudinal adimensionalizada;

Ψ é pressão média adimensionalizada;

Ω é a flutuação de pressão adimensionalizada;

$\Psi_{x\%}$ é o percentil x de pressão adimensionalizado;

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

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir, apresenta-se o comportamento dos dados de pressão coletados no presente artigo em comparação com dados de diferentes autores, com respeito a parâmetros estatísticos e/ou adimensionais, dentre eles: pressão média, desvio padrão, coeficientes de assimetria e curtose, percentis de pressão extrema e o coeficiente estatístico de distribuição de probabilidade N.

Pressão média

A partir da Figura 48, entende-se que a metodologia de adimensionalização proposta por Marques *et al.* (1997) é adequada para a análise de dados de pressão média em ressalto hidráulico com baixo número de Froude. Verifica-se que os valores de pressão entre as posições 0 e 0,5, mais elevados que os demais principalmente para $Fr_1 = 2,3$ e para $Fr_1 = 1,9$ ainda estão sob efeito da curva de concordância, conforme apontado por Dai Prá (2011). Percebe-se também uma certa influência do número de Froude sobre a distribuição dos dados, principalmente entre as posições longitudinais adimensionalizadas 0 e 4, uma vez que, para esta região, a pressão aumenta conforme o número de Froude diminui. Este efeito se suaviza na parte final do ressalto, em que todos os valores tendem à unidade. Para o $Fr_1 = 1,9$, as pressões médias no final do ressalto demonstram valores um pouco superiores às outras. Isso pode ser decorrente de uma pequena diferença entre o nível de jusante calculado pela Equação 33 e o efetivamente medido com a ponta limimétrica.

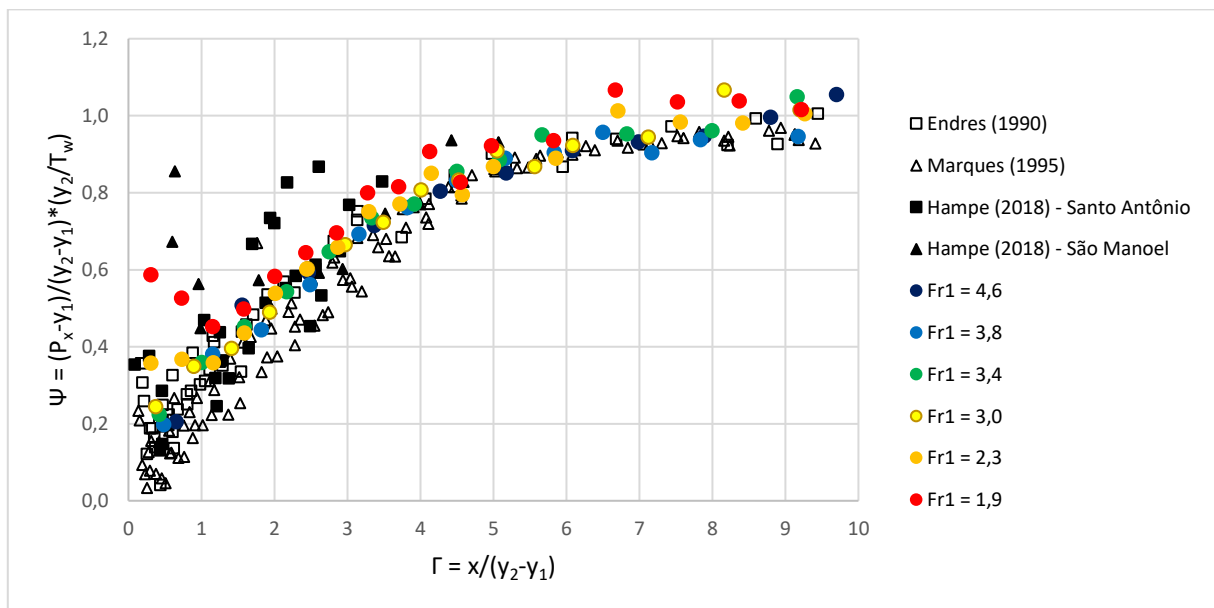


Figura 48 – Pressões médias adimensionalizadas: comparação entre este artigo e dados de outros autores

Os dados coletados no modelo em estudo seguem uma tendência muito semelhante àquelas encontradas por outros

autores, principalmente no que diz respeito aos valores de Endres (1990). Verifica-se que, especialmente na primeira

metade do ressalto (até a posição 4), os valores obtidos são superiores aos de Marques (1995) e inferiores a alguns dos dados cedidos por Hampe (2018), coletados nos modelos físicos da UHE Santo Antônio e da UHE São Manoel. Os valores mais elevados do modelo da UHE Santo Antônio de Hampe (2018), entre as posições 1,5 e 3 são provenientes de uma mesma tomada de pressão, a qual acredita-se que estava com algum defeito em seu funcionamento. Quanto aos valores de pressão média da UHE São Manoel, mais elevados do que a tendência dos outros dados entre as posições 0 e 1, sugere-se que este efeito seja causado pelo grau de submergência imposto aos ressalto ensaiados neste modelo.

Com vistas a aproximar as condições de ensaio deste artigo das condições do modelo da UHE Santo Antônio de Hampe (2018), foi instalada uma comporta plana fixa sobre o vertedouro, conforme a Figura 49. A abertura G_0 imposta foi de 12 centímetros. A vazão ensaiada, de $0,092 \text{ m}^3/\text{s}$, foi escolhida de forma que se mantivesse uma lâmina de jusante igual à de Hampe (2018), de 0,61 metros. Um resumo das características deste ensaio é apresentado na Tabela 12.

Na Figura 50, são apresentados os valores de pressão média adimensionalizada amostrados nos ensaios com comporta ($Fr_1 = 3,6$), bem como dados de um ensaio sem comporta deste artigo ($Fr_1 = 3,4$) e dados de Hampe (2018) para números de Froude próximos desta faixa. Constatou-se que

a presença da comporta não exerce influência nos valores de pressão média, uma vez que todos os pontos apresentam comportamento similar, exceto pelos pontos da terceira tomada de Hampe (2018), para a qual já se sugeriu anteriormente a possível existência de algum defeito.



Figura 49 – Comporta plana instalada sobre a ogiva

Tabela 12 – Características do ensaio com comportas

Vazão total (m^3/s)	Vazão específica (m^2/s)	y_1 (m)	v_1 (m/s)	Fr_1	Re_1	We_1
0,092	0,232	0,075	3,073	3,6	2,3E+05	9900

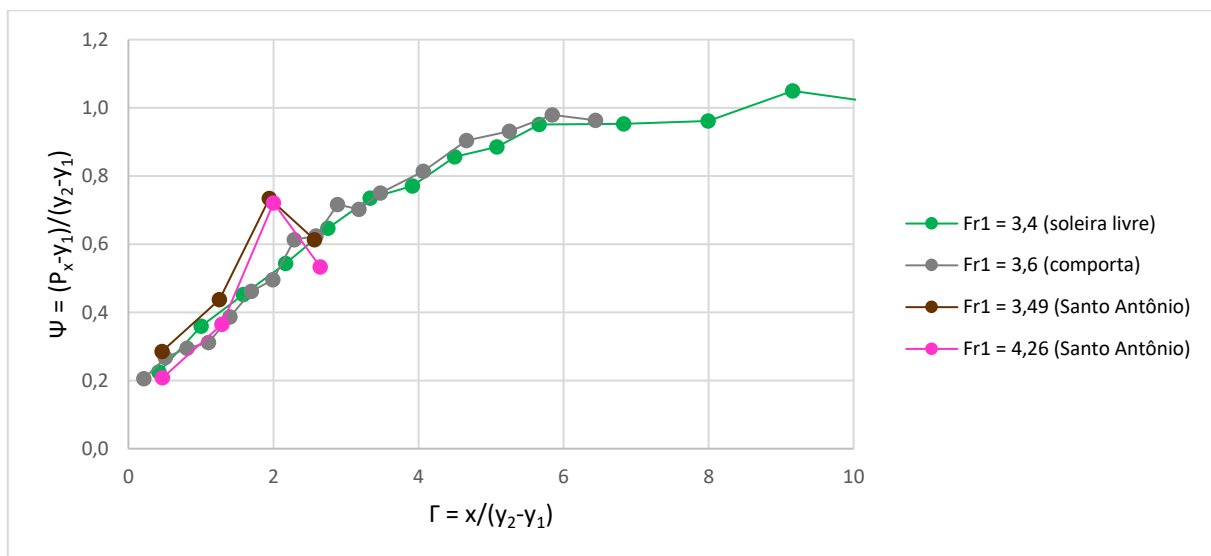


Figura 50 – Pressões médias adimensionalizadas: comparação entre este artigo para soleira livre e com comporta e dados de Hampe (2018)

Desvio padrão

Quanto ao desvio padrão, analisado por meio do coeficiente de flutuação de pressão proposto por Marques *et al.* (1997), a Figura 51 mostra que os dados em questão não seguem o mesmo comportamento verificado por Endres (1990) e Marques (1995). Percebe-se que a flutuação de pressão no ressalto com baixo número de Froude é diferente da flutuação de pressão no ressalto estável. As séries de dados que apresentaram um comportamento mais similar ao dos autores em questão foram as correspondentes às duas

menores vazões (números de Froude iguais a 4,6 e 3,8). Para os dados destes ensaios, é possível verificar uma ascensão dos valores entre as posições longitudinais adimensionalizadas 1 e 3, seguida por uma atenuação do valor do desvio padrão adimensionalizado, ainda que não da mesma ordem que os dados dos outros autores. Com relação aos dados cedidos por Hampe (2018), entretanto, os valores de flutuação de pressão apresentam semelhança. Entre as posições 1 e 3, percebe-se concordância dos pontos com os dados coletados no modelo da UHE Santo Antônio.

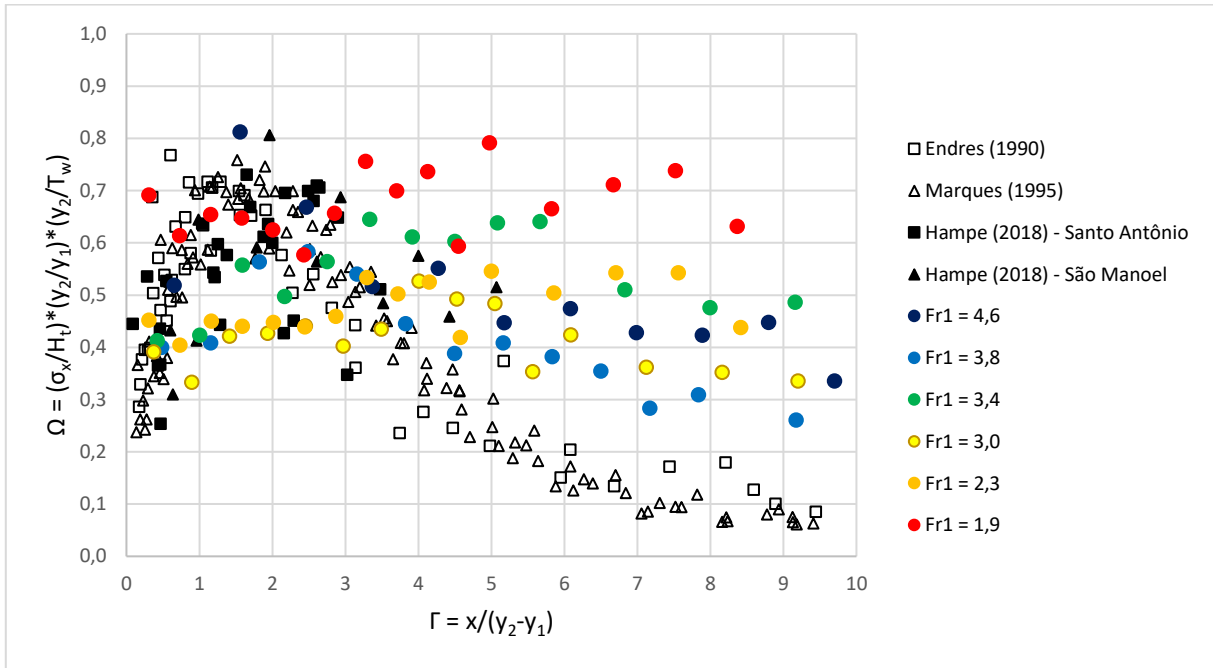


Figura 51 – Flutuações de pressão adimensionalizadas: comparação entre este artigo e dados de outros autores

O mesmo acontece para os dados coletados no modelo da UHE São Manoel entre as posições longitudinais adimensionalizadas 3 e 5.

Acredita-se que o colchão de água presente sob o ressalto hidráulico amortença as flutuações de pressão causadas no fundo da bacia, de forma que o desvio padrão dos valores de pressão seja relativamente constante ao longo de toda a extensão do ressalto e não se desenvolva em dois ramos, um ascendente e outro descendente. O fato de a espessura do colchão de água aumentar conforme diminui o número de Froude corrobora para esta hipótese. A relação entre estas duas grandezas está apresentada na Figura 52. Não se verificou a formação de colchão de água para as duas menores vazões.

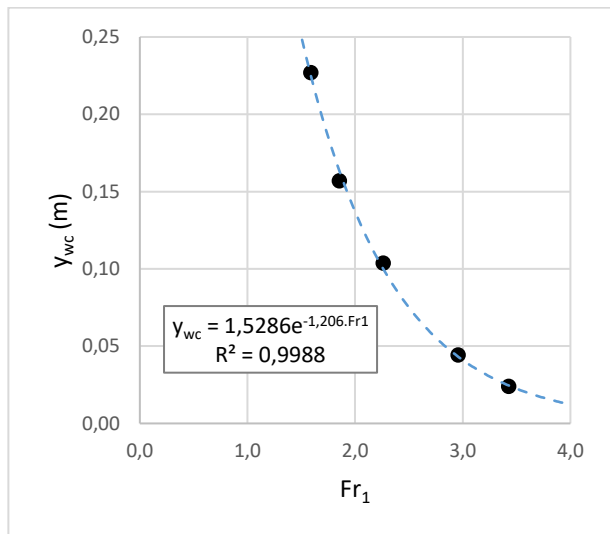


Figura 52 – Altura do colchão de água para os números de Froude ensaiados

O ponto indicando a maior altura de colchão refere-se a um ensaio feito a 200 l/s e número de Froude igual a 1,6, conduzido para que se pudesse construir este gráfico com

maior número de pontos. Os dados de pressão coletados neste ensaio não foram incluídos nas outras análises, porque, segundo Peterka (1984), as ondulações que ocorrem entre o escoamento subcrítico e o supercrítico ainda não podem ser consideradas como um ressalto propriamente dito, para números de Froude abaixo de 1,7.

Somado ao efeito do colchão, também exerce influência na flutuação de pressão o grau de desenvolvimento do escoamento na entrada do ressalto. Vertedouros de baixas quedas não permitem que o escoamento atinja um desenvolvimento completo. Conforme apontado por Resch e Leutheusser (1971) e Abdul Khader e Elango (1974), quando o escoamento incidente no ressalto é completamente desenvolvido, podem ocorrer níveis de turbulência de até quatro vezes maiores, quando comparados a escoamentos em que o desenvolvimento da camada limite é insignificante.

Além disso, há o fato de que, quanto maior o número de Froude, menor a dissipação de energia (H_t) ao longo do ressalto, conforme apontado por Peterka (1984). Visto que a energia dissipada H_t está no denominador do coeficiente adimensional Ω , é possível compreender o fato de que, quanto menor o número de Froude, maior o valor da flutuação de pressão adimensional Ω .

Peterka (1984) definiu que, para ressaltos a jusante de estruturas de baixa queda, cada oscilação do jato de entrada produz largas ondas de período irregular que podem se propagar por quilômetros, danificando encostas de terra e enrocamento. Os elevados valores de flutuação de pressão até a região final do ressalto (Figura 51) podem estar expressando este fenômeno.

Mees (2008) defendeu que a coleta das flutuações de pressão é grandemente influenciada pelas condições dos ensaios. Alguns dos fatores que podem influenciar os resultados são: o número de Reynolds do escoamento, a precisão do transdutor, o método de instalação do transdutor, o comprimento da mangueira, o diâmetro da tomada de pressão, a largura do canal, a rugosidade do modelo, entre outras. Como uma tentativa de aproximar as condições de

ensaio do presente trabalho das condições presentes no modelo da UHE Santo Antônio estudado por Hampe (2018), foi instalada a comporta mencionada no item anterior. Apesar de os dois modelos possuírem perfis vertentes descritos por uma mesma equação, estarem na mesma escala (1:50) e contarem com comportas, ainda se observam diferenças entre eles, como por exemplo no formato da comporta (em arco para Hampe (2018) e plana para o presente artigo) e na presença ou ausência de pilares. A Figura 53 mostra o comportamento das flutuações de pressão para vertedouro de soleira livre ($Fr_1 = 3,4$) e para vertedouro controlado por comporta ($Fr_1 = 3,6$), em comparação com dois escoamentos de números de Froude semelhantes analisados por Hampe (2018). Apesar do

agrupamento dos dados em $\Gamma < 2$, verifica-se que os dados de flutuação de pressão para o caso com comporta apresentam um comportamento mais parecido com os dados da UHE Santo Antônio de Hampe (2018), que também tem comportas. Isso parece indicar que a presença de comportas eleva as flutuações na região inicial do ressalto, possivelmente por causa da maior energia acumulada a montante. Além disso, o ensaio com comporta mostra que o desenvolvimento das flutuações ocorre ao longo de um comprimento menor do que no ensaio com soleira livre. O mesmo não aconteceu na análise das pressões médias, para a qual ambos ensaios se comportam da mesma forma, como pode ser visto na Figura 50.

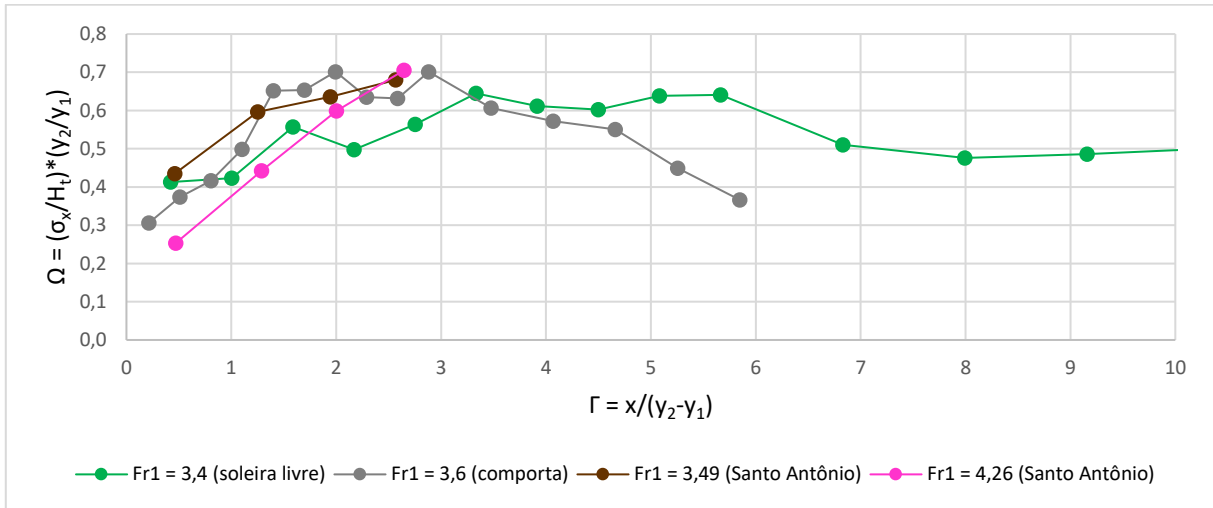


Figura 53 – Flutuações de pressão adimensionalizadas: comparação entre este artigo para soleira livre e com comporta e dados de Hampe (2018)

Além da adimensionalização proposta por Marques *et al.* (1997), os valores de flutuação de pressão também foram adimensionalizados conforme a Equação 38. Os resultados estão apresentados na Figura 54. Assim como na Figura 51, na análise do C'_p também se observou que os pontos de ressalto com baixo número de Froude não se distribuem em dois trechos, um ascendente e outro descendente. A exceção é o escoamento $Fr_1 = 4,6$ e, de forma mais sutil, para $Fr_1 = 3,8$. Até a posição $\Gamma = 3,5$, é possível afirmar que os valores de C'_p estão de acordo com Hampe (2018). Para

o $Fr_1 = 3,4$, a distribuição discrepante dos pontos entre as posições 4 e 6 pode ser proveniente de falhas nas medições, uma vez que os ensaios desta vazão não foram feitos na mesma campanha das outras, mas em outra época, depois que os transdutores foram removidos e então reinstalados no canal de ensaios. Os valores de C'_p na região final do ressalto, mais elevados para baixos números de Froude, concordam com Peterka (1984), que afirmou que as oscilações causadas por ressalto de baixa queda se propagam por longas distâncias.

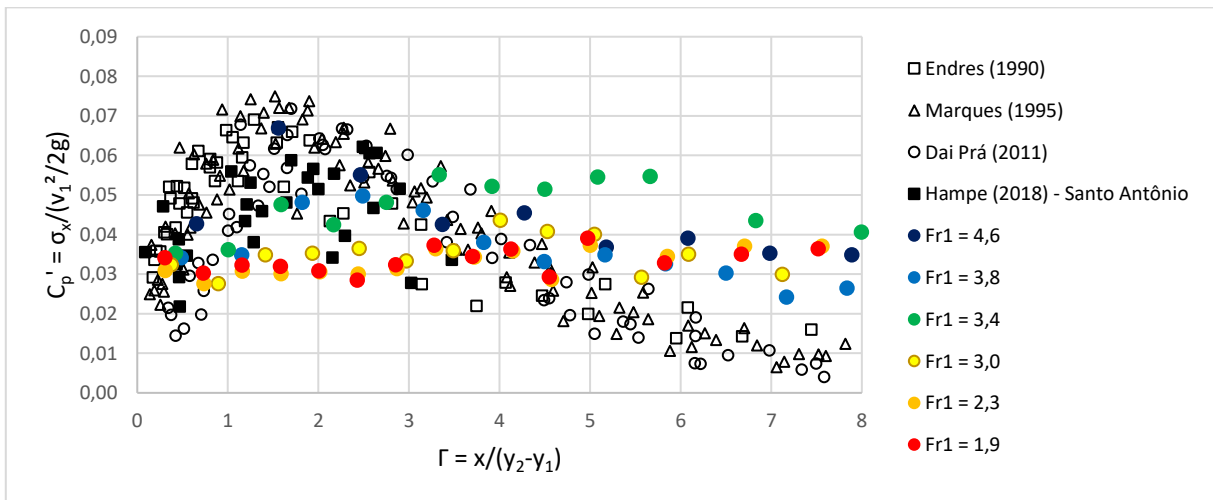


Figura 54 – Coeficiente de flutuação de pressão: comparação entre este artigo e dados de outros autores

Coefficiente de assimetria

A Figura 55 apresenta a assimetria das séries de pressão instantânea coletadas neste artigo, em comparação com os dados cedidos por Endres (1990), Marques (1995), Souza (2012) e Hampe (2018).

Os valores de assimetria para as séries correspondentes aos números de Froude de 4,6 e 3,8 apresentam uma tendência muito similar aos dados cedidos pelos outros autores. O coeficiente de assimetria na região inicial do ressalto é elevado por dois motivos, conforme explicado por Marques *et al.* (1997): o efeito da curva de concordância e o desenvolvimento do rolo, que fazem com que, nesta região, ocorram valores de pressão significativamente maiores do que a média, deslocando a função de densidade de probabilidades para a direita. O efeito da curva de concordância atua somente até a posição 1, de forma que, conforme o rolo se desenvolve, o coeficiente de assimetria diminui e o escoamento se descola do fundo, originando valores de coeficiente de assimetria negativos, como pode

ser visto entre as posições 5 e 7 de forma geral, porém de forma mais expressiva nos dados cedidos por Endres (1990) e Marques (1995). A partir da posição 8, com o término do ressalto, a assimetria se estabiliza em torno de 0.

Para os menores números de Froude, entretanto, a tendência dos dados coletados se assemelha a alguns dos pontos de Souza (2012) e Hampe (2018), tanto para o modelo da UHE Santo Antônio quanto para o modelo da UHE São Manoel. Verifica-se que entre as posições 0 e 3, os valores de assimetria ficam muito próximos de 0. Souza (2012) atribuiu este efeito ao pequeno desenvolvimento do ressalto nestas posições e à baixa queda do vertedouro. Aqui, sugere-se, mais uma vez, que o colchão de água sob o ressalto, mais espesso quanto maior for a vazão, amortecia os efeitos causados pelo rolo no fundo da bacia de dissipação. Entre as posições 4 e 7, os dados coletados seguem próximos da assimetria nula, diferentemente dos pontos de Marques (1995) e Hampe (2018) para a UHE São Manoel.

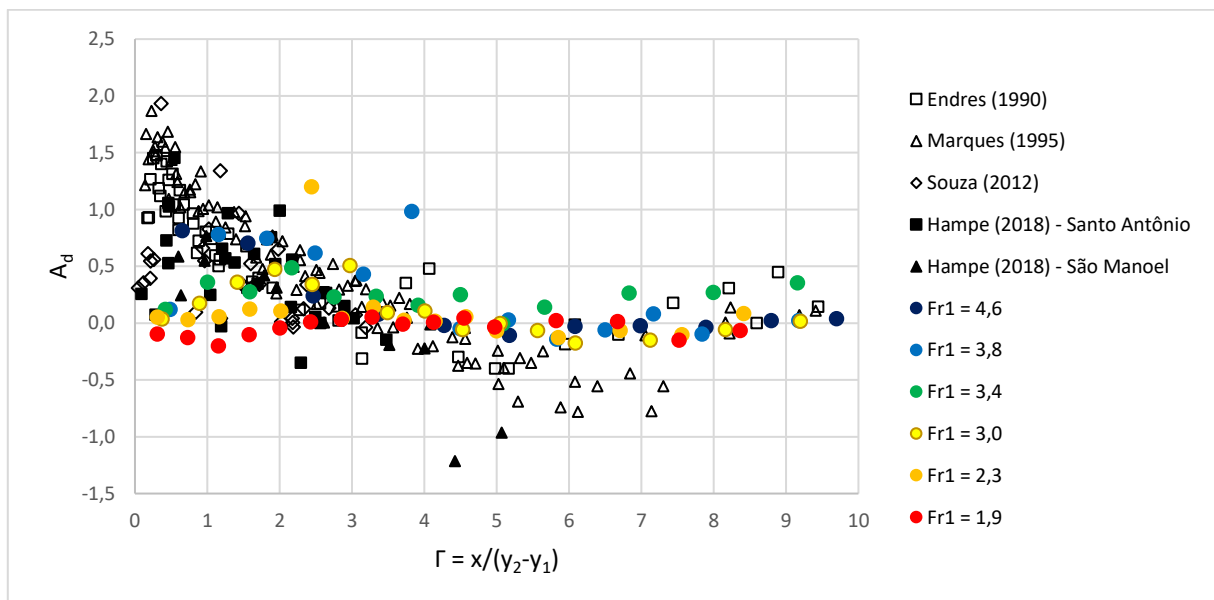


Figura 55 – Coeficiente de assimetria: comparação entre este artigo e dados de outros autores

Coefficiente de curtose

O coeficiente de curtose expressa de forma quantitativa a concentração dos dados em torno da média. Coeficientes menores que três indicam que a série de dados está mais concentrada em torno da média do que uma distribuição normal. Já valores maiores que três indicam que os dados estão dispersos, mais afastados da média em relação à distribuição normal.

Na Figura 56, apresenta-se a distribuição longitudinal dos valores de curtose para as séries de dados obtidas neste artigo, em comparação com os dados cedidos por Endres (1990), Marques (1995), Souza (2012) e Hampe (2018).

Percebe-se que os dados deste trabalho estão de acordo com alguns dos pontos de Souza (2012) e Hampe (2018), apresentando valores de curtose entre 3 e 7 para $\Gamma < 3$. Nesta região, os maiores valores de curtose ocorrem para os maiores números de Froude. Muitos dos pontos de Endres (1990) e Marques (1995) apresentam valores de curtose superiores a todos os outros dados, evidenciando que, para vertedouros de baixa queda, a dispersão dos valores instantâneos de pressão é menor do que para os outros vertedouros.

Entre as posições 4 e 6, verifica-se um aumento na curtose, tanto para os dados deste artigo quanto para os demais autores, indicando que nesta região também há um acréscimo na variabilidade dos valores de pressão. Marques *et al.* (1997) justificaram que é nesta região que o escoamento descola do fundo e encontra a altura final do escoamento. Na região final do ressalto, os dados dos demais autores tendem à ordenada três. Alguns coeficientes de curtose do presente estudo, entretanto, se situam na faixa entre 5 e 7, indicando que as linhas do escoamento a jusante ainda não se tornaram paralelas.

Percentis de pressão extrema

Foram analisados alguns percentis de pressão extrema, também chamados de pressões com certa probabilidade de não-excedência. As probabilidades analisadas foram: 0,1%, 1%, 99% e 99,9%. Assim como nas análises estatísticas anteriores, neste item também são apresentados os valores encontrados neste trabalho em comparação com os dados cedidos pelos demais autores.

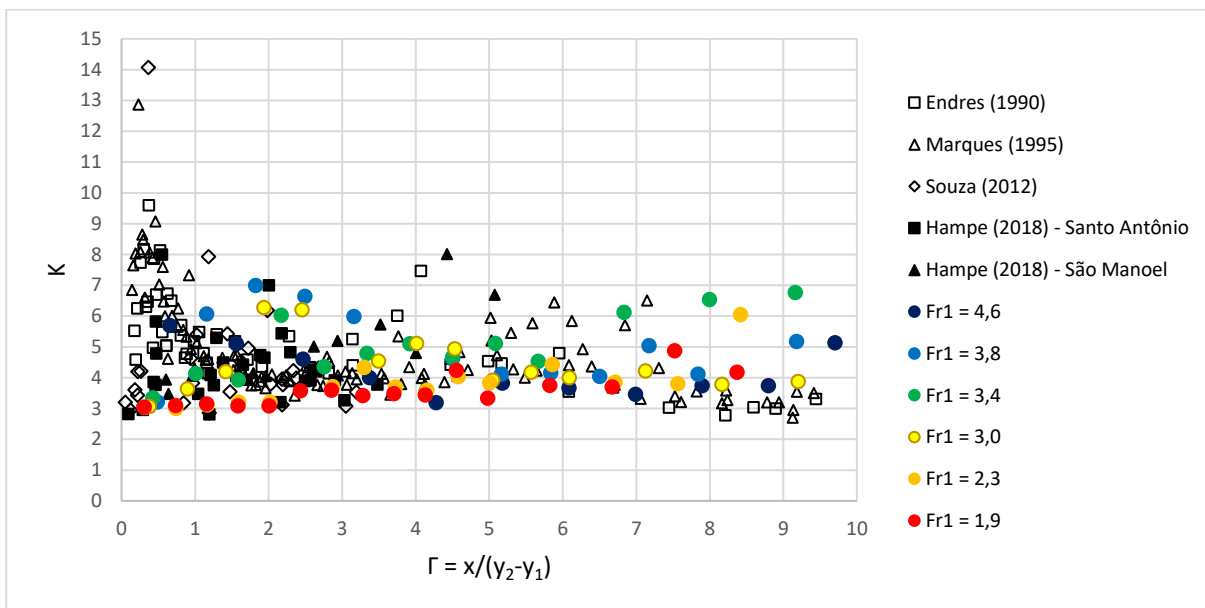


Figura 56 – Coeficiente de curtose: comparação entre este artigo e dados de outros autores

A Figura 57 mostra que as pressões com probabilidade de não-excedência de 0,1% deste artigo não atingiram valores tão baixos quanto os de Endres (1990) e Marques (1995). Enquanto para estes autores muitos pontos atingiram valores negativos, principalmente na região inicial do ressalto, para este artigo, apenas um ponto resultou nesta faixa, para o número de Froude igual a 4,6.

Além disso, pode-se perceber que, conforme o número de Froude diminui, aumentam os valores de pressão mínima. O mesmo comportamento ocorre para as pressões com probabilidade de não-excedência de 1%, mostradas na Figura 58. Sugere-se que este efeito seja devido ao colchão de água presente sob o ressalto hidráulico, que aumenta de

espessura conforme aumenta a vazão de ensaio. O colchão atua amortecendo os valores extremos de pressão que ocorrem no fundo da bacia.

Na região final do ressalto, entretanto, os dados do presente estudo seguem a mesma tendência dos dados dos outros pesquisadores. Quanto aos dados cedidos por Hampe (2018), percebe-se uma boa concordância em relação àqueles coletados no modelo da UHE Santo Antônio. Já para a UHE São Manoel, ocorre uma dispersão em relação à nuvem de pontos entre as posições 0 e 1. Isso pode decorrer do grau de submergência imposto aos ressalto nos ensaios deste modelo.

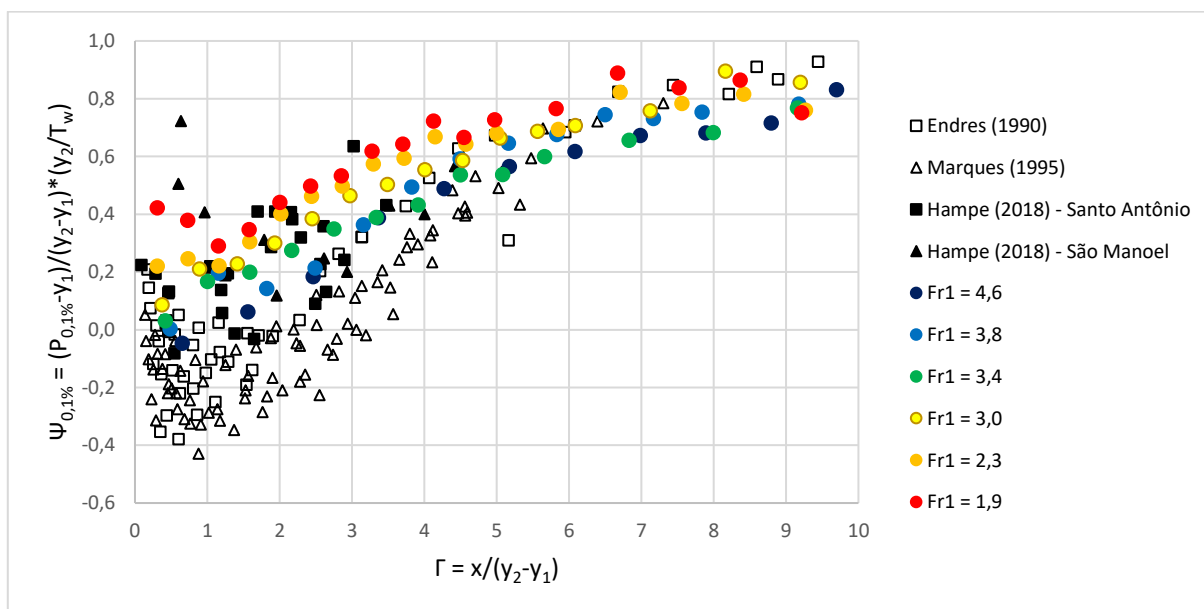


Figura 57 – Pressões com probabilidade de não-excedência de 0,1%: valores encontrados no presente artigo em comparação com demais autores

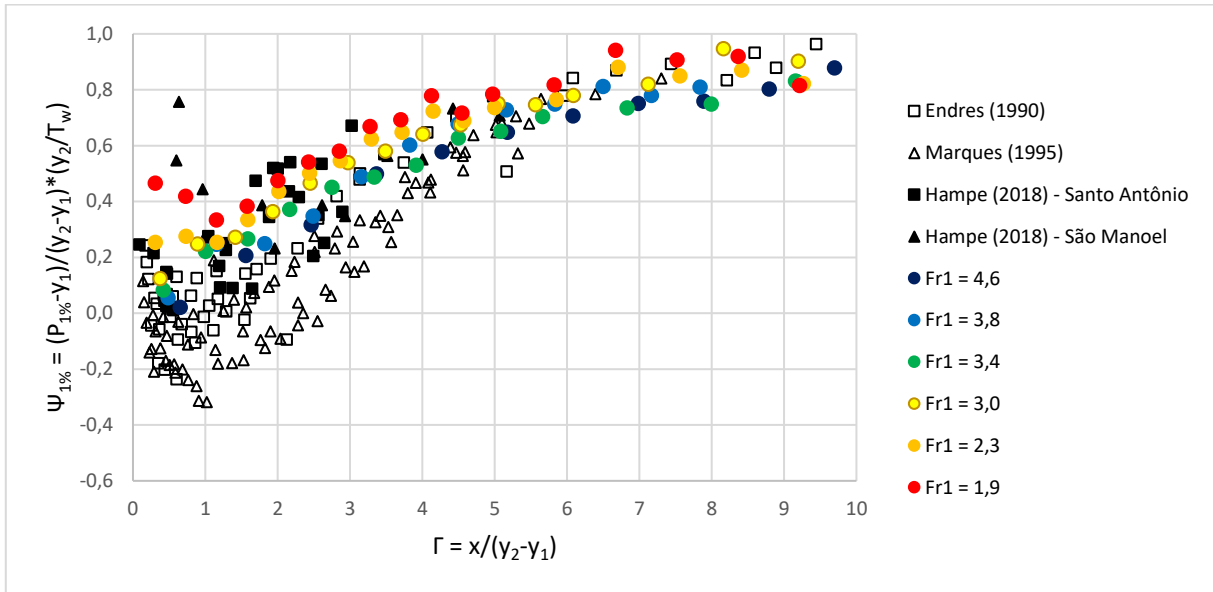


Figura 58 – Pressões com probabilidade de não-excedência de 1%: valores encontrados no presente artigo em comparação com demais autores

As pressões extremas máximas, para as probabilidades de não-excedência de 99% e 99,9% são mostradas na Figura 59 e na Figura 60, respectivamente. Até a posição longitudinal adimensionalizada 4, os valores encontrados no presente estudo seguem a mesma tendência encontrada por Hampe (2018) no modelo da UHE São Manoel, porém são inferiores aos dados obtidos por Endres (1990) e Marques (1995). Mais uma vez, justifica-se que este efeito seja decorrente do amortecimento causado pelo colchão de água sob o ressalto hidráulico. Existe também a possibilidade de haver influência da geometria do modelo, conforme proposto por Hampe (2018). Na região final do ressalto, a partir da posição 5, os valores obtidos são superiores àqueles encontrados pelos demais autores.

para os dados aqui avaliados. Tais valores foram comparados com aqueles obtidos por Dai Prá (2011) e os analisados por Hampe (2018), nos modelos da UHE Santo Antônio e da UHE São Manoel. Os gráficos referentes a esta análise são apresentados da Figura 61 à Figura 64. Os coeficientes N para o percentil 0,1% apresentaram comportamentos semelhantes entre si para os diferentes números de Froude ensaiados. Quando comparados com os dados de outros pesquisadores, entretanto, foram observadas algumas diferenças. Até aproximadamente a posição longitudinal adimensionalizada 2, os valores encontrados por Dai Prá (2011) e Hampe (2018) demonstraram ser superiores aos da presente pesquisa. Percebe-se também, nesta região, uma influência do número de Froude para os dados aqui coletados: quando este diminui, também diminuem os valores de N.

Coefficiente estatístico de distribuição de probabilidades (N)

Por meio da Equação 39, foram obtidos os valores dos coeficientes estatísticos de distribuição de probabilidade

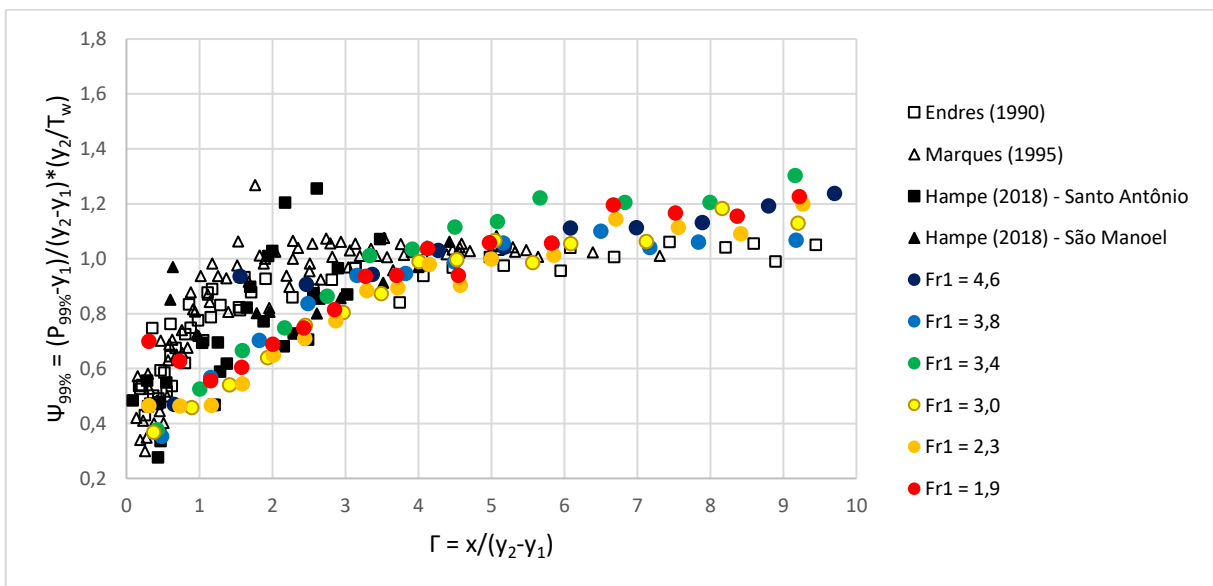


Figura 59 – Pressões com probabilidade de não-excedência de 99%: valores encontrados no presente artigo em comparação com demais autores

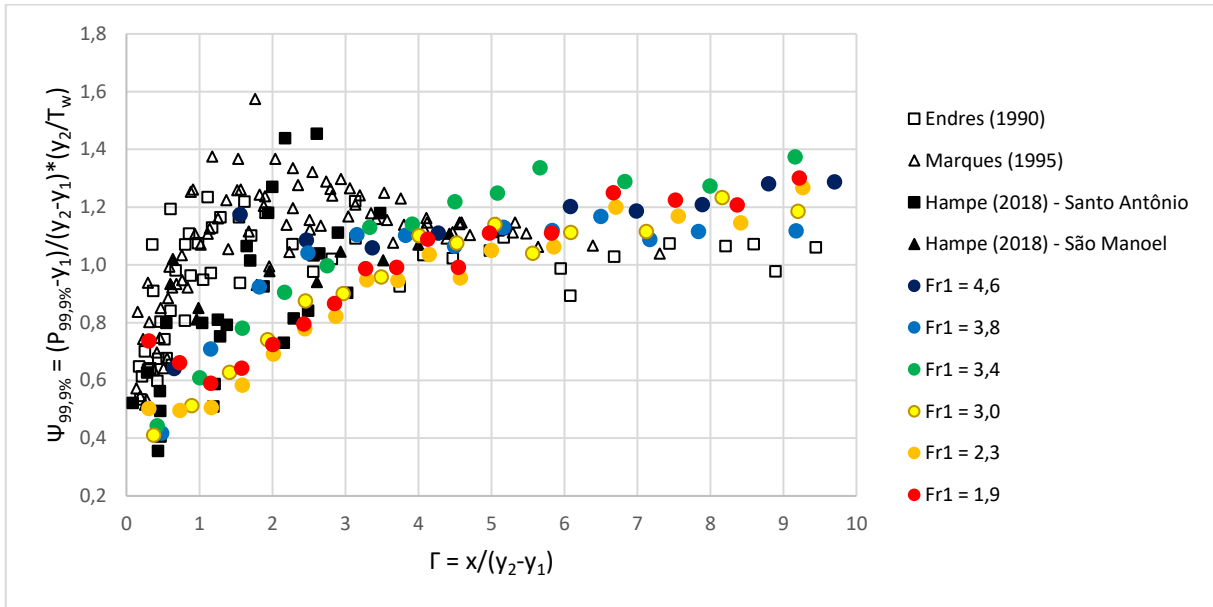


Figura 60 – Pressões com probabilidade de não-excedência de 99,9%: valores encontrados no presente artigo em comparação com demais autores

Entre as posições 3 e 8, grande parte dos pontos de Dai Prá (2011) e Hampe (2018) demonstraram ser inferiores aos dados coletados na presente pesquisa. Aqueles chegaram a valores próximos a -6,0, enquanto estes ficaram em torno de -3,7. As mesmas observações podem ser feitas para os coeficientes N do percentil 1%, apresentados na Figura 62, com a ressalva de que as diferenças observadas não são tão expressivas, ou seja, os valores são mais próximos uns dos outros.

Para as pressões extremas máximas (Figura 63 e Figura 64), a influência do número de Froude na região inicial do ressalto hidráulico se repete: para maiores números de

Froude, maiores os coeficientes N. De forma similar, também os dados de Dai Prá (2011) e Hampe (2018) demonstram valores superiores aos pontos do presente estudo entre as posições 0 e 2.

Para os coeficientes N do percentil 99,9%, há concordância entre os dados do modelo estudado e os dados dos outros pesquisadores, porém de forma difusa. Os valores obtidos para os números de Froude iguais a 3,8 e 4,6 se mostram semelhantes aos dados coletados por Dai Prá (2011), enquanto os menores números de Froude se assemelham mais aos dados coletados por Hampe (2018).

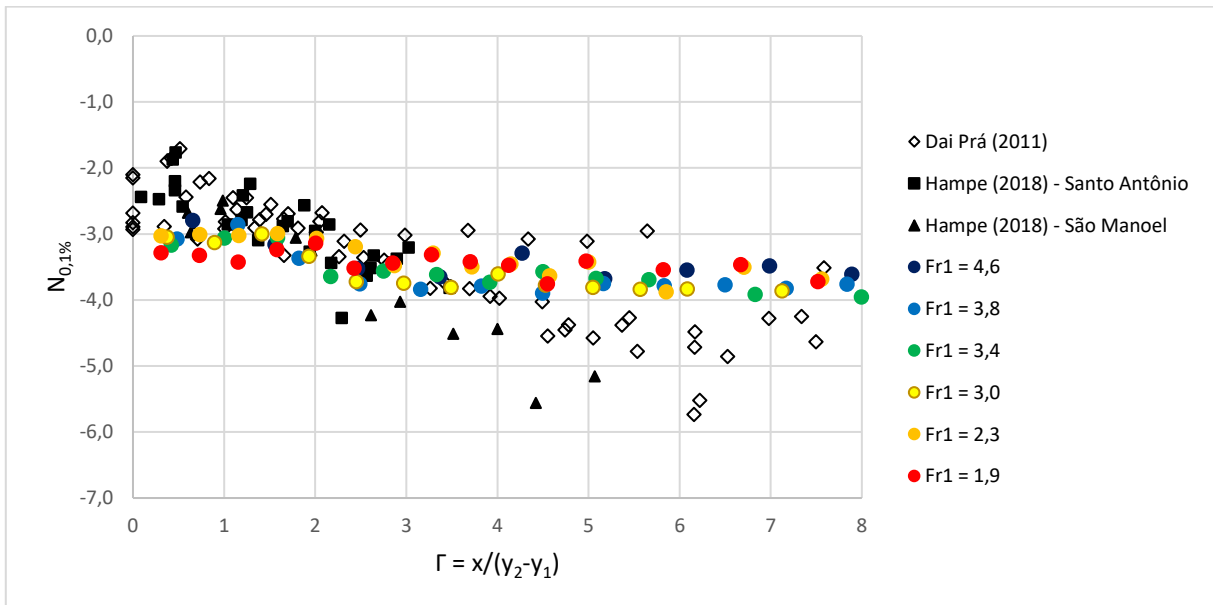


Figura 61 – Coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades N: dados do presente artigo em comparação com outros autores para o percentil 0,1%

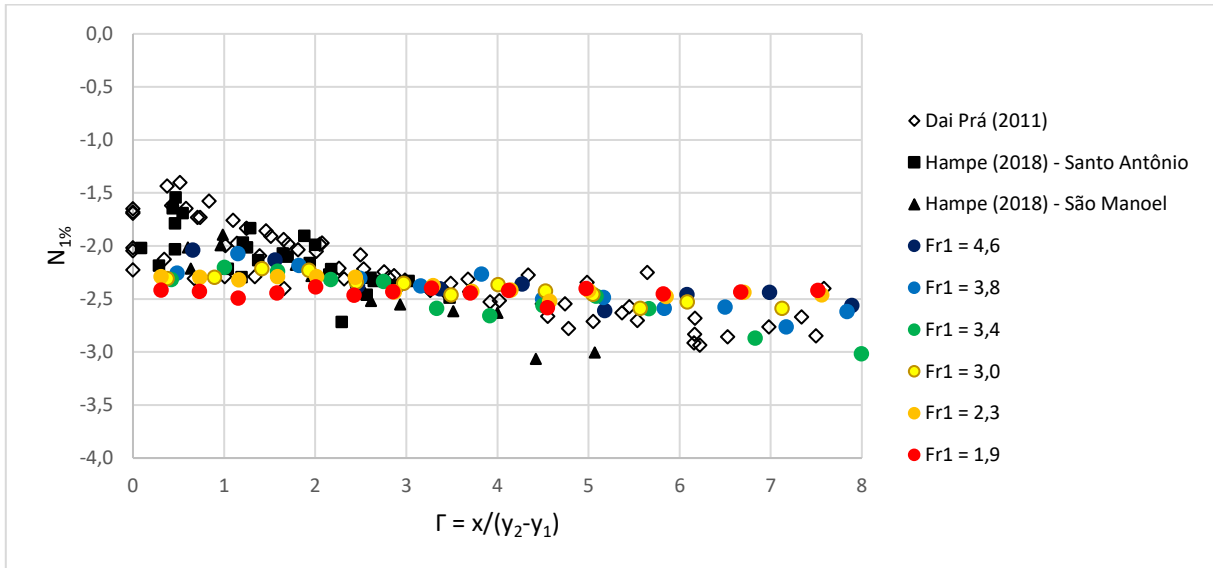


Figura 62 – Coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades N: dados do presente artigo em comparação com outros autores para o percentil 1%

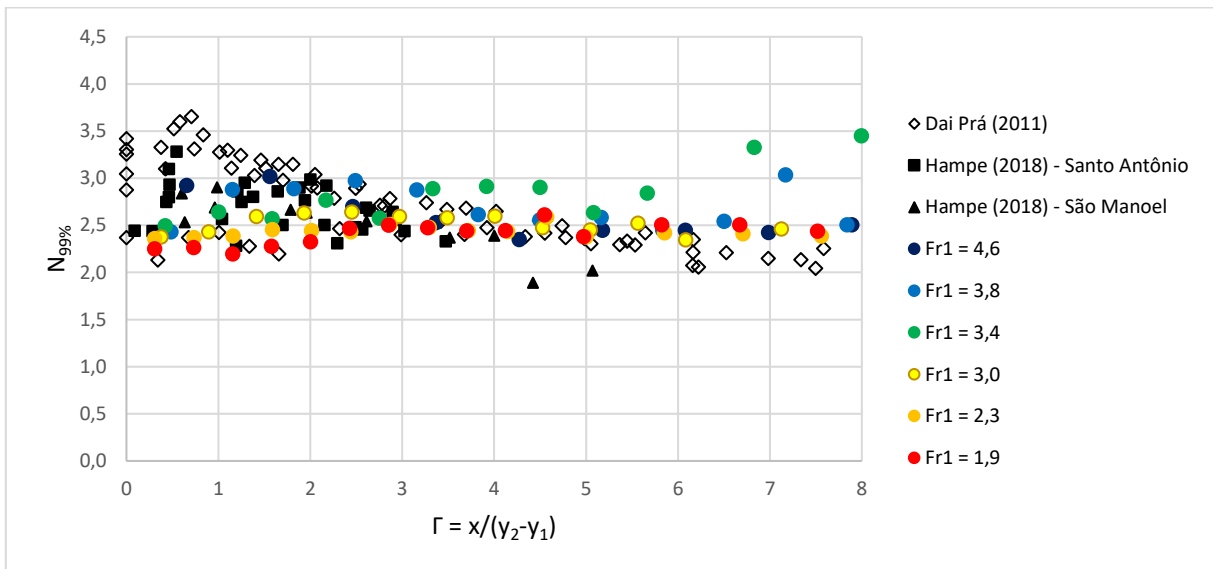


Figura 63 – Coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades N: dados do presente artigo em comparação com outros autores para o percentil 99%

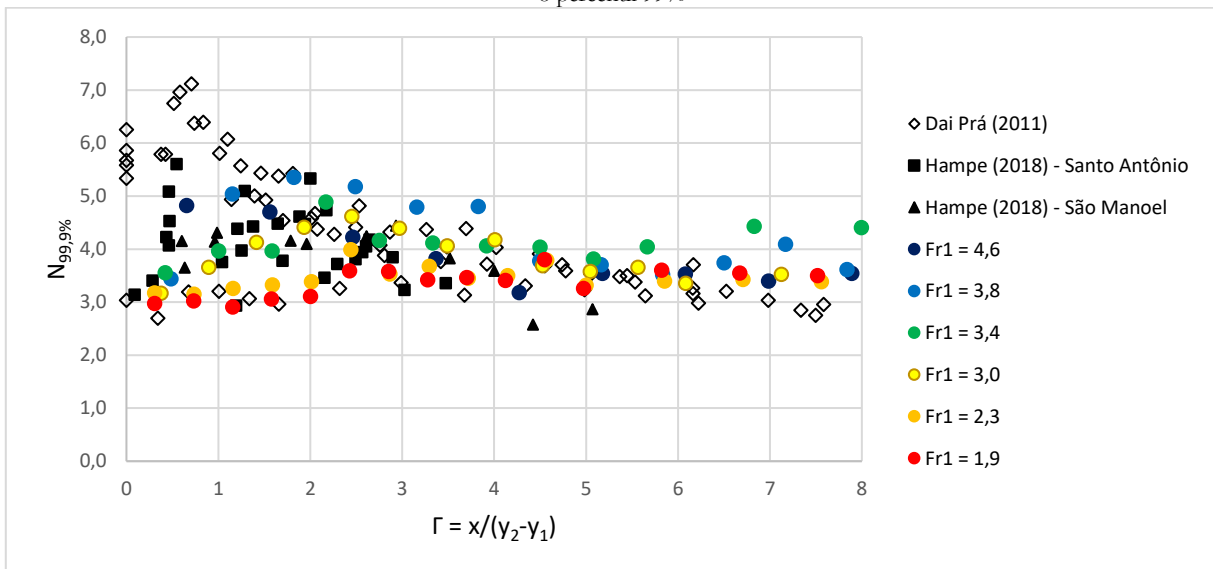


Figura 64 – Coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades N: dados do presente artigo em comparação com outros autores para o percentil 99,9%

CONCLUSÃO

Neste artigo, buscou-se elucidar as diferenças entre ressaltos hidráulicos estáveis e com baixo número de Froude. Os dados deste estudo, amostrados em um modelo físico de uma bacia de dissipação, foram contrastados com dados de outros autores também provenientes de estudos em modelos físicos, para diferentes faixas do número de Froude. A análise foi conduzida utilizando parâmetros estatísticos adimensionais.

Quanto à pressão média, verificou-se que o ressalto hidráulico com baixo número de Froude apresenta um comportamento muito semelhante em relação ao ressalto estável, principalmente no que diz respeito à região final do desenvolvimento do fenômeno. Na região intermediária, verificou-se uma influência do número de Froude. Conforme este diminui, aumentam os valores de pressão média. Já para o início da bacia, constatou-se que o ressalto com baixo número de Froude sofre grande influência da curva de concordância. Sugere-se que futuros estudos investiguem esta influência de forma generalizada, abrangendo diferentes raios da curva e diferentes graus de submersão do ressalto.

A flutuação de pressão de ressaltos hidráulicos com baixo número de Froude não se comporta da mesma maneira que em ressaltos estáveis. As diferenças foram justificadas por três principais motivos. Em primeiro lugar, o colchão de água sob o ressalto causa um efeito amortecedor no desvio padrão do fenômeno, de forma que os valores de pressão instantânea não oscilam tanto em torno da média como o fazem as pressões de ressaltos estáveis. Por causa disso, os valores de flutuação de pressão não apresentam um ramo ascendente e depois descendente tão expressivo quanto os de ressaltos estáveis. O grau de desenvolvimento do escoamento, menor em vertedouros de baixa queda, também exerce influência significativa neste parâmetro. Além disso, há o fato de que a energia dissipada H_t ao longo de um ressalto com baixo número de Froude é menor do que aquela de um ressalto estável. Como esta grandeza está no denominador da flutuação de pressão adimensionalizada, valores menores de H_t levam a valores maiores de flutuação de pressão adimensionalizada.

O coeficiente de assimetria para os maiores números de Froude se mostrou semelhante aos pontos de Endres (1990) e Marques (1995). Já para os menores números de Froude, os pontos aderiram melhor aos de Souza (2012) e Hampe (2018). Atribuiu-se isso à baixa queda do vertedouro, conforme Souza (2012), e ao colchão de água presente sob o ressalto. O mesmo comportamento foi verificado na análise do coeficiente de curtose.

A análise dos percentis de pressão extrema (probabilidades 0,1%, 1%, 99% e 99,9%) revelou que ressaltos hidráulicos com baixo número de Froude ocasionam valores de pressão não tão extremos quanto ressaltos estáveis, possivelmente devido ao colchão de água que ocorre sob o fenômeno e também devido à baixa queda do vertedouro. Quanto às pressões mínimas, diferentemente de Endres (1990) e Marques (1995), não foram verificadas pressões extremas negativas, com exceção de uma ocorrência.

Os coeficientes estatísticos N do presente estudo demonstraram ser inferiores aos dados de outros pesquisadores na região inicial do ressalto. Na maior parte do desenvolvimento do fenômeno, entretanto, os conjuntos

de pontos apresentaram semelhanças, principalmente aos dados de Hampe (2018).

REFERÊNCIAS

- ABDUL KHADER, M. H.; ELANGO, K. Turbulent pressure field beneath a hydraulic jump. *Journal of Hydraulic Research*, v. 12, n. 4, p. 469–489, 1974.
- BÉLANGER, J.-B. *Essai sur la solution numérique de quelques problèmes relatifs au mouvement permanent des eaux courantes*. Paris: Carilian-Goeury, 1828.
- BIDONE, G. *Expériences sur le remou et sur la propagation des ondes*. Turin: Accademia delle Scienze di Torino, 1820.
- CHOW, V. T. *Open Channel Hydraulics*. New York: McGraw-Hill, 1959.
- 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.
- ELEVATORSKI, E. A. *Hydraulic Energy Dissipators*. New York: McGraw-Hill, 1959.
- ENDRES, L. A. M. *Contribuição ao desenvolvimento de um sistema para 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. *Plano Nacional de Energia 2050: Considerações sobre a Expansão Hidrelétrica nos Estudos de Planejamento Energético de Longo Prazo*. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética - EPE, 2018.
- HAGER, W. H. *Energy dissipators and hydraulic jump*. Zurich: Springer Science and Business Media, 1992.
- HAMPE, R. F. *Previsão de pressões extremas em bacias de dissipação por ressalto hidráulico com baixo número de Froude*. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, 2018.
- KING, D. L. *Analysis of random pressure fluctuations in stilling basins*. In: XII CONGRESS OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR HYDRAULIC RESEARCH. Fort Collins: 1967
- LOPARDO, R. A. *Notas sobre fluctuaciones macroturbulentas de presión, medición, análisis y aplicación al resalto hidráulico*. São Paulo: Curso n. 1: Turbulencia, cavitación y aireación de fenomenos hidráulicos, 1986.
- MARQUES, M. G. *Nouvelle approche pour le dimensionnement des dissipateurs à auge*. Tese (Doutorado)—Quebec: Faculte des sciences et génie de La Université Laval, 1995.

- MARQUES, M. G.; ALMEIDA, F. M.; ENDRES, L. A. M. **Adimensionalização de pressões médias em bacias de dissipação por ressalto hidráulico**. In: XIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. Belo Horizonte: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1999.
- MARQUES, M. G.; DRAPEAU, J.; VERRETTE, J.-L. Flutuação de Pressão em um Ressalto Hidráulico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 2, n. 2, p. 45–52, 1997.
- MARQUES, M. G.; HAMPE, R. F.; SOUZA, P. E. A.; TEIXEIRA, E. D. **Previsão de pressões extremas mínimas em bacia de dissipação com baixo número de Froude**. In: XXXI SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS. Belo Horizonte: Comitê Brasileiro de Barragens, 2017.
- MCPHERSON, B. L.; LESLEIGHTER, E. J.; SCRIVEN, D. C.; BOLLAERT, E. F. R. **Physical and Computational Scour Modelling System Analysis-Case Study for Paradise Dam, Queensland**. In: AUSTRALIAN NATIONAL COMMITTEE ON LARGE DAMS CONFERENCE: contemporary challenges for dams. Hobart, Tasmânia: 2015.
- MEES, A. A. A. **Caracterização das solicitações hidrodinâmicas em bacias de dissipação por ressalto hidráulico com baixo número de Froude**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, 2008.
- PETERKA, A. J. **Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators**. Denver: USBR, 1984.
- PINHEIRO, A. A. N. **Acções hidrodinâmicas em soleiras de bacia de dissipação de energia por ressalto hidráulico**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa, 1995.
- RAJARATNAM, N. Hydraulic Jumps. In: CHOW, V. T. (Ed.). **Advances in Hydroscience**. New York: Elsevier, 1967. v. 4p. 197–280.
- RESCH, F. J.; LEUTHEUSSER, H. J. Mesures de turbulence dans le ressaut hydraulique. **La Houille Blanche**, n. 1, p. 17–31, 1971.
- ROUSE, H.; SIAO, T. T.; NAGARATNAM, S. Turbulence characteristics of the hydraulic jump. **Transactions of the American Society of Civil Engineers**, v. 124, n. 1, p. 926–950, 1959.
- SOUZA, P. E. DE A. **Bacias de dissipação por ressalto hidráulico com baixo número de Froude - Análise das pressões junto ao fundo da estrutura**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, 2012.
- 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. Extreme Pressures in Hydraulic-Jump Stilling Basins. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 114, n. 8, p. 829–843, 1988.
- VASILIEV, O. F.; BUKREYEV, V. I. **Statistical characteristics of pressure fluctuations in the region of hydraulic jump**. In: XII CONGRESS OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR HYDRAULIC RESEARCH. Fort Collins: 1967.

5 ARTIGO 2: ESTIMATIVA DE PRESSÕES EXTREMAS EM BACIAS DE DISSIPAÇÃO POR RESSALTO HIDRÁULICO COM BAIXO NÚMERO DE FROUDE

Este artigo trata sobre metodologias de previsão de pressões extremas em bacias de dissipação, mais especificamente naquelas por ressalto hidráulico com baixo número de Froude. A partir de dados de laboratório coletados em um modelo físico, verificou-se que as equações existentes para ressaltos estáveis não eram aplicáveis para ressaltos hidráulicos com baixo número de Froude. Diante disso, foram propostas novas equações, que foram validadas por meio da sua aplicação em dados coletados em outro modelo.

ESTIMATIVA DE PRESSÕES EXTREMAS EM BACIAS DE DISSIPÇÃO POR RESSALTO HIDRÁULICO COM BAIXO NÚMERO DE FROUDE

Renato Steinke Júnior¹, Mauricio Dai Prá¹, Eder
Daniel Teixeira¹

¹Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal
do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil

E-mails: renato.steinkejunior@gmail.com (RSJ),
mauricio.daipra@ufrgs.br (MDP), eder.teixeira@ufrgs.br
(EDT)

RESUMO

Não raro são observados danos em estruturas hidráulicas, o que aponta para a importância de se conhecerem os efeitos hidrodinâmicos causados pelo escoamento sobre as mesmas. Diante da tendência brasileira de expandir seu parque hidrelétrico em direção à região norte do país, e levando em conta o fato de que as bacias de dissipação lá existentes operam frequentemente com ressalto hidráulicos de baixo número de Froude, fica evidente a relevância de se investigar este tipo de fenômeno. Neste artigo, foi testada a aplicabilidade de metodologias já existentes para a estimativa de pressões extremas em bacias de dissipação. A partir de dados coletados em uma instalação experimental, foi proposto um novo equacionamento capaz de estimar percentis extremos de pressão de ressalto hidráulicos com baixo número de Froude.

Palavras-chave: Previsão de pressões extremas; Ressalto hidráulico; baixo número de Froude; Bacia de dissipação.

ABSTRACT

Damages on hydraulic structures are frequent, what indicates the importance of knowing the hydrodynamic effects caused by the flow on these structures. Given the Brazilian trend of expanding its hydropower net towards the north, and taking into account that the stilling basins in that region often operate with low Froude number hydraulic jumps, the relevance of investigating this type of phenomenon becomes clear. In this paper, the applicability of existent methodologies for the estimation of extreme pressures on stilling basins was tested. Using data collected on an experimental setup, a novel set of equations was proposed, capable of estimating extreme percentiles of pressure of low Froude number hydraulic jumps.

Keywords: Extreme pressure estimation; Hydraulic jump; Low Froude number; Stilling basin.

INTRODUÇÃO

Conforme Hager (1992), as bacias de dissipação representam aproximadamente um terço de todos os dissipadores de energia. Tais estruturas possuem como

vantagem a segurança no seu desempenho, devido à quantidade de conhecimento e experiência existentes, quando comparadas com outros meios de dissipação de energia em estruturas de segurança de barragens. Além disso, a simplicidade e a facilidade de manutenção das bacias de dissipação simples também são vantagens que contribuem para a sua relevância técnica e científica, frente a dissipadores do tipo salto-esqui ou bacias de dissipação com acessórios. Algumas das principais desvantagens de sua aplicação são a suscetibilidade a danos por cavitação, erosão superficial e o arrancamento de lajes por subpressão.

Marques *et al.* (2017) enumeram diversos tipos de danos que podem ocorrer em estruturas hidráulicas, podendo-se citar: cavitação, abrasão, erosão, vibrações, instabilidades estruturais, fissuras, entre outros.

Como exemplos de danos recentes ocorridos em estruturas de segurança de barragens, pode-se mencionar a erosão causada no maciço rochoso a jusante do vertedouro principal da Barragem Paradise, em Queensland, Austrália, devido a uma sucessão de cheias na região. Alguns procedimentos foram adotados a fim de evitar futuras ocorrências: foram feitas sondagens detalhadas para a análise da geologia local; a bacia de dissipação foi reparada e reforçada; e foram conduzidos diversos estudos utilizando modelagem física e numérica com vistas a quantificar a possível erosão diante de cenários de cheias futuras (MCPHERSON *et al.*, 2015). Teixeira (2008) menciona dois casos de danos em bacias de dissipação no Brasil: a UHE Jaguará e a UHE Porto Colômbia. Na primeira delas, erosões a jusante do vertedouro foram causadas por uma vazão de 4.600 m³/s, sendo a vazão máxima prevista de 13.600 m³/s. Na segunda, uma vazão de 5.700 m³/s ocasionou danos por cavitação junto aos blocos de dissipação, como pode ser visto na Figura 65.



Figura 65 – Danos por cavitação na bacia de dissipação da UHE Porto Colômbia. Fonte: Teixeira (2008)

Os casos mencionados servem para reforçar a importância de se conhecerem os esforços hidrodinâmicos flutuantes e extremos a que as estruturas hidráulicas estarão sujeitas. Segundo Bowers e Toso (1988), muitas das grandes barragens dos Estados Unidos possuem estruturas que foram projetadas antes de existir qualquer informação sobre a magnitude das pressões flutuantes no ressalto hidráulico. Os autores recomendam que as flutuações de pressão intrínsecas ao fenômeno sejam levadas em conta no projeto de bacias de dissipação.

Bowers e Toso (1988) conduziram um estudo em modelo físico a fim de investigar os danos ocorridos na calha do vertedouro da Barragem Karnafuli, em Bangladesh, após a descarga de uma vazão de aproximadamente $3.480 \text{ m}^3/\text{s}$ (o que equivale a aproximadamente 20% da vazão de projeto, $18.000 \text{ m}^3/\text{s}$). Concluiu-se que a principal causa da falha nas lajes da estrutura foram as pressões flutuantes do ressalto hidráulico.

Peterka (1984) estabeleceu que o ressalto hidráulico pode ser classificado quanto ao número de Froude na entrada do fenômeno, conforme mostra a Figura 66. De acordo com o autor, a forma do ressalto e a energia dissipada pelo mesmo variam conforme a faixa do número adimensional. Quanto maior o número de Froude, maior a diferença entre os níveis de montante e jusante, mais fortes os vórtices formados e maior a dissipação de energia.

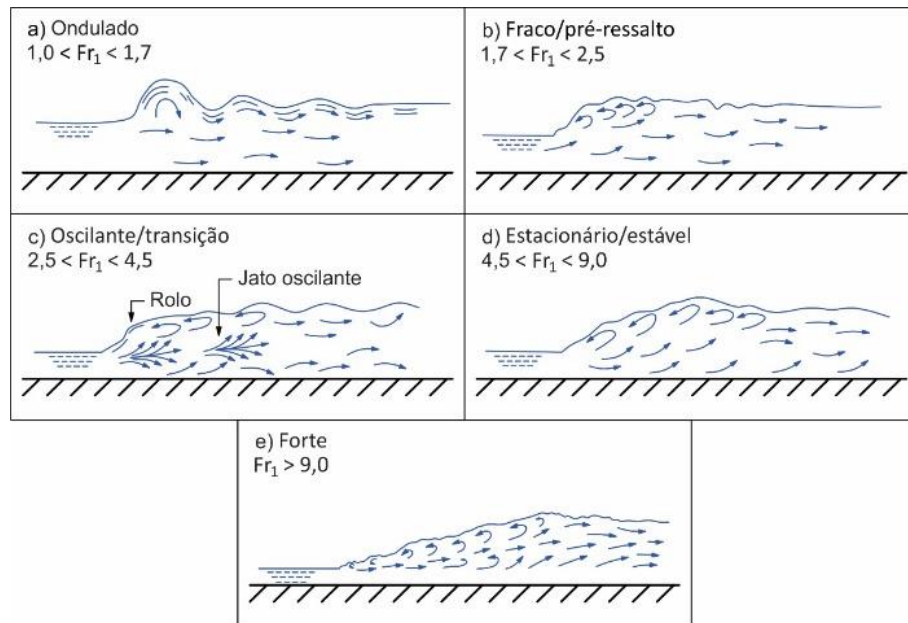


Figura 66 – As formas do ressalto hidráulico. Adaptado de Peterka (1984) e Teixeira (2008)

O conhecimento das pressões médias, flutuantes e extremas causadas pelo ressalto hidráulico sobre bacias de dissipação já é bem conhecido para $4,5 < Fr_1 < 9,0$. Sendo um ressalto que dissipa entre 45% e 70% da energia do escoamento, sem ser extremamente danoso à estrutura como é o ressalto forte, o ressalto estável é o mais comumente encontrado em bacias de dissipação. Como exemplos de trabalhos contemplando esta faixa do número de Froude, podem ser citados: Endres (1990), Lopardo (1986), Pinheiro (1995), Marques *et al.* (1997), Teixeira (2003) e Dai Prá (2011).

Entretanto, ainda não se conhecem suficientemente bem os efeitos hidrodinâmicos causados pelo ressalto hidráulico operando com $Fr_1 < 4,5$, neste trabalho chamado de ressalto com baixo número de Froude. Podem ser citadas duas pesquisas que discorrem sobre este tipo de ressalto: Souza (2012) e Hampe (2018). Entretanto, nenhum deles abrange a extensão completa do fenômeno. Souza (2012) conduziu experimentos em um modelo físico da UHE Santo Antônio na escala 1:50, coletando pressões instantâneas em 4 tomadas instaladas na região inicial da bacia de dissipação. Foram utilizados transdutores de pressão registrando dados a uma frequência de 100 Hz durante 10 minutos, para 7 vazões diferentes, com números de Froude variando entre 1,70 e 7,73.

Hampe (2018) utilizou dados coletados no mesmo modelo físico utilizado por Souza (2012), em uma nova campanha de ensaios realizados em 2016, com o fim de verificar a validade dos dados coletados inicialmente pelo autor. A partir dos novos dados, amostrados em condições

praticamente idênticas às de Souza (2012), verificou-se que os dados do autor apresentavam comportamentos duvidosos, e decidiu-se dar prosseguimento à pesquisa utilizando os registros de 2016. Além destes dados, Hampe (2018) fez uso de valores de pressão coletados em um modelo físico da UHE São Manoel, na escala 1:60. Foram ensaiadas duas vazões distintas, porém para ressaltos afogados e com números de Froude muito similares entre si. As tomadas de pressão deste modelo também não abrangiam a extensão completa do ressalto, deixando assim uma lacuna na bibliografia.

Na prática, ressaltos hidráulicos com baixo número de Froude ocorrem mais comumente em aproveitamentos com elevadas vazões específicas e baixas quedas, condições que são características da região amazônica.

Pelo menos desde 2007, sabe-se que a maior parte do potencial hidrelétrico nacional se encontra na região amazônica, sobretudo nas bacias dos rios Tocantins, Araguaia, Xingu e Tapajós, incluindo seus tributários. Apesar da série de desafios de caráter ambiental e social, a vocação da região para a geração hidrelétrica é inegável. Em 2017, um levantamento realizado pela EPE verificou que o Brasil possui um potencial hidrelétrico inventariado e não explorado de 52 GW, abrangendo tanto UHES quanto projetos hidrelétricos menores que 30 MW. Destes 52 GW, o Plano Decenal de Expansão de Energia 2029 explicita a intenção de implementar 6,4 GW dentro da próxima década (EPE, 2018, 2019).

Diante da raridade das pesquisas sobre ressaltos com baixo número de Froude, da importância de se conhecerem os efeitos hidrodinâmicos causados pelo fenômeno nas

bacias de dissipação e da tendência de a hidreletricidade brasileira crescer em direção à região norte do país, fica em evidência a relevância do presente trabalho.

Neste artigo, é introduzida uma metodologia para a estimativa de pressões extremas em bacias de dissipação, causadas pelo ressalto hidráulico com baixo número de Froude. Esta metodologia é comparada com equações já existentes, propostas por Teixeira (2003) (para ressalto estáveis) e Hampe (2018) (ressaltos com baixo número de Froude).

MATERIAIS

Os dados utilizados no desenvolvimento deste artigo foram coletados em uma instalação experimental,

construída no Laboratório de Obras Hidráulicas do IPH/UFRGS. Em um canal de 40 cm de largura e 80 cm de altura, foi instalada uma ogiva que representa o vertedouro da UHE Santo Antônio (Porto Velho, RO), na escala 1:50. O modelo, entretanto, se diferencia do protótipo por não possuir pilares nem comportas, o que o constitui como um vertedouro de soleira livre. A Figura 67 apresenta os detalhes do canal de ensaios em corte e planta.

Imediatamente a jusante do vertedouro, a bacia de dissipação é representada por uma placa de acrílico de 185 cm de comprimento, que possui 23 tomadas de pressão espaçadas de 8 cm ao longo de seu eixo longitudinal.

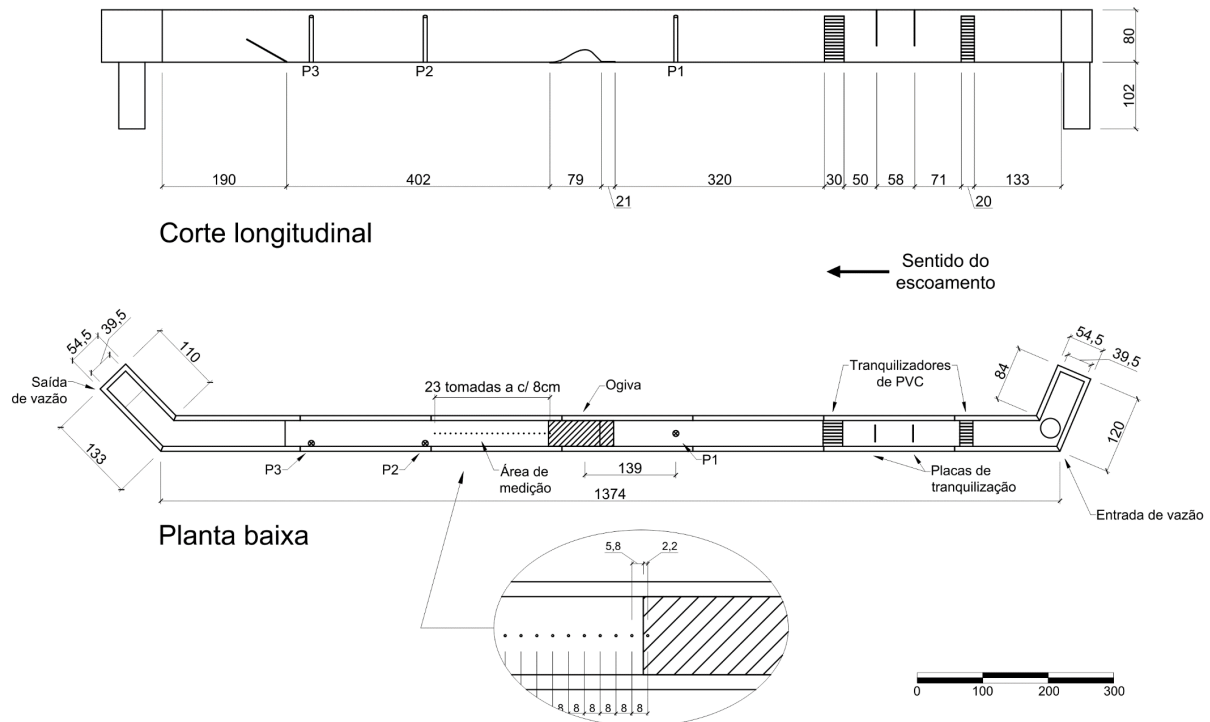


Figura 67 – Planta e corte do modelo físico (medidas em centímetros)

A alimentação do canal é feita por um conjunto de 3 motobombas que funcionam em paralelo, capazes de bombear a vazão máxima suportada pelo canal, de pouco mais de 200 l/s. Um medidor de vazão eletromagnético possibilitou a medição desta grandeza. Uma série de tranquilizadores a montante do vertedouro é responsável por amortecer as ondulações do nível de água, principalmente para os escoamentos mais caudalosos.

Ao longo da bacia de dissipação, foram instalados 18 transdutores da marca Omega, modelo PX419. Quanto à faixa de aquisição: 6 transdutores, instalados no início da bacia, operam de -1 psi a 1 psi; 11 transdutores, instalados na região intermediária da bacia, operam de -2,5 psi a 2,5 psi; o transdutor mais a jusante opera de -5 psi a 5 psi. Foram registrados dados a uma taxa de 100 Hz, durante 10 minutos para cada uma das vazões ensaiadas, seis ao todo, com o número de Froude na entrada do ressalto variando entre 1,9 e 4,6. A Tabela 13 contém informações sobre os ensaios realizados.

Uma comporta a jusante da bacia de dissipação permite impor o nível de jusante desejado, de modo a posicionar o ressalto ao longo da bacia. O nível de água na entrada do fenômeno foi medido por meio de uma ponta limimétrica

dotada de vernier. Ao fim do canal, a água é conduzida novamente para o reservatório inferior através da tubulação de saída.

Tabela 13 – Condições de ensaio

Q (m ³ /s)	q (m ² /s)	Fr ₁	y ₁ (m)	y ₂ (m)
0,013	0,033	4,6	0,017	0,106
0,025	0,064	3,8	0,030	0,150
0,035	0,088	3,4	0,041	0,178
0,050	0,126	3,0	0,057	0,211
0,100	0,252	2,3	0,108	0,296
0,150	0,377	1,9	0,162	0,350

Para a validação dos ajustes que aqui serão introduzidos, foram utilizados os dados de Hampe (2018) coletados no modelo da UHE São Manoel. Vale ressaltar que estes dados são provenientes de dois ensaios com números de Froude muito próximos entre si e ressalto hidráulico afogados.

MÉTODOS

A análise dos dados coletados no modelo mencionado acima adotou a convenção de variáveis apresentada na Figura 68. A linha tracejada logo acima do ressalto refere-se ao caso afogado, situação dos dados de Hampe (2018) coletados no modelo da UHE São Manoel.

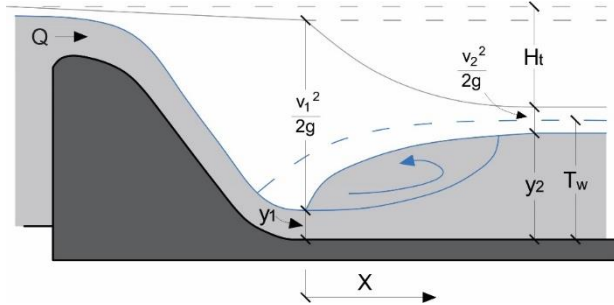


Figura 68 – Esquema de um ressalto hidráulico e suas variáveis

Na figura:

Q é a vazão (m^3/s);

x é a posição longitudinal a partir do início do ressalto (m);

y_1 e y_2 são as alturas conjugadas (m);

T_w é a lâmina de água a jusante do ressalto afogado (m);

v_1 e v_2 são as velocidades na entrada e na saída do ressalto (m/s);

H_t é a energia dissipada ao longo do ressalto (m);

Foi utilizada a metodologia de adimensionalização introduzida por Marques *et al.* (1997), com a qual é possível agrupar, em uma mesma tendência, valores de pressão de ressaltos de diferentes dimensões. Estas relações são representadas pelas equações abaixo. Para que os dados da UHE São Manoel (ressaltos afogados) pudessem ser comparados, foi introduzido nas equações o fator $\frac{y_2}{T_w}$, que leva em conta o grau de submergência dos ressaltos, conforme sugerido por Marques *et al.* (1999).

$$\Gamma = \frac{x}{y_2 - y_1} \quad (40)$$

$$\Psi = \frac{P_x - y_1 y_2}{y_2 - y_1 T_w} \quad (41)$$

$$\Omega = \frac{\sigma_x y_2 y_2}{H_t y_1 T_w} \quad (42)$$

$$\Psi_{x\%} = \frac{P_{x\%} - y_1 y_2}{y_2 - y_1 T_w} \quad (43)$$

Em que:

P_x é o valor médio das pressões instantâneas (altura piezométrica equivalente) (m);

σ_x é o desvio padrão das pressões instantâneas (flutuação de pressão) (m);

$P_{x\%}$ é o percentil “x” da amostra de pressões (altura piezométrica equivalente) (m);

Γ é a posição longitudinal adimensionalizada;

Ψ é a pressão média adimensionalizada;

Ω é a flutuação de pressão adimensionalizada;

$\Psi_{x\%}$ é o percentil “x” de pressão adimensionalizado;

Teixeira (2003), de posse de dados coletados tanto em modelo quanto em protótipo, desenvolveu uma metodologia de estimativa de pressões extremas causadas pelo ressalto hidráulico sobre bacias de dissipação. Suas equações são válidas para ressaltos hidráulicos livres dentro da faixa estável do número de Froude. De acordo com o autor, um percentil de pressão extrema pode ser entendido como uma combinação de fatores: a pressão média, a flutuação de pressão e o coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades N (Equação 44). Para cada um destes parâmetros, foram ajustados polinômios do segundo grau, descritos conforme as Equações 45, 46 e 47. Os coeficientes a , b e c da Equação 47 dependem da probabilidade que se deseja analisar, e podem ser consultados em Teixeira (2003).

$$N_{x\%} = \frac{P_{x\%} - P_x}{\sigma_x} \quad (44)$$

$$\Psi = -0,015 \cdot \Gamma^2 + 0,237 \cdot \Gamma + 0,07 \quad (45)$$

$$\Omega = \begin{cases} -0,159 \cdot \Gamma^2 + 0,573 \cdot \Gamma + 0,19, & \text{para } 0 \leq \Gamma < 2,4 \\ 0,017 \cdot \Gamma^2 - 0,281 \cdot \Gamma + 1,229, & \text{para } 2,4 \leq \Gamma \leq 8,25 \end{cases} \quad (46)$$

$$N_{x\%} = a \cdot \Gamma^2 + b \cdot \Gamma + c \quad (47)$$

$N_{x\%}$ é o coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades para uma certa porcentagem “x”;

Hampe (2018) investigou se o equacionamento proposto por Teixeira (2003) é também válido para ressaltos fracos e oscilantes. A autora constatou que as pressões médias seguem a mesma tendência para diferentes faixas do número de Froude. Quanto ao desvio padrão, entretanto, verificou-se que ressaltos com baixo número de Froude apresentam comportamento diferente dos ressaltos estáveis. Assim, foi proposta uma nova equação para esta grandeza (Equação 48), válida somente para $\Gamma \leq 2,4$. Hampe (2018) também expandiu a faixa de porcentagens do coeficiente N disponibilizada por Teixeira (2003), tornando possível o cálculo dos percentis $P_{0,1\%}$ e $P_{99,9\%}$.

$$\Omega = -0,087 \cdot \Gamma^2 + 0,314 \cdot \Gamma + 0,320, \text{ para } 0 \leq \Gamma \leq 2,4 \quad (48)$$

Os ajustes propostos neste artigo foram desenvolvidos por meio do método dos mínimos quadrados. A qualidade das equações introduzidas foi avaliada por meio do erro relativo entre os dados amostrais e o ajuste em questão.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir, são apresentadas as amostras de dados coletadas com respeito a pressões médias, flutuação de pressão, coeficiente estatístico N e percentis de pressão extrema. Estes parâmetros foram comparados com os ajustes de previsão propostos por Teixeira (2003) e Hampe (2018). Quando se julgou necessário, novas equações foram introduzidas.

Pressões médias

Na Figura 69, são apresentadas as pressões médias amostradas, na forma adimensional, em comparação com

o ajuste proposto por Teixeira (2003). A Figura 70 mostra o erro relativo entre o conjunto de dados e a equação ajustada.

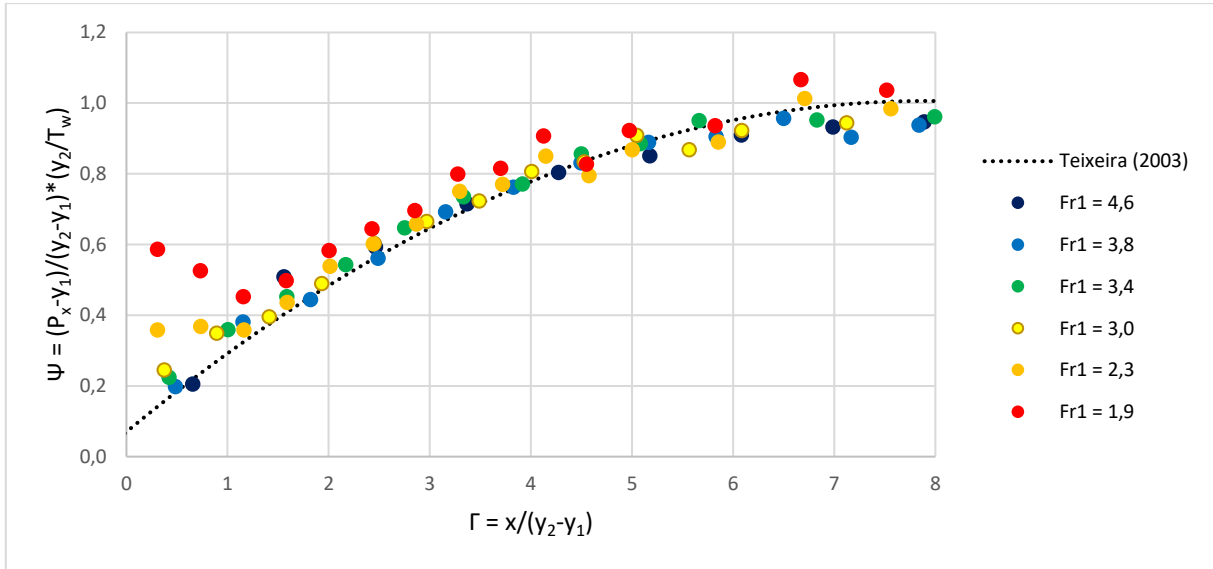


Figura 69 – Pressões médias adimensionalizadas em comparação com o ajuste proposto por Teixeira (2003)

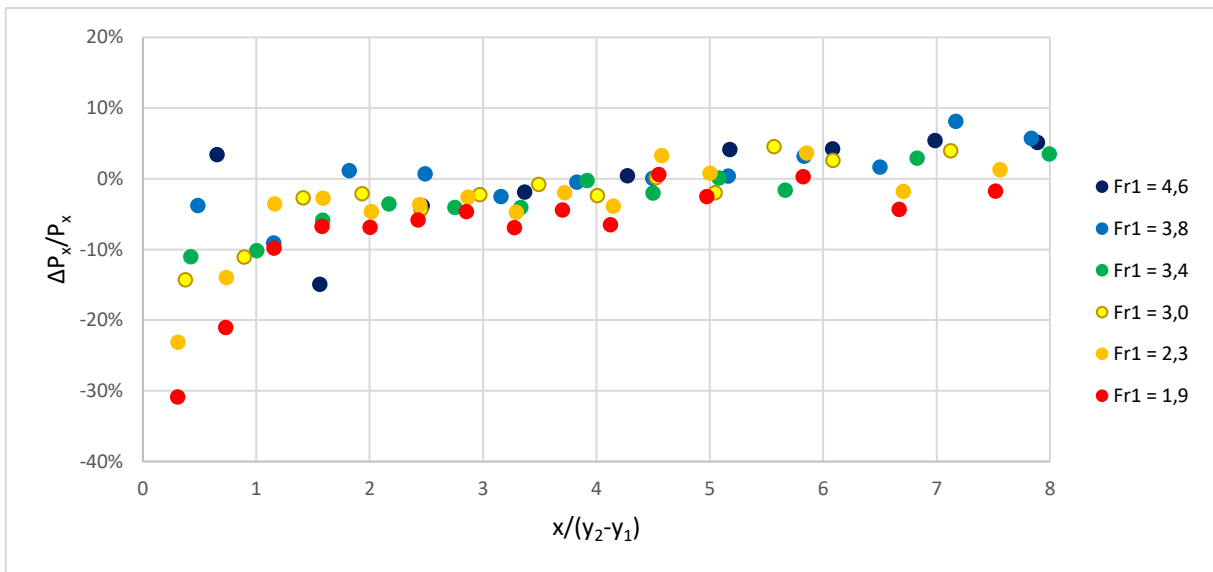


Figura 70 – Erro relativo: metodologia proposta por Teixeira (2003) em relação aos dados amostrados

Verifica-se que o ajuste proposto por Teixeira (2003) é válido para a estimativa de pressões médias de ressaltos hidráulicos com baixos números de Froude. A equação proposta, entretanto, não é capaz de descrever fidedignamente o efeito da curva de concordância, conforme pode ser visto na dispersão dos dados até a posição longitudinal adimensionalizada 2. Para esta região da bacia, onde as pressões ainda estão sob efeito da curva, os erros na estimativa da pressão média podem chegar a - 31%. A jusante deste ponto, a equação introduzida por Teixeira (2003) acompanha com bastante proximidade a distribuição dos dados de pressão média coletados, variando o erro entre -7% e 9%. Sendo assim, não foi proposta nenhuma nova equação para a estimativa de pressões médias em ressaltos hidráulicos com baixo número de Froude.

Desvio padrão

Na Figura 71, são apresentados os valores de flutuação de pressão adimensionalizada conforme a metodologia de Marques *et al.* (1997) em comparação com os ajustes propostos por Hampe (2018) e Teixeira (2003), sendo aquele válido para posições longitudinais adimensionalizadas de até 2,4, e este válido para posições a jusante deste ponto. Verifica-se que os ajustes não reproduzem a tendência observada nos dados coletados. Enquanto o ajuste dos outros autores se desenvolve em dois trechos, o primeiro ascendente e o segundo descendente, este comportamento não acontece para os dados amostrais coletados em ressaltos hidráulicos com baixo número de Froude, com exceção de duas das vazões ensaiadas. A Figura 72 mostra que os erros variam entre - 90% e 60%.

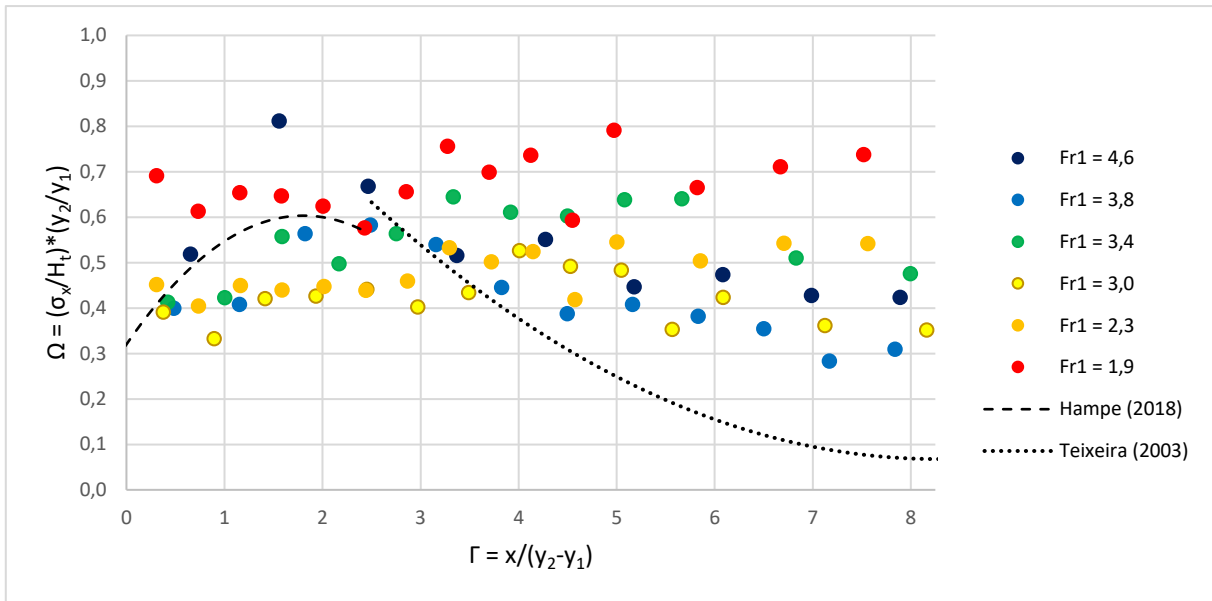


Figura 71 – Desvio padrão adimensionalizado em comparação com os ajustes propostos por Teixeira (2003) e Hampe (2018)

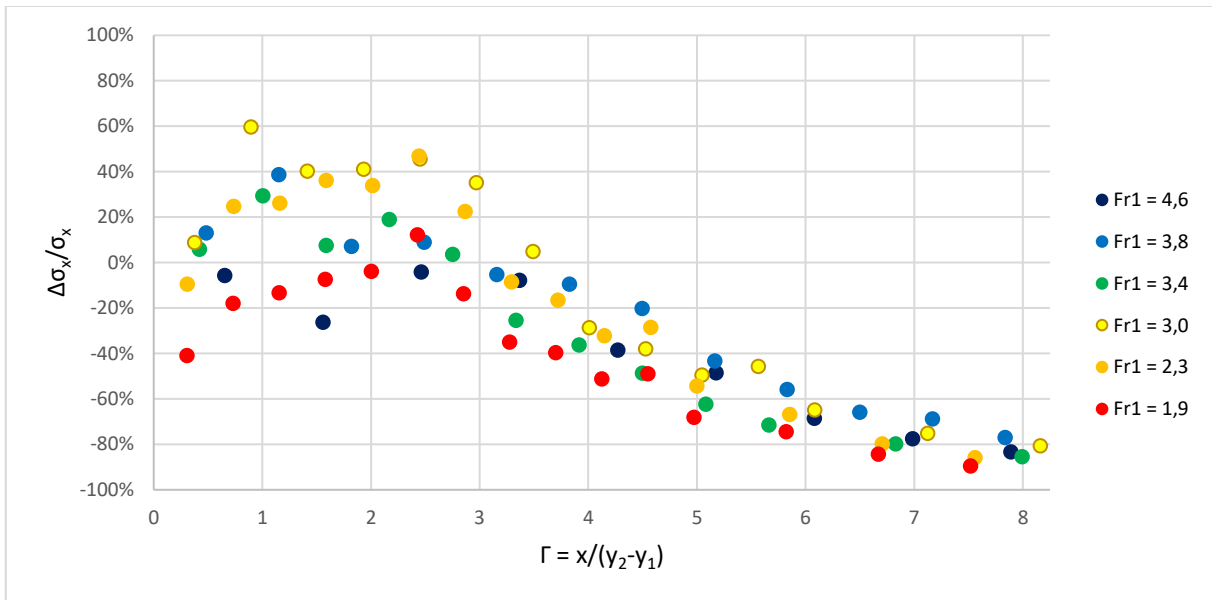


Figura 72 – Erro relativo: metodologia proposta por Teixeira (2003) e Hampe (2018) com relação ao desvio padrão amostrado

Diante disso, propõe-se aqui uma nova metodologia de estimativa dos valores de flutuação de pressão para ressaltos hidráulicos com números de Froude variando entre 1,7 e 4,6.

Inicialmente, foram ajustados polinômios de terceiro grau para cada uma das vazões ensaiadas, conforme a Equação 49. Os coeficientes do polinômio são apresentados na Tabela 14 para cada número de Froude.

$$\Omega = a \cdot \Gamma^3 + b \cdot \Gamma^2 + c \cdot \Gamma + d \quad (49)$$

Depois disso, verificou-se que os coeficientes dos polinômios apresentam comportamentos bem definidos em função do número de Froude. Para cada um dos coeficientes da Equação 49 (a , b , c e d), foi ajustado um polinômio de segundo grau com respeito ao número de Froude do escoamento na entrada do ressalto. As expressões encontradas estão apresentadas da Equação 50 à Equação 53.

Tabela 14 – Coeficientes do polinômio de terceiro grau

Fr_1	a	b	c	d	R^2
4,6	0,0029	-0,0477	0,1877	0,4286	0,61
3,8	0,0032	-0,0530	0,2158	0,2712	0,86
3,4	0,0012	-0,0267	0,1615	0,3212	0,88
3,0	0,0013	-0,0245	0,1248	0,2728	0,69
2,3	-0,0003	-0,0005	0,0383	0,3798	0,58
1,9	-0,0010	0,0094	-0,0043	0,6254	0,28

$$a = -0,00034 \cdot Fr_1^2 + 0,00371 \cdot Fr_1 - 0,0069 \quad (R^2 = 0,91) \quad (50)$$

$$b = 0,00602 \cdot Fr_1^2 - 0,06152 \cdot Fr_1 + 0,1051 \quad (R^2 = 0,93) \quad (51)$$

$$c = -0,03436 \cdot Fr_1^2 + 0,29881 \cdot Fr_1 - 0,4503 \quad (R^2 = 0,97) \quad (52)$$

$$d = 0,12620 \cdot Fr_1^2 - 0,87021 \cdot Fr_1 + 1,7628 \quad (R^2 = 0,89) \quad (53)$$

A partir deste ajuste, foram recalculados os valores da flutuação de pressão adimensionalizada para cada uma das vazões ensaiadas. O resultado é a Figura 73. Na Figura 74,

verifica-se que os erros entre os dados amostrais e o ajuste aqui proposto chegam a, no máximo, 40% em valor absoluto.

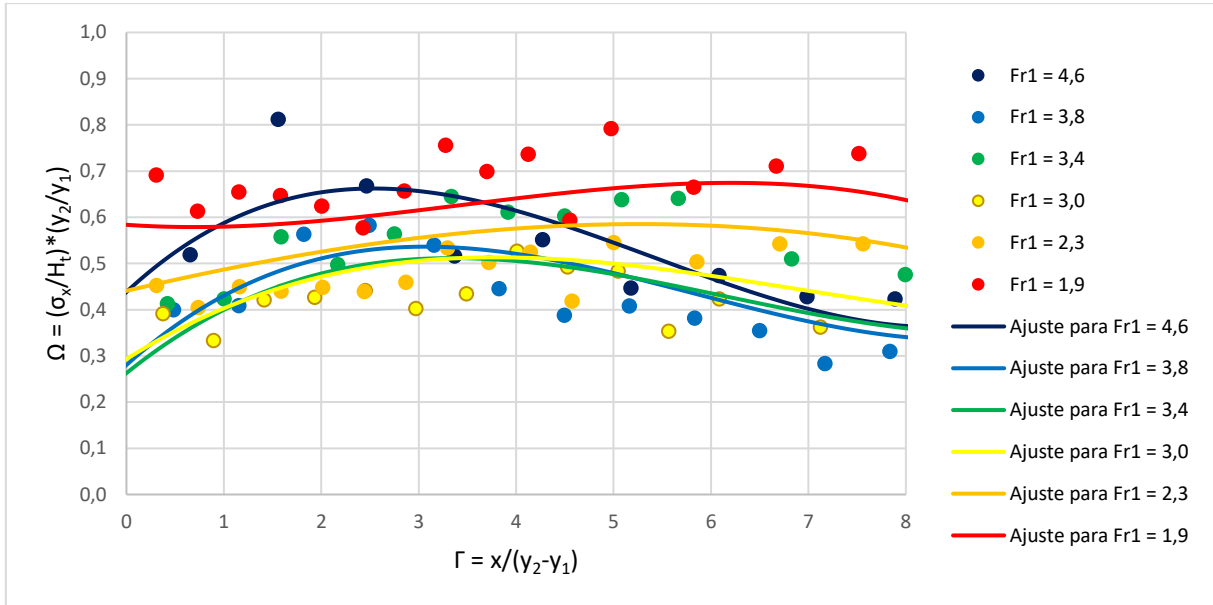


Figura 73 – Dados amostrais de flutuação de pressão em comparação com o ajuste final proposto

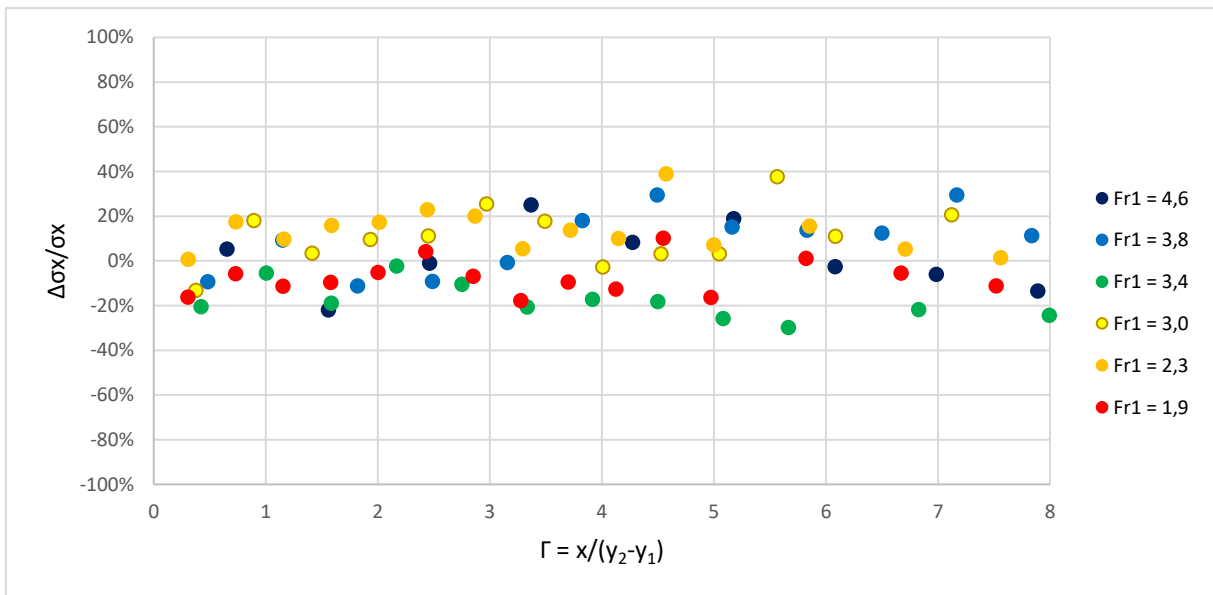


Figura 74 – Erros relativos para o ajuste final proposto

A fim de validar o equacionamento desenvolvido, a metodologia proposta foi aplicada aos dados de São Manoel, também utilizados por Hampe (2018). Só se dispunha de duas vazões ensaiadas neste modelo com números de Froude muito próximos um do outro. Além disso, os ressaltos ensaiados eram afogados, e as tomadas de pressão não abrangiam a extensão completa do ressalto. Apesar destes fatores, decidiu-se utilizar tais dados para a etapa de validação, uma vez que não há outros disponíveis para ressaltos hidráulicos com baixos números de Froude. Na comparação, também foram incluídos os ajustes propostos por Hampe (2018) para $\Gamma < 2,4$ e Teixeira (2003) para $\Gamma > 2,4$. A Figura 75 apresenta a comparação entre os ajustes mencionados e os dados amostrais,

enquanto a Figura 76 contém os erros relativos e absolutos de cada um deles. Ao analisar os erros em valores absolutos e em escala de protótipo, verifica-se que as diferenças para o ajuste aqui proposto não passam de 31 cm para $Fr_1 = 3,07$ e 71 cm para $Fr_1 = 3,21$. Estes erros representam 2,1% e 5,9% da pressão média, respectivamente.

Observa-se que, para $Fr_1 = 3,07$, o ajuste introduzido demonstra uma semelhança mais homogênea com os dados coletados em modelo ao longo do desenvolvimento dos pontos, enquanto os ajustes de Hampe (2018) e Teixeira (2003) superestimam e subestimam os valores reais de desvio padrão, respectivamente, sendo adequados, porém, para os pontos da terceira e quarta tomadas. Para

$Fr_1 = 3,21$, o ajuste de Hampe (2018) demonstra-se mais adequado do que o sugerido. Para $\Gamma > 2,4$, entretanto, o ajuste sugerido resulta em erros menores do que a equação de Teixeira (2003). Isso se deve ao fato de que o ajuste de Teixeira (2003) considera o ramo descendente no desvio

padrão da região final do ressalto, que ocorre para a faixa estável do número de Froude. Os dados da UHE São Manoel, entretanto, parecem apontar para valores de flutuação de pressão maiores na região final do ressalto, assim como os coletados no modelo deste artigo.

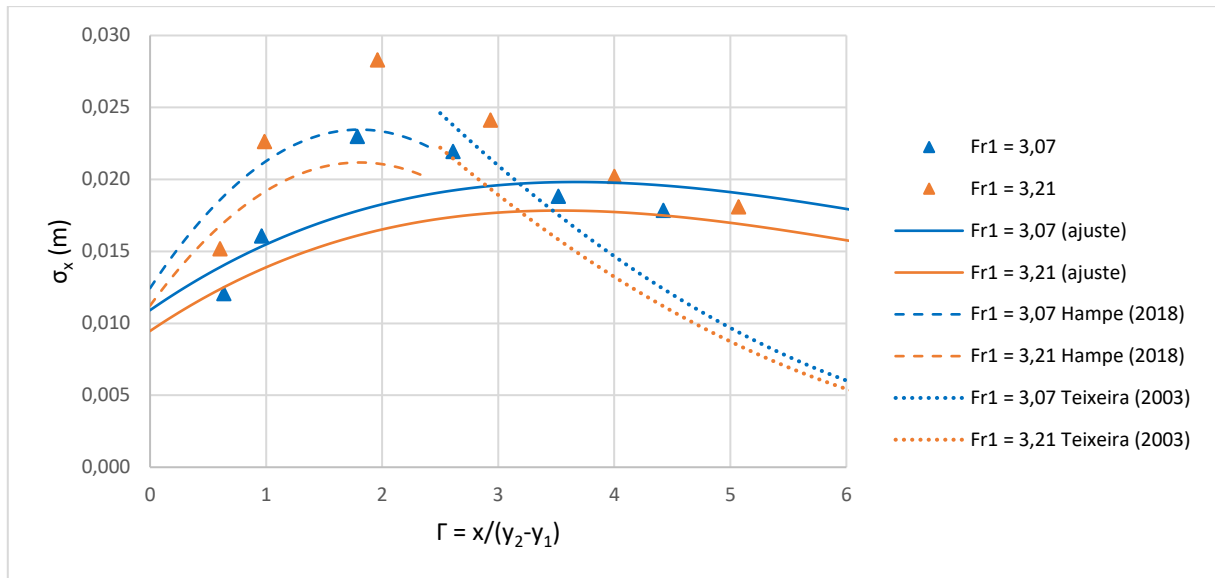


Figura 75 – Desvio padrão dimensional para a UHE São Manoel: dados amostrais, ajustes de Teixeira (2003) e Hampe (2018) e novo ajuste proposto

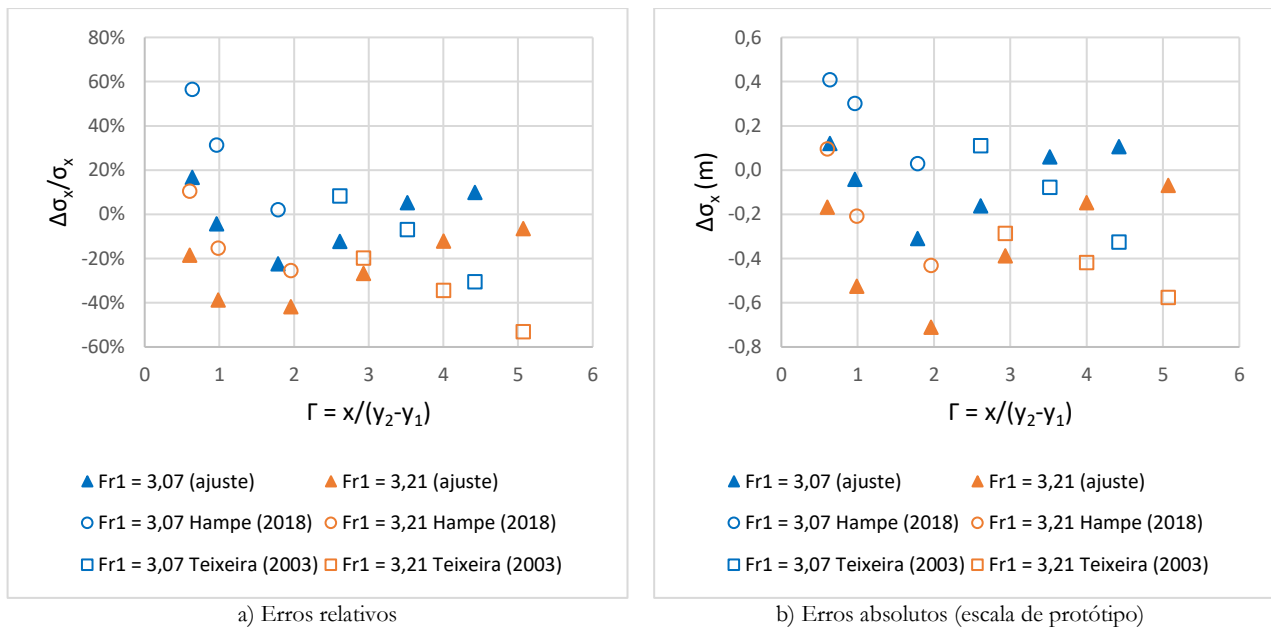


Figura 76 – Erros dos ajustes propostos em relação aos dados amostrais

Coefficiente estatístico de distribuição de probabilidades (N)

Foram comparados os coeficientes estatísticos de distribuição de probabilidades N extraídos a partir dos dados coletados no modelo bidimensional deste artigo com os ajustes introduzidos por Teixeira (2003) e Hampe (2018). Verificou-se que, para probabilidades entre 1% e 99%, os valores obtidos por meio dos ajustes representavam muito bem os valores calculados a partir das amostras. A comparação para as duas probabilidades mencionadas pode ser vista na Figura 77. Apesar de os ajustes se distanciarem levemente dos pontos nas extremidades das curvas, ao longo da maior parte de seu

desenvolvimento as equações ajustadas descrevem bem o comportamento dos dados.

Já para as probabilidades de 0,1% e 99,9%, não foi verificada a mesma tendência. Observa-se, no mesmo gráfico, que boa parte dos pontos não coincide com as curvas geradas a partir das equações existentes, tanto para as extremidades do ressalto quanto para a região intermediária do fenômeno. Assim sendo, julgou-se necessária a introdução de novos coeficientes a serem utilizados em combinação com a Equação 47 para tais probabilidades, válidos para ressalto operando sob baixos números de Froude.

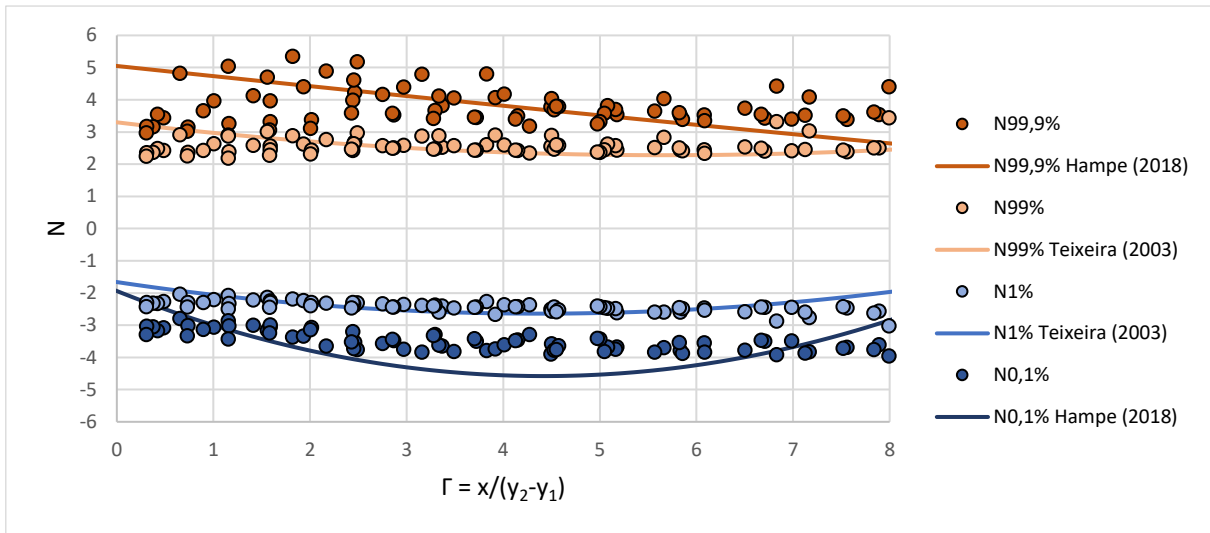


Figura 77 – Coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades N: dados deste artigo em comparação com os ajustes propostos por Teixeira (2003) e Hampe (2018) para as probabilidades de 0,1%, 1%, 99% e 99,9%

Os coeficientes foram calculados por meio do método dos mínimos quadrados e estão apresentados na Tabela 15, juntamente com seu respectivo valor de R².

Tabela 15 – Parâmetros a, b e c para determinação do coeficiente N para ressalto hidráulico com baixo número de Froude

Probabilidade	a	b	c	R ²
99,9%	-0,021	0,148	3,629	0,037
0,1%	0,018	-0,239	-2,927	0,624

Estimativa de pressões extremas

Neste item, será apresentada uma comparação entre as duas metodologias de estimativa de pressões extremas analisadas até então, para os percentis de pressão 0,1% e 99,9%: o equacionamento introduzido por Teixeira (2003) e Hampe (2018); e o equacionamento aqui proposto. Os resultados para os percentis 1% e 99% foram aqui omitidos, devido a limitações de espaço, mas podem ser consultados nos apêndices de Steinke (2020).

Esta análise foi conduzida primeiramente para os dados coletados no modelo descrito neste artigo, com o fim de avaliar o ajuste proposto frente aos próprios dados utilizados para gerá-lo. Por fim, visando validar o ajuste aqui introduzido, o mesmo procedimento foi aplicado para os dados coletados no modelo da UHE São Manoel. Na aplicação da metodologia dos outros autores, foi empregada a equação da estimativa de pressão média de Teixeira (2003). Para a flutuação de pressão, utilizou-se a equação de Hampe (2018) para $0 \leq \Gamma < 2,4$ e a de Teixeira (2003) para $2,4 \leq \Gamma < 8,25$. Os coeficientes estatísticos N foram extraídos de Hampe (2018).

Ao mencionar a aplicação da metodologia presente neste artigo, refere-se à estimativa de percentis de pressões extremas utilizando: a equação de pressão média sugerida por Teixeira (2003), uma vez que a presente pesquisa não sugeriu um novo ajuste para este parâmetro; e as equações de flutuação de pressão e coeficiente estatístico N introduzidas no presente trabalho.

A Tabela 16 mostra os componentes utilizados na comparação mencionada e a fonte de cada equação.

Tabela 16 – Fonte das equações utilizadas na estimativa das pressões extremas

Estimativa de P0,1% e P99,9%	Outros autores	Ajuste proposto
Pressão média	Teixeira (2003)	Teixeira (2003)
Flutuação de pressão	Hampe (2018) para $0 \leq \Gamma < 2,4$ Teixeira (2003) para $2,4 \leq \Gamma \leq 8,25$	Presente artigo
Coeficiente estatístico N	Hampe (2018)	Presente artigo

➤ Aplicação para os dados do presente estudo: percentil P_{0,1%}

A Figura 78 e a Figura 79 mostram o desempenho da metodologia existente de estimativa do percentil de pressão P_{0,1%}, em comparação com os dados amostrais coletados no modelo do presente estudo. As curvas geradas por meio da previsão subestimam os valores de pressão para $\Gamma < 4$ e as superestimam para $\Gamma > 4$. Isso ocorre principalmente por causa do erro na estimativa de flutuação de pressão, mostrado na Figura 71. As leves barrigas que podem ser observadas nas curvas, em $\Gamma = 2,4$, são advindas da descontinuidade entre as curvas de Teixeira (2003) e Hampe (2018), conforme pode ser

observado também na Figura 71. Este efeito se repete nos gráficos das demais porcentagens analisadas. As equações aqui sugeridas possuem a vantagem de serem válidas para toda a extensão do ressalto, de forma a não haver descontinuidade de nenhum parâmetro ao longo da extensão do fenômeno. Além disso, na Figura 80 e na Figura 81, verifica-se uma melhor aderência de tais equações aos dados medidos em modelo físico, principalmente para os maiores números de Froude. A exceção é a região delimitada por $\Gamma < 1$, onde ainda há influência dos efeitos da curva de concordância nos escoamentos de menor número de Froude.

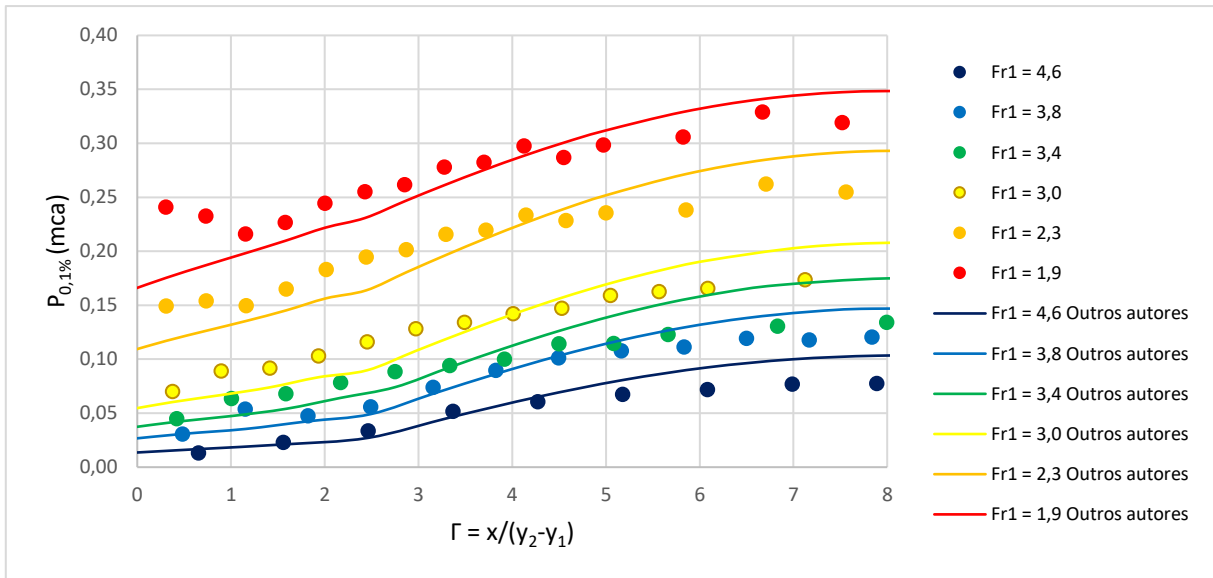


Figura 78 – Aplicação da metodologia de Teixeira (2003) e Hampe (2018) para os dados do presente estudo: percentil $P_{0,1\%}$

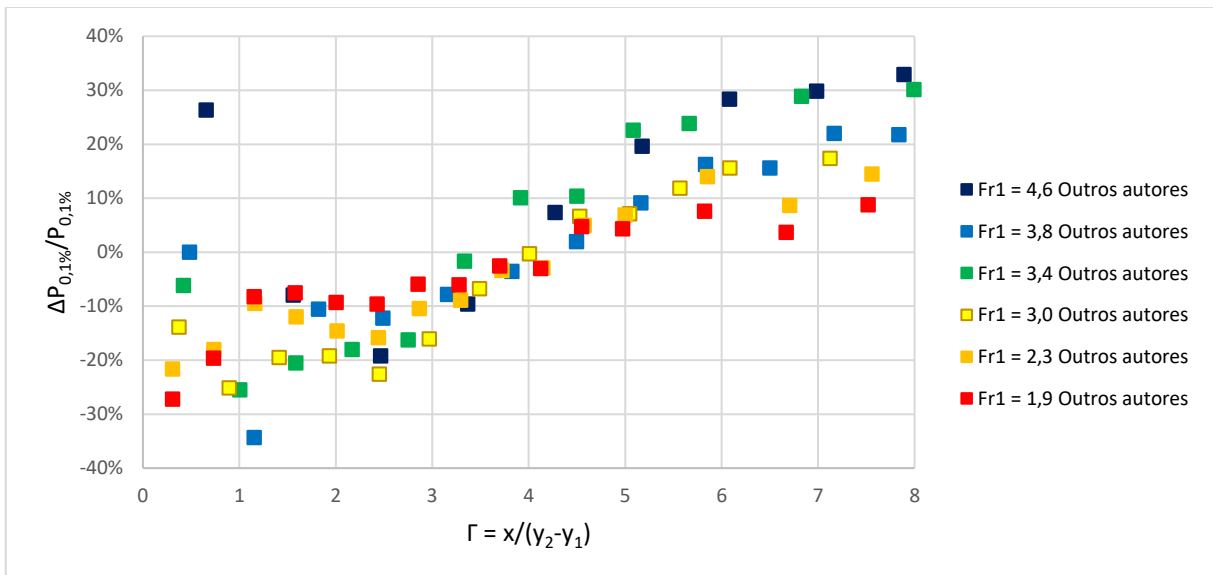


Figura 79 – Erro relativo entre a metodologia de Teixeira (2003) e Hampe (2018) e os dados do presente estudo: percentil $P_{0,1\%}$

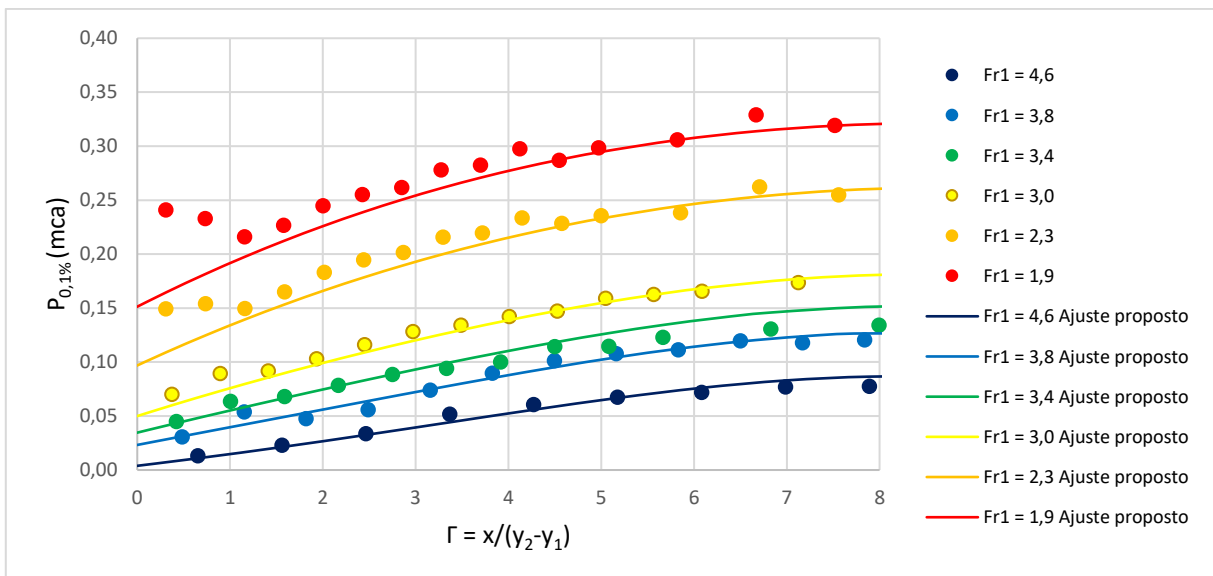


Figura 80 – Aplicação da metodologia proposta para os dados do presente estudo: percentil $P_{0,1\%}$

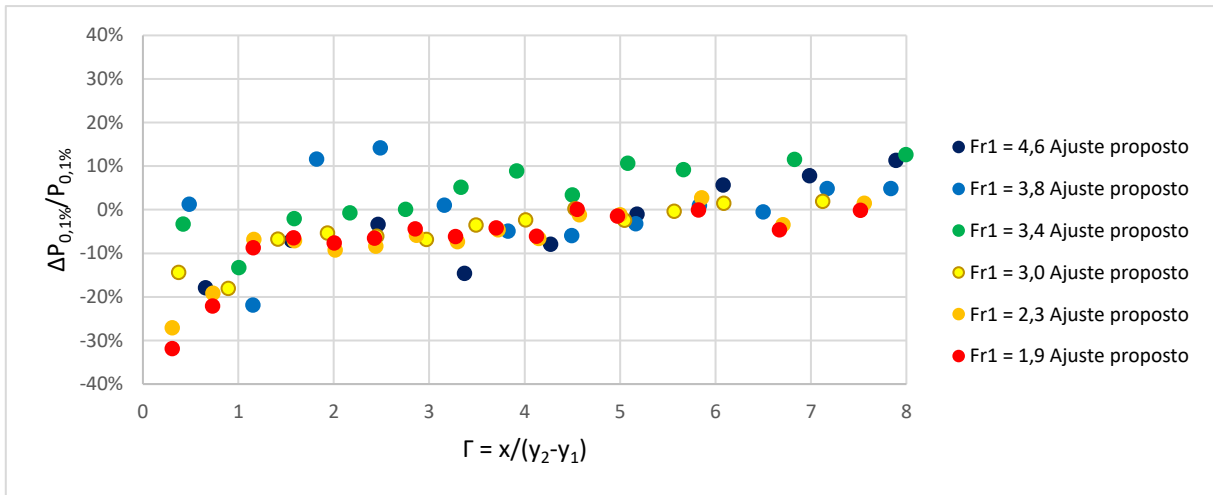


Figura 81 – Erro relativo entre a metodologia proposta e os dados do presente estudo: percentil $P_{0,1\%}$

➤ Aplicação para os dados do presente estudo: percentil $P_{99,9\%}$
 Para o percentil das pressões $P_{99,9\%}$, a Figura 82 e a Figura 83 permitem concluir que a metodologia combinada de Teixeira (2003) e Hampe (2018) subestima os dados amostrais em aproximadamente 10% para posições longitudinais adimensionalizadas acima de 3. Enquanto

isso, por meio do equacionamento proposto, se atingem valores mais próximos dos dados amostrais, como mostram a Figura 84 e a Figura 85. Novamente, verifica-se que nenhuma das metodologias é capaz de descrever o comportamento dos efeitos da curva de concordância.

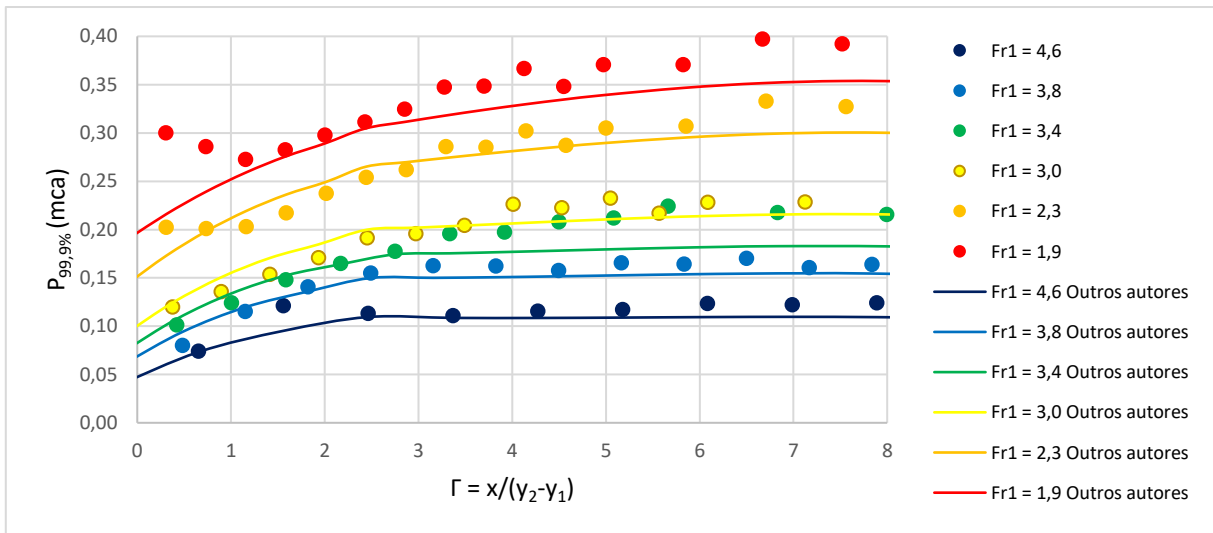


Figura 82 – Aplicação da metodologia de Teixeira (2003) e Hampe (2018) para os dados do presente estudo: percentil $P_{99,9\%}$

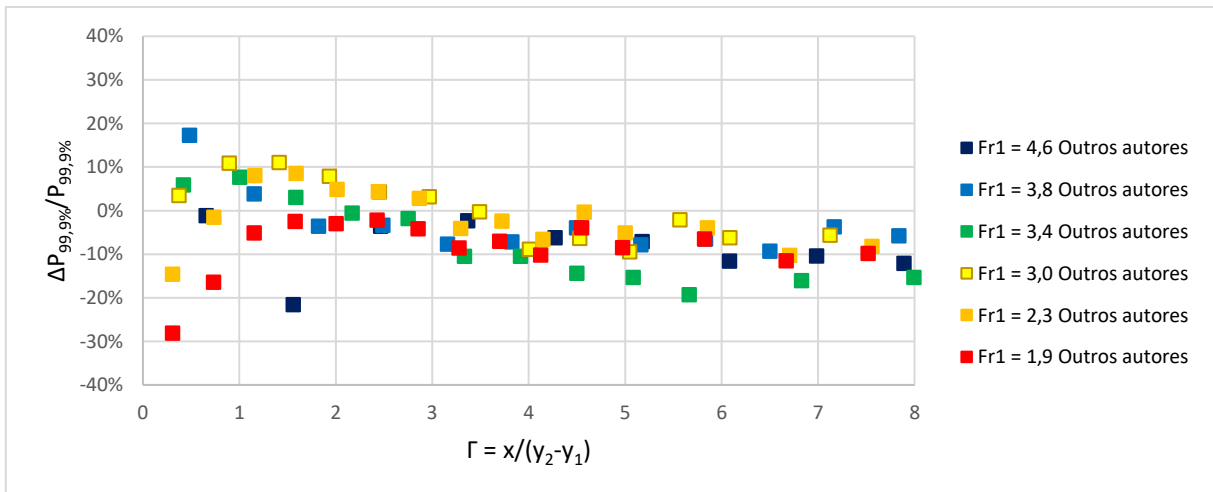


Figura 83 – Erro relativo entre a metodologia de Teixeira (2003) e Hampe (2018) e os dados do presente estudo: percentil $P_{99,9\%}$

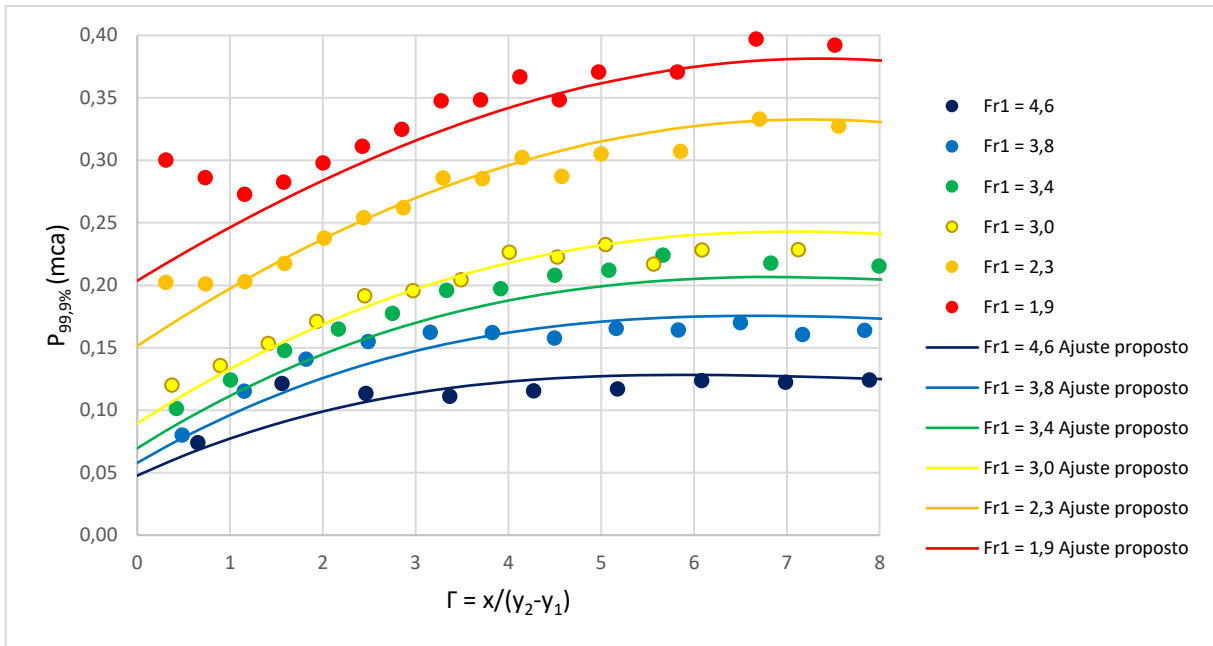


Figura 84 – Aplicação da metodologia proposta para os dados do presente estudo: percentil $P_{99,9\%}$

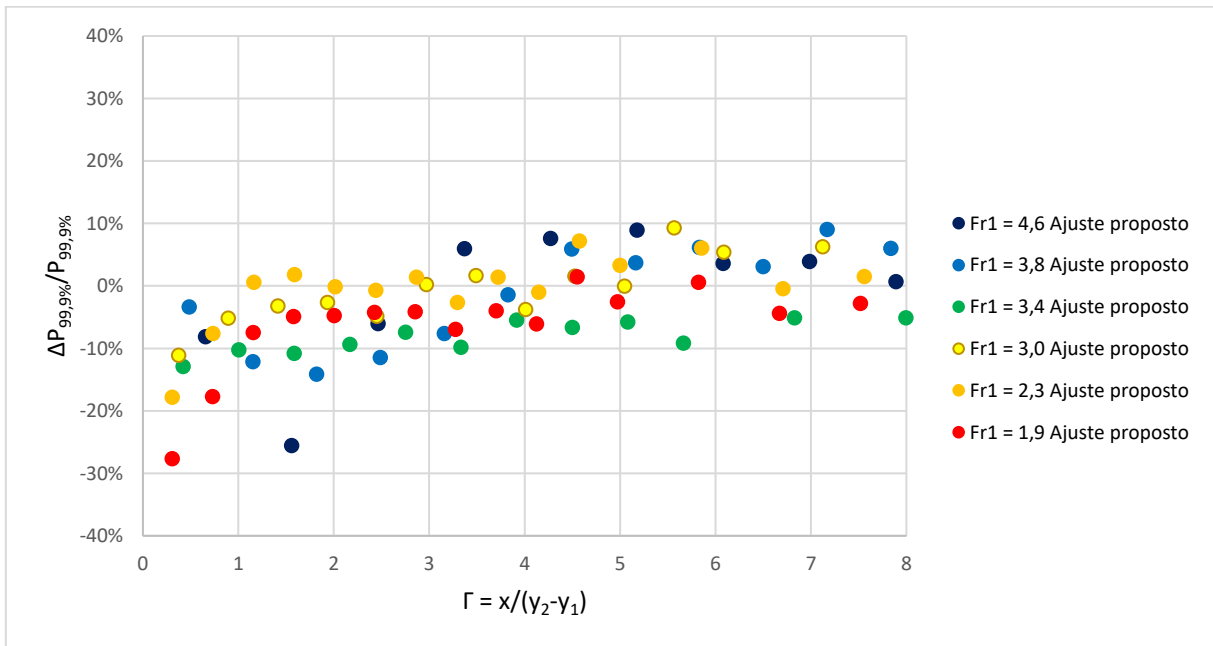


Figura 85 – Erro relativo entre a metodologia proposta e os dados do presente estudo: percentil $P_{99,9\%}$

➤ Aplicação para os dados da UHE São Manoel: percentil $P_{0,1\%}$
 Da análise da Figura 86, percebe-se que nenhuma metodologia de previsão de pressões extremas foi capaz de estimar adequadamente as pressões para $\Gamma < 2$. Atribui-se isso ao fato de que os ressaltos ensaiados no modelo da UHE São Manoel eram afogados. Conforme observado por Trierweiler (2006), ao impor-se um certo nível de submersão ao resalto, as pressões na região inicial da bacia aumentam. A Figura 87 apresenta os erros entre os dados amostrais e as metodologias avaliadas, em valores relativos (a) e absolutos (b). Os ajustes de Teixeira (2003) e Hampe (2018) descreveram bem os pontos amostrais

provenientes da quarta e quinta tomadas de pressão, enquanto o ajuste aqui proposto aderiu melhor aos pontos da quinta e sexta tomadas. Da análise dos erros absolutos em escala de protótipo, verifica-se que, em $\Gamma < 2$, as estimativas podem subestimar os valores amostrais em até 11 metros de coluna d'água aproximadamente, o que aponta para a relevância de se investigar, em estudos futuros, o efeito da submersão em ressaltos hidráulicos com baixo número de Froude. A partir de $\Gamma = 2$, as diferenças entre estimativa e amostra chegam a 2,7 metros, tanto para a metodologia combinada de Teixeira (2003) e Hampe (2018) quanto para a aqui introduzida.

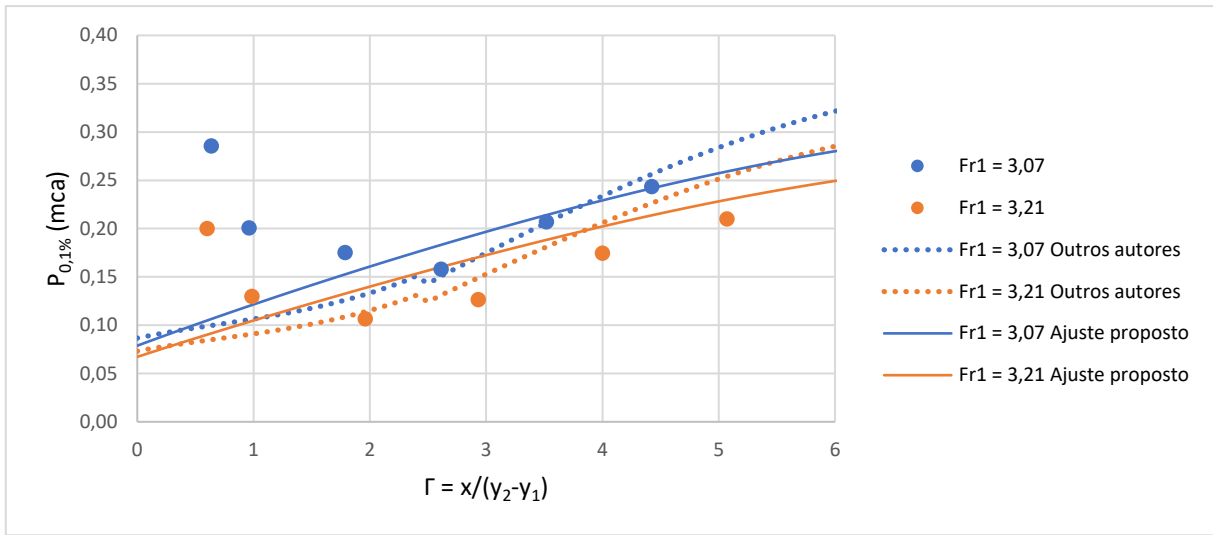
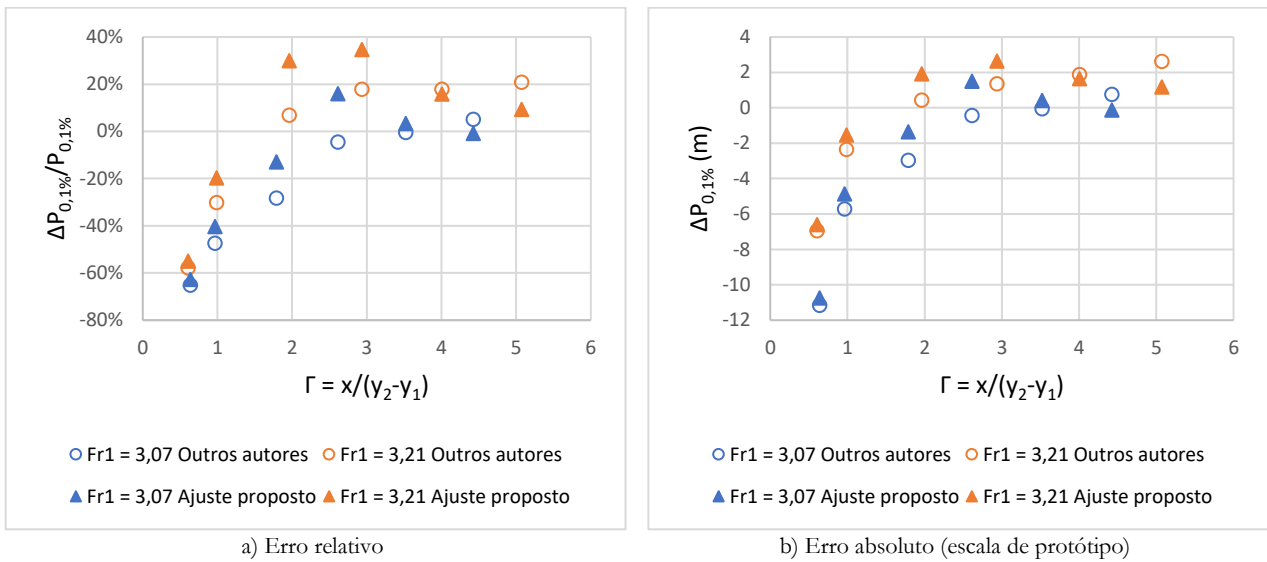


Figura 86 – Aplicação das metodologias para os dados da UHE São Manoel: percentil $P_{0,1\%}$



a) Erro relativo
b) Erro absoluto (escala de protótipo)

Figura 87 – Erros entre as metodologias e os dados do presente estudo: percentil $P_{0,1\%}$

➤ Aplicação para os dados de São Manoel: percentil $P_{99,9\%}$

Na aplicação das metodologias analisadas para as pressões com probabilidade de não-excedência de 99,9% (Figura 88 e Figura 89), mais uma vez os ajustes não descreveram adequadamente os pontos no início da bacia, devido ao grau de submergência imposto aos ressalto hidráulicos ensaiados no modelo da UHE São Manoel. A Figura 89 mostra que a diferença entre estimativa e amostra chega a 10 metros de coluna d'água para esta região. Ao se avançar em direção ao final do ressalto, a partir de $\Gamma > 3$, o ajuste aqui proposto demonstra um melhor desempenho em relação à metodologia combinada de Teixeira (2003) e Hampe (2018). Os erros absolutos para o ajuste proposto são quase nulos, enquanto a metodologia combinada de Teixeira (2003) e Hampe (2018) subestima os valores de pressão em até 2 metros de coluna d'água.

CONCLUSÃO

Neste estudo, foi introduzida uma metodologia para a estimativa de percentis extremos de pressão em bacias de dissipação por ressalto hidráulico com baixo número de Froude. Foram avaliados métodos já existentes para esta

estimativa, sendo um deles para ressalto hidráulicos estáveis e o outro para ressalto com baixo número de Froude (aplicável somente para um trecho do ressalto). Ao se avaliar a aplicabilidade das metodologias frente a dados coletados em um modelo físico bidimensional, verificou-se que boa parte delas não era aplicável para o tipo de ressalto em questão. Dessa maneira, foi sugerido um novo equacionamento, que teve sua capacidade preditiva testada contra dados de outro estudo.

Verificou-se que o ajuste de pressão média proposto por Teixeira (2003) é válido para ressalto hidráulicos com baixo número de Froude. Porém, atenção especial deve ser dada para a região inicial da bacia, onde há acréscimos no valor de pressão devido à curva de concordância. Recomenda-se que trabalhos futuros desenvolvam uma metodologia capaz de levar em conta estes efeitos.

Quanto ao desvio padrão, as equações de Teixeira (2003) e Hampe (2018) não foram capazes de descrever suficientemente bem as flutuações de pressão de um ressalto hidráulico com baixo número de Froude. Os gráficos apresentados permitiram constatar que este parâmetro é dependente do número de Froude. Sendo assim, foram introduzidas equações que considerassem este comportamento.

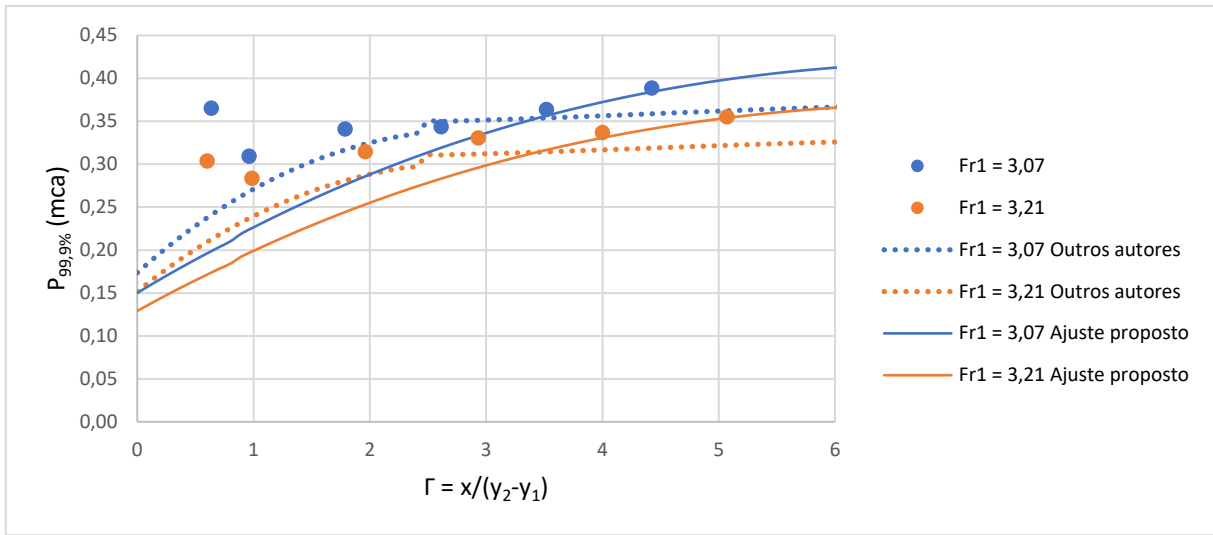


Figura 88 – Aplicação das metodologias para os dados da UHE São Manoel: percentil $P_{99,9\%}$

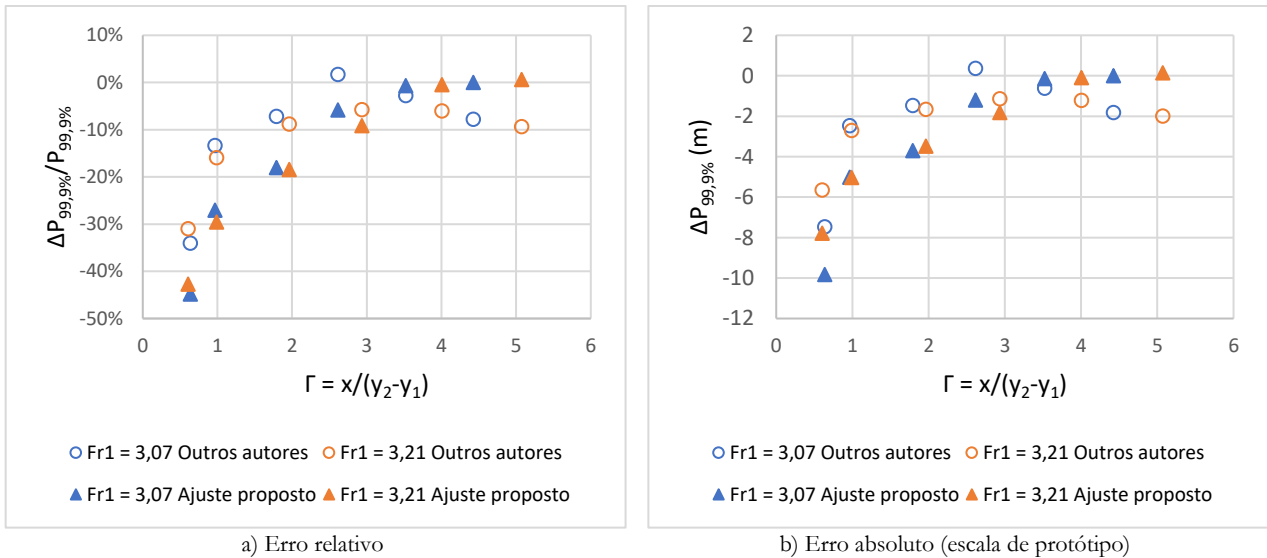


Figura 89 – Erros entre as metodologias e os dados do presente estudo: percentil $P_{99,9\%}$

Para as probabilidades entre 1% e 99%, os coeficientes N de Teixeira (2003) aderiram bem aos dados amostrados no presente estudo. Porém, o mesmo não aconteceu para os valores de Hampe (2018), derivados para probabilidades de não-excedência de 0,1% e 99,9%. Assim, foram sugeridos novos coeficientes para estas probabilidades.

No cômputo dos percentis extremos de pressão, os quais são considerados como resultantes da combinação dos parâmetros supracitados, foram comparadas as equações de Teixeira (2003) e Hampe (2018) com as novas equações introduzidas no presente artigo. Para a validação dos ajustes propostos, foram empregados os dados de Hampe (2018) do modelo da UHE São Manoel. Apesar de serem dados de ressalto afogados, para apenas duas vazões com números de Froude muito próximos entre si, eram os únicos de que se dispunha. Nenhuma das metodologias avaliadas aderiu bem aos dados amostrais para posições longitudinais menores que 2, devido ao grau de afogamento imposto aos ressalto. Para posições a jusante desse ponto, o equacionamento proposto demonstrou um melhor desempenho. Sugere-se que estudos futuros comparem a metodologia aqui apresentada com dados de ressalto com baixos números de Froude na condição livre, ou seja, não

afogados, coletados ao longo de toda a extensão do fenômeno.

REFERÊNCIAS

BOWERS, C. E.; TOSO, J. Karnafuli Project, Model Studies of Spillway Damage. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 114, n. 5, p. 469-483, 1988.

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 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. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2029**. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética - EPE, 2019.

- EPE. **Plano Nacional de Energia 2050: Considerações sobre a Expansão Hidrelétrica nos Estudos de Planejamento Energético de Longo Prazo.** Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética - EPE, 2018.
- HAGER, W. H. **Energy dissipators and hydraulic jump.** Zurich: Springer Science and Business Media, 1992.
- HAMPE, R. F. **Previsão de pressões extremas em bacias de dissipação por ressalto hidráulico com baixo número de Froude.** Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, 2018.
- LOPARDO, R. A. **Notas sobre fluctuaciones macroturbulentas de presión, medición, análisis y aplicación al resalto hidráulico.** São Paulo: Curso n. 1: Turbulencia, cavitación y aireación de fenomenos hidráulicos, 1986.
- MARQUES, M. G.; ALMEIDA, F. M.; ENDRES, L. A. M. **Adimensionalização de pressões médias em bacias de dissipação por ressalto hidráulico.** In: XIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. Belo Horizonte: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1999.
- MARQUES, M. G.; DRAPEAU, J.; VERRETTE, J.-L. Flutuação de Pressão em um Ressalto Hidráulico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 2, n. 2, p. 45–52, 1997.
- MARQUES, M. G.; HAMPE, R. F.; SOUZA, P. E. A.; TEIXEIRA, E. D. **Previsão de pressões extremas mínimas em bacia de dissipação com baixo número de Froude.** In: XXXI SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS. Belo Horizonte: Comitê Brasileiro de Barragens, 2017.
- MCPHERSON, B. L.; LESLEIGHTER, E. J.; SCRIVEN, D. C.; BOLLAERT, E. F. R. **Physical and Computational Scour Modelling System Analysis-Case Study for Paradise Dam, Queensland.** In: AUSTRALIAN NATIONAL COMMITTEE ON LARGE DAMS CONFERENCE: contemporary challenges for dams. Hobart, Tasmânia: 2015.
- MEES, A. A. A. **Caracterização das solicitações hidrodinâmicas em bacias de dissipação por ressalto hidráulico com baixo número de Froude.** Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, 2008.
- PETERKA, A. J. **Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators.** Denver: USBR, 1984.
- PINHEIRO, A. A. N. **Acções hidrodinâmicas em soleiras de bacia de dissipação de energia por ressalto hidráulico.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa, 1995.
- SOUZA, P. E. DE A. **Bacias de dissipação por ressalto hidráulico com baixo número de Froude - Análise das pressões junto ao fundo da estrutura.** Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, 2012.
- STEINKE JR, R.. **Caracterização das pressões em bacias de dissipação por ressalto hidráulico livre com baixo número de Froude.** Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, 2020 (a ser publicado).
- TAMADA, K. **Dissipadores de Energia com Baixo Número de Froude: Estudo Experimental.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – São Paulo: Escola Politécnica da USP, 1989.
- TEIXEIRA, E. D. **Efeito de escala na previsão dos valores extremos de pressão junto ao fundo em bacias de dissipação por ressalto hidráulico.** Tese (Doutorado em Engenharia) – Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, 2008.
- 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.
- TRIERWEILER NETO, E. F. **Avaliação do campo de pressões em ressalto hidráulico formado a jusante de uma comporta com diferentes graus de submergência.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, 2006.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O objetivo principal desta dissertação foi investigar o comportamento das pressões que ocorrem junto ao fundo de bacias de dissipação por ressalto hidráulico com baixo número de Froude, comparando estes dados com os de ressaltos estáveis e verificando a aplicabilidade de metodologias de estimativa de pressões extremas. Assim, ao longo deste trabalho, foram apresentados dois principais estudos (Capítulos 4 e 5) que intentaram responder às questões científicas levantadas a partir da motivação da dissertação. De forma breve, são apresentadas a seguir as principais conclusões alcançadas por meio do desenvolvimento deste trabalho.

As pressões que ocorrem junto ao fundo de bacias de dissipação por ressalto hidráulico com baixo número de Froude são diferentes daquelas provenientes de ressaltos estáveis, para a maior parte dos parâmetros estatísticos adimensionais avaliados. As diferenças foram justificadas, em geral, pela formação de uma camada monofásica de água sob o escoamento bifásico, chamada de colchão de água. Atribuiu-se a esta camada a atenuação de efeitos verificada em alguns parâmetros.

Quanto à pressão média, constatou-se que os valores provenientes de ressaltos fracos e oscilantes são muito semelhantes aos de ressaltos estáveis. Algumas discrepâncias observadas a montante da posição longitudinal 1 se devem aos efeitos causados pela curva de concordância.

A flutuação de pressão de ressaltos com baixo número de Froude foi o coeficiente que apresentou maior diferença em seu comportamento, em relação a ressaltos com $Fr_1 > 4,5$. Sugere-se que o colchão de água sob o ressalto amortecça as oscilações de pressão geradas pelos seus efeitos hidrodinâmicos, de forma que o desvio padrão resulte praticamente constante ao longo de toda a bacia. O grau de desenvolvimento do escoamento incidente também exerce influência sobre este parâmetro, uma vez que escoamentos completamente desenvolvidos na entrada do ressalto são capazes de acarretar em níveis maiores de turbulência ao longo do fenômeno. Além disso, verificou-se que a dissipação de energia ao longo do ressalto não é um bom parâmetro para a adimensionalização desta estatística.

Verificou-se um efeito do número de Froude nos coeficientes de assimetria e curtose. Para números de Froude próximos de 4,5, os valores do presente estudo se assemelharam a pontos obtidos em ressaltos estáveis. Porém para as maiores

vazões, o comportamento destes coeficientes resultou semelhante ao de outros pesquisadores que também ensaiaram ressaltos com $Fr_1 < 4,5$.

Nos percentis extremos de pressão, mais uma vez o comportamento dos dados foi justificado por meio da camada monofásica de água sob o ressalto. Em geral, as pressões extremas de ressaltos com baixo número de Froude não atingem valores tão elevados (em módulo) quanto as pressões de ressaltos estáveis. Os coeficientes estatísticos N obtidos apresentaram comportamento semelhante aos pontos de outros estudos que ensaiaram ressaltos $Fr_1 < 4,5$, porém inferiores aos valores de ressaltos estáveis.

Foi testada a aplicabilidade de metodologias já existentes para a estimativa de pressões extremas junto ao fundo de bacias de dissipação, e verificou-se a necessidade da introdução de novas equações que possam ser utilizadas em ressaltos hidráulicos com baixo número de Froude. Quanto à pressão média, a equação de Teixeira (2003) demonstrou ser capaz de descrever o comportamento do ressalto com baixo número de Froude, à exceção da região a montante da posição longitudinal 1, onde atuam os efeitos da curva de concordância. Como estes efeitos acarretam em diferenças significativas na estimativa da pressão extrema, sugere-se que futuros trabalhos proponham metodologias de previsão que abranjam esse comportamento.

Para as flutuações de pressão, foi introduzido um equacionamento em função não só da posição longitudinal adimensionalizada, mas também do número de Froude do escoamento. Na validação do ajuste proposto, verificou-se que as equações deste estudo resultam em valores mais próximos do que as equações de outros autores, com exceção da região limitada por $1 \leq \Gamma \leq 3$.

Quanto ao coeficiente estatístico N , as equações e tabelas de Teixeira (2003) e Hampe (2018) seguiram o comportamento dos dados analisados para todas as probabilidades, com exceção de 0,1% e 99,9%. Para estas porcentagens, foram propostas novas equações, aplicáveis em ressaltos hidráulicos com baixo número de Froude.

No cálculo das pressões extremas, que são expressas como uma combinação linear dos fatores supracitados, as equações deste trabalho demonstraram uma maior aderência aos dados amostrais, em relação aos ajustes de Teixeira (2003) e Hampe (2018), principalmente para $\Gamma > 3$. A comparação dos ajustes para posições longitudinais menores que 3 é inconclusiva, porque os dados utilizados para a

validação eram de ressaltos afogados. Sugere-se que trabalhos futuros apliquem a metodologia proposta em dados de ressaltos livres.

Por fim, recomenda-se também que os próximos estudos realizem ensaios com comportas, em diferentes graus de abertura, a fim de se analisar a influência das características de montante no ressalto. A relevância desta sugestão reside no fato de a situação mais frequente em barragens ser a de controle com comportas. Além da variação na presença ou não de comporta e no grau de abertura dela, a coleta de dados no sentido transversal da bacia permitiria uma caracterização mais abrangente dos esforços, uma vez que, com a presença de pilares, ressalto hidráulico não pode mais ser considerado bidimensional. Sugere-se, ainda, que pesquisas futuras analisem a autocorrelação da série de pressões de cada tomada, bem como a correlação cruzada entre elas e a função de densidade espectral.

A partir dos resultados aqui apresentados, combinados com resultados provenientes de pesquisas futuras, recomenda-se que seja feita a proposição de uma nova classificação do ressalto hidráulico quanto ao número de Froude do escoamento incidente, diferente da classificação clássica (que se baseou em uma análise visual, e não física). Trabalhos futuros também revelarão se as curvas e equações que aqui foram sugeridas são adequadas para a descrição dos parâmetros pertinentes ao ressalto hidráulico com baixo número de Froude, ou se metodologias mais simples poderiam ter sido adotadas (descrever as flutuações de pressão por meio de equações do primeiro grau, ou então adotar a distribuição gaussiana para o coeficiente estatístico N).

Esta pesquisa apoiou-se na análise de dados de pressão instantânea coletados em modelos físicos de bacias de dissipação por ressaltos hidráulicos. De forma generalizada, concluiu-se que muito do que se conhece sobre ressaltos estáveis não pode ser aplicado em ressaltos hidráulicos com baixo número de Froude. Assim, espera-se que as lacunas do conhecimento preenchidas por este trabalho contribuam para o avanço do dimensionamento seguro e econômico de bacias de dissipação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDUL KHADER, M. H.; ELANGO, K. Turbulent pressure field beneath a hydraulic jump. **Journal of Hydraulic Research**, v. 12, n. 4, p. 469–489, 1974.
- AKBARI, M. E.; MITTAL, M. K.; PANDE, P. K. **Pressure fluctuations on the floor of free and forced hydraulic jumps**. . In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE HYDRAULIC MODELLING OF CIVIL ENGINEERING STRUCTURES. Coventry: 1982
- BÉLANGER, J.-B. **Essai sur la solution numérique de quelques problèmes relatifs au mouvement permanent des eaux courantes**. Paris: Carilian-Goeury, 1828.
- BENDAT, J. S.; PIERSOL, A. G. **Random data**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2010.
- BHAGAT, R. K. et al. On the origin of the circular hydraulic jump in a thin liquid film. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 851, 2018.
- BHUTTO, H. B. G.; MIRANI, S. N.; CHANDIO, S. N. Characteristics of Free Hydraulic Jump in Rectangular Channel. **Mehran University Research Journal of Engineering and Technology**, v. 8, n. 2, p. 34–44, 1989.
- BIDONE, G. **Expériences sur le remou et sur la propagation des ondes**. Turin: Accademia delle Scienze di Torino, 1820.
- BOWERS, C. E.; TOSO, J. Karnafuli Project, Model Studies of Spillway Damage. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 114, n. 5, p. 469–483, 1988.
- BOWERS, C. E.; TSAI, F. Y. Fluctuating pressures in spillway stilling basins. **Journal of the Hydraulics Division**, v. 95, n. 6, p. 2071–2080, 1969.
- CHANSON, H. **Air bubble entrainment in hydraulic jumps: similitude and scale effects**: CH57/05. [s.l.] University of Queensland, 2006.
- CHEN, J.-Y.; LIAO, Y.-Y.; LIU, S.-I. Energy dissipation of hydraulic jump in gradually expanding channel after free overfall. **Journal of the Chinese Institute of Engineers**, v. 36, n. 4, p. 452–457, 2013.
- CHOW, V. T. **Open Channel Hydraulics**. New York: McGraw-Hill, 1959.
- 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.
- ELDER, R. A. **Scaling is vital to the practicing engineer**. (H. Kobus, Ed.). In: SYMPOSIUM ON SCALE EFFECTS IN MODELLING HYDRAULIC STRUCTURES. Esslingen am Neckar: 1984
- ELEVATORSKI, E. A. **Hydraulic Energy Dissipators**. New York: McGraw-Hill, 1959.

ENDRES, L. A. M. **Contribuição ao desenvolvimento de um sistema para 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. **Balanco Energético Nacional 2017.** Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética - EPE, 2017.

EPE. **Plano Nacional de Energia 2050.** Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética - EPE, 2018.

EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2029.** Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética - EPE, 2019.

FIOROTTO, V.; RINALDO, A. Turbulent pressure fluctuations under hydraulic jumps. **Journal of Hydraulic Research**, v. 30, n. 4, p. 499–520, 1992.

GARG, S. P.; SHARMA, H. R. Efficiency of hydraulic jump. **Journal of the Hydraulics Division**, v. 97, n. 3, p. 409–420, 1971.

GOLDSTEIN, R. J. (ED.). **Fluid mechanics measurements.** Washington: Taylor and Francis, 1996.

HAGER, W. H. B-jump in sloping channel. **Journal of Hydraulic Research**, v. 26, n. 5, p. 539–558, 1988.

HAGER, W. H. **Energy dissipators and hydraulic jump.** Zurich: Springer Science and Business Media, 1992.

HAGER, W. H.; BREMEN, R.; KAWAGOSHI, N. Classical hydraulic jump: length of roller. **Journal of Hydraulic Research**, v. 28, n. 5, p. 591–605, 1990.

HAMPE, R. F. **Previsão de pressões extremas em bacias de dissipação por ressalto hidráulico com baixo número de Froude.** Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos)—Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, 2018.

KING, D. L. **Analysis of random pressure fluctuations in stilling basins.** . In: XII CONGRESS OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR HYDRAULIC RESEARCH. Fort Collins: 1967

KOBUS, H. **Hydraulic Modelling.** Berlin: Paul Parey, 1980.

LOPARDO, R. A. **Metodología de estimación de presiones instantâneas en cuencos amortiguadores.** Anales de la Universidad de Chile. **Anais...**1985

LOPARDO, R. A. **Notas sobre fluctuaciones macroturbulentas de presión, medición, análisis y aplicación al resalto hidráulico.** São Paulo: Curso n. 1: Turbulencia, cavitación y aireación de fenomenos hidráulicos, 1986.

LOPARDO, R. A. **Contribution of hydraulic models on the safe design of large dams stilling basins.** . In: IAHR SYMPOSIUM ON HYDRAULIC AND

HYDROLOGICAL ASPECTS OF RELIABILITY AND SAFETY ASSESSMENT OF HYDRAULIC STRUCTURES. St. Petersburg: International Association for Hydro-Environment Engineering and Research, 2002

LOPARDO, R. A. Cavitação en flujos macroturbulentos. **Matematicae Notae**, v. 2, p. 19–40, 2003.

LOPARDO, R. A. et al. **Una aproximación por turbulencia remanente de la longitud del resalto sumergido**. . In: XXI CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA. São Pedro: International Association for Hydro-Environment Engineering and Research, 2004

LOPARDO, R. A. **Presiones mínimas y velocidades máximas instantáneas en un dissipador a resalto hidráulico oscilante**. . In: XXIV CONGRESO NACIONAL DEL AGUA. San Juan: 2013

MARQUES, M. G. **Nouvelle approche pour le dimensionnement des dissipateurs à auge**. Tese (Doutorado)—Quebec: Faculte des sciences et génie de La Université Laval, 1995.

MARQUES, M. G. et al. **Perda de carga no interior de um ressalto hidráulico a jusante de vertedouro**. . In: XVIII CONGRESSO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA. Oaxaca: 1998

MARQUES, M. G. et al. **Previsão de pressões extremas mínimas em bacia de dissipação com baixo número de Froude**. . In: XXXI SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS. Belo Horizonte: Comitê Brasileiro de Barragens, 2017

MARQUES, M. G.; ALMEIDA, F. M.; ENDRES, L. A. M. **Adimensionalização de pressões médias em bacias de dissipação por ressalto hidráulico**. . In: XIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. Belo Horizonte: 1999

MARQUES, M. G.; DRAPEAU, J.; VERRETTE, J.-L. Flutuação de Pressão em um Ressalto Hidráulico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 2, n. 2, p. 45–52, 1997.

MCLELLAN, G. **Chute spillway sub-drainage and anchorage**. . In: XII INTERNATIONAL CONGRESS ON LARGE DAMS. Ciudad de México: 1976

MCPHERSON, B. L. et al. **Physical and Computational Scour Modelling System Analysis- Case Study for Paradise Dam, Queensland**. . In: AUSTRALIAN NATIONAL COMMITTEE ON LARGE DAMS CONFERENCE. Hobart: 2015

MEES, A. A. A. **Caracterização das solicitações hidrodinâmicas em bacias de dissipação por ressalto hidráulico com baixo número de Froude**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos)—Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, 2008.

Miniaturizing America's Tallest Dam. Disponível em: <<https://phys.org/news/2017-06-miniaturizing-america-tallest.html>>. Acesso em: 30 jan. 2019.

NOVÁK, P. **Scaling factors and scale effects in modelling hydraulic structures.** (H. Kobus, Ed.). In: SYMPOSIUM ON SCALE EFFECTS IN MODELLING HYDRAULIC STRUCTURES. Esslingen am Neckar: 1984

NOVÁK, P. et al. **Hydraulic modelling - an introduction.** Londres: Spon, 2010.

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)—Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, 2016.

PALERMO, M.; PAGLIARA, S. Semi-theoretical approach for energy dissipation estimation at hydraulic jumps in rough sloped channels. **Journal of Hydraulic Research**, v. 56, n. 6, p. 786–795, 2018.

PETERKA, A. J. **Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators.** Denver: USBR, 1984.

PINHEIRO, A. N. **Acções hidrodinâmicas em soleiras de bacia de dissipação de energia por ressalto hidráulico.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil)—Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa, 1995.

PINHEIRO, A. N.; QUINTELA, A. C.; RAMOS, C. M. **Hydrodynamic forces on slabs of hydraulic jump stilling basins.** . In: V INTERNATIONAL CONFERENCE ON DAM ENGINEERING. Lisboa: 2007

PINTO, N. L. DE S. **Model evaluation of aerators in shooting flow.** (H. Kobus, Ed.). In: SYMPOSIUM ON SCALE EFFECTS IN MODELLING HYDRAULIC STRUCTURES. Esslingen am Neckar: 1984

PRODOVSKY, A. M. **General principles of approximate hydraulic modelling.** (H. Kobus, Ed.). In: SYMPOSIUM ON SCALE EFFECTS IN MODELLING HYDRAULIC STRUCTURES. Esslingen am Neckar: 1984

Quantidade de água. Disponível em: <<http://www3.ana.gov.br/portal/ANA/aguas-no-brasil/panorama-das-aguas/quantidade-da-agua>>. Acesso em: 31 jan. 2019.

RAJARATNAM, N. The Hydraulic Jump as a Wall Jet. **Journal of the Hydraulics Division**, v. 91, n. 5, p. 107–132, 1965.

RAJARATNAM, N. Hydraulic Jumps. In: CHOW, V. T. (Ed.). . **Advances in Hydroscience.** New York: Elsevier, 1967. v. 4p. 197–280.

RAJARATNAM, N.; SUBRAMANYA, K. Profile of the hydraulic jump. **Journal of the Hydraulics Division**, v. 94, n. 3, p. 663–674, 1968.

RESCH, F. J.; LEUTHEUSSER, H. J. Mesures de turbulence dans le ressaut hydraulique. **La Houille Blanche**, n. 1, p. 17–31, 1971.

ROUSE, H.; SIAO, T. T.; NAGARATNAM, S. Turbulence characteristics of the hydraulic jump. **Transactions of the American Society of Civil Engineers**, v. 124, n. 1, p. 926–950, 1959.

SOUZA, P. E. DE A. **Bacias de dissipação por ressalto hidráulico com baixo número de Froude - Análise das pressões junto ao fundo da estrutura.** Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos)—Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, 2012.

SOUZA, P. E. DE A. et al. **Flutuação de pressão em um ressalto hidráulico de baixa queda e baixo número de Froude a jusante de um vertedouro.** . In: XXX SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS. Foz do Iguaçu: Comitê Brasileiro de Barragens, 2015

TAMADA, K. **Dissipadores de Energia com Baixo Número de Froude: Estudo Experimental.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil)—São Paulo: Escola Politécnica da USP, 1989.

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.

TEIXEIRA, E. D. **Efeito de escala na previsão dos valores extremos de pressão junto ao fundo em bacias de dissipação por ressalto hidráulico.** Tese (Doutorado em Engenharia)—Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, 2008.

TOSO, J. W.; BOWERS, E. Extreme Pressures in Hydraulic-Jump Stilling Basins. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 114, n. 8, p. 829–843, 1988.

TRIERWEILER NETO, E. F. **Avaliação do campo de pressões em ressalto hidráulico formado a jusante de uma comporta com diferentes graus de submergência.** Dissertação (Mestrado em Engenharia)—Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, 2006.

TROPEA, C.; YARIN, A. L.; FOSS, J. F. (EDS.). **Handbook of experimental fluid mechanics.** Zurich: Springer Science and Business Media, 2007.

TUNG, Y.-K.; MAYS, L. W. Optimal design of stilling basins for overflow spillways. **Journal of the Hydraulics Division**, v. 108, n. 10, p. 1163–1178, 1982.

USBR. **Gravity Dams.** Denver: USBR, 1976.

USBR. **Design of Small Dams.** Washington: USBR, 1987.

VASILIEV, O. F.; BUKREYEV, V. I. **Statistical characteristics of pressure fluctuations in the region of hydraulic jump.** . In: XII CONGRESS OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR HYDRAULIC RESEARCH. Fort Collins: 1967

VISCHER, D. **Modelling energy dissipation with hydraulic structures: a phenomenon with insignificant scale effects?** (H. Kobus, Ed.). In: SYMPOSIUM ON SCALE EFFECTS IN MODELLING HYDRAULIC STRUCTURES. Esslingen am Neckar: 1984

WIEST, R. A. **Avaliação do campo de pressões em ressalto hidráulico formado a jusante de um vertedouro com diferentes graus de submergência.** Dissertação

(Mestrado em Engenharia)—Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, 2008.

ZANONI, E. C. et al. **Análise das pressões extremas atuantes em bacias de dissipação por ressalto hidráulico com baixo Froude.** . In: XXI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. Brasília: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2015

APÊNDICE A – DIMENSIONAMENTO DAS LAJES DE UMA BACIA DE DISSIPACÃO: ESTUDO DE CASO

A.1 INTRODUÇÃO

Diversos trabalhos vêm investigando as pressões hidrodinâmicas causadas pelo ressalto hidráulico sobre bacias de dissipação. Podem-se citar: Pinheiro (1995), Marques *et al.* (1997), Teixeira (2003), Trierweiler (2006), Wiest (2008) e Teixeira (2008). Tratando-se mais especificamente de ressaltos hidráulicos com baixo número de Froude, verifica-se que as pesquisas existentes são bem menores em quantidade. A seguir, são descritos brevemente três exemplos.

Mees (2008) investigou o campo de forças atuantes sobre uma bacia de dissipação por ressaltos hidráulicos com baixo número de Froude, propondo, a partir de dados coletados em modelos físicos, uma metodologia para o dimensionamento das lajes da estrutura.

Souza (2012), em um modelo físico, também coletou valores instantâneos de pressão em ressaltos hidráulicos com baixo número de Froude. Por meio de gráficos e parâmetros estatísticos adimensionais, o autor investigou se as pressões deste tipo de ressalto seguem um mesmo comportamento que as pressões de um ressalto hidráulico dito estável. Devido à limitada extensão em que foram coletados os dados, não abrangendo o comprimento total do ressalto, seus resultados não foram suficientemente conclusivos.

Hampe (2018) verificou que os valores de flutuação de pressão de ressaltos hidráulicos com baixo número de Froude não apresentam a mesma tendência de ressaltos ditos estáveis. A autora sugeriu três equações que podem descrever o comportamento deste parâmetro para a região inicial da bacia. Assim como para Souza (2012), não foram coletados dados ao longo da extensão completa do ressalto.

Dentre os trabalhos mencionados, poucos se preocupam com a aplicação das metodologias e de seus resultados no dimensionamento real de uma bacia de dissipação. Após revisão da literatura, verificou-se que são raras as publicações que discorrem sobre pormenores de projetos de bacias de dissipação. A seguir, mencionam-se alguns destes trabalhos, bem como recomendações tanto executivas quanto de projeto para esta estrutura.

McLellan (1976) aborda o dimensionamento de lajes da calha do vertedouro, e dá detalhes de projeto que abrangem a ancoragem e a drenagem presentes sob esta estrutura. Algumas de suas recomendações podem ser aplicadas a bacias de dissipação.

O USBR (1987) contém diversas recomendações construtivas e de projeto sobre lajes articuladas de canais a superfície livre. Embora as especificações se refiram de forma geral a lajes de calhas de vertedouros, algumas delas são aplicáveis no dimensionamento de bacias de dissipação.

De acordo com o manual (USBR, 1987), o propósito das lajes em estruturas hidráulicas é, principalmente, formar uma superfície impermeável de proteção sobre o canal que prevenirá danos à fundação. Durante o vertimento, a laje pode estar sujeita a diversas forças: hidrostáticas, devido ao peso da água; hidrodinâmicas, causadas pelo impacto do escoamento; forças de atrito; forças de arrancamento; forças de pressão causadas por infiltração pelas juntas ou fissuras. Avaliar todas as forças envolvidas e projetar lajes suficientemente pesadas para resistir a elas é muitas vezes inviável, o que faz com que, frequentemente, a espessura destas estruturas seja selecionada empiricamente, e drenos, ancoragens e “cut-offs” sejam especificados para estabilizar a peça.

Quando a bacia de dissipação é escavada em rocha, as lajes podem ser concretadas diretamente sobre a superfície escavada, com barras de ancoragem amarrando a laje à fundação. Já quando a estrutura é escavada em solo, as lajes podem ser concretadas diretamente sobre a superfície ou então sobre uma camada permeável intermediária. A escolha depende da permeabilidade do solo e da sua heterogeneidade. Uma camada permeável de brita é normalmente indicada para solos impermeáveis nos quais as infiltrações não são capazes de serem drenadas (USBR, 1987).

Ainda segundo o manual, é recomendável que as juntas de dilatação entre as lajes da bacia de dissipação sejam dotadas de mecanismos de vedação, a fim de evitar que as pressões hidrodinâmicas do ressalto causem diferenciais de pressão sob as lajes. O espaçamento entre as juntas determina o comprimento de cada elemento de laje, normalmente entre 7,5 e 15 metros de comprimento (USBR, 1987).

Fiorotto e Rinaldo (1992) desenvolveram critérios de projeto para as lajes de bacias de dissipação. O equacionamento proposto pelos autores, desenvolvido em função de diversos parâmetros, pode ser utilizado para a determinação da espessura

dos elementos (sem levar em conta uma possível ancoragem dos mesmos). O estudo demonstrou que um dimensionamento seguro destas estruturas passa pela distribuição espacial de pressões instantâneas sob o ressalto.

Assim como os trabalhos anteriores, Hager (1992) também considerou importante a execução de uma camada permeável sob a laje da bacia propriamente dita. Segundo o autor, duas condições extremas devem ser consideradas para a determinação das pressões de arrancamento das lajes: 1) extravasamento correspondente à vazão de projeto; 2) reservatório completamente cheio, bacia vazia e nível de jusante correspondente à vazão turbinada. As forças hidrodinâmicas de arrancamento são causadas ou pelas diferenças de pressão entre as faces inferiores e superiores das lajes ou então pelas pressões negativas causadas pela turbulência do ressalto, que podem causar sucção. Segundo o autor, normalmente a espessura das lajes decresce em direção ao fim da bacia de dissipação.

Mees (2008) também considerou as lajes de uma bacia de dissipação como elementos separados por juntas de dilatação (nas quais são utilizadas as “*water-stop seals*”). Estes elementos são dispostos sobre uma camada permeável, através da qual se propagam as chamadas subpressões (Figura 90). O autor recomendou que, nos cálculos de subpressão, se considere que os mecanismos de vedação sofreram falhas, ou seja, as pressões advindas do ressalto podem livremente se propagar através das juntas de dilatação até a camada permeável sob as lajes. Algumas premissas foram adotadas na propagação das subpressões:

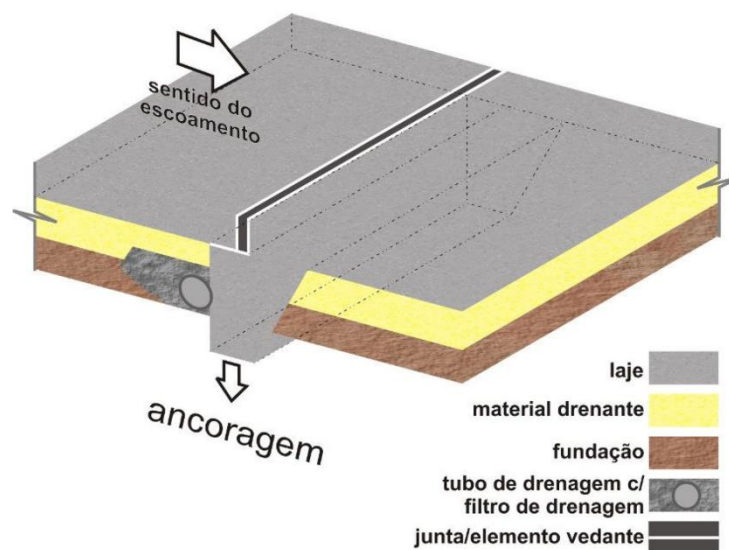


Figura 90 – Esquema construtivo das lajes de uma bacia de dissipação (MEES, 2008)

- a transmissão das flutuações de pressão ocorre de forma instantânea através das juntas e fissuras;
- as pressões propagadas para a camada permeável atuam sobre a face inferior do elemento estrutural;
- as subpressões são as médias instantâneas espaciais sobre o comprimento da junta ou fissura.

A partir da literatura consultada, entende-se que não há um consenso quanto à especificação da espessura das lajes de uma bacia de dissipação e quanto à necessidade ou não de ancoragem e sua quantidade, sendo o assunto pouco abordado no meio científico. Alguns trabalhos trazem recomendações construtivas, falando vagamente sobre a espessura das lajes, enquanto outros introduzem cálculos pouco práticos. No presente estudo de caso, serão apresentados alguns possíveis cenários de equilíbrio estático para o dimensionamento desta estrutura.

A.2 METODOLOGIA

Como forma de determinar a espessura de lajes em diversas posições ao longo de uma bacia de dissipação, foram propostos alguns cenários de carga descritos mais adiante. Em cada um destes cenários, foi avaliada exclusivamente a resultante das forças verticais, sem se preocupar com os somatórios de momentos sobre as lajes. Quando o dimensionamento corresponde ao “Caso de Carregamento Excepcional”, os manuais e critérios existentes normalmente sugerem fatores de segurança pequenos. Por isso, nos cálculos efetuados, adotou-se fator de segurança igual a 1.

Foram empregados dados de Steinke (2020) coletados em um modelo físico presente no Laboratório de Obras Hidráulicas, equipado com uma ogiva representando o vertedouro da UHE Santo Antônio na escala 1:50. Dois ensaios com condições diferentes foram selecionados para o cálculo da espessura das lajes. No primeiro deles, com baixo número de Froude incidente ($Fr_1 = 3,0$) e vazão específica de protótipo igual a 44,39 m³/s/m, atingiu-se o nível de água de montante de 17,03 m em relação ao fundo da bacia de dissipação. Para a interpolação entre os níveis de montante e de jusante, considerou-se que este valor ocorre a uma distância de 38,78 m do começo da bacia, na direção de montante. Foram medidas as alturas conjugadas de 2,84 m e 10,55 m, sendo este último valor considerado como o nível

de água no canal de restituição. O comprimento do ressalto resultou em 65,50 m. Foram também utilizados dados referentes a um ensaio conduzido com uma vazão específica de protótipo igual a $11,83 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ e $Fr_1 = 4,6$. Assim, chegou-se a um nível de montante de 12,85 m em relação ao fundo da bacia, com as alturas conjugadas iguais a 0,87 m e 5,30 m e um ressalto de 37,59 m de comprimento.

Além disso, também foram utilizados dados referentes a um dos ensaios de Dai Prá (2011), conduzidos em um modelo dotado de uma ogiva que representa, na escala 1:32, o vertedouro da UHE Porto Colômbia. Para uma vazão específica igual a $15,74 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ e $Fr_1 = 6,9$, foi obtido o nível de água de montante de 22,12 m, com relação ao fundo da bacia de dissipação. Para a interpolação dos empuxos de montante e jusante, considerou-se que o vertedouro tem comprimento de 32,42 m no sentido longitudinal da bacia. O ressalto formado, com 55,13 m de comprimento, possui alturas conjugadas de 0,81 m e 7,30 m.

A fim de se reproduzir a prática construtiva, foram analisadas bacias de dissipação constituídas de duas formas diferentes: formadas por lajes de 10 m, ou então formadas por lajes de 15 m de comprimento, no sentido longitudinal. No sentido transversal, para fins de simplificação e valendo-se da premissa de que um ressalto hidráulico livre a jusante de vertedouro sem comportas é um fenômeno bidimensional, considerou-se correlação transversal igual a 1. Assim, os cálculos foram feitos para uma bacia de dissipação de largura unitária.

A Figura 91 e a Figura 92 mostram a configuração das lajes de 10 m e 15 m de comprimento ao longo da bacia de dissipação, para as duas instalações experimentais analisadas. Para que o comprimento total de cada bacia fosse múltiplo do comprimento das lajes, adotou-se que a bacia de dissipação deste estudo é de comprimento igual a 90 m e a de Dai Prá (2011) é de comprimento igual a 60 m.

As figuras também mostram a posição das tomadas de pressão em cada um dos modelos contemplados, com medidas em metros, em escala de protótipo. Os transdutores estão representados por linhas alaranjadas sob a bacia.

Pode-se perceber que as lajes são constituídas por combinações de 1 até 5 transdutores, dependendo da sua posição dentro da bacia e do seu comprimento. Os cálculos referentes a lajes com mais de um transdutor foram feitos utilizando a média aritmética simples entre eles.

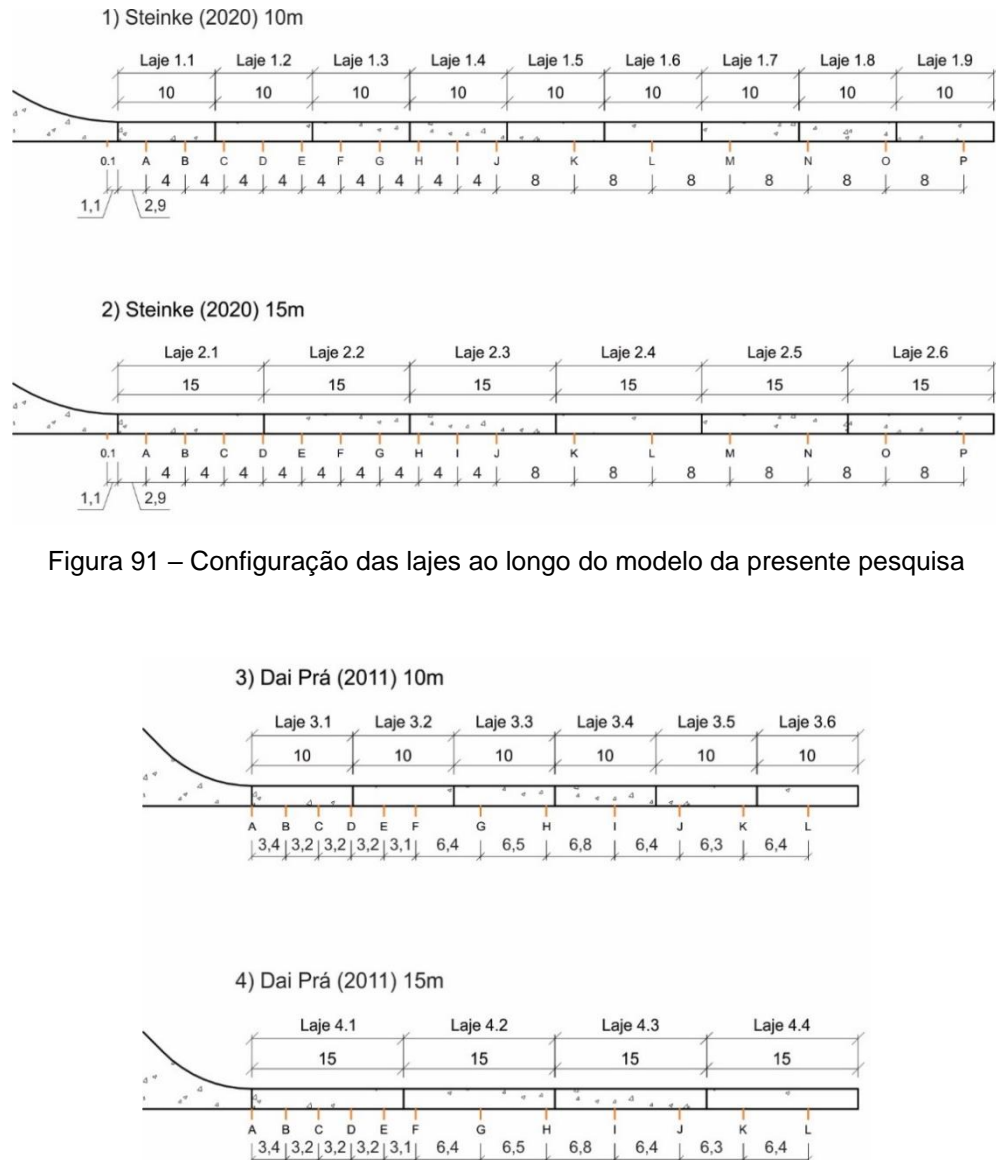


Figura 91 – Configuração das lajes ao longo do modelo da presente pesquisa

Figura 92 – Configuração das lajes ao longo do modelo de Dai Prá (2011)

Adiante, serão descritos separadamente os cenários avaliados e os esforços presentes em cada um deles. Para as pressões atuando sob a bacia, exercendo forças no sentido de arrancar a laje, duas hipóteses foram contempladas. Em ambas, considerou-se que o canal de restituição se encontra ao lado do vertedouro. Na primeira delas (hipótese “a” nas figuras a seguir), adotou-se que a linha de drenos presente sob o vertedouro é completamente eficaz, impedindo que o empuxo vindo do reservatório exerça influência nas lajes da bacia. Assim, o único empuxo atuante é o devido ao canal de restituição. Além disso, considerou-se que a junta de dilatação mais a montante de cada laje falhou, permitindo que as ondas de pressão sobre a bacia se propaguem, através da junta, para a camada permeável sob a bacia, gerando

as chamadas subpressões. O valor da subpressão que se propaga através da junta é extraído a partir do transdutor que está mais próximo da junta em questão. Para fins de simplificação e, a favor da segurança, definiu-se que a propagação das subpressões se dá instantaneamente (pelo fato de a água ser um líquido incompressível) e sem atenuações.

No segundo caso (hipótese “b”), todas as juntas de dilatação estão íntegras e bem vedadas, porém, para a drenagem, foi considerado o critério de dimensionamento preliminar sugerido pelo USBR (1976). Conforme o manual, o empuxo considerado na linha dos drenos deve ser igual ao empuxo de jusante mais um terço da diferença entre o empuxo de jusante e o empuxo devido ao reservatório. Os empuxos a montante e a jusante são então conectados por uma linha reta para formar o diagrama de subpressão devido ao empuxo. A Figura 93 é um exemplo da aplicação deste conceito. O diagrama contém o empuxo de fato medido em comparação com o empuxo assumido por meio desta hipótese. No presente estudo, para fins de simplificação, considerou-se que a linha dos drenos está no plano do paramento de montante da barragem.

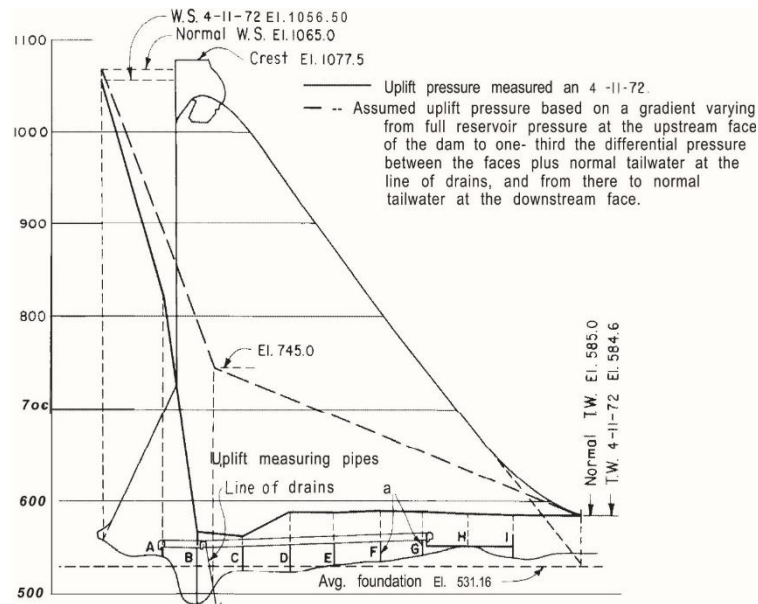


Figura 93 – Redução do empuxo de montante devido à drenagem

O peso específico adotado para o concreto foi de 2400 kgf/m³. Por fim, a convenção adotada para o sentido das forças foi: forças de baixo para cima são positivas; forças de cima para baixo são negativas. A seguir, são descritos os esforços considerados nos diversos cenários analisados.

➤ Cenário 1: análise instantânea

O primeiro cenário constitui-se de uma análise instantânea dos valores de pressão, não sendo possível reproduzi-lo quando da indisponibilidade da série de dados. Para a hipótese “a”, em que a junta de vedação de montante é falhada, a análise consiste em calcular, para cada instante da série de dados, a diferença entre a as pressões atuando sobre a laje e a subpressão sob ela propagada, escolhendo-se o instante mais desfavorável para a estabilidade da peça estrutural. Na hipótese “b”, são avaliadas somente as forças instantâneas no sentido de cima para baixo. Na Figura 94, são mostradas as forças envolvidas neste cenário.

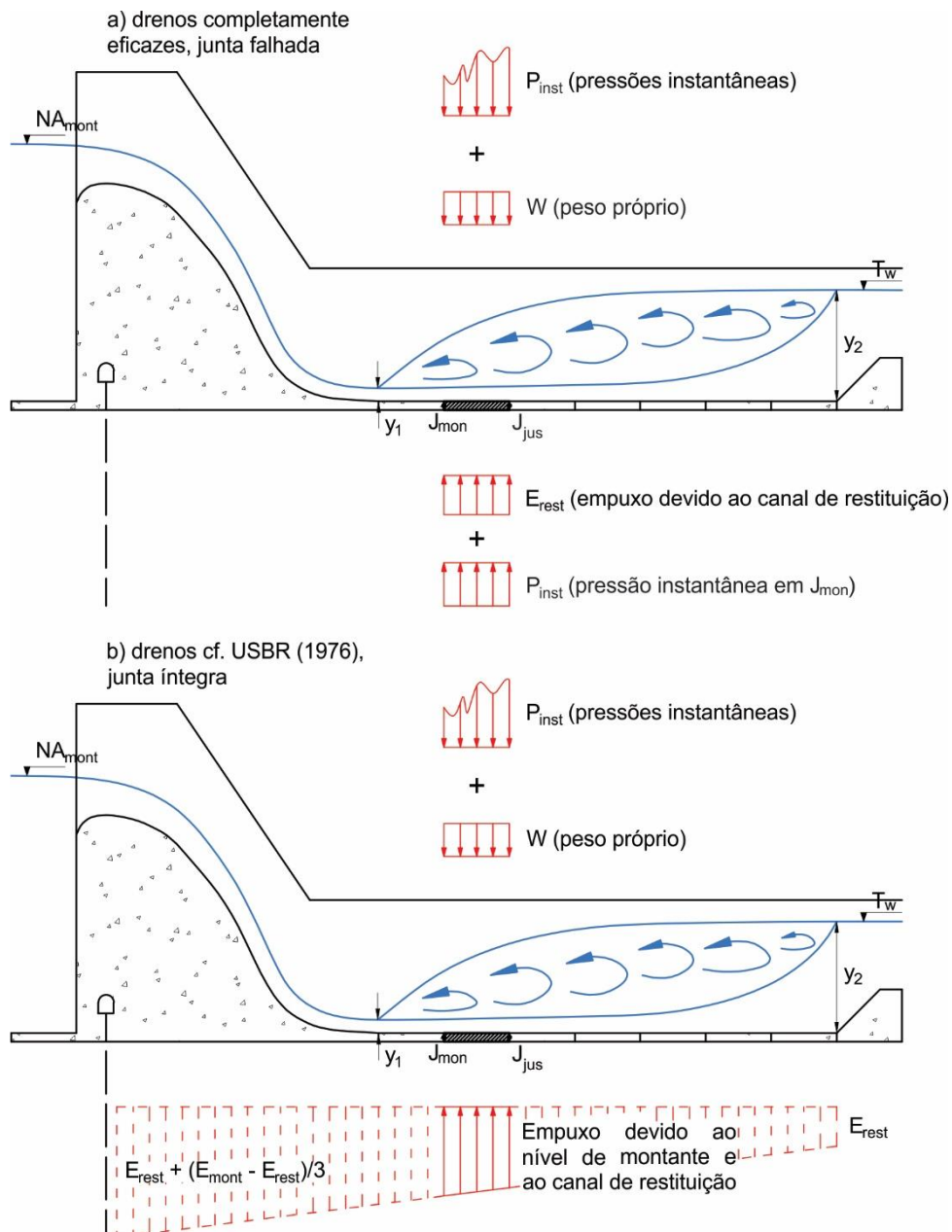


Figura 94 – Diagrama de forças dos Cenários 1a e 1b

➤ Cenário 2: percentil 0,1% do somatório das forças

Dentre a série de dados de pressão instantânea, foi selecionado o instante no qual o somatório das forças atuando sobre a laje fosse o percentil 0,1%, ou seja, um dos instantes em que ocorre a menor força no sentido de cima para baixo. A Figura 95 contém as forças envolvidas para as duas situações avaliadas.

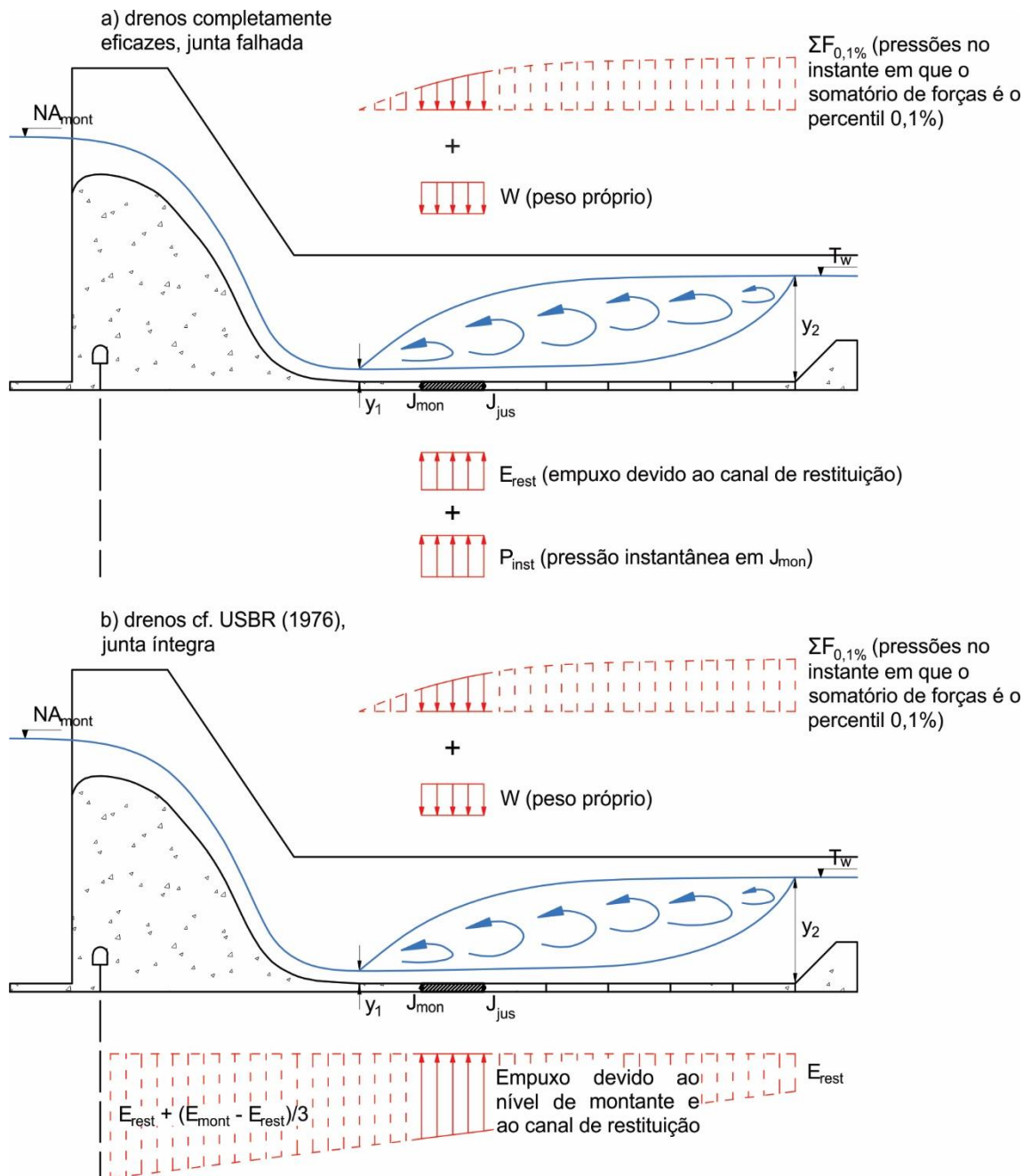


Figura 95 – Diagrama de forças dos Cenários 2a e 2b

➤ Cenário 4: percentil 1% das pressões estimadas

Análise semelhante à anterior, porém conduzida com o percentil 1%, que resulta em valores de pressão não tão pequenos quando as do percentil 0,1%.

➤ Cenário 5: taquicarga

Esta hipótese baseia-se no critério introduzido por McLellan (1976). Segundo o autor, era prática do ICOLD considerar como subpressão 20% da carga de velocidade sobre a laje ($0,2 v^2/2g$). As velocidades junto ao fundo da bacia de dissipação foram calculadas por meio dos ábacos de Rajaratnam (1965). O empuxo considerado foi o devido ao canal de restituição, sendo o peso próprio a única força atuando de cima para baixo. O esquema de cargas deste cenário é mostrado na Figura 97.

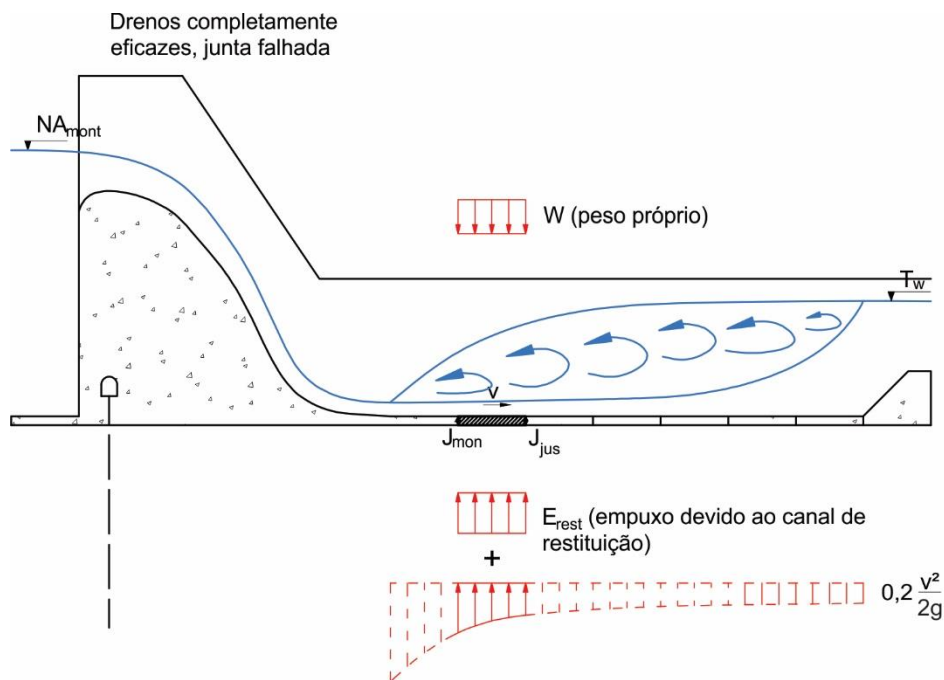


Figura 97 – Diagrama de forças do Cenário 5

➤ Cenário 6: análise simplificada

Chegou-se a este cenário por meio de conversas com engenheiros estruturais e memórias de cálculo. É prática de alguns profissionais considerar sobre a bacia o peso de água equivalente à área sob o diagrama formado pelo traçado de uma linha reta entre as alturas conjugadas do ressalto. Foi levado em conta o peso próprio das lajes e o empuxo devido ao nível de montante da barragem, como apresentado na Figura 98.

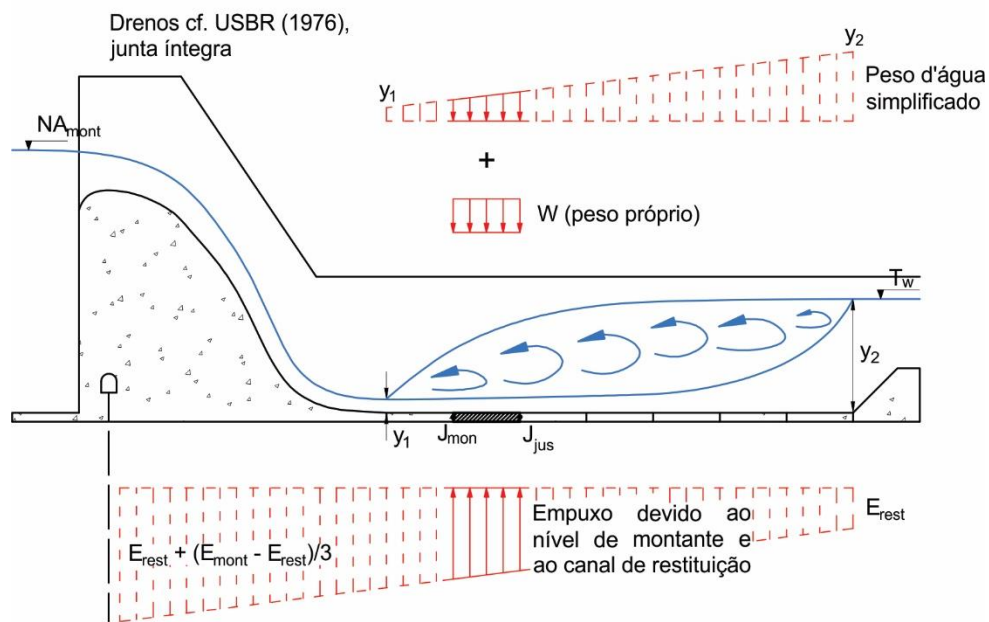


Figura 98 – Diagrama de forças do Cenário 6

A.3 RESULTADOS

A seguir, são apresentados os valores encontrados no cálculo da espessura de cada uma das lajes consideradas. Destaca-se que não é possível fazer uma comparação simples e direta entre as três situações abordadas, pelos seguintes motivos: não foi empregada nenhuma forma de adimensionalização nos valores das espessuras, sendo que, para números de Froude iguais, situações com vazões de projeto diferente podem resultar em espessuras distintas de lajes; os dados de Dai Prá (2011) foram coletados em um outro modelo, que representava um protótipo com diferentes condições de hidrologia, queda e configuração do arranjo. Ressalta-se que os cálculos foram feitos considerando lajes simples, sem ancoragem. Na prática, a espessura dos elementos estruturais pode ser reduzida por meio do emprego de ancoragem.

$$\triangleright Fr_1 = 3,0$$

Na simulação com baixo número de Froude, foi empregado o equacionamento introduzido nesta pesquisa para a estimativa de pressões extremas. A leitura da Tabela 17 e da Figura 99 permite concluir que há duas tendências predominantes. A primeira delas, constituída pela hipótese “a” de cada cenário, em conjunto com o Cenário 5. A segunda tendência, que apresenta um decréscimo significativo ao longo da bacia, constituída pela hipótese “b” dos Cenários 1 a 4, em conjunto com o

Cenário 6. A existência destas duas tendências, também observadas nas próximas vazões, deve-se aos critérios de subpressão definidos para cada um dos cenários.

Nos cenários em que há o decréscimo significativo da espessura da laje ao longo da bacia, adotou-se o critério sugerido pelo USBR (1976), no qual a linha de drenos alivia somente uma parte do empuxo vindo do reservatório. Portanto, o empuxo na região de montante da bacia é bem maior do que aquele atuando no final dela. Além disso, não há outra força positiva atuando e, por isso, as espessuras atingem valores muito próximos de zero nas lajes mais a jusante. Os resultados estão de acordo com Hager (1992), que afirmou que a espessura das lajes decresce conforme o avanço em direção ao final da bacia.

Já nos cenários em que a espessura se mantém relativamente constante ao longo da bacia, os furos de drenagem são capazes de aliviar completamente o empuxo vindo do reservatório. Assim, o empuxo atuante é o devido ao canal de restituição que, por sua vez, é constante ao longo da extensão da bacia. Além deste empuxo, também há outra força no sentido positivo: a subpressão propagada através da junta de vedação falhada. Por isso a espessura mais elevada do que na hipótese “b” no final da bacia.

Tabela 17 – Espessura mínima das lajes para $Fr_1 = 3,0$

Laje	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6
Cenário 1a	4,8	4,7	5,2	5,0	5,3	5,0	4,6	4,7	4,8	4,5	4,8	5,0	4,7	4,7	4,6
Cenário 1b	3,3	2,5	2,0	1,4	1,3	1,0	0,5	0,5	0,8	2,9	2,0	1,4	1,0	0,5	0,7
Cenário 2a	4,6	4,0	4,3	4,4	4,4	4,3	4,0	4,5	4,9	4,2	3,7	4,4	4,3	4,3	4,6
Cenário 2b	3,2	2,1	1,4	1,2	1,0	0,9	0,4	0,3	0,8	2,8	1,5	1,2	0,9	0,3	0,6
Cenário 3a	4,4	4,8	4,8	5,0	4,9	5,0	5,0	5,0	5,0	4,2	4,6	5,0	5,1	5,0	5,0
Cenário 3b	3,6	2,9	2,3	1,7	1,2	1,0	0,8	0,7	0,7	3,3	2,4	1,7	1,1	0,8	0,7
Cenário 4a	4,2	4,6	4,6	4,8	4,7	4,7	4,7	4,7	4,7	4,0	4,4	4,8	4,8	4,7	4,7
Cenário 4b	3,7	2,7	2,0	1,5	1,0	0,7	0,5	0,4	0,4	3,1	2,2	1,5	0,8	0,5	0,4
Cenário 5	5,5	5,4	5,2	5,1	4,9	4,8	4,7	4,6	4,5	5,5	5,3	5,1	4,9	4,7	4,6
Cenário 6	3,6	3,0	2,4	1,9	1,3	0,8	0,2	0,1	0,0	3,4	2,6	1,7	0,9	0,2	0,1

O Cenário 2 apresentou as menores espessuras para diversas lajes da bacia desta hipótese. Isso mostra que o dimensionamento feito a partir das pressões que ocorrem no exato instante em que o somatório de forças sobre a laje é o percentil 0,1% não é uma premissa muito conservadora. As forças negativas são, de fato, pequenas, o que deveria fazer a espessura aumentar. Porém esse fato é contrabalanceado pelas pressões propagadas através das juntas, que também são pequenas. Assim, o instante escolhido acaba por não ser tão crítico quanto o do

Cenário 1, por exemplo, que apresentou espessuras relativamente elevadas para algumas das lajes.

Por meio do Cenário 4, chegou-se a espessuras sempre menores que as do Cenário 3, como já era esperado. As diferenças entre as espessuras dos dois cenários são da ordem de 20 cm a 30 cm para esta vazão. O Cenário 3 apresentou valores muito similares ao Cenário 1, o que mostra que as metodologias de estimativa de pressões extremas, quando empregadas no dimensionamento de lajes, podem substituir os cálculos feitos utilizando a amostra de pressões coletada em modelo físico.

Para esta vazão, o Cenário 5 apresentou as espessuras mais conservadoras para os primeiros 40 m da bacia de dissipação, enquanto o Cenário 6 apresentou as espessuras mais arrojadas para os últimos 30 m da bacia.

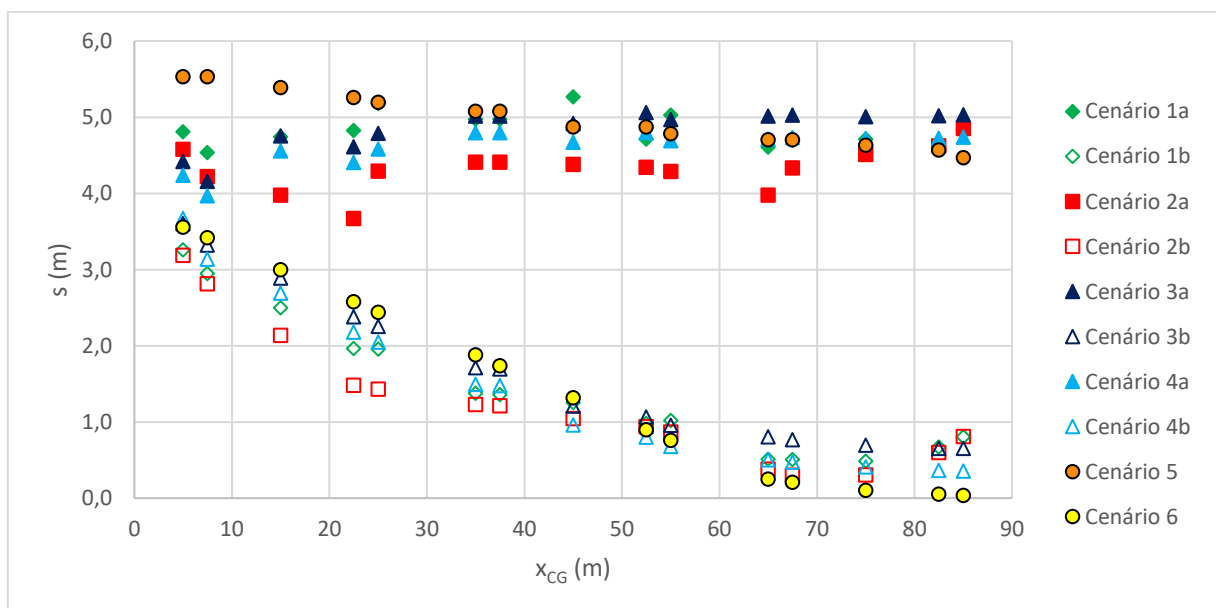


Figura 99 – Espessura mínima das lajes para $Fr_1 = 3,0$

➤ $Fr_1 = 4,6$

Para este número de Froude e para o seguinte, foi empregada a metodologia de estimativa de pressões extremas de Teixeira (2003), por se tratarem de ressaltos estáveis.

Observa-se que, para esta vazão, o empuxo vindo do reservatório, aliviado parcialmente pelos furos de drenagem, exerce significativa influência sobre a espessura mínima das lajes, sobretudo no começo da bacia de dissipação (Tabela 18

e Figura 100). Por sua vez, a hipótese “a” de cada cenário resultou em espessuras relativamente constantes em praticamente toda a extensão da bacia, com valores pouco menores do que 2,5 m.

Tabela 18 – Espessura mínima das lajes para $Fr_1 = 4,6$

Laje	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6
Cenário 1a	2,4	2,6	2,6	2,3	2,4	2,6	2,5	2,4	2,5	2,0	2,6	2,3	2,4	2,3	2,3
Cenário 1b	2,3	1,5	1,2	1,0	0,8	0,7	0,7	0,4	0,7	1,9	1,2	1,0	0,7	0,6	0,6
Cenário 2a	2,1	1,7	2,2	2,2	2,2	2,3	2,2	2,2	2,4	1,7	2,6	2,2	2,2	2,1	2,3
Cenário 2b	2,2	1,3	1,1	0,9	0,7	0,7	0,7	0,3	0,4	1,8	1,1	0,8	0,7	0,5	0,3
Cenário 3a	2,4	2,6	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,1	2,2	2,3	2,3	2,3	2,3
Cenário 3b	2,6	1,9	0,9	0,5	0,4	0,3	0,3	0,2	0,1	2,3	1,1	0,5	0,4	0,2	0,1
Cenário 4a	2,2	2,4	2,1	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	1,9	2,1	2,2	2,2	2,2	2,2
Cenário 4b	2,5	1,6	0,8	0,5	0,4	0,3	0,2	0,2	0,1	2,1	1,0	0,5	0,3	0,2	0,1
Cenário 5	3,0	2,7	2,4	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	3,0	2,4	2,2	2,2	2,2	2,2
Cenário 6	2,3	1,7	1,1	0,6	0,4	0,3	0,2	0,1	0,0	2,1	1,3	0,5	0,3	0,2	0,1

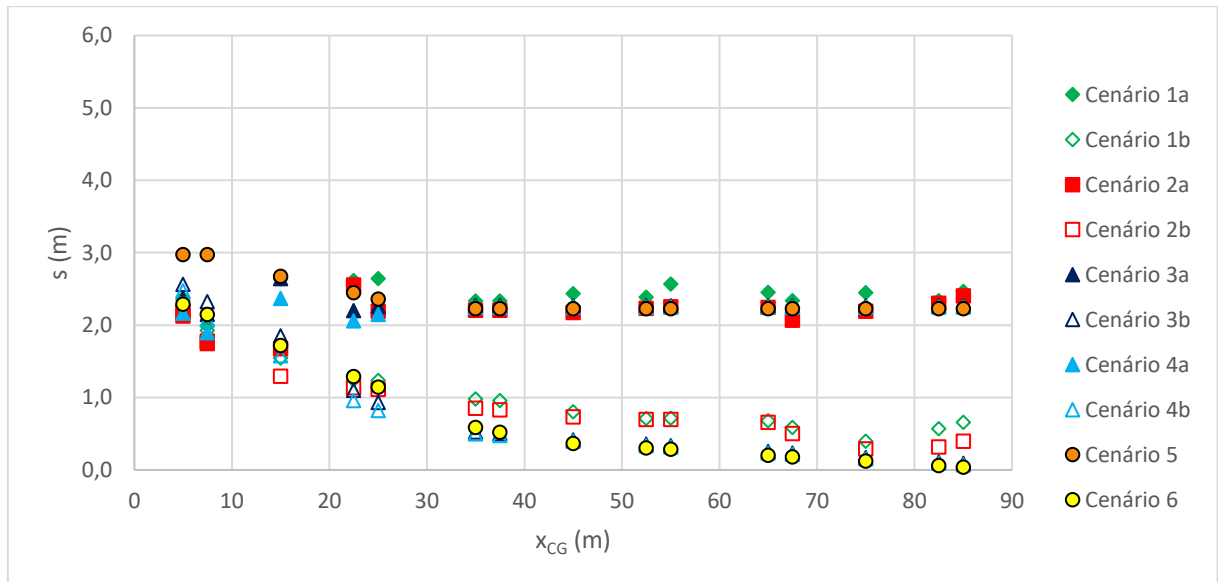


Figura 100 – Espessura mínima das lajes para $Fr_1 = 4,6$

As espessuras calculadas para o Cenário 2 mais uma vez se mostraram menores do que as do Cenário 1, evidenciando que o instante em questão no primeiro cenário é mais conservador se utilizado como parâmetro para o dimensionamento das lajes. As diferenças entre os Cenários 3 e 4 novamente são de até 30 cm.

Comparando esta vazão e a anterior, verifica-se que, para uma mesma geometria de vertedouro e bacia, uma vazão menor acarreta sempre em espessuras menores.

➤ $Fr_1 = 6,9$

Para esta situação, verificou-se novamente que a hipótese “b” implica em um decréscimo acentuado da espessura mínima das lajes ao longo da bacia, enquanto que, para a hipótese “a”, os valores encontrados são relativamente constantes, conforme os resultados apresentados na Tabela 19 e na Figura 101.

Tabela 19 – Espessura mínima das lajes para $Fr_1 = 6,9$

Laje	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6	4.1	4.2	4.3	4.4
Cenário 1a	3,7	5,5	3,6	3,6	3,2	3,2	3,6	3,9	3,5	3,2
Cenário 1b	3,8	3,6	2,2	1,3	0,6	0,2	3,6	2,4	0,9	0,3
Cenário 2a	3,5	2,0	2,3	2,8	3,0	2,9	3,4	2,8	2,7	3,0
Cenário 2b	3,7	2,7	2,1	0,8	0,4	0,1	3,5	2,2	0,7	0,2
Cenário 3a	3,3	4,1	3,8	3,3	3,2	3,1	3,3	3,7	3,1	3,1
Cenário 3b	4,0	3,7	2,3	1,2	0,6	0,2	4,0	2,7	1,0	0,3
Cenário 4a	3,1	3,5	3,4	3,1	3,1	3,1	3,1	3,3	2,9	3,0
Cenário 4b	3,8	3,1	1,9	1,0	0,5	0,2	3,7	2,3	0,8	0,2
Cenário 5	4,9	3,8	3,3	3,1	3,1	3,1	4,9	3,6	3,1	3,1
Cenário 6	3,7	3,0	2,3	1,5	0,8	0,2	3,5	2,4	1,4	0,3

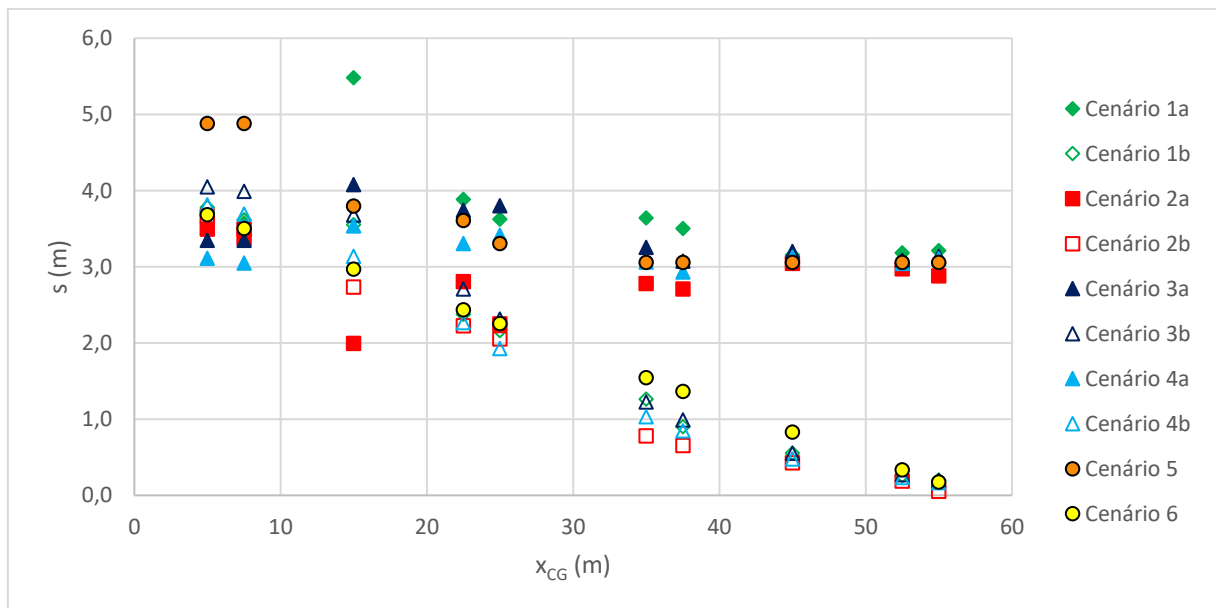


Figura 101 – Espessura mínima das lajes para $Fr_1 = 6,9$

Os Cenários 1 e 2 são análises baseadas em um determinado instante da amostra de dados. Isso significa que o diagrama de pressões em questão muitas vezes apresenta pontos dispersos uns dos outros, refletindo o efeito de um possível vórtice passando em alguma tomada específica, ou então simplesmente deve-se às flutuações de pressão, intrínsecas a todo fenômeno turbulento. Interferências no sistema de aquisição de dados também podem gerar valores que muitas vezes não

expressam a realidade. Nesse sentido, explica-se os pontos dispersos do Cenário 1a e do Cenário 2a.

Nesta vazão e na anterior, o Cenário 5 resultou nas maiores espessuras no começo da bacia. Percebe-se também que o Cenário 6 acompanha a tendência da hipótese “b” dos outros cenários. Conforme o número de Froude aumenta, aumenta também a redução relativa da espessura dos elementos estruturais ao longo da bacia. Isso ocorre justamente por causa da dissipação de energia do ressalto, menor para os menores números de Froude.

➤ Contribuição relativa das forças envolvidas

A fim de se avaliar o peso de cada componente envolvido no cálculo da espessura da laje, foi conduzida uma análise relativa para uma das lajes em questão. A peça estrutural escolhida foi a Laje 1.2, para os três números de Froude contemplados. Tal elemento tem começo em $x = 10\text{ m}$ e fim em $x = 20\text{ m}$ e foi escolhido por abranger a região mais turbulenta do ressalto, com $\Gamma_{CG} = 1,95$ para $Fr_1 = 3,0$, $\Gamma_{CG} = 3,39$ para $Fr_1 = 4,6$ e $\Gamma_{CG} = 2,31$ para $Fr_1 = 6,9$.

Foram somadas, em módulo, as forças envolvidas no cálculo da espessura mínima das lajes, à exceção do peso próprio, por ser este um esforço consequente dos outros. Assim, as porcentagens referem-se a esse somatório. Os resultados são apresentados na Tabela 20 e na Tabela 21. A pressão média, a flutuação de pressão, o empuxo e a subpressão de cada cenário foram detalhados na metodologia.

Tabela 20 – Contribuição relativa das forças considerando a hipótese “a”

	Fr_1	Pressão média	Flutuação de pressão	Empuxo de restituição	Subpressão
Cenário 1a	3,0	26,12%	1,58%	41,33%	30,97%
	4,6	24,41%	6,21%	32,41%	36,98%
	6,9	17,88%	9,79%	35,62%	36,71%
Cenário 2a	3,0	29,11%	0,05%	46,05%	24,79%
	4,6	33,25%	2,78%	44,16%	19,81%
	6,9	30,24%	4,30%	60,24%	5,22%
Cenário 3a	3,0	26,55%	6,54%	43,35%	23,56%
	4,6	27,66%	11,33%	37,32%	23,70%
	6,9	23,17%	18,39%	39,98%	18,46%
Cenário 4a	3,0	27,08%	4,68%	44,21%	24,03%
	4,6	29,00%	7,01%	39,13%	24,85%
	6,9	24,96%	12,12%	43,05%	19,88%
Cenário 5	3,0	-	-	81,55%	18,45%
	4,6	-	-	82,53%	17,47%
	6,9	-	-	80,03%	19,97%

Tabela 21 – Contribuição relativa das forças considerando a hipótese “b”

	Fr ₁	Pressão média	Flutuação de pressão	Empuxo de montante
Cenário 1b	3,0	34,48%	4,45%	61,07%
	4,6	34,12%	8,04%	57,85%
	6,9	23,09%	15,72%	61,18%
Cenário 2b	3,0	36,07%	0,06%	63,87%
	4,6	35,98%	3,01%	61,01%
	6,9	26,38%	3,75%	69,87%
Cenário 3b	3,0	32,53%	8,02%	59,45%
	4,6	31,92%	13,07%	55,00%
	6,9	24,46%	19,42%	56,12%
Cenário 4b	3,0	33,33%	5,76%	60,91%
	4,6	33,73%	8,16%	58,11%
	6,9	26,46%	12,85%	60,70%
Cenário 6	3,0	28,07%	-	71,93%
	4,6	28,06%	-	71,94%
	6,9	20,97%	-	79,03%

Para os Cenários 1, 2, 3 e 4, conforme o número de Froude aumenta, aumenta também a participação relativa das flutuações de pressão, enquanto a participação da pressão média diminui. Apesar disso, verifica-se que em geral a flutuação de pressão, um dos parâmetros mais difíceis e imprecisos de se estimar, teve pouca influência na espessura da laje. Enquanto isso, a participação relativa do empuxo foi a maior para todos os cenários e para todos os números de Froude, evidenciando a importância desta componente.

No Cenário 5, verificou-se que o empuxo devido ao canal de restituição exerce uma influência até 4 vezes maior do que a da taquicarga.

A.4 CONCLUSÕES

Por meio do equilíbrio de forças verticais, foram calculadas as espessuras mínimas de lajes em diferentes posições ao longo de uma bacia de dissipação, para três vazões distintas, em dez diferentes cenários. Em cada um dos cenários, foram levadas em consideração combinações de carga diversas, variando-se as forças atuando sobre a laje, bem como o empuxo e as subpressões exercendo força no sentido de arrancá-la.

Verificou-se, em geral, o desenvolvimento de duas tendências principais nos gráficos e tabelas apresentados, que são determinadas pelas premissas adotadas para o sistema de drenagem e para a vedação nas juntas de dilatação.

As espessuras encontradas por meio do Cenário 1 mostraram-se relativamente similares àquelas geradas com o Cenário 3. Isso leva a crer que o dimensionamento

feito utilizando metodologias de estimativas de pressão pode resultar em valores muito próximos daqueles gerados com a série de pressões instantâneas. São necessários mais estudos para avaliar essa similaridade.

O instante analisado no Cenário 2 mostrou não ser crítico para o dimensionamento das lajes de uma bacia de dissipação, gerando valores sempre menores do que o Cenário 1. Sendo os dois cenários calculados a partir da amostra de dados, deve-se levar em conta, sempre, a possibilidade de haver ruído ou interferência nos registros coletados pelos transdutores.

As diferenças observadas entre os Cenários 3 e 4 foram de, no máximo, 30 cm de espessura. Portanto, fica a critério do projetista o percentil a ser utilizado, a depender do grau de conservadorismo que deseja adotar.

Nas três vazões analisadas, os resultados da análise simplificada (Cenário 6) foram muito semelhantes aos valores obtidos por meio do Cenário 3b. Enquanto isso, a configuração que leva em conta a taquicarga (Cenário 5) apresentou um comportamento variado em relação aos outros cenários, o que indica que a carga de velocidade pode vir a ser um critério auxiliar de projeto, utilizada em combinação com outras configurações de forças.

Na análise do peso relativo de cada um dos componentes sobre a escolha da espessura mínima da laje, constatou-se que, mesmo na região onde ocorrem as máximas flutuações de pressão, estas exercem pouca influência no cálculo. Enquanto isso, o empuxo a ser considerado demonstrou ter papel determinante no resultado final do dimensionamento.

APÊNDICE B – GRÁFICOS E TABELAS COMPLEMENTARES

Aqui serão apresentados os resultados da comparação entre a metodologia de previsão de pressões extremas introduzida neste trabalho e a metodologia combinada de Teixeira (2003) e Hampe (2018), de forma semelhante ao que se apresentou no Capítulo 5, porém para os percentis 1% e 99%.

➤ Aplicação para os dados do presente estudo: percentil $P_{1\%}$

De forma similar ao percentil $P_{0,1\%}$, a metodologia dos outros autores superestimou o valor das pressões com probabilidade de não-excedência 1% a partir de $\Gamma > 4$, conforme Figura 102 e Figura 103. Isso ocorreu porque a estimativa de flutuação de pressão dos outros autores não leva em conta o comportamento praticamente constante deste parâmetro ao longo do ressalto com baixo Froude. Na Figura 104 e na Figura 105, percebe-se que a aderência dos pontos é bem maior às curvas geradas com o ajuste proposto, justamente porque as equações de flutuação de pressão empregadas são adequadas para a descrição do comportamento deste parâmetro. Até a posição longitudinal 1, destaca-se o efeito da curva de concordância para os três menores números de Froude.

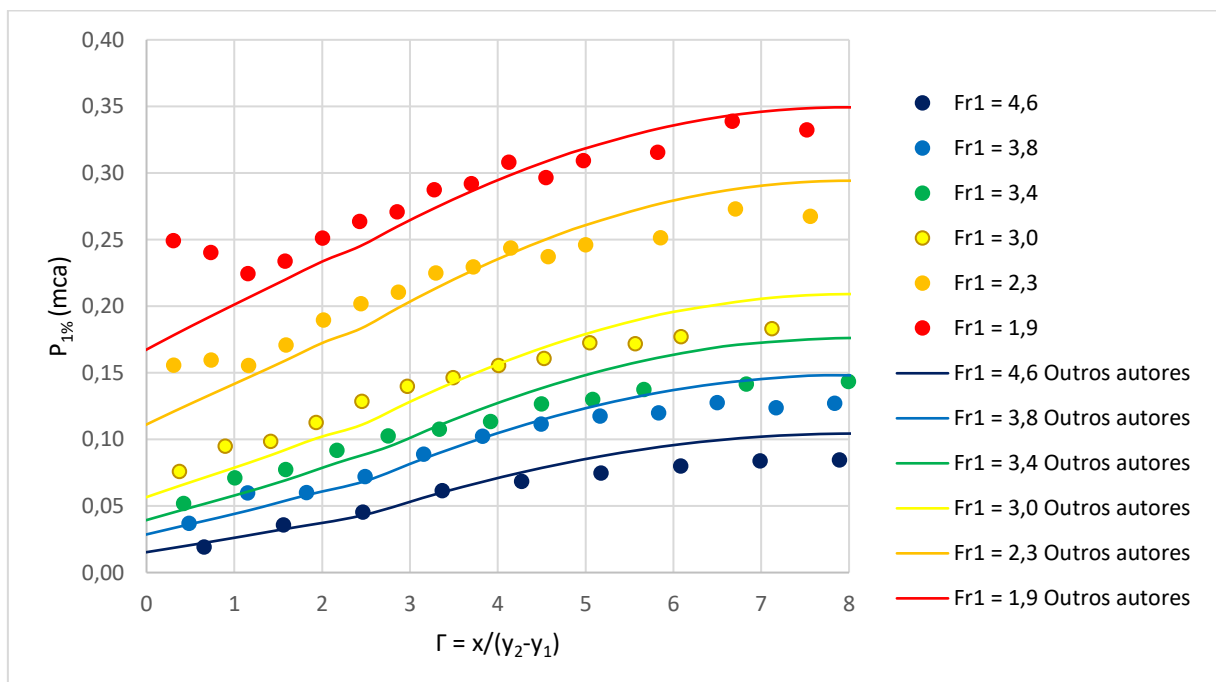


Figura 102 – Aplicação da metodologia de Teixeira (2003) e Hampe (2018) para os dados do presente estudo: percentil $P_{1\%}$

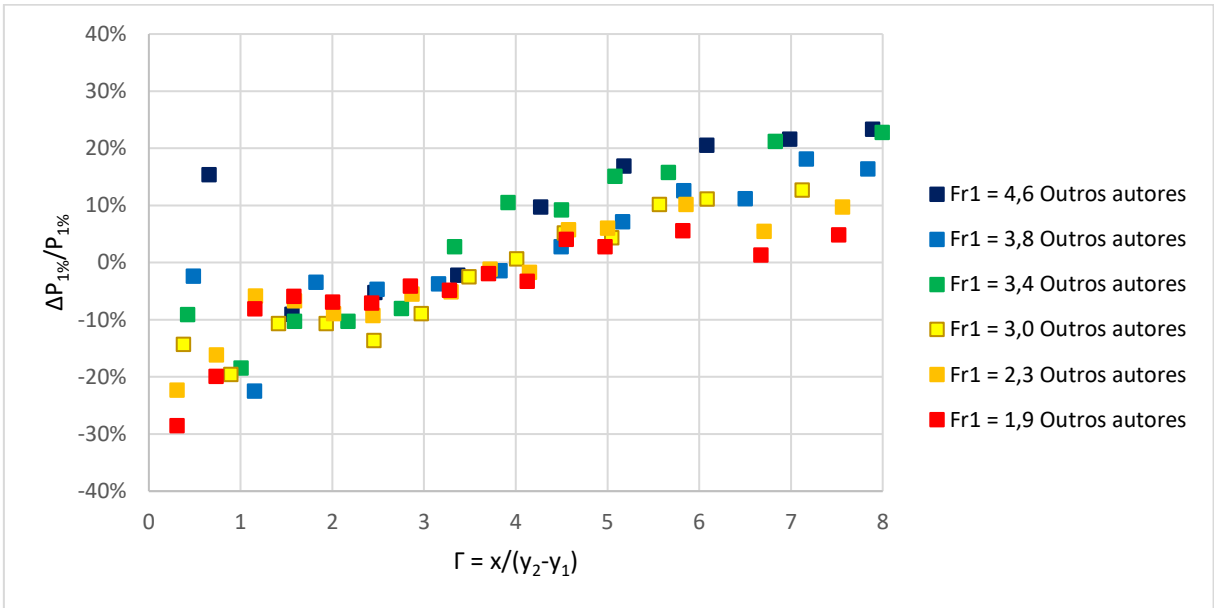


Figura 103 – Erro relativo entre a metodologia de Teixeira (2003) e Hampe (2018) e os dados do presente estudo: percentil P_{1%}

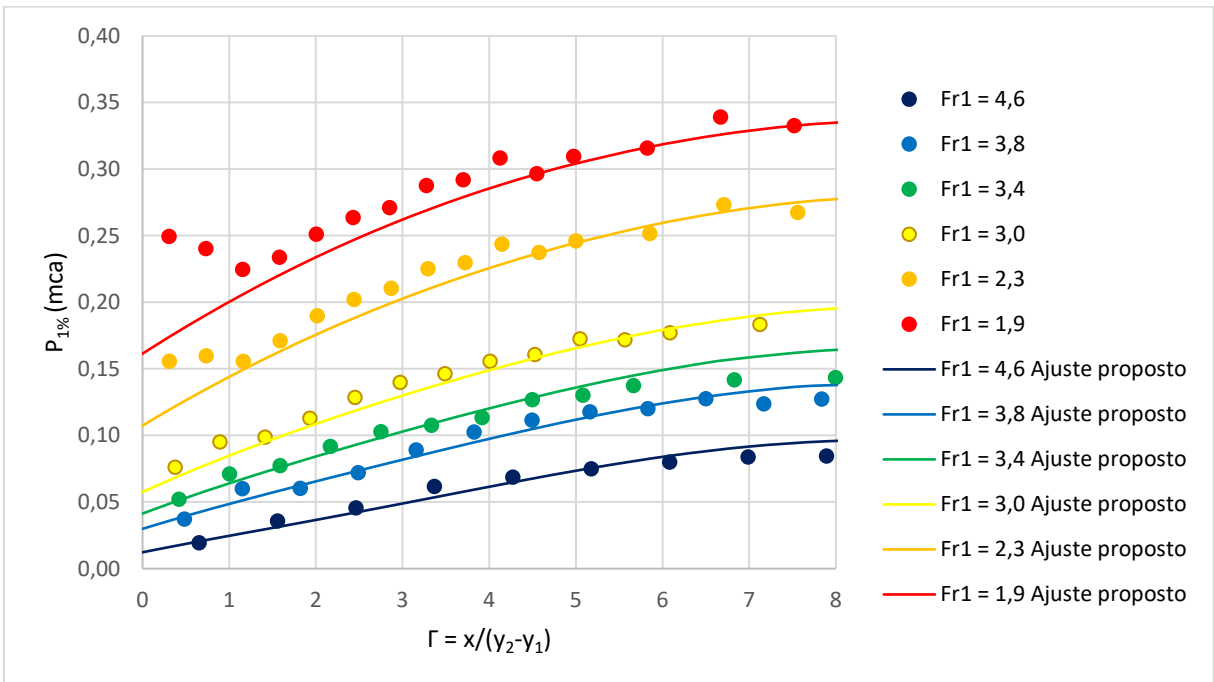


Figura 104 – Aplicação da metodologia proposta para os dados do presente estudo: percentil P_{1%}

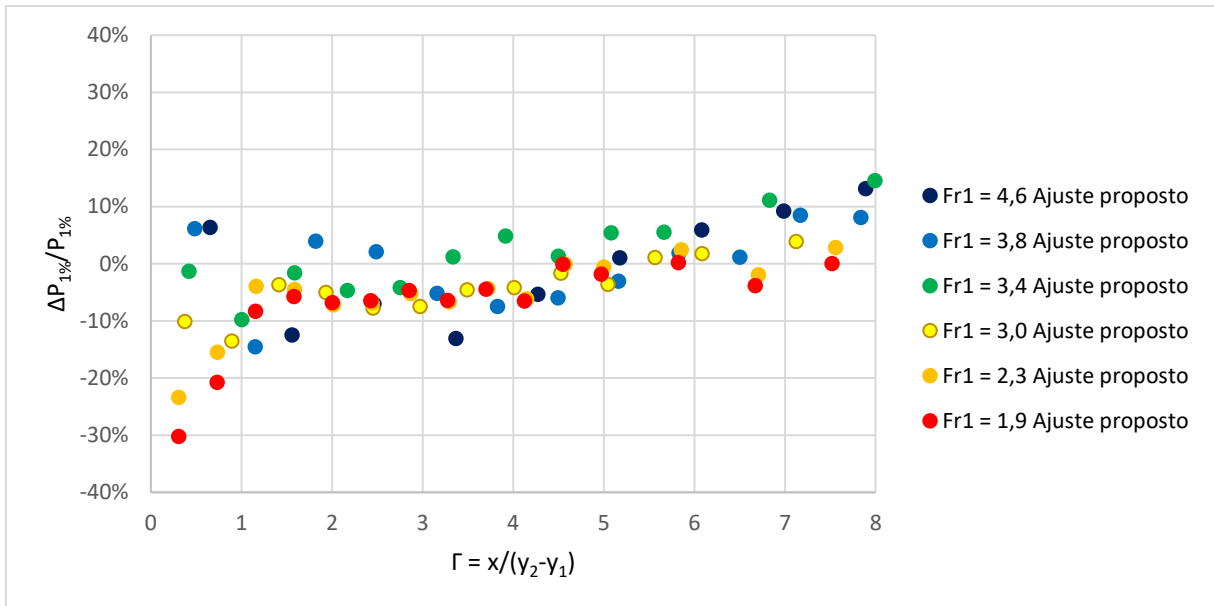


Figura 105 – Erro relativo entre a metodologia proposta e os dados do presente estudo: percentil P_{1%}

➤ Aplicação para os dados do presente estudo: percentil P_{99%}

Pela análise da Figura 106 e da Figura 107, percebe-se que as diferenças observadas entre os pontos amostrais e as curvas geradas com as metodologias de outros autores para o percentil 99% também são advindas principalmente das equações de flutuação de pressão, que não descrevem bem o comportamento do ressalto hidráulico com $Fr_1 < 4,5$. Ao se empregar a equação de flutuação proposta neste trabalho, os erros ficam entre -10% e 7% para $\Gamma > 2$. Mais uma vez, os efeitos da curva de concordância não foram bem representados por nenhuma das metodologias avaliadas.

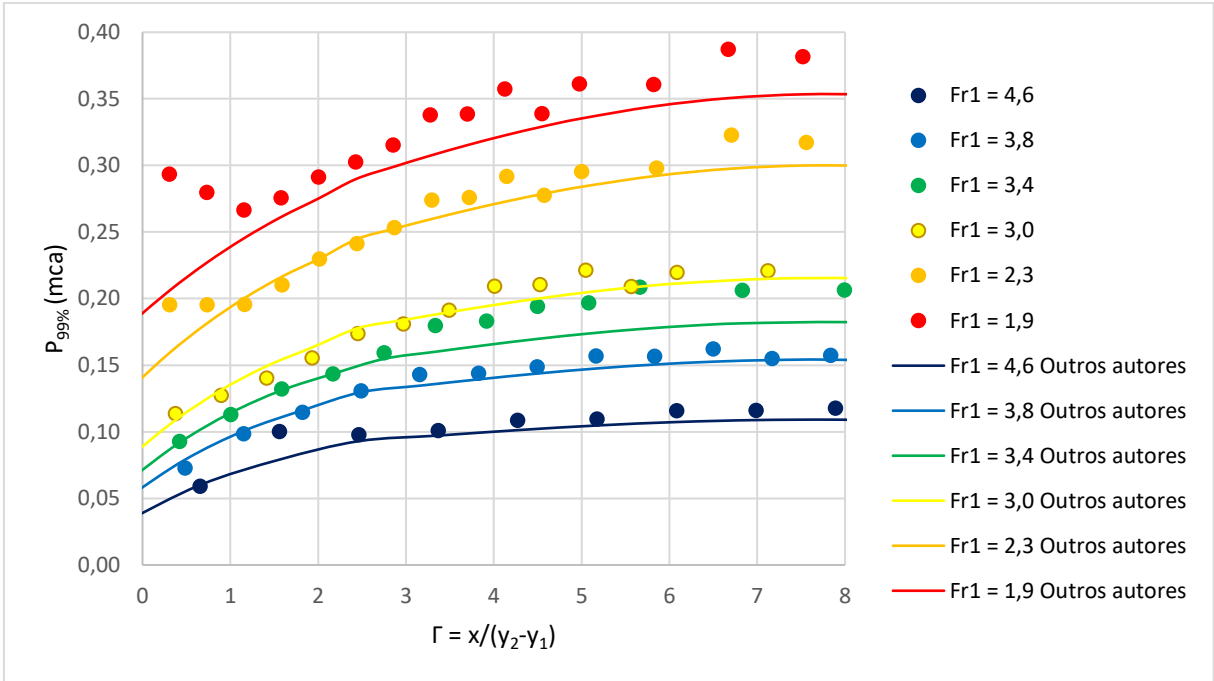


Figura 106 – Aplicação da metodologia de Teixeira (2003) e Hampe (2018) para os dados do presente estudo: percentil $P_{99\%}$

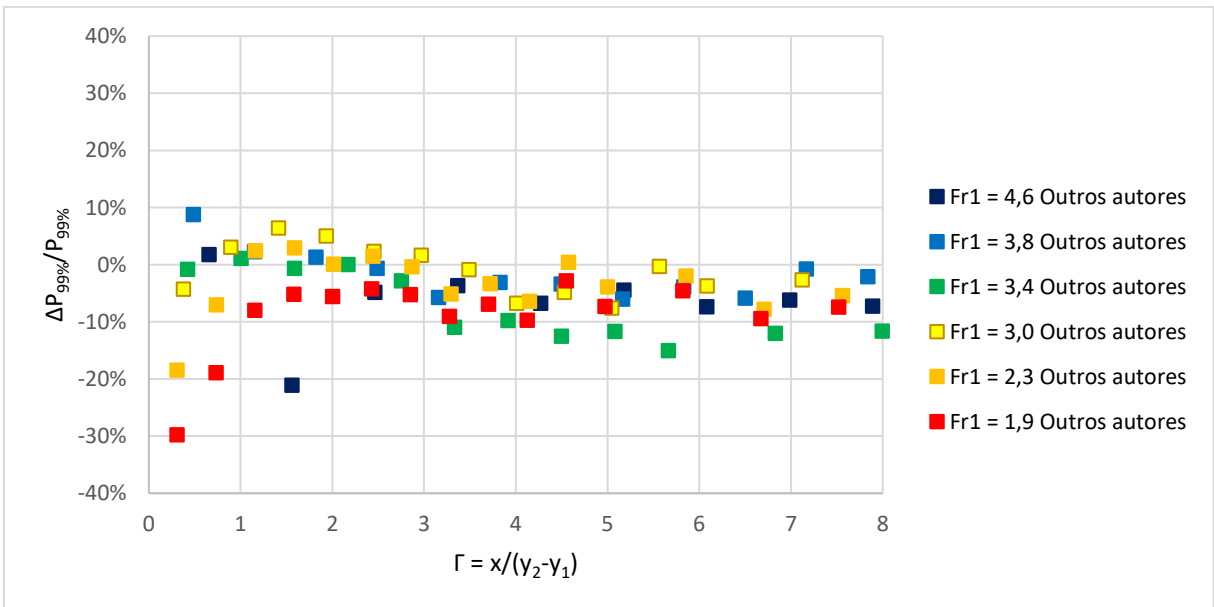


Figura 107 – Erro relativo entre a metodologia de Teixeira (2003) e Hampe (2018) e os dados do presente estudo: percentil $P_{99\%}$

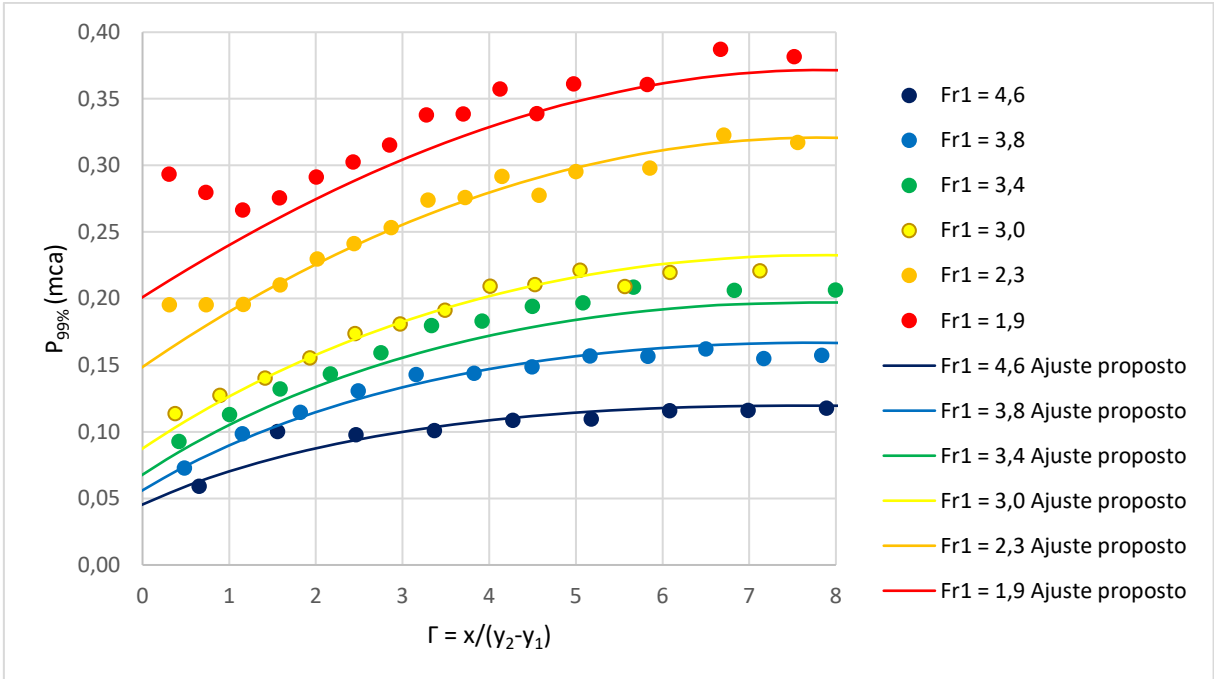


Figura 108 – Aplicação da metodologia proposta para os dados do presente estudo: percentil $P_{99\%}$

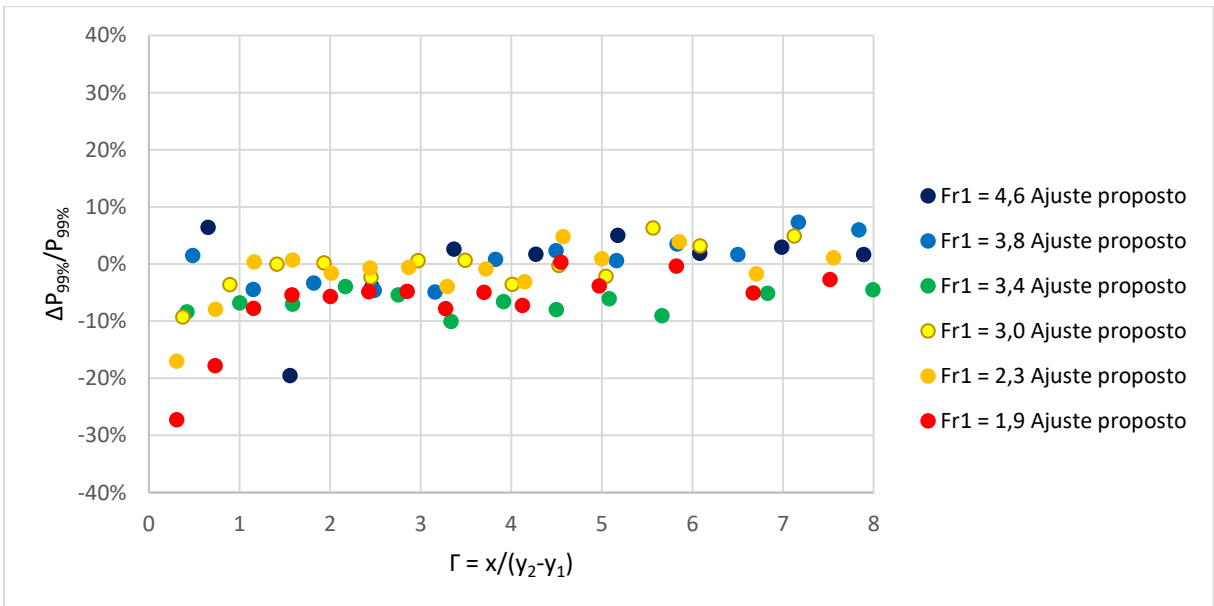


Figura 109 – Erro relativo entre a metodologia proposta e os dados do presente estudo: percentil $P_{99\%}$

➤ Aplicação para os dados da UHE São Manoel: percentil $P_{1\%}$

O ajuste proposto foi validado por meio de sua aplicação em dados de outro estudo, e comparado com os ajustes combinados de Teixeira (2003) e Hampe (2018). A Figura 110 mostra que a metodologia aqui introduzida descreveu bem o escoamento

com $Fr_1 = 3,21$, para posições longitudinais maiores que 2. Para a mesma região, o ensaio com $Fr_1 = 3,07$ foi melhor representado pelo ajuste dos outros autores.

Nenhuma das metodologias avaliadas foi capaz de descrever bem os pontos para $\Gamma < 2$. Isso porque as amostras de dados utilizadas eram provenientes de ensaios com ressaltos afogados. A Figura 111 mostra que os erros nesta região podem chegar a 62%, ou, de forma absoluta, a quase 11 m em escala de protótipo. Isso destaca a importância de se validar a metodologia que está sendo proposta com dados de ressaltos livres, ou então expandir a metodologia para que ela seja capaz de ser aplicada a ressaltos afogados.

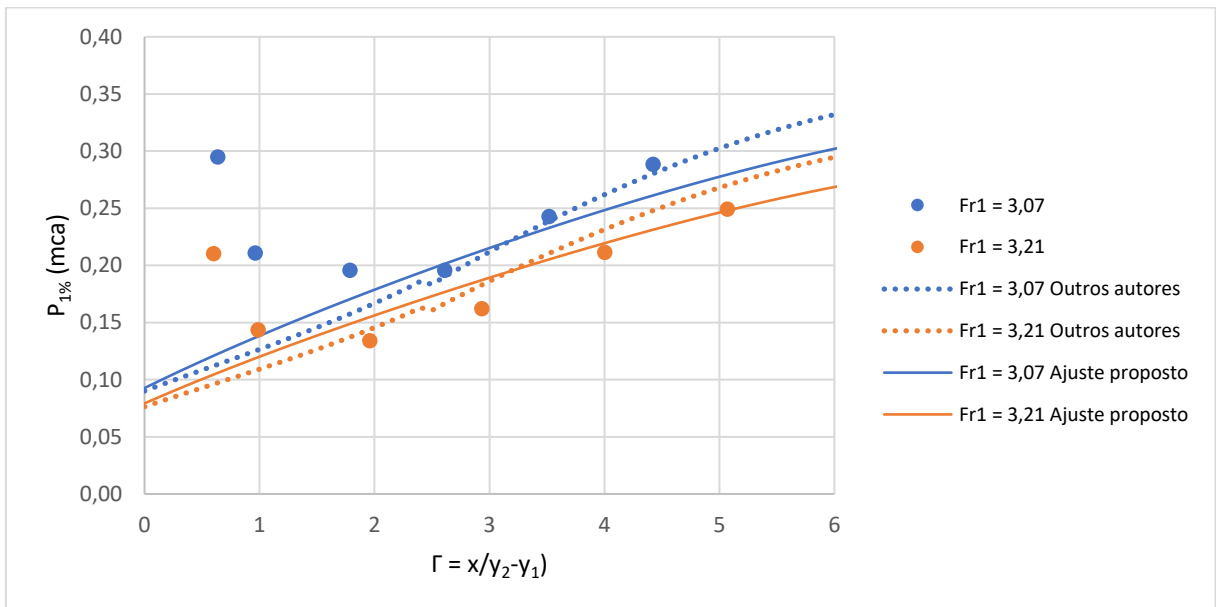
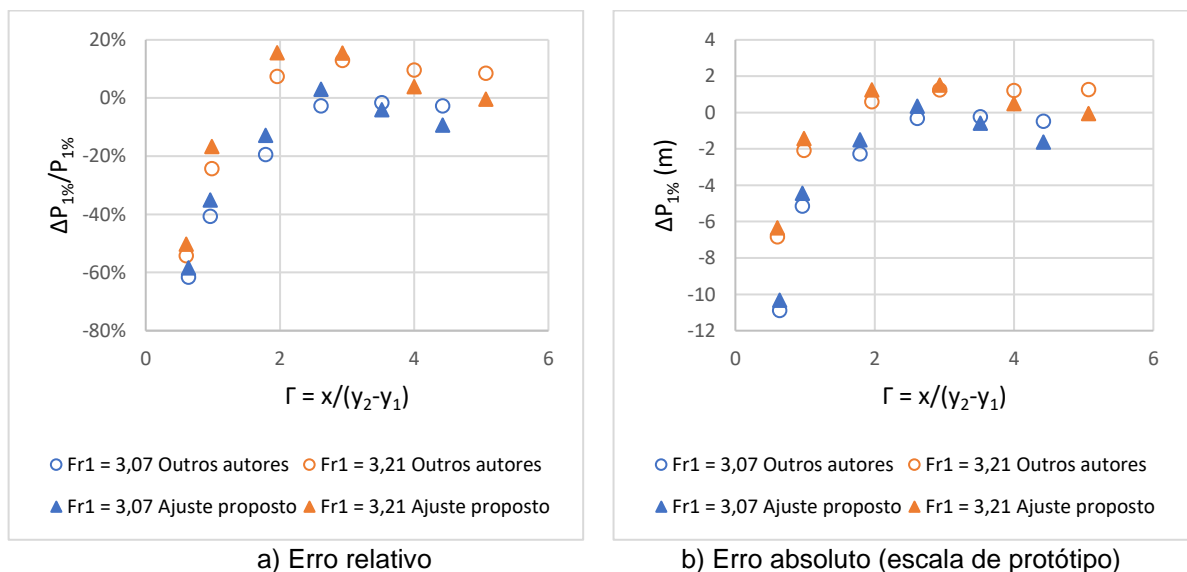


Figura 110 – Aplicação das metodologias para os dados da UHE São Manoel: percentil $P_{1\%}$



a) Erro relativo
 b) Erro absoluto (escala de protótipo)
 Figura 111 – Erros entre as metodologias e os dados do presente estudo: percentil $P_{1\%}$

➤ Aplicação para os dados da UHE São Manoel: percentil $P_{99\%}$

Assim como no percentil 99,9%, o ajuste que está sendo aqui proposto descreveu melhor os valores amostrais para a $P_{99\%}$, quando analisada a região $\Gamma > 2$, conforme apresentado na Figura 112. Na Figura 113, observa-se que, em escala de protótipo, os erros absolutos são menores que 1 metro de coluna d'água nesta região. Para a metodologia dos outros autores, os erros podem chegar a 2 m.

Nenhuma das metodologias avaliadas descreveu bem os pontos em $\Gamma < 2$, devido aos efeitos do afogamento do ressalto.

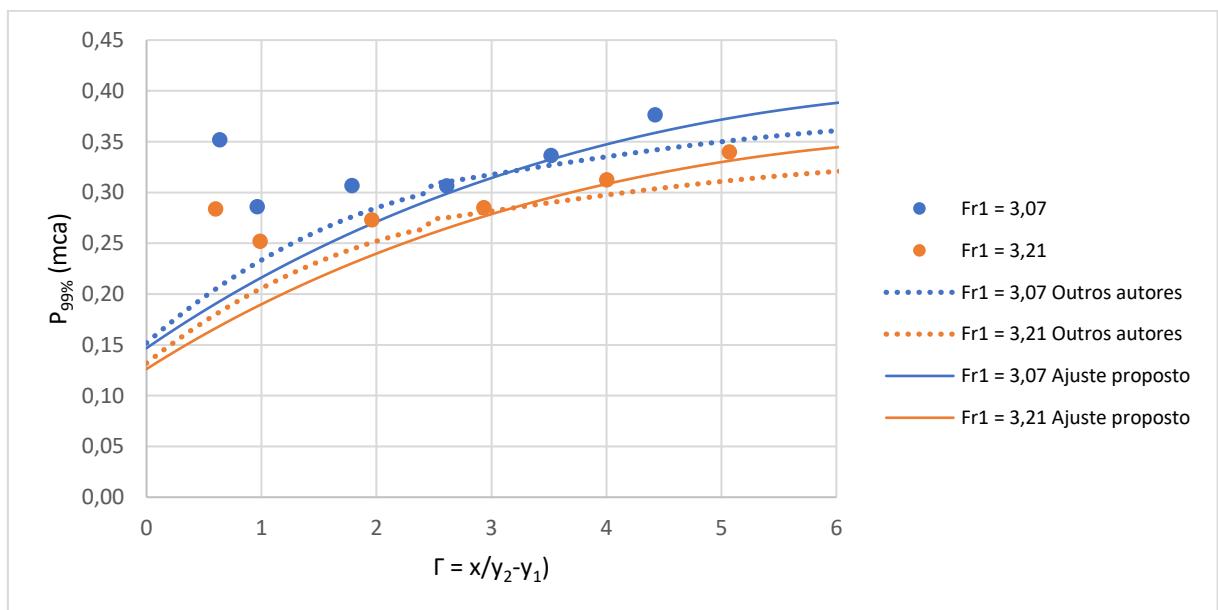
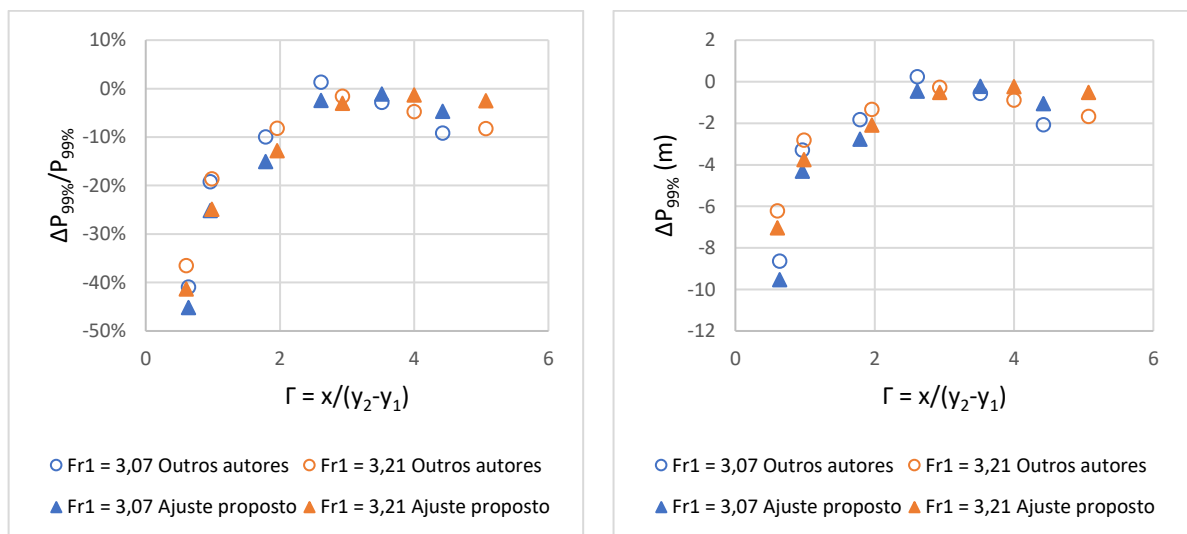


Figura 112 – Aplicação das metodologias para os dados da UHE São Manoel: percentil $P_{99\%}$



a) Erro relativo

b) Erro absoluto (escala de protótipo)

Figura 113 – Erros entre as metodologias e os dados do presente estudo: percentil $P_{99\%}$

APÊNDICE C – AJUSTE DAS EQUAÇÕES DE FLUTUAÇÃO DE PRESSÃO

Este apêndice contém a descrição do processo de desenvolvimento das equações de flutuação de pressão, como complemento do Capítulo 5. Para que a exposição seja feita de forma didática, algumas das figuras e tabelas já apresentadas serão aqui repetidas. No ajuste das curvas, foi utilizado o *software* CurveExpert.

Primeiramente, observou-se que as curvas de flutuação de pressão adimensionalizada Ω poderiam ser descritas por meio de equações do terceiro grau (Equação 54), conforme a Figura 114. Na Figura 115, as mesmas curvas são apresentadas, porém separadamente para cada número de Froude. A Tabela 22, que é a repetição da Tabela 14, contém os coeficientes das curvas para cada número de Froude ensaiado.

$$\Omega = a \cdot \Gamma^3 + b \cdot \Gamma^2 + c \cdot \Gamma + d$$

Equação 54

Tabela 22 – Coeficientes do polinômio de terceiro grau

Fr ₁	a	b	c	d	R ²
4,6	0,0029	-0,0477	0,1877	0,4286	0,61
3,8	0,0032	-0,0530	0,2158	0,2712	0,86
3,4	0,0012	-0,0267	0,1615	0,3212	0,88
3,0	0,0013	-0,0245	0,1248	0,2728	0,69
2,3	-0,0003	-0,0005	0,0383	0,3798	0,58
1,9	-0,0010	0,0094	-0,0043	0,6254	0,28

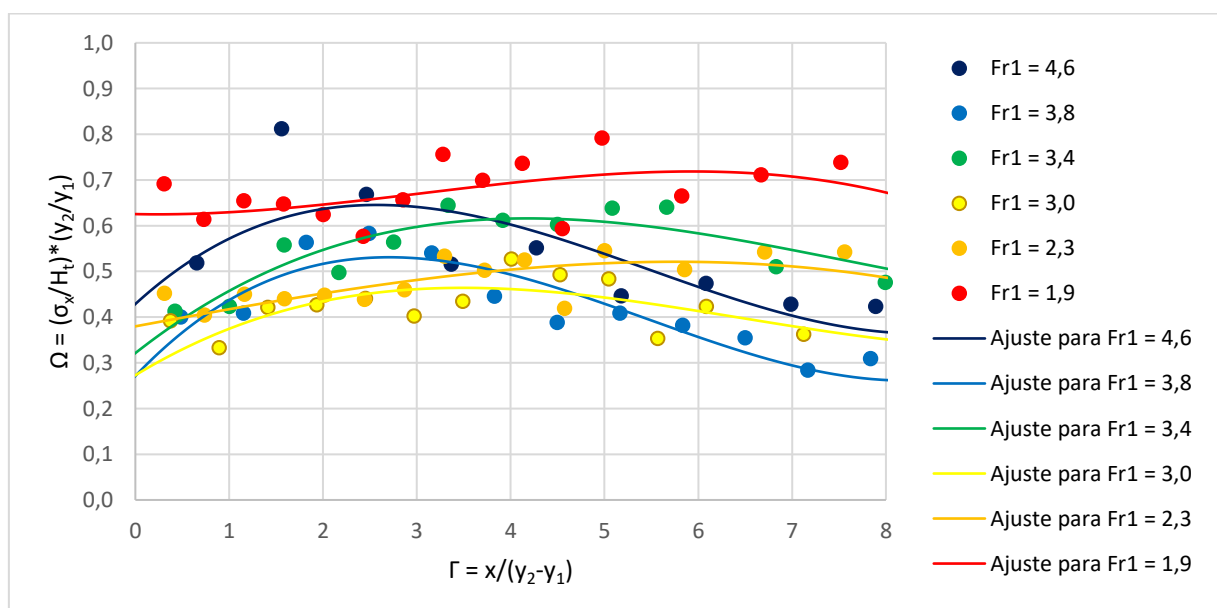


Figura 114 – Ajustes inicialmente encontrados para a flutuação de pressão adimensionalizada

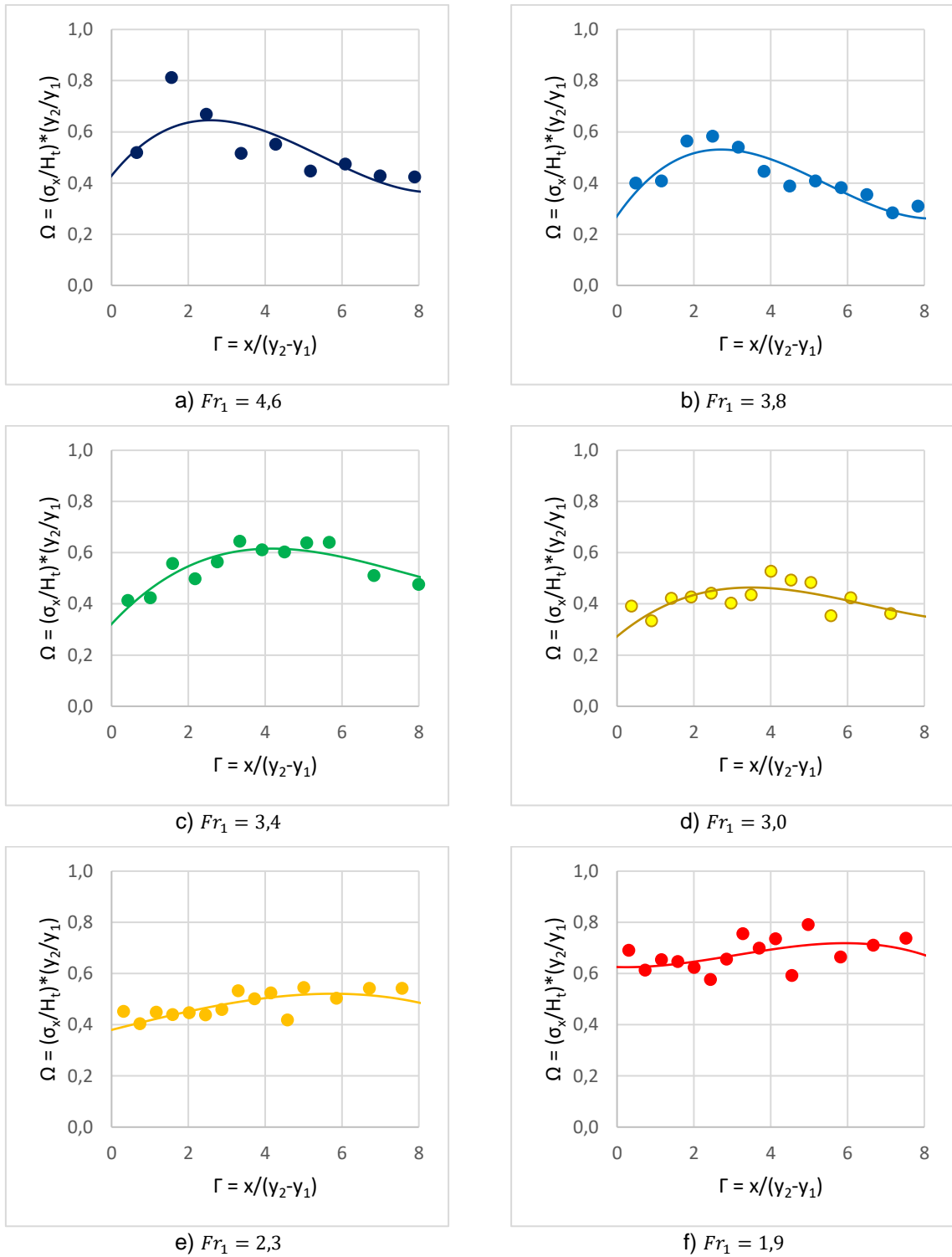


Figura 115 – Ajustes inicialmente encontrados para a flutuação de pressão adimensionalizada, para cada número de Froude

Como já mencionado no Capítulo 5, observou-se que os coeficientes da Tabela 22 têm um comportamento bem definido em relação ao número de Froude. Isso pode ser observado na Figura 116. Diante disso, foram propostas equações no segundo

grau, em função do número de Froude, para cada um destes coeficientes. A Equação 55 e seguintes são as relações encontradas.

$$a = -0,0003 \cdot Fr_1^2 + 0,0037 \cdot Fr_1 - 0,0069$$

$$R^2 = 0,91$$

Equação 55

$$b = 0,0058 \cdot Fr_1^2 - 0,0599 \cdot Fr_1 + 0,1025$$

$$R^2 = 0,93$$

Equação 56

$$c = -0,0343 \cdot Fr_1^2 + 0,2988 \cdot Fr_1 - 0,4503$$

$$R^2 = 0,97$$

Equação 57

$$d = 0,1263 \cdot Fr_1^2 - 0,8705 \cdot Fr_1 + 1,7630$$

$$R^2 = 0,89$$

Equação 58

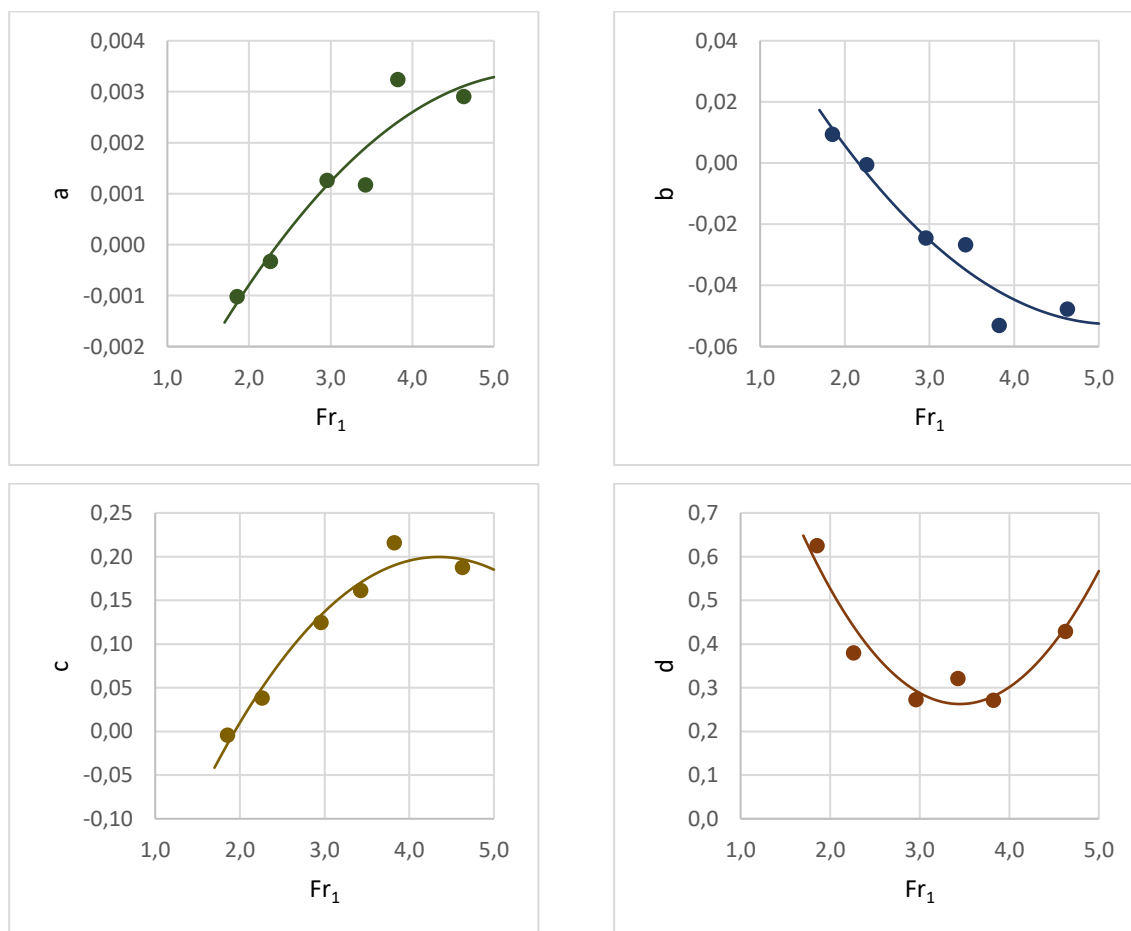


Figura 116 – Comportamento dos coeficientes a , b , c e d , e curvas ajustadas

Por fim, foram recalculados os valores da flutuação de pressão, com as equações definidas, para cada uma das vazões ensaiadas. Os resultados são mostrados na Figura 117, que é a repetição da Figura 73.

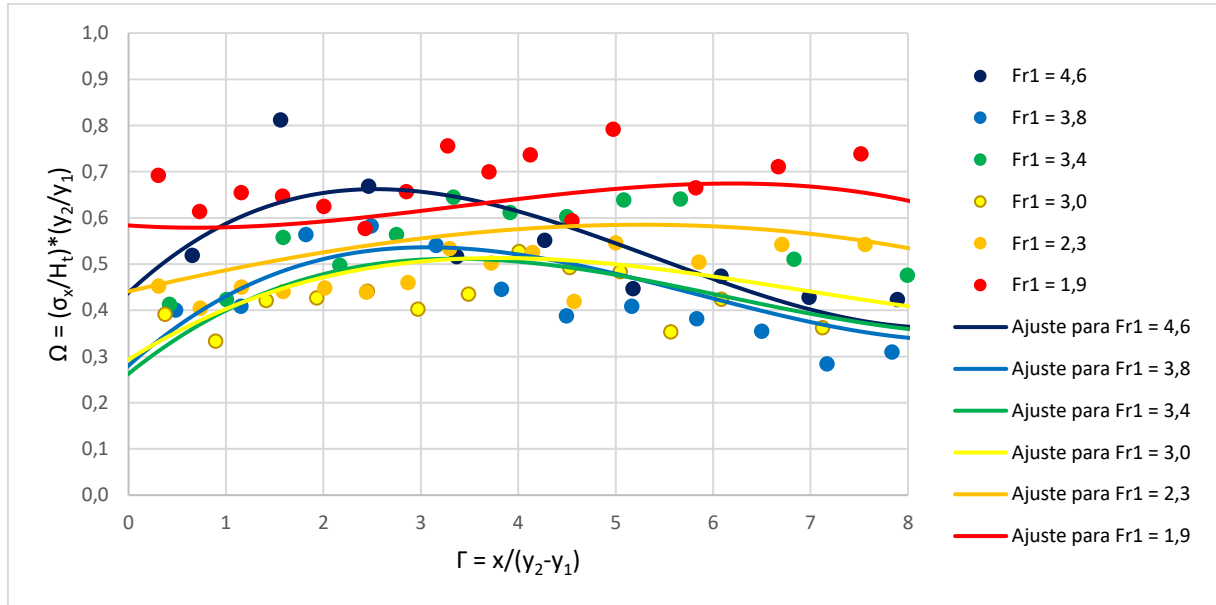


Figura 117 – Dados amostrais de flutuação de pressão em comparação com o ajuste final proposto