

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

Roberta Ferrão Hampe

**PREVISÃO DE PRESSÕES EXTREMAS EM BACIAS DE
DISSIPACÃO POR RESSALTO HIDRÁULICO COM BAIXO
NÚMERO DE FROUDE**

Porto Alegre
2018

ROBERTA FERRÃO HAMPE

**PREVISÃO DE PRESSÕES EXTREMAS EM BACIAS DE
DISSIPACÃO POR RESSALTO HIDRÁULICO 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

Porto Alegre
2018

CIP - Catalogação na Publicação

Hampe, Roberta Ferrão
PREVISÃO DE PRESSÕES EXTREMAS EM BACIAS DE
DISSIPACÃO POR RESSALTO HIDRÁULICO COM BAIXO NÚMERO DE
FROUDE / Roberta Ferrão Hampe. -- 2018.
174 f.
Orientador: Eder Daniel Teixeira.

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, 2018.

1. Ressalto Hidráulico. 2. Baixo Número de Froude.
3. Previsão de Pressões. I. Teixeira, Eder Daniel,
orient. II. Título.

ROBERTA FERRÃO HAMPE

**PREVISÃO DE PRESSÕES EXTREMAS EM BACIAS DE
DISSIPACÃO POR RESSALTO HIDRÁULICO 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 a orientação do Prof. Eder Daniel Teixeira da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, novembro de 2018

Prof. Eder Daniel Teixeira
Dr. pela UFRGS
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. António Alberto do Nascimento Pinheiro (UL/IST)
Dr. pela UL

Prof. Dr. Maurício Dai Prá (UFRGS)
Dr. pela UFRGS

Prof. Dr. Luiz Augusto Magalhães Endres (UFRGS)
Dr. pela UFRGS

Profa. Dra. Vanessa Fátima Pasa Dutra (UFRGS)
Dra. pela UFRGS

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH-UFRGS) e ao programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pela oportunidade e pelos conhecimentos transmitidos ao longo do mestrado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo suporte financeiro indispensável para o desenvolvimento do Mestrado.

Ao Laboratório de Obras Hidráulicas (LOH), pela oportunidade da pesquisa.

Ao Laboratório de Hidráulica Experimental e Recursos Hídricos (LAHE), técnicos e à empresa Eletrobrás Furnas (FURNAS) por cederem os dados dos ensaios utilizados neste estudo.

Aos autores que, gentilmente, cederam seus dados para sua utilização nesta pesquisa.

Aos professores do LOH, pela disponibilidade, dedicação e ensinamentos, especialmente ao orientador Prof. Eder Daniel Teixeira.

Aos amigos e colegas do LOH, pelo apoio e amizade. Obrigada especial Rute, Carolina, Lorena, João, Aline e Priscila, pela ajuda indispensável.

Aos meus pais, Roberto e Eliane, e meu irmão Eduardo, pelo incentivo e apoio.

Ao Juliano, pelo apoio, incentivo, compreensão e carinho.

RESUMO

As estruturas empregadas na dissipação da energia do escoamento em obras hidráulicas, como as bacias de dissipação por ressalto hidráulico a jusante de vertedouros de calha lisa, são fundamentais para garantir a segurança e eficiência deste tipo de construção. Sendo assim, é imprescindível o conhecimento dos esforços gerados pelo escoamento macroturbulento ao qual as estruturas são submetidas. No caso das barragens situadas em rios com grandes vazões e baixa queda, observa-se a ocorrência do ressalto hidráulico com baixo número de Froude incidente ($Fr_1 < 4,5$), cujo conhecimento até o momento é menos abrangente quando comparado ao ressalto hidráulico com número de Froude na faixa estável ($4,5 < Fr_1 < 9,0$), notadamente quanto aos métodos para previsão das pressões geradas pelo escoamento. Dessa forma, o objetivo desta pesquisa é verificar a aplicabilidade da metodologia de previsão de pressões proposta por Teixeira (2003), originalmente validada para o ressalto hidráulico livre com número de Froude incidente na faixa estável ($4,5 < Fr_1 < 9,0$), à estimativa dos esforços do ressalto hidráulico com baixo número de Froude ($Fr_1 < 4,5$). Para tanto, utilizaram-se dados de pressões instantâneas coletadas nos modelos bidimensionais do sistema extravasor da UHE Santo Antônio e da UHE São Manoel, bem como dados cedidos por outros autores. Foram analisadas as pressões extremas com probabilidades 0,1%, 1%, 5%, 10%, 90%, 95%, 99% e 99,9% da ocorrência de pressões iguais ou inferiores, além dos parâmetros estatísticos pressão média, desvio padrão e coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades (N). A partir dos resultados obtidos, observou-se que em estruturas semelhantes ao sistema extravasor da UHE Santo Antônio, cuja baixa queda permite o desenvolvimento do ressalto hidráulico livre com número de Froude tão baixo quanto 1,70, as pressões do ressalto hidráulico livre ocorrem com comportamento distinto das pressões do ressalto hidráulico livre com número de Froude na faixa estável. Para estes casos, a metodologia estudada pode ser aplicada, porém com cautela, especialmente para a estimativa do desvio padrão das pressões. Por esta razão, buscou-se atualizar a metodologia proposta por Teixeira (2003) para melhor aplicação a estruturas semelhantes à UHE Santo Antônio através da proposição de novos ajustes para a previsão do desvio padrão das séries de pressões.

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

ABSTRACT

The structures employed in the energy dissipation of the water flow in hydraulic works, such as hydraulic jump stilling basins downstream smooth spillways, are fundamental to ensure safety and efficiency for this kind of construction. Thus, knowledge of the efforts generated by the macroturbulent flow to which the structures are submitted is essential. In the case of dams located on high flow rates and low fall rivers, the hydraulic jump with low rapid Froude number ($Fr_1 < 4,5$) may occur, about which knowledge is less extensive than for the hydraulic jump within the rapid Froude number stable range ($4,5 < Fr_1 < 9,0$), particularly about water flow pressure prediction methods. Therefore, the present study was aimed at verifying the applicability of the pressure efforts forecasting methodology proposed by Teixeira (2003), originally validated for the hydraulic jump within the rapid Froude number stable range ($4,5 < Fr_1 < 9,0$), to estimating the pressure efforts of the hydraulic jump with low rapid Froude number ($Fr_1 < 4,5$). For this purpose, instant pressures collected in the two-dimensional models of the overflow system of Santo Antônio HPP and São Manoel HPP were used, as well as data provided by other authors. The extreme pressures with 0.1%, 1%, 5%, 10%, 90%, 95%, 99% and 99.9% of chance of occurrence of equal or lower pressures were analyzed in addition to the statistical parameters average pressure, standard deviation and statistic coefficient of probability distribution (N). From the results obtained, it was found that for a structure similar to Santo Antônio HPP's overflow system, which the low fall enables the development of the hydraulic jumps with Froude numbers as low as 1,70, the hydraulic jump pressure efforts followed a different trend compared to the hydraulic jump within the rapid Froude number stable range. For these cases the methodology studied can be applied with caution, especially for the estimation of pressure standard deviation. For this reason, it was attempted to update the methodology proposed by Teixeira (2003) for better application to structures similar to Santo Antônio HPP by proposing a new fitting for forecasting pressure standard deviation.

Key words: Hydraulic jump, Low Froude number, Stilling basin

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Danos observados na bacia de dissipação da UHE Porto Colômbia, em destaque indivíduo para referência de escala (Fonte: CBDB, 2010).	19
Figura 2: Ressalto Hidráulico descrito por Guglielmini (1739) (Fonte: MOSSA; PETRILLO, 2003).....	21
Figura 3: Linha do tempo com alguns dos principais trabalhos sobre o ressalto hidráulico (Fonte: adaptado de MEES, 2008).	22
Figura 4: Ressalto Hidráulico formado a jusante de vertedouro de calha lisa (Fonte: CHIEW, EMADZADEH, 2017).	23
Figura 5: Alturas conjugadas do ressalto hidráulico.	24
Figura 6: Diagrama de referência da equação de conservação do momento (Fonte: HICKIN, 2004).....	25
Figura 7: Energia em um escoamento gradualmente variado sobre um plano inclinado (Fonte: PULS, 1941).....	27
Figura 8: Parâmetros do ressalto hidráulico tipo B (Fonte: HAGER, 1988).....	30
Figura 9: Estimativa da posição vertical do início do ressalto hidráulico (Fonte: WIEST, 2008).	31
Figura 10: Determinação do comprimento do ressalto hidráulico segundo USBR (1955) (Fonte: USBR, 1954 adaptado por GOMES, 2000).	32
Figura 11: Formas do ressalto hidráulico (Fonte: CHOW, 1959).	35
Figura 12: Esquemático do ressalto hidráulico livre e submergido.....	37
Figura 13: Formas do ressalto segundo o grau de submergência (Fonte: HAGER, 1992).	37
Figura 14: Dissipação de energia no ressalto hidráulico (Fonte: USBR, 1954 adaptado por WIEST, 2008).	39
Figura 15: Eficiência do ressalto hidráulico (Fonte: PETERKA, 1957).	40
Figura 16: Pressões média obtidas em modelo experimental e ajuste (Fonte: MEES, 2008). .	42
Figura 17: Coeficiente de flutuação de pressões (Fonte: ABDUL-KHADER e ELANGO, 1974).	46
Figura 18: Coeficiente de flutuação de pressões (C_p') apresentado por Souza (2012) em comparação ao C_p' obtido por diferentes autores (Fonte: SOUZA, 2012).....	50
Figura 19: Pressões máximas, médias e mínimas do ressalto hidráulico livre com $Fr_1=5,67$ (Fonte: TOSO e BOWERS, 1988).	52
Figura 20: Amplitude das pressões extremas longitudinais do ressalto hidráulico com números de Froude (Fr_1) 1,77 e 3,29, em situações de canal com superfície livre (Fonte: CHIEW; EMADZADEH, 2017).	55
Figura 21: Pressões médias adimensionalizadas, incluindo dados dos modelos das UHEs Porto Colômbia e Canabrava, e estimativa (Fonte: TEIXEIRA, 2003).....	58

Figura 22: Desvios padrão adimensionalizados, incluindo dados do modelo da UHEs Porto Colômbia, e estimativas para cada intervalo longitudinal (Fonte: TEIXEIRA, 2003).	59
Figura 23: Distribuição longitudinal do coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades obtidos por Teixeira (2003) a partir dos dados cedidos por Endres (1990) (Fonte: TEIXEIRA, 2003).	61
Figura 24: Desvio padrão coletado em protótipo e modelos reduzidos com diferentes escalas em relação ao início da bacia de dissipação, no ponto de tangência da bacia com a curva de concordância vertical (Fonte: TRIERWEILER et al., 2005).....	64
Figura 25: Comprimento de influência da curva de concordância em relação ao comprimento da bacia de dissipação (Fonte: DAI PRÁ et al., 2012).....	69
Figura 26: Modelo físico do vertedouro da UHE Santo Antônio, medidas em centímetros (Fonte: SOUZA, 2012).....	72
Figura 27: Modelo de detalhe do vertedouro da UHE Santo Antônio e bacia de dissipação, em escala 1:50, com indicação da posição das tomadas de pressões (Fonte: SOUZA, 2012).....	73
Figura 28: Esquemático das principais grandezas registradas nos ensaios (Fonte: SOUZA, 2012).....	75
Figura 29: Perfil longitudinal do vertedouro e bacia de dissipação da UHE São Manoel, com elevações e raio da curva de concordância nas dimensões de protótipo em metros, e disposição das tomadas de pressões no trecho plano da bacia.	76
Figura 30: Planta baixa do modelo do vertedouro e bacia de dissipação da UHE São Manoel na escala 1:60, com larguras de vãos e pilares em dimensões de protótipo em metros, e disposição das tomadas de pressões no trecho plano da bacia.	76
Figura 31: Modelo bidimensional da UHE São Manoel, em escala 1:60, ensaio com vazão 182,3 l/s.	78
Figura 32: Perfil longitudinal do canal de ensaios utilizado por Endres (1990) e localização das tomadas de pressões, medidas em centímetros (Fonte: ENDRES, 1990).....	78
Figura 33: Perfil longitudinal do canal de ensaios utilizado por Marques (1995) e localização das tomadas de pressões, medidas em centímetros (Fonte: MARQUES, 1995).....	79
Figura 34: Modelo físico experimental utilizado por Marques (1995), ensaio com $Fr_1=4,9$ (Fonte: MARQUES, 1995).....	79
Figura 35: Resultados apresentados na pesquisa (em azul) obtidos conforme o método analítico utilizado.....	84
Figura 36: Pressões médias coletadas no modelo bidimensional da UHE Santo Antônio, por Souza (2012) e como alternativa para o presente estudo, em comparação com dados cedidos por Endres (1990) e Marques (1995) e dados coletados no modelo bidimensional da UHE São Manoel.	86
Figura 37: Pressões médias coletadas no modelo bidimensional da UHE Santo Antônio com: (a) Fr_1 1,73 e 1,70; (b) Fr_1 2,77 e 2,90; (c) Fr_1 5,30 e 5,22; (d) Fr_1 7,56 e 7,73.....	87
Figura 38: Desvios padrão coletados no modelo bidimensional da UHE Santo Antônio, por Souza (2012) e como alternativa para o presente estudo, em comparação com dados	

cedidos por Endres (1990) e Marques (1995) e dados coletados no modelo bidimensional da UHE São Manoel.	88
Figura 39: Desvios padrão coletados no modelo bidimensional da UHE Santo Antônio com: (a) Fr_1 1,73 e 1,70; (b) Fr_1 2,77 e 2,90; (c) Fr_1 5,30 e 5,22; (d) Fr_1 7,56 e 7,73.	89
Figura 40: Fr_1 1,70 e 1,73: pressões médias e com probabilidades não excedência de 0,1% e 99,9% obtidas a partir dos dados coletados no modelo bidimensional da UHE Santo Antônio, por Souza (2012) e como alternativa para o presente estudo (UHE Santo Antônio), em comparação com dados cedidos por Endres (1990).	90
Figura 41: Fr_1 3,16 e 3,05: pressões médias e com probabilidades não excedência de 0,1% e 99,9% obtidas a partir dos dados coletados no modelo bidimensional da UHE Santo Antônio, por Souza (2012) e como alternativa para o presente estudo (UHE Santo Antônio), em comparação com dados cedidos por Endres (1990).	90
Figura 42: Fr_1 4,38 e 4,26: pressões médias e com probabilidades não excedência de 0,1% e 99,9% obtidas a partir dos dados coletados no modelo bidimensional da UHE Santo Antônio, por Souza (2012) e como alternativa para o presente estudo (UHE Santo Antônio), em comparação com dados cedidos por Endres (1990).	91
Figura 43: Fr_1 7,56 e 7,73: pressões médias e com probabilidades não excedência de 0,1% e 99,9% obtidas a partir dos dados coletados no modelo bidimensional da UHE Santo Antônio, por Souza (2012) e como alternativa para o presente estudo (UHE Santo Antônio), em comparação com dados cedidos por Endres (1990).	91
Figura 44: Coeficientes Estatísticos de Distribuição de Probabilidades (N) com probabilidade de não excedência 0,1%, 1%, 5%, 10%, 90%, 95%, 99% e 99,9% coletados no modelo bidimensional da UHE Santo Antônio, por Souza (2012) e em 2016 para o presente estudo (UHE Santo Antônio).	93
Figura 45: Coeficientes Estatísticos de Distribuição de Probabilidades (N) com probabilidade de não excedência 0,1% e 1% coletados no modelo bidimensional da UHE Santo Antônio, por Souza (2012) e em 2016 para o presente estudo (UHE Santo Antônio).	93
Figura 46: Coeficientes Estatísticos de Distribuição de Probabilidades (N) com probabilidade de não excedência 99% e 99,9% coletados no modelo bidimensional da UHE Santo Antônio, por Souza (2012) e em 2016 para o presente estudo (UHE Santo Antônio).	94
Figura 47: Pressões médias coletadas no modelo bidimensional da UHE Santo Antônio, em 2016 para o presente estudo, em comparação com dados cedidos por Endres (1990) e Marques (1995) e dados coletados no modelo bidimensional da UHE São Manoel.	95
Figura 48: Desvios padrão coletados no modelo bidimensional da UHE Santo Antônio, em 2016 para o presente estudo, em comparação com dados cedidos por Endres (1990) e Marques (1995) e dados coletados no modelo bidimensional da UHE São Manoel.	96
Figura 49: Pressões extremas adimensionais com probabilidade de não excedência de 0,1% coletadas no modelo bidimensional da UHE Santo Antônio, em 2016 para o presente estudo, em comparação com dados cedidos por Endres (1990) e Marques (1995) e dados coletados no modelo bidimensional da UHE São Manoel.	97
Figura 50: Pressões extremas adimensionais com probabilidade de não excedência de 1% coletadas no modelo bidimensional da UHE Santo Antônio, em 2016 para o presente	

estudo, em comparação com dados cedidos por Endres (1990) e Marques (1995) e dados coletados no modelo bidimensional da UHE São Manoel.....	98
Figura 51: Pressões extremas adimensionais com probabilidade de não excedência de 99% coletadas no modelo bidimensional da UHE Santo Antônio, em 2016 para o presente estudo, em comparação com dados cedidos por Endres (1990) e Marques (1995) e dados coletados no modelo bidimensional da UHE São Manoel.....	99
Figura 52: Pressões extremas adimensionais com probabilidade de não excedência de 99,9% coletadas no modelo bidimensional da UHE Santo Antônio, em 2016 para o presente estudo, em comparação com dados cedidos por Endres (1990) e Marques (1995) e dados coletados no modelo bidimensional da UHE São Manoel.....	99
Figura 53: Pressões médias amostrais e estimadas a partir da metodologia proposta por Teixeira (2003), em escala de modelo.....	101
Figura 54: Pressões médias com baixo número de Froude incidente ($Fr_1 < 4,5$) amostrais e estimadas a partir da metodologia proposta por Teixeira (2003), em escala de modelo: a) Fr_1 1,73 e 2,77; b) Fr_1 3,05, 3,49 e 4,26.	101
Figura 55: Desvios padrão amostrais e estimados a partir da metodologia proposta por Teixeira (2003), em escala de modelo.....	102
Figura 56: Desvios padrão amostrais e estimados a partir da metodologia proposta por Teixeira (2003), valores adimensionais.....	102
Figura 57: Desvios padrão com baixo número de Froude incidente ($Fr_1 < 4,5$) amostrais e estimados a partir da metodologia proposta por Teixeira (2003), em escala de modelo: a) Fr_1 1,73 e 2,77; b) Fr_1 3,05, 3,49 e 4,26.	103
Figura 58: Coeficientes estatísticos de distribuição de probabilidades (N) amostrais e estimados a partir da metodologia proposta por Teixeira (2003), valores adimensionais.	104
Figura 59: Coeficientes estatísticos de distribuição de probabilidades (N) amostrais e estimados a partir da metodologia proposta por Teixeira (2003), com probabilidades de não excedência de 0,1% e 1%, valores adimensionais.....	104
Figura 60: Coeficientes estatísticos de distribuição de probabilidades (N) amostrais e estimados a partir da metodologia proposta por Teixeira (2003), com probabilidades de não excedência de 99% e 99,9%, valores adimensionais.....	105
Figura 61: Pressões extremas com probabilidade de não excedência de 0,1% amostrais e estimadas a partir da metodologia proposta por Teixeira (2003), em escala de modelo.	105
Figura 62: Pressões extremas com probabilidade de não excedência de 1% amostrais e estimadas a partir da metodologia proposta por Teixeira (2003), em escala de modelo.	106
Figura 63: Pressões extremas com probabilidade de não excedência de 99% amostrais e estimadas a partir da metodologia proposta por Teixeira (2003), em escala de modelo.	106
Figura 64: Pressões extremas com probabilidade de não excedência de 99,9% amostrais e estimadas a partir da metodologia proposta por Teixeira (2003), em escala de modelo.	107
Figura 65: Diferença relativa entre as pressões médias estimadas a partir da metodologia proposta por Teixeira (2003) e amostrais.....	108

Figura 66: Diferença relativa entre as pressões médias estimadas a partir da metodologia proposta por Teixeira (2003) e amostrais, com baixo número de Froude incidente ($Fr_1 < 4,5$).	108
Figura 67: Diferença relativa entre os desvios padrão estimados a partir da metodologia proposta por Teixeira (2003) e amostrais.....	109
Figura 68: Diferença relativa entre os desvios padrão estimados a partir da metodologia proposta por Teixeira (2003) e amostrais, em detalhe, intervalo de diferença relativa - 1,0 a 2,0.	109
Figura 69: Diferenças relativas entre os coeficientes estatísticos de distribuição de probabilidades estimados a partir da metodologia proposta por Teixeira (2003) e amostrais, com probabilidades de não excedência: (a) 0,1%; (b) 1%; (c) 99%; (d) 99,9%.....	110
Figura 70: Diferença relativa entre as pressões extremas com probabilidade de não excedência de 0,1% estimadas a partir da metodologia proposta por Teixeira (2003) e amostrais.	111
Figura 71: Diferença relativa entre as pressões extremas estimadas a partir da metodologia proposta por Teixeira (2003) e amostrais, com probabilidades de não excedência: (a) 0,1%; (b) 1%; (c) 99%; (d) 99,9%.....	111
Figura 72: Pressão média da amostra coletada no modelo bidimensional da UHE São Manoel, comparação à estimativa proposta por Teixeira (2003), valores em metros, escala de modelo.	114
Figura 73: Desvio padrão da amostra coletada no modelo bidimensional da UHE São Manoel, comparação ao ajuste 1 proposto e ao ajuste proposto por Teixeira (2003), valores em metros, escala de modelo.....	114
Figura 74: Diferença relativa na estimativa do desvio padrão da UHE São Manoel a partir da metodologia original proposta por Teixeira (2003) e ajuste 1 proposto.	115
Figura 75: Estimativa das pressões extremas com probabilidade de não excedência de 0,1% da UHE São Manoel a partir da metodologia original proposta por Teixeira (2003) e incluindo 0 ajuste 1 proposto para o desvio padrão.	115
Figura 76: Estimativa das pressões extremas com probabilidade de não excedência de 99,9% da UHE São Manoel a partir da metodologia original proposta por Teixeira (2003) e incluindo o ajuste 1 proposto para o desvio padrão.	116
Figura 77: Diferença relativa na estimativa das pressões extremas com probabilidade de não excedência de 0,1% da UHE São Manoel a partir da metodologia original proposta por Teixeira (2003) e incluindo o ajuste 1 proposto para o desvio padrão.....	116
Figura 78: Diferença relativa na estimativa das pressões extremas com probabilidade de não excedência de 99,9% da UHE São Manoel a partir da metodologia original proposta por Teixeira (2003) e incluindo o ajuste 1 proposto para o desvio padrão.	117
Figura 79: Desvio padrão da amostra coletada no modelo bidimensional da UHE São Manoel, comparação ao ajuste 2 proposto e ao ajuste proposto por Teixeira (2003), valores em metros, escala de modelo.....	118
Figura 80: Diferença relativa na estimativa do desvio padrão da UHE São Manoel a partir da metodologia original proposta por Teixeira (2003) e ajuste 2 proposto.	119

Figura 81: Diferença relativa na estimativa das pressões extremas com probabilidade de não excedência de 0,1% da UHE São Manoel a partir da metodologia original proposta por Teixeira (2003) e incluindo o ajuste 2 proposto para o desvio padrão.....	119
Figura 82: Diferença relativa na estimativa das pressões extremas com probabilidade de não excedência de 99,9% da UHE São Manoel a partir da metodologia original proposta por Teixeira (2003) e incluindo o ajuste 2 proposto para o desvio padrão.	120
Figura 83: Ajuste 3 proposto para o desvio padrão do escoamento com $Fr_1 = 1,73$ em comparação à metodologia de previsão de pressões proposta por Teixeira (2003) e séries amostrais de Endres (1990) e Marques (1995).....	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Barragens brasileiras com baixo número de Froude (Fonte: SOUZA, 2012, p. 2). .	16
Tabela 2: Casos históricos de danos em barragens devidos ao ressalto hidráulico (Fonte: DAI PRÁ, 2011, p. 37).....	18
Tabela 3: Danos observados em obras hidráulicas (Fonte: MARQUES et al., 2017).....	43
Tabela 4: Coeficientes a, b e c para determinação do coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades (Fonte: TEIXEIRA, 2003).	60
Tabela 5: Características geométricas do modelo físico bidimensional do sistema extravasor da UHE Santo Antônio (Fonte: adaptado de SOUZA, 2012).	72
Tabela 6: Situações ensaiadas no modelo do vertedouro da UHE Santo Antônio (Fonte: SOUZA, 2012).	74
Tabela 7: Novos ensaios realizados no modelo bidimensional do sistema extravasor da UHE Santo Antônio.....	75
Tabela 8: Características dos ensaios realizados no modelo da UHE São Manoel no LAHE/FURNAS.	77
Tabela 9: Coeficientes a, b e c para determinação do coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades no intervalo de não excedência de 0,1% a 99,9%.....	100
Tabela 10: Considerações finais – amostra de dados	123

LISTA DE SIGLAS

ADV – *Acoustic Doppler Velocity*

CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

FURNAS – Furnas Centrais Elétricas S. A

IPH – Instituto de Pesquisas Hidráulicas

IST – Instituto Superior Técnico

LAHE – Laboratório de Hidráulica Experimental e Recursos Hídricos

LIPV – *Large-Scale Particle Image Velocimetry*

LOH – Laboratório de Obras Hidráulicas

PAC – Programa de Aceleração do Crescimento

PIV – *Particle Image Velocimetry*

TVE – Teoria dos Valores Extremos

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UHE – Usina Hidrelétrica

UL – Universidade de Lisboa

USBR – *United States Bureau of Reclamation*

LISTA DE SÍMBOLOS

A: área da seção

a, b, c: coeficientes de ajuste para determinação do coeficiente $N_{a\%}$, conforme metodologia proposta por Teixeira (2003), cujos valores são apresentados na Tabela 4

A_b : área do leito

A_d : coeficiente de assimetria

C_p' : coeficiente de flutuação de pressões

$C_{p\pm}$: coeficiente de pressões máximas (+) e mínimas (-)

C_{pC} : coeficiente de pressões médias

C_{pCM} : coeficiente de pressões médias máximas devido à força centrífuga

E_i : energia específica do escoamento na seção i

E: parâmetro presente na metodologia proposta por Hager (1988) que representa a razão $E=e/h_2=(h_2-z_1)/h_2$

E_1 : energia na seção S_1

E_2 : energia na seção S_2

Fr_1 : número adimensional de Froude no início do ressalto hidráulico

Fr_1^* : número de Froude na entrada do ressalto hidráulico afogado

Fr_2 : número adimensional de Froude no final do ressalto hidráulico

g: aceleração da gravidade

G_o : abertura da comporta, corresponde à menor distância perpendicular entre a extremidade inferior da comporta e o perfil do vertedouro

h_1 : projeção vertical do nível de água na entrada do ressalto hidráulico afogado ou altura conjugada rápida do ressalto hidráulico afogado

h_2 : ou T_w , altura conjugada lenta do ressalto hidráulico afogado ou lâmina de água a jusante do ressalto hidráulico

h_c : altura crítica do escoamento

K : coeficiente de curtose

$L_{Cp\text{máx}}$: ponto de maior flutuação de pressões

L_d : ponto de descolamento do escoamento

L_j : comprimento do ressalto hidráulico

L_j' : fim do ressalto hidráulico

L_r : comprimento do rolo

L_r' : fim do rolo

m_3 : momento centrado de ordem 3 (estatística)

m_4 : momento centrado de ordem 4 (estatística)

N : coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades

N_i : nível de água do escoamento, medido perpendicularmente ao fundo do canal, na seção i

N_1 : nível d'água incidente ou na entrada do ressalto hidráulico afogado

$N_{a\text{ Jus.}}$: nível de água a jusante do ressalto hidráulico

$N_{a\text{ Mont.}}$: nível de água a montante do ressalto hidráulico

$N_{a\%}$: coeficiente estatístico de distribuição de probabilidade no ponto x , parâmetro adimensional

P : pressão ou amostra de pressões

\bar{P} : pressões médias

P' : amplitude das flutuações de pressões

$P'_{0,1\%}$: amplitude das flutuações de pressões com 0,1% de probabilidade de ocorrência de valores iguais ou inferiores às mesmas

$P'_{99,9\%}$: amplitude das flutuações de pressões com 99,9% de probabilidade de ocorrência de valores iguais ou inferiores às mesmas

$P_{0,1\%}$: amostra de pressões com 0,1% de probabilidade de ocorrência de valores iguais ou inferiores às mesmas

$P_{99,9\%}$: amostra de pressões com 99,9% de probabilidade de ocorrência de valores iguais ou inferiores às mesmas

$P_{a\%}$: pressão com determinada probabilidade da ocorrência de pressão igual ou inferior no ponto x

$P_{amostral}$: pressão $P_{a\%}$ obtida a partir da amostra de pressões instantâneas

$P_{estimada}$: pressão $P_{a\%}$ estimada a partir da metodologia proposta por Teixeira (2003)

P_x : pressão média no ponto x

Q: vazão

S^* : fator de submergência, calculado conforme a Equação 2.16

S: fator de submergência, calculado conforme a Equação 2.17

S_1 : seção imediatamente a montante da entrada do ressalto hidráulico

S_2 : seção imediatamente a jusante da entrada do ressalto hidráulico

T_h : tangente hiperbólica

T_w : ou h_2 , altura conjugada lenta do ressalto hidráulico afogado ou lâmina de água a jusante do ressalto hidráulico

v: velocidade média do escoamento

v_1 : velocidade na seção de início do ressalto hidráulico

V_0 : volume de controle

x : posição longitudinal no ressalto hidráulico ou distância horizontal relativa ao início do ressalto hidráulico, contada a partir do encontro entre o raio de concordância do vertedouro e o trecho plano da bacia de dissipação

X_1 : posição horizontal do início do ressalto hidráulico medida a partir do eixo da crista do vertedouro

y_1 : altura conjugada no início do ressalto hidráulico (rápida)

y_2 : altura conjugada no final do ressalto hidráulico (lenta)

Z_1 : altura do início do ressalto hidráulico a partir da cota da bacia de dissipação

θ : ângulo de inclinação do fundo do canal em relação à horizontal

ρ : massa específica da água

γ : peso específico do líquido

ΔH : perda de carga total na estrutura de dissipação

ΔP : desvio das pressões da média

α : coeficiente de Coriolis

δ : parâmetro adimensional dependente do número de Froude e da inclinação do canal, utilizado na metodologia proposta por Elevatorski (1959)

η : eficiência na dissipação de energia do ressalto hidráulico

σ : desvio padrão da amostra de pressões

σ_x : desvio padrão no ponto x

τ_0 : tensão de cisalhamento crítica

$\Omega_{x,adm}$: desvio padrão adimensional

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 MOTIVAÇÃO	17
1.2 OBJETIVOS	20
1.2.1 Objetivo Principal	20
1.2.2 Objetivos Secundários.....	20
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1 RESSALTO HIDRÁULICO: APRESENTAÇÃO DO FENÔMENO	23
2.2 ALTURAS CONJUGADAS NO RESSALTO HIDRÁULICO	24
2.2.1 Alturas Conjugadas em Plano Inclinado	27
2.3 COMPRIMENTOS CARACTERÍSTICOS (RESSALTO E ROLO).....	31
2.3.1 Comprimento do Ressalto Hidráulico	31
2.3.2 Comprimento do Rolo.....	33
2.4 FORMAS DO RESSALTO HIDRÁULICO.....	34
2.5 GRAU DE SUBMERGÊNCIA DO RESSALTO HIDRÁULICO	36
2.6 DISSIPACÃO DE ENERGIA	38
2.7 ESFORÇOS RELACIONADOS AO RESSALTO HIDRÁULICO	40
2.7.1 Pressões hidrodinâmicas	40
2.7.2 Flutuações de pressões	43
2.7.3 Pressões extremas.....	50
2.7.4 Previsão de pressões.....	55
2.8 MODELAGEM FÍSICA DO RESSALTO HIDRÁULICO.....	62
2.8.1 Relações de escala.....	62
2.8.2 Medições	65
2.8.3 Condições de entrada	67
2.8.4 Velocidades	69
3 MATERIAIS E MÉTODOS	71
3.1 DADOS EXPERIMENTAIS	71
3.1.1 Souza (2012)	71
3.1.2 Dados coletados no modelo físico da UHE Santo Antônio.....	74
3.1.3 Dados coletados no modelo físico da UHE São Manoel.....	75
3.1.4 Endres (1990).....	78
3.1.5 Marques (1995).....	79

3.2 METODOLOGIA	80
3.2.1 Análise Preliminar dos Dados Amostrais.....	80
3.2.2 Análises Estatísticas dos Dados Amostrais	80
3.2.3 Complementação da Metodologia de Previsão de Pressões Proposta por Teixeira (2003)..	81
3.2.4 Estimativa dos Parâmetros Estatísticos	82
3.2.5 Comparação dos Resultados e Avaliação da Aplicabilidade do Método ao Baixo Número de Froude	82
3.2.6 Sugestão de Novas Estimativas.....	83
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	84
4.1 ANÁLISE PRELIMINAR DOS DADOS: MODELO DA UHE SANTO ANTÔNIO	85
4.1.1 Pressão Média	85
4.1.2 Desvio Padrão	87
4.1.3 Pressões Extremas: 0,1% e 99,9%.....	89
4.1.4 Coeficiente Estatístico de Distribuição de Probabilidades	92
4.1.5 Escolha dos Dados Utilizados	94
4.2 ANÁLISE DAS PRESSÕES EXTREMAS	94
4.3 COEFICIENTE ESTATÍSTICO DE DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADES: 0,1% E 99,9%	100
4.4 ESTIMATIVA DAS PRESSÕES EXTREMAS A PARTIR DA METODOLOGIA PROPOSTA POR TEIXEIRA (2003).....	100
4.5 COMPARAÇÃO DAS PRESSÕES EXTREMAS AMOSTRAIS E ESTIMADAS.....	107
4.6 PROPOSIÇÃO DE NOVO AJUSTE PARA METODOLOGIA DE PREVISÃO DE PRESSÕES	112
4.6.1 Ajuste 1: UHE Santo Antônio	112
4.6.2 Ajuste 2: baixo número de Froude	117
4.6.3 Ajuste 3: número de Froude incidente 1,73	120
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	122
6 RECOMENDAÇÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS	126
REFERÊNCIAS	127
APÊNDICE A – Modelo UHE Santo Antônio	135
APÊNDICE B – Aplicação da metodologia proposta por Teixeira (2003).....	147
APÊNDICE C – Diferença relativa referente à aplicação da metodologia proposta por Teixeira (2003)	154
APÊNDICE D – Novos ajustes propostos	157
ANEXO A – Ensaio UHE Santo Antônio e UHE São Manoel.....	163

1 INTRODUÇÃO

No atual contexto do desenvolvimento sustentável, é imprescindível a busca por alternativas energéticas menos impactantes ao meio, que permitam a manutenção do crescimento social e econômico, sem o comprometimento dos recursos para as gerações futuras. Assim, a energia derivada de fontes hidráulicas representa uma das principais alternativas na geração energética por fontes renováveis. Nas últimas quatro décadas, a produção mundial de energia elétrica produzida por fontes hidráulicas aumentou aproximadamente 150%, correspondendo, em 2014, a 2,4% da matriz energética mundial (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2016). Segundo a Aneel (ANEEL, 2008), o crescimento verificado ocorreu principalmente na Ásia e na América Latina, uma vez que os países desenvolvidos já exploraram a maior parte do seu potencial hidroenergético.

No Brasil, onde a energia elétrica é majoritariamente oriunda de fontes renováveis, a energia hidráulica correspondeu a 65,2% da matriz elétrica no ano de 2017 (EPE, 2018). Apesar do papel determinante na geração de energia elétrica do País, o potencial hidroenergético, estimado em cerca de 251.490 MW, ainda não foi totalmente explorado (BRASIL, 2007). Até o ano de 2007, apenas 30,9% da capacidade foi aproveitada e somente parte do potencial havia sido inventariada, correspondendo a 81,1% do potencial total estimado (BRASIL, 2007). Nos anos seguintes, com a criação do Programa de Aceleração do Crescimento (PAC), grandes investimentos foram direcionados ao desenvolvimento de novos aproveitamentos hidrelétricos no País.

Alinhado com a demanda energética crescente no mundo, prevê-se crescimento do consumo de energia elétrica brasileira de cerca de 4% ao ano entre o período de 2014 a 2024, quando o consumo anual deve atingir cerca de 780 TWh (EPE, 2015). Para suprir tal necessidade, grande parte dos recursos destinados ao aumento da produção de energia são direcionados à geração por fontes hidráulicas. Entre os aproveitamentos recentes, podem-se citar as UHEs Jirau, Santo Antônio, Belo Monte e Teles Pires. Além disso, verifica-se o interesse crescente na exploração do potencial energético da região Norte do Brasil, uma vez que grande parte do potencial hidroenergético das regiões Sul e Sudeste encontra-se aproveitada.

No entanto, são vários os desafios enfrentados no aproveitamento da região Norte do País para a construção de empreendimentos hidroenergéticos, tanto da ordem social e ambiental como em aspectos técnicos. Apesar dos critérios de projeto para estruturas convencionais de aproveitamento hidrelétrico, incluindo os elementos de dissipação de energia, serem amplamente aceitos e aplicados, existem lacunas do conhecimento a serem preenchidas. Nesse sentido, verifica-se a ocorrência de danos em obras hidráulicas em diversas localidades do mundo, como o caso recente da barragem Paradise, em Queensland, na Austrália. As cheias ocorridas no local em 2010 e em 2013, cujo tempo de recorrência foi estimado em aproximadamente 170 anos, levaram ao surgimento de danos na estrutura a jusante do vertedouro principal (MCPHERSON et al., 2015).

Quanto às estruturas de dissipação de energia por ressalto hidráulico, segundo Lopardo (2003), são necessários estudos relacionados às características internas do fluxo aleatório e altamente turbulento do ressalto hidráulico. O entendimento da natureza aleatória do fenômeno pode contribuir com informações fundamentais para o projeto das estruturas de dissipação, proporcionando o desenvolvimento de obras mais seguras e com maior eficiência.

Em se tratando dos rios presentes na região Norte do Brasil, outro aspecto a ser abordado são as implicações da forma do ressalto nos esforços hidrodinâmicos causados por este. Em corpos d'água caracterizados por baixas quedas e elevadas vazões, verifica-se o surgimento do ressalto hidráulico com baixo número de Froude ($Fr_1 < 4,5$), que produz menor dissipação de energia em relação ao ressalto hidráulico estável ($4,5 < Fr_1 < 9,0$), porém seus efeitos podem se propagar por longas distâncias. Diversos trabalhos foram publicados envolvendo dados com baixo número de Froude (TOSO, BOWERS, 1988; MEES, 2008; SOUZA, 2012; CASTRO-ORGAZ et al., 2015; CHIEW, EMADZADEH, 2017; etc.), porém poucas publicações os relacionam às características internas do ressalto hidráulico ou a métodos de previsão de esforços.

A Tabela 1 apresenta algumas barragens brasileiras com ocorrência de ressalto hidráulico com baixo número de Froude, conforme apresentado por Souza (2012, p. 2). Percebe-se que as UHEs Jirau e Santo Antônio, localizadas em regiões de baixa declividade, no rio Madeira, na região Norte, apresentam elevadas vazões específicas e, como esperado, baixo número de Froude.

Tabela 1: Barragens brasileiras com baixo número de Froude (Fonte: SOUZA, 2012, p. 2).

Nome	Rio	Estado	Vazão Específica máxima (m ³ /s/m)	Fr ₁
Porto Primavera	Paraná	Mato Grosso do Sul e São Paulo	220,0	1,4
Rosana	Paranapanema	São Paulo e Paraná	176,0	1,5
Coaracy Nunes	Araguari	Amapá	96,0	2,0
Taquaruçu	Paranapanema	São Paulo e Paraná	121,2	2,3
Balbina	Uatumã	Amazonas	143,1	2,9
Porto Colômbia	Grande	Minas Gerais e São Paulo	98,0	3,2
Jirau	Madeira	Rondônia	162,4	3,2
Santo Antônio	Madeira	Rondônia	187,2	3,5
Funil	Grande	Minas Gerais	147,1	3,6
Aimorés	Doce	Minas Gerais	92,3	3,7
Nova Avanhadava	Tietê	São Paulo	104,4	3,7
Belo Monte	Xingu	Pará	86,7	4,5

A presente pesquisa busca contribuir para o estudo de métodos de previsão de pressões em ressalto hidráulico com baixo número de Froude, a partir da validação da metodologia de previsão proposta por Teixeira (2003). Para tanto, são utilizados dados experimentais obtidos por Souza (2012) e novas séries de dados coletadas no mesmo modelo físico utilizado por Souza (2012) para elaboração do estudo e dados experimentais cedidos por Endres (1990) e Marques (1995), bem como séries de pressões instantâneas obtidas no modelo físico do sistema extravasor da UHE São Manoel.

Dessa forma, os dois primeiros capítulos desta pesquisa incluem a contextualização do assunto e a motivação para elaboração do estudo, bem como são apresentados os objetivos que se almejam alcançar. São apontadas as características da demanda energética crescente no Brasil e a relevância dos aproveitamentos hidrelétricos da região Norte para a manutenção da geração de energia elétrica brasileira. Também são indicados os desafios técnicos associados às estruturas hidráulicas de dissipação de energia com baixo número de Froude, objeto de estudo da presente pesquisa, que ainda requerem informações e critérios para a elaboração de projetos mais eficientes.

O terceiro capítulo apresenta a fundamentação teórica relevante ao tema, onde são apresentadas algumas das principais características do ressalto hidráulico, tais como alturas, comprimentos

e aspectos relacionados aos esforços associados ao fenômeno. Neste item, são abordados diferentes fatores relacionados às características estatísticas do ressalto hidráulico.

O quarto capítulo apresenta a metodologia que foi adotada na elaboração da pesquisa, bem como os materiais empregados. São apresentados os modelos físicos em escala dos quais são oriundos os dados experimentais utilizados.

No quinto capítulo, são apresentados os resultados obtidos com o desenvolvimento desta pesquisa. Foi justificada a escolha da série de dados coletada no modelo físico da UHE Santo Antônio utilizada, foram apresentadas as características das pressões amostrais analisadas, o produto da atualização da metodologia proposta por Teixeira (2003) para pressões mais extremas e os resultados da aplicação da metodologia aos escoamentos com baixo número de Froude. A comparação e avaliação da aplicabilidade do método foi dada a partir das diferenças relativas verificadas entre valores coletados em modelos e estimados e, por fim, foi discutida a sugestão de novos ajustes para complementação do método.

No sexto e sétimo capítulos, foram apresentadas as considerações finais sobre a pesquisa desenvolvida e sugeridos temas para novas investigações.

1.1 MOTIVAÇÃO

As observações do ressalto hidráulico remontam ao século XVI, quando alguns dos primeiros registros de que se têm conhecimento foram produzidos por Leonardo da Vinci. Dadas suas características, o ressalto hidráulico constitui uma ferramenta fundamental para a dissipação de energia nas estruturas hidráulicas. Sendo assim, a compreensão dos diversos aspectos relacionados ao fenômeno é de extrema importância para o desenvolvimento de projetos de obras hidráulicas, a fim de proporcionar maior eficiência às estruturas e minimizar a ocorrência de falhas e danos.

Sujeitas a esforços extremos causados pelo escoamento turbulento, as estruturas dissipadoras de energia a jusante de vertedouros de barragens podem sofrer danos relacionados ao movimento estrutural, erosão, falha dos materiais e problemas relacionados ao fluxo hidráulico (MARQUES et al., 2017). Embora o ressalto hidráulico seja objeto de estudo de muitos pesquisadores, faltam informações para o projeto adequado dos elementos que visam contê-lo, uma vez que até recentemente foram registradas ocorrências de falhas significativas em

estruturas de dissipação. A Tabela 2, conforme apresentada por Dai Prá (2011, p. 37), elenca casos históricos de danos ocorridos principalmente em bacias de dissipação por ressalto hidráulico, que corresponde a uma estrutura presente em diversos projetos de sistemas extravasores de barragens.

A Figura 1 apresenta os danos provocados pela ação macroturbulenta do escoamento na bacia de dissipação da UHE Porto Colômbia, verificados a jusante dos blocos de dissipação junto ao pé do vertedouro. As crateras de erosão, formadas ao longo de aproximadamente 20 anos de operação da usina, atingiram dimensões médias de até 2,00 m de comprimento e 0,70 m de profundidade (CBDB, 2010).

Tabela 2: Casos históricos de danos em barragens devidos ao ressalto hidráulico¹ (Fonte: DAI PRÁ, 2011, p. 37).

Autores	Ocorrência
Sanchez Bribiesca e Capella Viscaino (1973)	Barragem de Malpaso: arrancamento de blocos de rocha
Bowers et al. (1964)	Barragem de Karnafuli: danos no vertedouro
Lopardo et al. (2006)	Barragem de Nort Folk: danos na soleira terminal da bacia de dissipação e erosão a jusante
Elevatorski (1959)	Barragens de Bonneville e Wilson: danos erosivos na bacia de dissipação
Senturk (1998)	Barragem de Keban: erosão na bacia de dissipação
Lopardo et al. (1982)	Barragem de Salto Grande: erosão nos blocos de dissipação da bacia
ICOLD/CBDB (2010)	Barragem de Camargos: erosão no defletor no final da bacia de dissipação
ICOLD/CBDB (2010)	Barragem de Porto Colômbia: erosão dos blocos de dissipação na entrada e na saída da bacia

¹ SANCHEZ BRIBIESCA, J. S.; CAPELLA VISCAINO, A. C. Turbulent effects on the lining of stilling basin. In: Proc., 11th Int. Congress on Large Dams. 1973. p. 1575-1592. apud Fiorotto e Rinaldo (1992). LOPARDO, R. A.; DE LIO, J. C.; VERNET, G. F. Physical modelling on cavitation tendency for macroturbulence of hydraulic jump. In: Proc., Int. Conf. on Hydraulic Modelling of Civil Eng. Struc., BHRA Fluid Engrs., Coventry, England, Paper C. 1982. p. 109-121. apud Lopardo et al. (2006).



Figura 1: Danos observados na bacia de dissipação da UHE Porto Colômbia, em destaque indivíduo para referência de escala (Fonte: CBDB, 2010).

Notadamente, os danos relacionados à erosão das estruturas, principalmente junto às macrorugosidades das bacias de dissipação e zonas de maiores esforços, estão relacionados às características internas do ressalto hidráulico e das extremas flutuações de pressões a esse associadas. Neste sentido, o conhecimento das características dos esforços extremos atuantes sobre as estruturas de dissipação, bem como o desenvolvimento de métodos de previsão desses esforços, contribuem com informações relevantes para o dimensionamento estrutural das obras de dissipação de energia hidráulica em barragens.

Conforme salientado no item 1 deste capítulo, nos últimos anos, identificou-se o interesse do aproveitamento do potencial hidroenergético da região Norte do Brasil, onde a presença de rios com elevada vazão e baixa ocorrência de quedas localizadas são propícias para o projeto de barragens com pequena altura (inferior a 20 metros). Nestas condições, observa-se a formação do ressalto hidráulico com baixo número de Froude ($Fr_1 < 4,5$) na entrada dos dissipadores de energia hidráulica, cujas características diferem do ressalto hidráulico estável ($4,5 < Fr_1 < 9,0$). Para esse caso, a literatura é limitada, principalmente quanto a métodos de previsão dos esforços atribuídos ao ressalto hidráulico.

Assim, esta pesquisa busca contribuir com o meio técnico-científico a partir da avaliação de um método, capaz de estimar os esforços gerados pelo ressalto hidráulico em bacias de dissipação, quanto a sua aplicabilidade a situações com baixo número de Froude ($Fr_1 < 4,5$). Espera-se, dessa forma, contribuir com novos recursos para a obtenção de informações fundamentais ao projeto de bacias de dissipação sujeitas a essa condição.

1.2 OBJETIVOS

Os objetivos da pesquisa estão classificados em principal e secundário e são descritos a seguir.

1.2.1 Objetivo Principal

O objetivo principal da pesquisa é a avaliação da metodologia de previsão de pressões extremas para bacias de dissipação a jusante de um vertedouro de soleira livre, proposta por Teixeira (2003), quanto a sua aplicabilidade ao ressalto hidráulico livre com baixo número de Froude ($Fr_1 < 4,5$).

1.2.2 Objetivos Secundários

Os objetivos secundários da pesquisa são:

- a) complementação do trabalho desenvolvido por Souza (2012) com revisão dos dados de ensaios e apresentação das pressões extremas amostrais com probabilidades de não excedência no intervalo 0,1% a 99,9%;
- b) avaliação das diferenças entre os parâmetros estatísticos (pressões extremas, médias, desvio padrão e coeficiente estatístico de distribuição de probabilidade) de escoamentos com baixo número de Froude ($Fr_1 < 4,5$) e número de Froude correspondentes ao ressalto hidráulico estável ($4,5 < Fr_1 < 9,0$);
- c) complementação da metodologia proposta por Teixeira (2003) para a previsão de maior faixa de pressões, incluindo as probabilidades de não excedência de 0,1% e 99,9%, para pressões extremas, médias, desvio padrão e coeficiente estatístico de distribuição de probabilidade;
- d) caso identificada a necessidade, proposição de novo ajuste para estimativa dos parâmetros estatísticos necessários à estimativa das pressões extremas em ressaltos hidráulicos com baixo número de Froude ($Fr_1 < 4,5$).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O ressalto hidráulico é um fenômeno de grande relevância nos estudos de dissipação de energia em estruturas hidráulicas. Conforme Hager (1992), as primeiras observações e descrição do ressalto hidráulico são atribuídas a Leonardo da Vinci, no século XVI. No século XVIII, Guglielmini (1739 apud MOSSA; PETRILLO, 2003) buscou descrever o comportamento do escoamento sobre um canal inclinado seguido por um canal mais largo com menor inclinação. Um esquemático da seção longitudinal do canal observado pelo autor é apresentado na Figura 2.

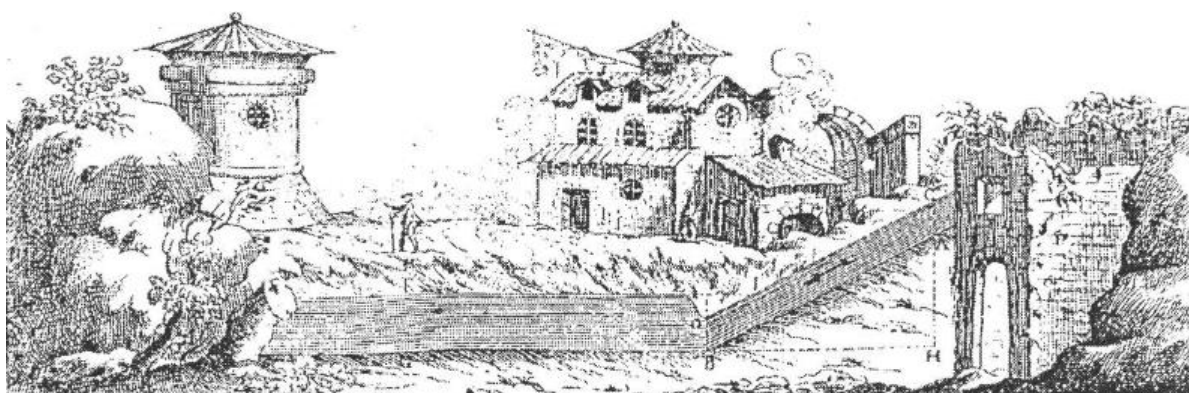


Figura 2: Ressalto Hidráulico descrito por Guglielmini (1739) (Fonte: MOSSA; PETRILLO, 2003).

Os primeiros trabalhos experimentais sobre o fenômeno hidráulico surgiram a partir de Bidone (1820² apud HAGER, 1992) que buscou descrever, embora sem sucesso, a relação das alturas conjugadas do ressalto hidráulico. No entanto, com base nos dados experimentais obtidos pelo autor e no princípio de conservação do momento, Bélanger (1841³ apud CHANSON, 2008) foi capaz de determinar as alturas conjugadas do escoamento através da conhecida equação de Bélanger.

Ao longo dos anos, diversas contribuições ao conhecimento das características do ressalto hidráulico foram realizadas, como estudos relativos à dissipação de energia por Elevatorski (1959), às flutuações de pressões por Elder (1961), às características estatísticas por Vasiliev e Brukreyev (1967), aos esforços atuantes sobre lajes por Fiorotto e Rinaldo (1992a) e outros. Assim, alguns dos principais trabalhos são apresentados no histórico de estudos sobre

² BIDONE, Giorgio. Expériences sur le remou et sur la propagation des ondes par George Bidone. de l'Imprimerie Royale, 1820. apud Hager (1992);

³ BELANGER, J. B. Essai sur la solution numérique de quelques problèmes relatifs au mouvement permanent des eaux courantes. Carilian-Goeury, 1828. apud Chanson (2008).

o ressalto hidráulico adaptado de Mees (2008) na Figura 3. Contudo, considerando-se a complexidade do fenômeno, ainda existem aspectos não esclarecidos do ressalto hidráulico, notadamente quanto suas características internas.

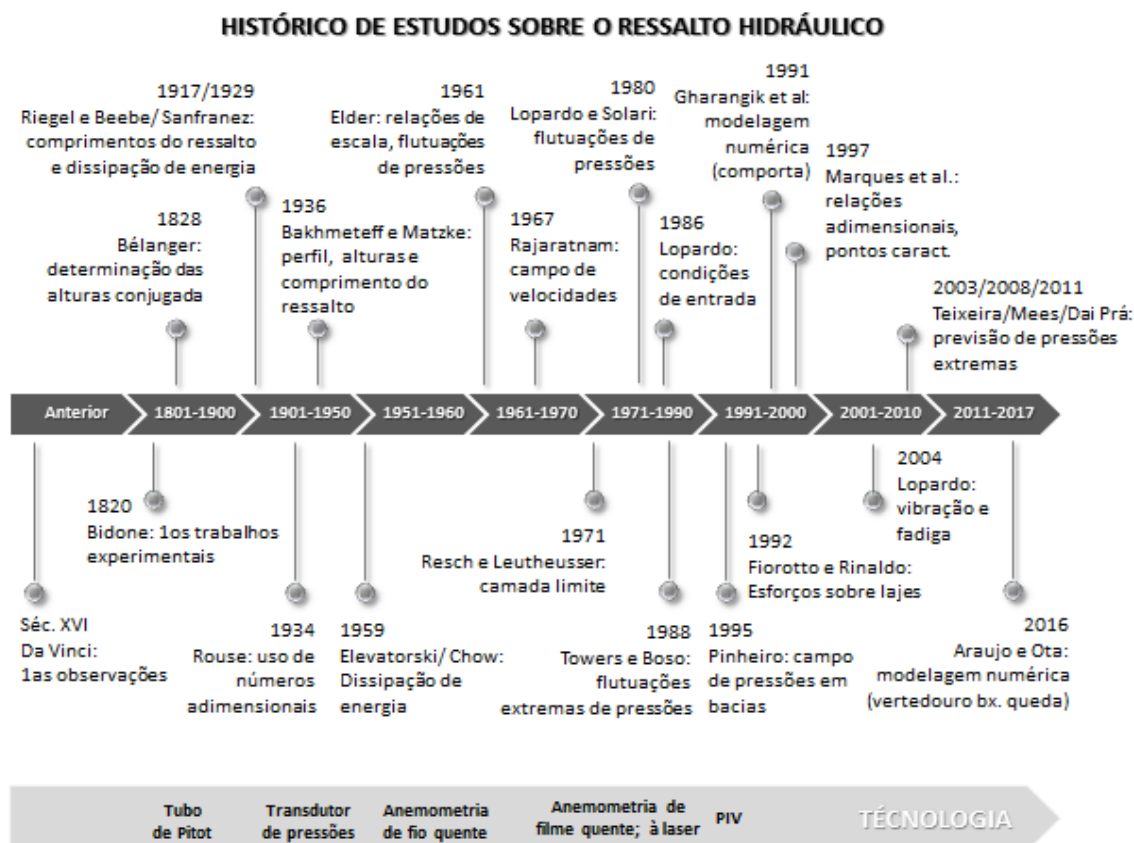


Figura 3: Linha do tempo com alguns dos principais trabalhos sobre o ressalto hidráulico⁴ (Fonte: adaptado de MEES, 2008).

Neste capítulo, é apresentada uma revisão de alguns dos principais aspectos relacionados ao ressalto hidráulico. São abordadas características externas do fenômeno como formas, alturas e comprimentos, bem como propriedades internas relacionadas às características estatísticas das

⁴ BIDONE, Giorgio. Expériences sur le remou et sur la propagation des ondes par George Bidone. de l'Imprimerie Royale, 1820. apud Hager (1992);
 BELANGER, J. B. Essai sur la solution numérique de quelques problèmes relatifs au mouvement permanent des eaux courantes. Carilian-Goeury, 1828. apud Chanson (2008);
 RIEGEL, R. M.; BEEBE, J. C. The Hydraulic Jump as a Means of Dissipating Energy. Miami Conservancy District, Technical Reports Part III, 1917, p. 60-111. Dayton, Ohio. apud Elevatorski (1959);
 BAKHMETEFF, B. A.; MATZKE, A. E. The hydraulic jump in terms of dynamic similarity. In: Proceedings of the American Society of Civil Engineers. ASCE, 1936. p. 145-162. apud Hager (1992);
 LOPARDO, R. A.; SOLARI, H. G. Fluctuaciones de presión en la base de resalto libre. In: IX Congreso Latino Americano de Hidráulica, Mérida, Venezuela, pg. 1980. p. 69-78. apud Teixeira (2003);
 PINHEIRO, A. A. N. Ações Hidrodinâmicas em Soleiras de Bacias de Dissipação de Energia por Ressalto Hidráulico. Tese (Doutorado) – Universidade Técnica de Lisboa. 353 p. 1995. apud Mees (2008).

pressões do ressalto hidráulico (pressões médias, pressões extremas, flutuações de pressões, coeficientes de assimetria e curtose, entre outros).

2.1 RESSALTO HIDRÁULICO: APRESENTAÇÃO DO FENÔMENO

O ressalto hidráulico é um fenômeno hidráulico bruscamente variado verificado na transição do regime supercrítico (rápido ou torrencial) para o regime subcrítico (lento ou fluvial) em escoamentos a superfície livre. Segundo Hickin (2004), a transição do regime de escoamento subcrítico para o regime supercrítico ocorre de maneira suave com o aumento gradativo da velocidade e redução do nível d'água. O fenômeno é relacionado a pequenas perdas de carga. Por outro lado, a passagem do regime de escoamento supercrítico para o regime subcrítico ocorre de forma súbita. Neste caso, as altas velocidades do escoamento a montante não permitem a transição gradativa do nível d'água normal ao escoamento supercrítico para o nível d'água normal ao escoamento subcrítico, resultando na descontinuidade conhecida como ressalto hidráulico.

Neste fenômeno, altamente turbulento, observa-se a formação de uma região de recirculação denominada rolo, na qual ocorre a incorporação de ar e a elevação do nível d'água, conforme ilustrado na Figura 4. A jusante desta região, uma zona de bolhas de ar é constituída, onde ocorre majoritariamente a saída de ar do sistema. Dessa forma, o ressalto hidráulico pode ser relacionado à alta dissipação de energia em um escoamento.



Figura 4: Ressonância Hidráulica formado a jusante de vertedouro de calha lisa (Fonte: CHIEW, EMADZADEH, 2017).

Além disso, devido a sua natureza turbulenta, o ressalto hidráulico é acompanhado de intensas flutuações de pressões e velocidades. Os esforços hidrodinâmicos a essas relacionados podem causar danos às estruturas que contêm o fenômeno como canais, calhas e leitos de rios e estruturas de dissipação de energia em obras hidráulicas. Conforme salienta Lopardo (2013a), apesar da publicação de estudos acerca das flutuações de pressões e velocidades ter início há

mais de 50 anos⁵, as características internas do ressalto hidráulico não foram suficientemente investigadas até o momento.

2.2 ALTURAS CONJUGADAS NO RESSALTO HIDRÁULICO

Um dos elementos utilizados para a descrição do ressalto hidráulico são as lâminas de água verificadas a montante e a jusante do fenômeno, chamadas alturas conjugadas. Dessa forma, a altura conjugada observada na seção de entrada do fenômeno é denominada rápida ou supercrítica (y_1), enquanto a altura conjugada verificada na seção de saída do ressalto hidráulico é denominada lenta ou subcrítica (y_2), conforme ilustrado na Figura 5.

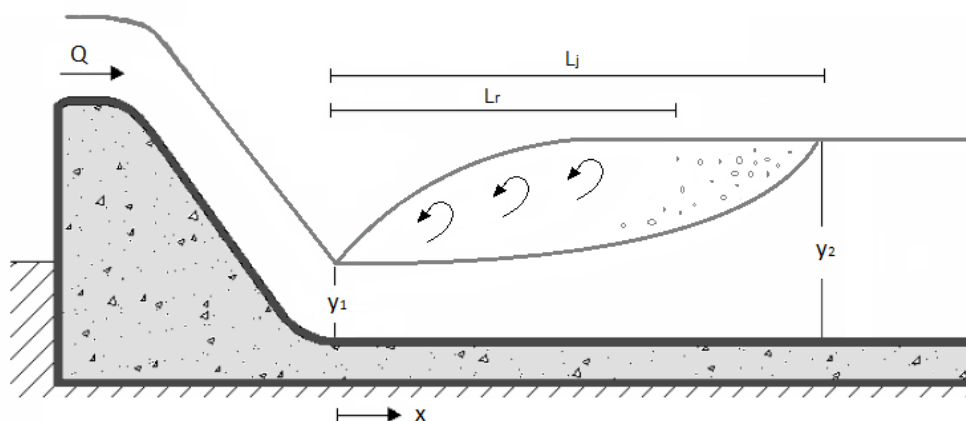


Figura 5: Alturas conjugadas do ressalto hidráulico.

Segundo Chanson (2008, p. 1), “Para um canal retangular horizontal e negligenciando a tensão de cisalhamento, os princípios de continuidade e quantidade de movimento produzem uma série de relações adimensionais entre as propriedades de montante e jusante do escoamento.”. As primeiras tentativas de determinação da relação entre as alturas conjugadas de que se tem conhecimento datam do século XIX, a partir do trabalho experimental desenvolvido por Bidone (1820² apud HAGER, 1992). Em 1841, o francês Jean-Baptiste Bélanger (1841³ apud CHANSON, 2008) obteve a conhecida Equação de Bélanger a partir da aplicação do princípio de conservação da quantidade de movimento.

O princípio da conservação da quantidade de movimento linear tem origem na Segunda Lei de Newton e atesta que a mudança no momento por unidade de tempo em um corpo é igual à

⁵ PREOBRAZHENSKI, N. A. Laboratory and field investigation of flow pressure pulsation and vibration of large dams. In: Proceedings of the 7th Congreso Mundial de Grandes Presas. ICOLD. 1958.
VASILIEV, V. O.; BUKREYEV, V. Statistical characteristics of hydraulic jump. In: Proceedings of the 12th IAHR Congress, v. 2, p. 1-8, Fort Collins, Colorado, USA, 1967.

resultante das forças externas aplicadas no corpo por unidade de tempo (HICKIN, 2004). Sendo assim, analisando-se um volume de controle (V_o), definido entre as seções 1 e 2, conforme a Figura 6, obtém-se a relação de conservação da quantidade de movimento (Equação 2.1):

$$\rho Q(v_{s2} - v_{s1}) = P_{s1}A_{s1} - P_{s2}A_{s2} + \gamma V_o \sin \theta - \tau_o A_b \quad 2.1$$

Sendo:

ρ : massa específica da água;

Q : vazão;

v : velocidade média do escoamento nas seções 1 (s_1) e 2 (s_2);

P : pressão nas seções 1 (s_1) e 2 (s_2);

A : área das seções 1 (s_1) e 2 (s_2);

γ : peso específico do líquido;

V_o : volume de controle;

θ : ângulo de inclinação do fundo do canal em relação à horizontal;

τ_o : tensão de cisalhamento crítica;

A_b : área do leito.

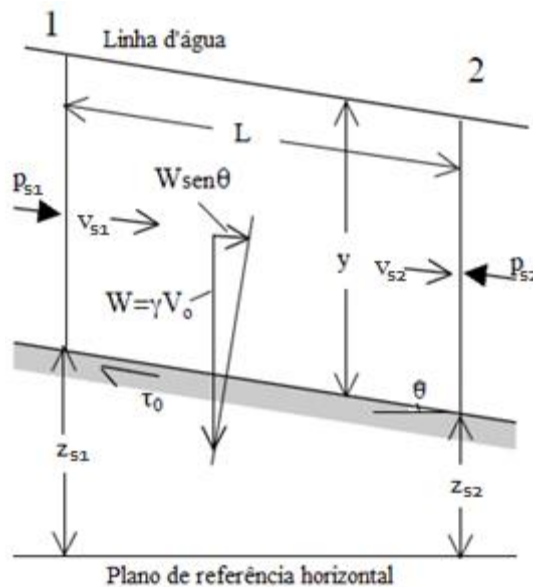


Figura 6: Diagrama de referência da equação de conservação do momento (Fonte: HICKIN, 2004).

Assumindo-se que os termos de pressão são hidrostáticos e que a soma da componente horizontal do peso do material contido no volume de controle ($\gamma V_o \sin \theta$) e da força de resistência ao cisalhamento ($\tau_o A_b$) possa ser desprezada, a Equação 3.1 pode ser reescrita de forma a

expressar a relação entre as alturas conjugadas do ressalto hidráulico livre em um canal horizontal de seção retangular (Equação 2.2):

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + 8 \frac{v_1^2}{gy_1}} - 1 \right] \quad 2.2$$

Sendo:

y_1 : altura conjugada no início do ressalto hidráulico (rápida);

y_2 : altura conjugada no final do ressalto hidráulico (lenta);

g : aceleração da gravidade.

Posteriormente, a relação adimensional $v_1 / \sqrt{gy_1}$ passou a ser conhecida como número de Froude na seção de entrada do ressalto hidráulico (Fr_1), conforme apresentado na Equação 2.3. Dessa forma, a Equação 2.2 pode ser reescrita na sua forma mais usual (Equação 2.4), a reputada Equação de Bélanger.

$$Fr_1 = \frac{v_1}{\sqrt{gy_1}} \quad 2.3$$

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1 \right] \quad 2.4$$

Sendo:

Fr_1 : número adimensional de Froude no início do ressalto hidráulico ou incidente;

v_1 : velocidade média do escamento na entrada do ressalto hidráulico.

Além disso, aplicando-se o princípio da continuidade, a relação expressa pela Equação 2.4 pode ser apresentada na forma (Equação 2.5):

$$\frac{y_1}{y_2} = \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + 8Fr_2^2} - 1 \right] \quad 2.5$$

Sendo:

Fr_2 : número adimensional de Froude no final do ressalto hidráulico.

2.2.1 Alturas Conjugadas em Plano Inclinado

Diversos autores sugeriram metodologias para determinação das alturas conjugadas do ressalto hidráulico com início sobre um plano inclinado, que corresponde ao caso do ressalto hidráulico submerso. Classicamente, a energia de um escoamento gradualmente variado sobre um plano inclinado é analisada em termos de seções transversais do escoamento, perpendiculares ao fundo do canal inclinado, segundo apresentado por Puls (1941) e Chow (1959), conforme observado na Figura 7.

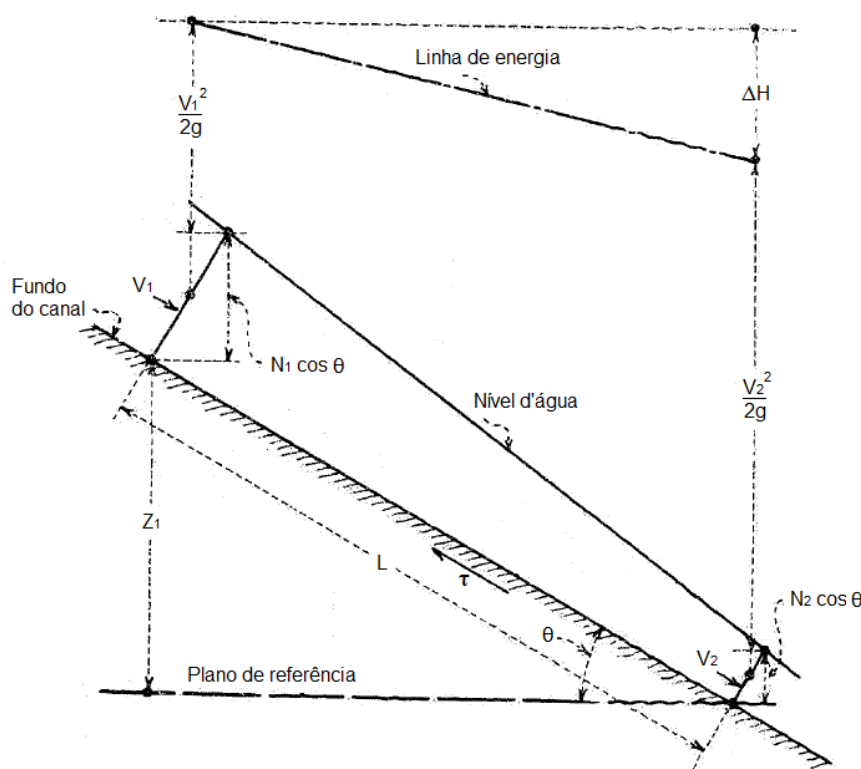


Figura 7: Energia em um escoamento gradualmente variado sobre um plano inclinado (Fonte: PULS, 1941).

Sendo assim, para uma dada seção transversal, a energia específica (E_i) de um escoamento é resultante da soma das cargas: piezométrica, dada pela projeção vertical da profundidade do escoamento ($N_i \cos \theta$), e cinética ($v_i^2/2g$). Conforme o grau de detalhamento do estudo, é possível a introdução de um fator de correção da energia cinética ou coeficiente de Coriolis (α), devido à distribuição não uniforme das velocidades na seção transversal de um escoamento

gradualmente variado. Assim, a energia específica da seção transversal de um escoamento pode ser expressa pela Equação 2.6. Observa-se que, para canais com pequenas inclinações ($\theta \approx 0$), a Equação 3.6 corresponde à situação de um escoamento sobre um plano horizontal, onde o parâmetro $N_i \cos \theta$ pode ser reduzido a N_i .

$$E_i = N_i \cos \theta + \alpha \frac{v_i^2}{2g} \quad 2.6$$

Sendo:

E_i : energia específica do escoamento na seção i ;

N_i : nível de água do escoamento, medido perpendicularmente ao fundo do canal;

θ : ângulo de inclinação do canal;

α : coeficiente de Coriolis.

Com base no conceito da energia específica da seção transversal de um canal, Chow (1959) apresenta o desenvolvimento teórico de um critério para definição do escoamento crítico da seção. A partir da diferenciação da Equação 2.6 e consideração da Lei da Continuidade, a energia específica da seção pode ser representada pela Equação 2.7.

$$\frac{dE_i}{dy} = 1 - \alpha \frac{v_i^2}{gN_i \cos \theta} \quad 2.7$$

Particularmente para a situação de energia crítica do escoamento, a energia da seção é assumida mínima ou $dE_i/dy = 0$. Sendo assim, em canais com pequenas declividades ($N_i \cos \theta \approx N_i$) e negligenciados os efeitos da distribuição não uniforme das velocidades na seção ($\alpha = 0$), a Equação 2.7 pode ser reescrita de forma a representar o número de Froude crítico do escoamento, presumido nas situações onde $v_i/\sqrt{gN_i}$ é igual à unidade.

A partir destas considerações, autores como Chow (1959) e Hager (1988) adotaram o conceito para representação do número de Froude incidente sobre um plano inclinado (Fr_i^*) conforme apresentado na Equação 2.8. Neste caso, a profundidade de água considerada no parâmetro adimensional corresponde à projeção vertical do nível de água da seção ($N_i \cos \theta$). Outros autores, como Smith e Chen (1989), sugeriram a consideração do nível de água medido

perpendicularmente ao fundo do canal (N) para a definição do número de Froude em planos inclinados, embora estudos como estes sejam mais raros na literatura do que o conceito mencionado anteriormente.

$$Fr_1^* = \frac{v_1}{\sqrt{gN_1 \cos \theta}} = \frac{v_1}{\sqrt{gh_1}} \quad 2.8$$

Sendo:

Fr_1^* : número de Froude na entrada do ressalto hidráulico afogado;

h_1 : projeção vertical do nível de água na entrada do ressalto hidráulico afogado ou altura conjugada rápida do ressalto hidráulico afogado.

O ressalto hidráulico afogado ou submerso pode assumir diferentes formas, sendo elas os tipos B, C e D, conforme abordado em detalhes no item 2.5. Além disso, a relação entre as alturas conjugadas do ressalto hidráulico submerso tende a não obedecer a relação entre as alturas conjugadas do ressalto livre estimada através da Equação de Bélanger, de modo que diversos pesquisadores buscaram desenvolver estimativas dessa razão para as diferentes formas de ocorrência do fenômeno.

Hager (1988) sugeriu uma metodologia para estimativa da razão entre as alturas conjugadas do ressalto hidráulico afogado tipo B, a partir de resultados experimentais obtidos na calha de um vertedouro, com inclinação $\theta=45^\circ$ e curva de concordância com raio de curvatura $R=0,40$ m, em um canal de ensaios com 0,50 m de largura. No estudo, o autor identificou que a razão entre as alturas conjugadas é função do número de Froude na entrada do ressalto hidráulico afogado (Fr_1^*) e do parâmetro E, que relaciona a elevação do início do ressalto hidráulico com a altura conjugada lenta (h_2). Dessa forma, a relação entre as alturas conjugadas do ressalto hidráulico tipo B pode ser estimada a partir da Equação 2.9, cujos parâmetros são apresentados na Figura 8.

$$\frac{h_2}{h_1} = 23,5 \left(1 + \frac{3}{2}E\right)^{-2} + \frac{\sqrt{2}(Fr_1^* - 3)}{Th\left(\frac{5}{2}E\right)} \quad 2.9$$

Sendo:

h_2 : altura conjugada lenta do ressalto hidráulico afogado;

E : parâmetro que representa a razão $E=e/h_2=(h_2-z_1)/h_2$;

Th : tangente hiperbólica.

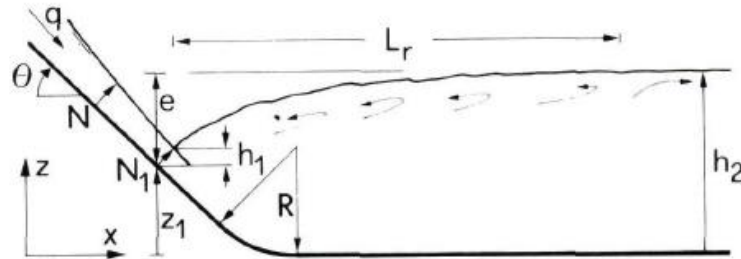


Figura 8: Parâmetros do ressalto hidráulico tipo B (Fonte: HAGER, 1988).

Elevatorski (1959) sugeriu uma estimativa para a relação entre as alturas conjugadas do ressalto hidráulico submerso dos tipos C e D. Segundo o autor, a razão pode ser expressa em função do número de Froude na entrada do ressalto hidráulico (Fr_1^*) e da inclinação do canal, conforme apresentado na Equação 2.10.

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{2\cos\theta} \left[\sqrt{\frac{8Fr_1^* \cdot \cos^3\theta}{1-2\delta \cdot \tan\theta} + 1} - 1 \right] \quad 2.10$$

Sendo:

δ : parâmetro adimensional dependente do número de Froude e da inclinação do canal.

Wiest (2008) sugeriu uma metodologia para a estimativa da posição vertical do início do ressalto hidráulico (Z_1), grandeza apresentada na Figura 8, apresentada na Equação 2.11. Para o desenvolvimento da pesquisa, o autor utilizou dados experimentais obtidos no modelo reduzido da UHE Porto Colômbia, em escala 1:50, onde foram ensaiados escoamentos com número de Froude no início do ressalto hidráulico no intervalo 2,96 a 10,50, com graus de submergência (S) de até 3,40.

$$\frac{Z_1}{h_c} = (Fr_1^* \cdot (S - 1))^{0,61} \quad 2.11$$

Sendo:

Z_1 : posição vertical do início do ressalto hidráulico;

h_c : altura crítica do escoamento.

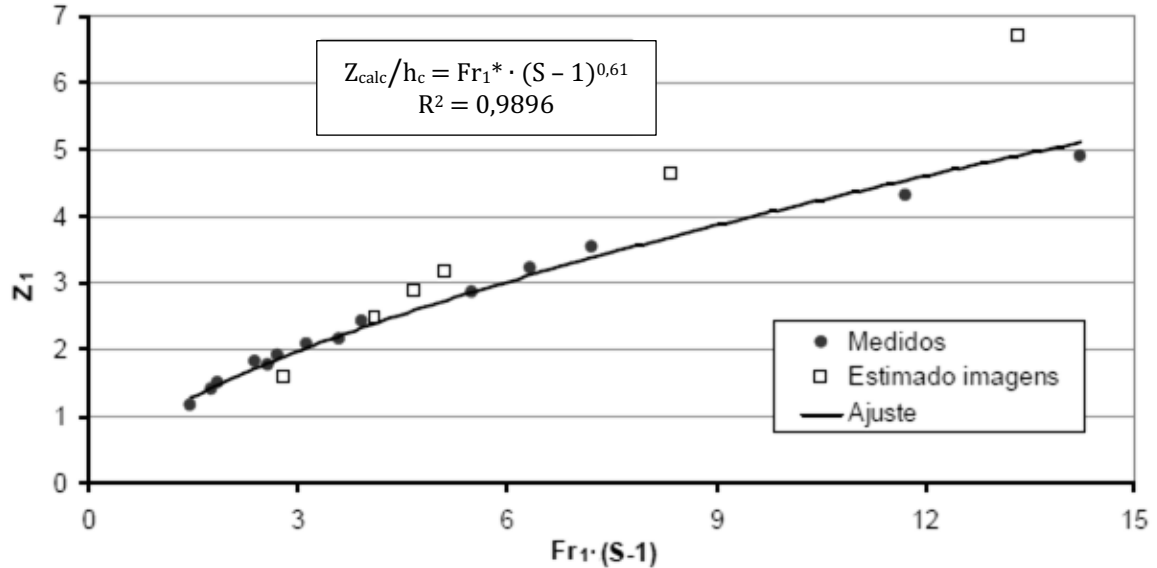


Figura 9: Estimativa da posição vertical do início do ressalto hidráulico (Fonte: WIEST, 2008).

2.3 COMPRIMENTOS CARACTERÍSTICOS (RESSALTO E ROLO)

O ressalto hidráulico também é caracterizado pelos comprimentos ao longo dos quais exerce influência sobre as estruturas hidráulicas. A quantificação dessa característica tem grande importância para o projeto de bacias de dissipação, uma vez que estão diretamente relacionadas ao comprimento da estrutura, conforme observado por Teixeira (2003). No entanto, trata-se de uma característica de difícil mensuração, pois não há consenso quanto à posição exata do término do ressalto hidráulico.

2.3.1 Comprimento do Ressalto Hidráulico

Diversos autores sugeriram métodos e equações para determinação do comprimento do ressalto hidráulico, cuja dificuldade de determinação está relacionada à dificuldade de definição do ponto final do desenvolvimento do fenômeno. Na década de 50, o USBR (1954) conduziu uma série de estudos a partir de 6 canais experimentais com diferentes dimensões. Com base nos estudos realizados, foi proposto um diagrama para determinação do comprimento do ressalto hidráulico em função do número de Froude na entrada do ressalto (Fr_1) e da altura conjugada lenta (y_2), apresentado na Figura 10.

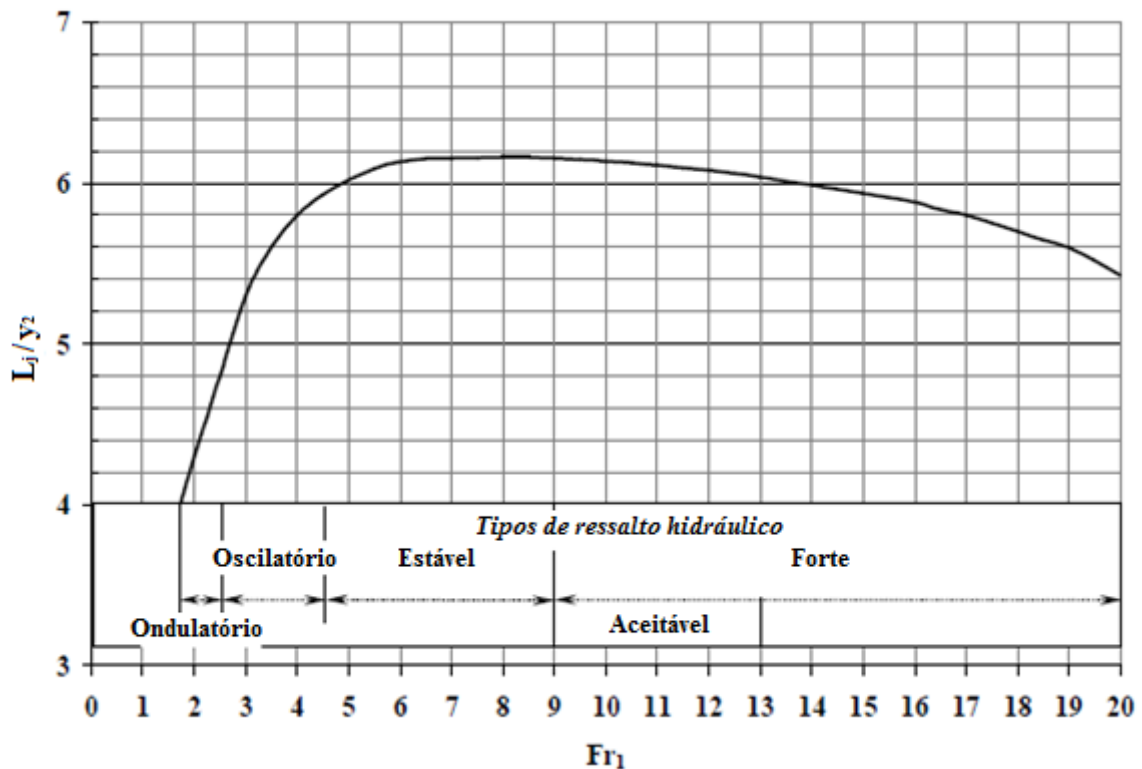


Figura 10: Determinação do comprimento do ressalto hidráulico segundo USBR (1955) (Fonte: USBR, 1954 adaptado por GOMES, 2000).

Segundo Elevatorski (1959), os resultados obtidos pelo USBR (1954), para bacias de dissipação tipo I na classificação USBR, podem ser analisados em função da diferença entre as alturas conjugas lenta (y_2) e rápida (y_1). Assim, o comprimento do ressalto hidráulico pode ser estimado a partir da Equação 2.12.

$$L_j = 6,9(y_2 - y_1) \quad 2.12$$

Sendo:

L_j = comprimento do ressalto hidráulico

Diferentes definições foram sugeridas por outros autores como Rajaratnam (1967), que estabelece o comprimento do ressalto como o ponto onde a altura do escoamento no ressalto encontra a altura conjugada de saída. Segundo Hager (1992), a seção do fim do ressalto hidráulico é definida pela região onde a linha d'água atinge a posição horizontal, a turbulência superficial é significativamente reduzida, o escoamento é completamente desaerado ou as condições de escoamento gradualmente variado reaparecem. Ainda conforme o autor, as

definições mencionadas buscam descrever o final do escoamento altamente turbulento, a partir do qual as forças erosivas são atenuadas.

Também observado por Marques et al. (1997, 2004), o final do ressalto hidráulico ocorre no local onde cessam as perturbações geradas pela descontinuidade, podendo o comprimento do ressalto hidráulico ser descrito pela Equação 2.13.

$$L_j = 8(y_2 - y_1) \quad 2.13$$

2.3.2 Comprimento do Rolo

O comprimento do rolo (L_r) pode ser de difícil determinação visualmente, como ocorre com o comprimento total do ressalto hidráulico, especialmente no escoamento altamente turbulento. Por este motivo, a literatura compreende uma série de equações e metodologias para estimativa da grandeza.

Um dos primeiros estudos sobre o comprimento do rolo do ressalto hidráulico foi conduzido por Safranez (1929⁶ apud HAGER et al., 1990), que identificou a relação entre a razão L_r/y_1 e o número de Froude no início do ressalto hidráulico (Fr_1), conforme apresentado na Equação 2.14.

$$\frac{L_r}{y_1} = 6Fr_1 \quad 2.14$$

Além disso, sabe-se que o comprimento do rolo se aproxima do comprimento total do ressalto hidráulico conforme o número de Froude no início do ressalto hidráulico (Fr_1) aumenta (RAJARATNAM, 1967). Esta relação também foi estudada por Hager et al. (1990) que, através de observações experimentais, concluíram que a razão L_r/y_1 é proporcional apenas ao Fr_1 até o valor $Fr_1 < 8,0$. A partir deste valor, a razão L_r/y_1 é proporcional ao Fr_1 e à relação h_1/b , onde b é a largura do canal.

⁶ SAFRANEZ, Kurt. Untersuchungen über den Wechselsprung. Im Selbstverlag, 1929.

A partir de uma abordagem estatística, Marques et al. (1997) sugeriram equações para determinação de comprimentos característicos do ressalto hidráulico, com base na análise da distribuição longitudinal de pressões médias, flutuações de pressões, coeficientes de assimetria (Ad) e curtose (K) e registros dos ensaios realizados. Os autores verificaram que a distribuição longitudinal dos coeficientes de assimetria e curtose apresentaram pontos críticos próximo à distância longitudinal $6(y_2 - y_1)$. A análise das funções longitudinais de pressões médias e flutuações de pressões indicou a mudança de declividade das curvas a partir da mesma região. Sendo assim, o comprimento do rolo do ressalto hidráulico livre pode ser estimado pela Equação 2.15:

$$L_r = 6(y_2 - y_1) \quad 2.15$$

2.4 FORMAS DO RESSALTO HIDRÁULICO

O ressalto hidráulico pode apresentar diferentes formas em razão das condições do escoamento e do local em que se desenvolve. Uma das principais formas de classificação do fenômeno é dada através do número adimensional de Froude na seção de início do ressalto hidráulico, ou incidente, (Fr_1). A literatura sugere a classificação do fenômeno nas cinco categorias apresentadas na Figura 11, conforme proposto por USBR (1954), Peterka (1957), Chow (1959) e Elevatorski (1959).

O ressalto ondulatório ocorre no intervalo de $1,0 < Fr_1 < 1,7$, para o qual é possível observar ondulações na linha d'água sem a formação do característico rolo. Neste caso, a diferença entre as alturas conjugadas é relativamente pequena (USBR, 1954). Segundo Castro-Orgaz et al. (2015), a caracterização deste tipo de ressalto é complexa, principalmente para aplicações à modelagem numérica, uma vez que a sequência de ondas invalida a hipótese de pressões hidrostáticas em modelos de escoamento gradualmente variado.

O ressalto fraco ou pré-ressalto ocorre no intervalo de $1,7 < Fr_1 < 2,5$, no qual são verificados pequenos rolos junto à superfície e pouca alteração do escoamento a jusante. A esta forma de ressalto hidráulico, são atribuídas velocidades razoavelmente uniformes e baixa dissipação de energia (USBR, 1954).

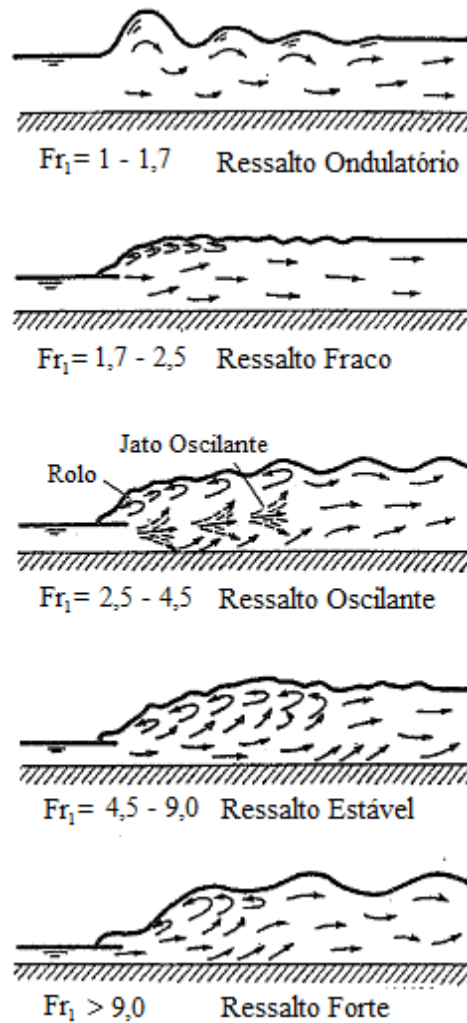


Figura 11: Formas do ressalto hidráulico (Fonte: CHOW, 1959).

O ressalto oscilante ou de transição ocorre no intervalo de $2,5 < Fr_1 < 4,5$, em que são observadas pulsações não periódicas. Os jatos de entrada atuam de forma intermitente, oscilando entre o fundo do canal e a superfície, e podem se propagar por longas distâncias. Esta formação de ressalto hidráulico é geralmente verificada em estruturas de baixa queda (PETERKA, 1957; CHOW, 1959).

O ressalto estável ocorre no intervalo de $4,5 < Fr_1 < 9,0$. Nesta situação, o fenômeno é bem estabilizado e controlado. Segundo USBR (1954), a eficiência da dissipação de energia desta forma de ressalto varia entre cerca de 45% e 70% da energia de entrada.

O ressalto forte ocorre em escoamentos com $Fr_1 > 9,0$. Neste caso, verificam-se a formação de vórtices, agitação da superfície e ondas que se propagam a jusante do ressalto hidráulico. A dissipação de energia pode chegar a cerca de 85% da energia de entrada (USBR, 1954; CHOW, 1959).

2.5 GRAU DE SUBMERGÊNCIA DO RESSALTO HIDRÁULICO

O ressalto hidráulico também pode ser classificado conforme o grau de afogamento ou submergência. Em bacias de dissipação a jusante de vertedouros, a vazão escoada pode apresentar variações, de forma que o ressalto hidráulico pode ocorrer a montante da bacia, na calha inclinada (HAGER, 1992). Nesse caso, o ressalto hidráulico é considerado afogado ou submerso. Situação semelhante pode ocorrer em um ressalto hidráulico formado a jusante de uma comporta.

Elevatorski (1959) observa que a elevação do nível a jusante do ressalto hidráulico, determinante na submergência do ressalto hidráulico, não implica na correspondente elevação vertical da altura rápida do fenômeno. Isto é devido ao ressalto hidráulico avançar em direção montante ao plano horizontal da bacia de dissipação, sobre a calha inclinada.

O fenômeno foi caracterizado por Govinda Rao e Rajaratnam (1963) e Rajaratnam (1965a), que sugeriram um fator de submergência (S^*), correspondente à razão entre o acréscimo de lâmina de água submergida ($h_2 - y_2$ ou $T_w - y_2$) e a altura conjugada lenta do ressalto hidráulico livre (y_2) (Equação 2.16). Dessa forma, o fator de submergência (S^*) relativo ao ressalto hidráulico livre é nulo.

$$S^* = \frac{(h_2 - y_2)}{y_2} \quad 2.16$$

Outras formas de representação do grau de submergência do ressalto foram propostas, como a relação utilizada por Marques et al. (1999) que consiste diretamente na razão entre a altura da lâmina de água a jusante do ressalto hidráulico (h_2 ou T_w) e a altura conjugada lenta do ressalto hidráulico livre (y_2) (Equação 2.17). Neste caso, o ressalto hidráulico livre corresponde ao fator de submergência (S) igual à unidade. Essa situação foi verificada por Peterka (1957), que observou que a estimativa das alturas conjugadas do ressalto livre a partir da Equação de Bélanger corresponde à situação onde a relação h_2/y_2 é igual à unidade. Um esquemático contendo a sobreposição do ressalto hidráulico submergido sobre o ressalto hidráulico livre é apresentado na Figura 12.

$$S = \frac{h_2}{y_2} \quad 2.17$$

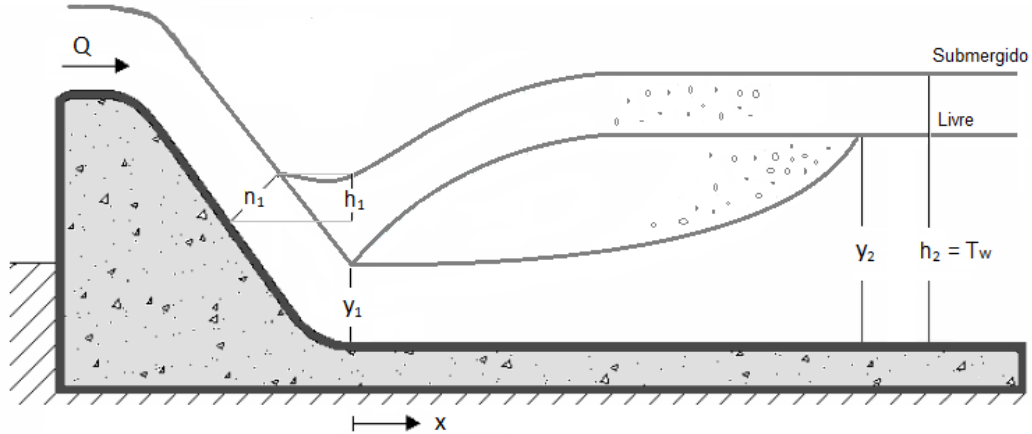


Figura 12: Esquemático do ressalto hidráulico livre e submergido.

Uma classificação bastante utilizada foi proposta por Kindsvater (1944⁷ apud HAGER, 1992), que considerou as diferentes formas do ressalto hidráulico em função da sua posição de ocorrência em uma calha inclinada. O autor identificou duas formas do ressalto hidráulico livre (A e Clássico) e três formas do ressalto hidráulico submergido (B, C e D), conforme apresentado na Figura 13.

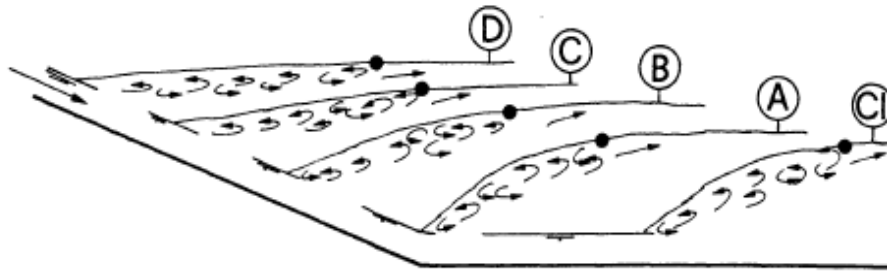


Figura 13: Formas do ressalto segundo o grau de submergência (Fonte: HAGER, 1992).

O ressalto hidráulico **tipo A** é caracterizado pelo início do fenômeno coincidente com o início do plano horizontal. Esta formação não apresenta submergência e é, dessa forma, caracterizada como livre. O ressalto hidráulico **Clássico** é formado a jusante do encontro entre o plano inclinado e o plano horizontal. Mahmood (1964⁸ apud HAGER, 1992) demonstrou que as dimensões dos ressaltos hidráulicos tipo A estudados foram semelhantes às do tipo clássico.

⁷ Kindsvater, C. E. The Hydraulic Jump in Sloping Channels. Trans. ASCE, v. 109, p. 1107-1154, 1944.

⁸ MAHMOOD, Khalid. Effect of apron slope on hydraulic jump performance. Dissertação (Mestrado). University of Washington, Washington, 1964. apud Hager (1992).

Em contrapartida, Mees (2008) observou que existem diferenças entre os dois tipos de ressalto hidráulico livre quanto ao campo de pressões e velocidades.

O ressalto hidráulico afogado tem início sobre a calha inclinada e apresenta diferentes classificações em função da sua posição final sobre o plano inclinado ou horizontal. O ressalto hidráulico **tipo B** tem a posição final sobre o plano horizontal, enquanto o ressalto hidráulico **tipo C** tem a posição final coincidente com o ponto de tangência entre os planos inclinado e horizontal. Finalmente, o ressalto hidráulico **tipo D** é plenamente desenvolvido sobre o plano inclinado.

No estudo dos esforços hidrodinâmicos relacionados ao ressalto hidráulico, as pressões desenvolvidas ao longo do fenômeno podem sofrer influência do afogamento do ressalto hidráulico, como destaca Wiest (2008). O autor buscou avaliar o campo de pressões no ressalto hidráulico formado em um vertedouro de calha lisa seguido por uma bacia de dissipação com diferentes graus de submergência.

2.6 DISSIPACÃO DE ENERGIA

O ressalto hidráulico, resultante da transição abrupta do escoamento em regime supercrítico ao escoamento em regime subcrítico, promove a dissipação de uma porção substancial da energia inicial do escoamento sob a forma de calor. Segundo Elevatorski (1959), o fenômeno é a melhor forma de dissipação de energia em estruturas hidráulicas, cuja eficiência pode atingir níveis de dissipação de energia de até 80% em relação à energia de entrada do ressalto hidráulico.

A dissipação controlada da energia do escoamento em estruturas hidráulicas é fundamental para prevenir-se ou minimizar os danos resultantes dos escoamentos altamente turbulentos descarregados por essas estruturas. Dessa forma, é comum a construção de estruturas de dissipação por ressalto hidráulico para o escoamento seguro das vazões excedentes em barragens, como as bacias de dissipação.

A energia total do ressalto hidráulico apresenta um decréscimo entre as seções de início e final da descontinuidade, correspondente à perda de carga ou energia total dissipada (ΔH). Assim, a perda de carga pode ser descrita em relação às alturas conjugadas do ressalto hidráulico e correspondentes cargas cinéticas, conforme a Equação 2.18 (ELEVATORSKI, 1959). A Figura 14 apresenta um esquemático do processo de dissipação de energia a partir do ressalto

hidráulico, na qual são indicadas as seções de início (S_1) e final (S_2) e a respectiva energia em cada posição.

$$\Delta H = E_2 - E_1 = \left(y_2 + \frac{v_2^2}{2g} \right) - \left(y_1 + \frac{v_1^2}{2g} \right) = \frac{1}{4} \frac{(y_2 - y_1)^3}{y_1 y_2} \quad 2.18$$

Sendo:

ΔH : energia total dissipada no ressalto hidráulico;

E_1 : energia na seção S_1 ;

E_2 : energia na seção S_2 ;

S_1 : seção imediatamente a montante da entrada do ressalto hidráulico;

S_2 : seção imediatamente a jusante do final do ressalto hidráulico.

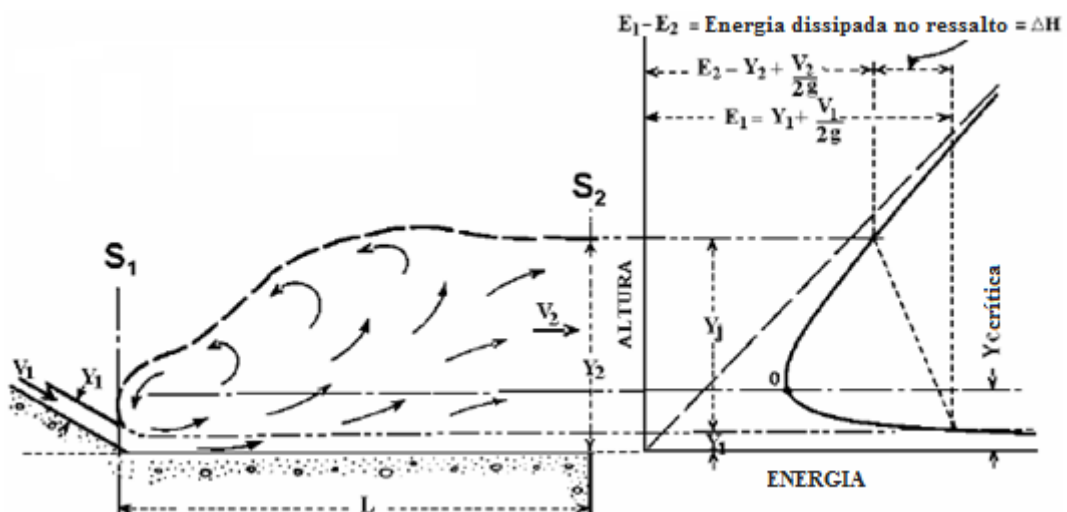


Figura 14: Dissipação de energia no ressalto hidráulico (Fonte: USBR, 1954 adaptado por WIEST, 2008).

Uma vez determinada a perda de carga (ΔH) do escoamento, pode-se avaliar a eficiência da dissipação de energia a partir da razão entre a energia dissipada e a energia verificada na seção inicial (E_1) do ressalto hidráulico, segundo proposto por Bakhmeteff e Matze (1936⁹ apud TRIERWEILER, 2006), conforme a Equação 2.19.

⁹ BAKHMETEFF, B. A., MATZKE, A. E., The hydraulic jump in terms of dynamic similarity, Trans. ASCE, v. 101, p. 630-647, 1936. apud Trierweiler (2006).

$$\eta = \frac{\Delta H}{E_1} = 1 - \frac{E_2}{E_1} \quad 2.19$$

Sendo:

η : eficiência na dissipação de energia do ressalto hidráulico.

Diversos autores buscaram estabelecer estimativas para a eficiência da dissipação de energia através do ressalto hidráulico como Peterka (1957), Elevatorski (1959) e Marques et al. (1998). Peterka (1957) sugeriu a relação entre a eficiência do ressalto hidráulico e o número de Froude incidente (Fr_1), conforme apresentado na Figura 15. Dessa forma, observa-se que, para valores elevados de Fr_1 , como ocorrem no ressalto hidráulico estável e forte, são atingidas porcentagens mais elevadas de dissipação da energia.

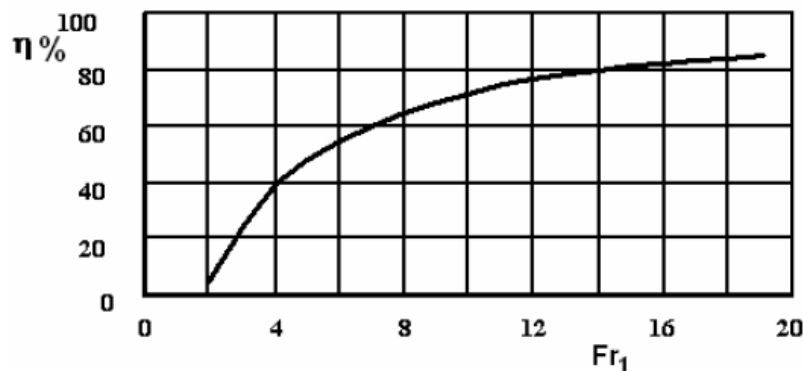


Figura 15: Eficiência do ressalto hidráulico (Fonte: PETERKA, 1957).

2.7 ESFORÇOS RELACIONADOS AO RESSALTO HIDRÁULICO

O processo de dissipação de energia em uma bacia de dissipação por ressalto hidráulico é resultado da alta turbulência e da conversão da energia turbulenta em calor (BOWERS, TOSO, 1988). Associadas a este fenômeno, há a ocorrência de intensas flutuações de pressões e velocidades, cujo conhecimento é de importância fundamental para o projeto de estruturas de dissipação seguras e eficientes.

2.7.1 Pressões hidrodinâmicas

Os esforços hidrodinâmicos associados ao ressalto hidráulico são objeto de estudos há décadas, uma vez que o conhecimento dos mesmos é fundamental para o projeto das obras hidráulicas.

Ao longo do ressalto hidráulico, a carga piezométrica no fundo do canal é variável devido à distribuição não hidrostática das pressões (RAJARATNAM, 1965b). Essas cargas, relacionadas a intensas flutuações de pressões e velocidades em função da turbulência do ressalto hidráulico, podem causar danos ao canal ou à estrutura de dissipação que compreende o fenômeno, indicando a importância do conhecimento das mesmas.

Nesse contexto, Rajaratnam e Subramanya (1968) estudaram o perfil longitudinal da linha de água do ressalto hidráulico livre para escoamentos com número de Froude entre 1,98 e 8,63 a fim de compreender a distribuição de pressões à qual a laje sob um ressalto hidráulico é submetida, fornecendo informações de interesse ao projeto das estruturas de dissipação.

Farhoudi e Narayanan (1991) estudaram as pressões médias e flutuantes atuantes em lajes sob o ressalto hidráulico livre, a partir de medições de esforços em um canal experimental, para escoamentos com número de Froude no intervalo de 4,00 a 10,00. Os autores verificaram que a intensidade das flutuações dos esforços pode variar conforme as dimensões do ressalto hidráulico e da laje, da posição longitudinal analisada e do número de Froude.

Fiorotto e Rinaldo (1992a) buscaram analisar e caracterizar as pressões turbulentas do ressalto hidráulico a jusante de um vertedouro de calha lisa que atuam sobre as lajes de um canal, com a definição da máxima subpressão instantânea atuante na mesma. Os autores concluíram que as lajes de fundo de bacias de dissipação devem ser retangulares, com a maior dimensão alinhada com o sentido do escoamento. Além disso, os autores sugerem que a espessura das lajes de concreto deve ser determinada em função:

- a) do número de Froude incidente (Fr_1);
- b) de uma relação adimensional entre as dimensões longitudinal e transversal da laje, da área de atuação de pressões extremas e escalas integrais de correlação espacial das flutuações de pressões;
- c) de forças de empuxo sobre a laje;
- d) de um coeficiente adimensional de pressões relacionando as máximas diferenças entre flutuações positivas e negativas em relação à média.

Assim como a largura e comprimento das lajes de concreto das bacias de dissipação podem influenciar a atuação dos esforços flutuantes sobre as mesmas, Armenio et al. (2000) observaram o efeito causado pela presença de um degrau negativo junto ao fundo de uma bacia a jusante de uma comporta. O estudo experimental conduzido incluiu escoamentos com

números de Froude entre 6,00 e 9,50. Melo et al. (2006) estudaram o comportamento dos esforços sobre as lajes de bacias de dissipação no evento de falha das juntas.

Mess (2008) estudou os esforços hidrodinâmicos atuantes em lajes de bacias de dissipação a partir de valores experimentais coletados em modelos reduzidos do vertedouro de Porto Colômbia nas escalas 1:100 e 1:85. O autor caracterizou o campo de forças gerado pelo ressalto hidráulico e sugeriu uma metodologia de previsão dos esforços médios, flutuantes e extremos. Na Figura 16, são apresentados as pressões médias longitudinais do ressalto hidráulico, coletadas em modelo experimental e adimensionalizadas em relação às alturas do nível de água na entrada e na saída do ressalto hidráulico afogado e ao grau de submergência do mesmo, e o ajuste proposto pelo autor.

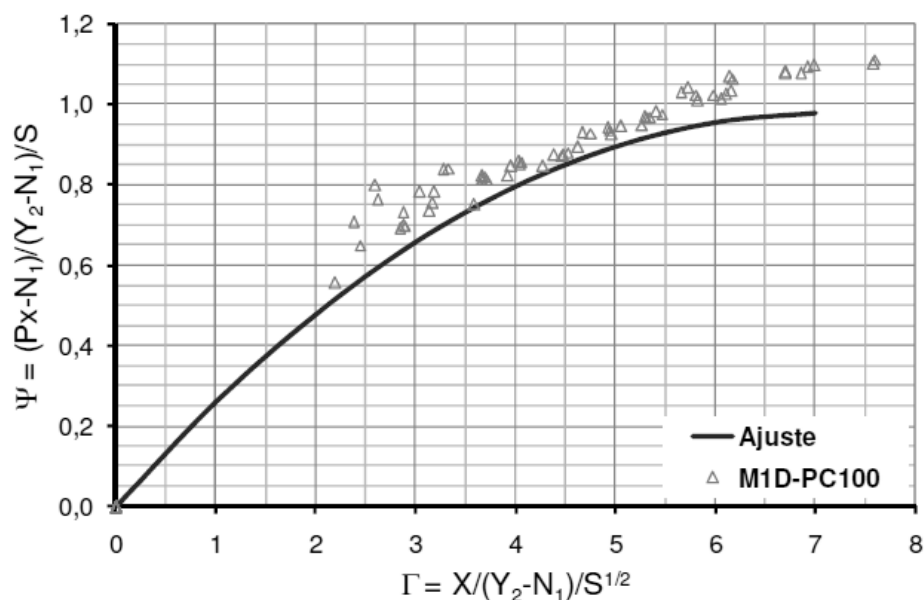


Figura 16: Pressões média obtidas em modelo experimental e ajuste (Fonte: MEES, 2008).

Gonzáles-Betancourt (2016) sugeriu um critério de projeto para a espessura das lajes de bacias de dissipação, considerando o mecanismo de falha das lajes induzido pelo momento. O autor avalia o centro de pressões, subpressões e momentos obtidos a partir de uma análise espaço-temporal das pressões medidas nas lajes de um modelo físico.

Marques et al. (2017) elencaram alguns dos principais problemas observados nas obras hidráulicas relacionados aos esforços hidrodinâmicos a que essas são submetidas. Os danos verificados são associados, em sua maioria, ao movimento estrutural das partes que constituem a estrutura, ao escoamento macroturbulento, à erosão e a falhas dos materiais (Tabela 3).

Tabela 3: Danos observados em obras hidráulicas (Fonte: MARQUES et al., 2017).

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
	Vibrações
Erosão e Assoreamento	Erosão causada pelo escoamento superficial
	Erosão causado pela descarga de obras hidráulicas
Deficiências dos Materiais	Fissuras ou deterioração do concreto
	Corrosão dos componentes metálicos

2.7.2 Flutuações de pressões

A turbulência é uma característica do escoamento para a qual se atribui caráter aleatório, não linear, difusivo e dissipativo (FAVRE et al., 1976¹⁰ apud LOPARDO, 1986). Da mesma forma, a macroturbulência associada à natureza dissipativa do ressalto hidráulico está relacionada a intensas flutuações de pressões, níveis e velocidades do escoamento. O conhecimento das flutuações de pressões, por sua vez, é de grande interesse ao projeto de bacias de dissipação.

Bowers et al. (1964) e Bowers e Toso (1988) identificaram as flutuações de pressões como principal causa dos danos ocorridos na calha do vertedouro da usina Karnafuli, em Bangladesh, durante um evento de cheias em 1961. O estudo foi conduzido com o auxílio de um modelo reduzido do vertedouro e da bacia de dissipação, na escala 1:60, instrumentado com transdutores de pressões.

Segundo Lopardo (1986), matematicamente, as flutuações de pressões que ocorrem no ressalto hidráulico podem ser descritas como um processo estocástico, estacionário e ergódico, que dificilmente poderiam ser descritas através de uma função explícita e analítica em função do tempo. No entanto, o fenômeno pode ser caracterizado e quantificado a partir da utilização de métodos estatísticos. Conforme o autor, estudos sistemáticos envolvendo as flutuações de pressões iniciaram por volta da década de 50.

¹⁰ Favre, A.; Kovasznay, L. S.; Dumas, R.; Gaviglio, J.; Coantic, M. La turbulence en mécanique des fluides. Gauthier Villars, 1976.

Um dos primeiros trabalhos acerca das características estatísticas das flutuações de pressões foi apresentado por Vasiliev e Bukreyev (1967), que estudaram o ressalto hidráulico livre a jusante de uma comporta, com número de Froude 5,75. Os autores identificaram que a distribuição de probabilidades das flutuações de pressões do ressalto hidráulico, ao longo do canal experimental, difere da distribuição normal (Gaussiana) nos trechos iniciais de desenvolvimento do fenômeno. As mesmas diferenças foram verificadas nos momentos centrais correspondentes aos coeficientes de assimetria (A_d) e curtose (K), que em distribuições de Gauss tendem aos valores 0 e 3, respectivamente. Assim, os autores verificaram a existência de uma região do ressalto hidráulico onde ocorrem as máximas flutuações de pressões.

Shiebe (1971¹¹ apud TOSO e BOWERS, 1988) observou as características estocásticas das flutuações de pressões sob o ressalto hidráulico. Em 1974, Abdul-Khader e Elango analisaram o ressalto hidráulico clássico com diferentes vazões, com números de Froude 4,70, 5,90 e 6,60. Os autores analisaram valores longitudinais das pressões médias e extremas, do desvio padrão e dos coeficientes de Assimetria (A_d) e Curtose (K).

As flutuações de pressões, assim como as pressões médias e extremas, podem ser caracterizadas a partir de coeficientes adimensionais, que relacionam características como velocidade, cargas e esforços. A aplicação dos coeficientes abrange tanto a comparação de resultados de diferentes modelos físicos quanto o emprego dos resultados de estudos em protótipos (BUFFON, 2016). Abdul-Khader e Elango (1974), Abkari et al. (1982) e Lopardo (1986) utilizaram o coeficiente de flutuação de pressões (C_p') como parâmetro adimensional para avaliação das flutuações de pressões no ressalto hidráulico.

Sendo a amplitude das flutuações de pressões (P') representada pela Equação 2.20, tem-se que o valor quadrático médio das flutuações de pressões é dado por $RMS(P')$ ou desvio padrão da amostra de pressões (σ) (LOPARDO, 1986).

$$P' = P - \bar{P} \quad 2.20$$

¹¹ SCHIEBE, F. R. The Stochastic Characteristics of Pressure Fluctuations on a Channel Bed Due to the Macroturbulence in a Hydraulic Jump. University of Minnesota, 1971.

Sendo:

P' : amplitude das flutuações de pressões;

P : amostra de pressões;

\bar{P} : pressões médias.

Dessa forma, o coeficiente de flutuação de pressões (Cp') pode ser definido pela Equação 2.21. Conforme indicado por Lopardo (1986, p. 119), o parâmetro representa “qualitativamente a proporção de energia cinética incidente que se transforma em flutuação macroturbulenta por ação do ressalto” e, quando a turbulência do escoamento encontra-se plenamente desenvolvida, é influenciado pela posição longitudinal do ressalto hidráulico e pelo número de Froude incidente (Fr_1).

$$Cp' = \frac{RMS(P')}{\frac{\rho v_1^2}{2}} = f\left(\frac{x}{y_1}; Fr_1\right) \quad 2.21$$

Sendo:

Cp' : coeficiente de flutuação de pressões;

ρ : massa específica;

v_1 : velocidade na seção de início do ressalto hidráulico;

x : posição longitudinal no ressalto hidráulico.

A Figura 17 apresenta o comportamento do coeficiente de flutuação de pressões (Cp') ao longo da posição adimensional x/y_1 , conforme o estudo desenvolvido por Abdul-Khader e Elango (1974). Os valores elevados na porção inicial do gráfico estão relacionados às maiores flutuações de pressões observadas no início do ressalto hidráulico. Além disso, os autores compararam os resultados com o trabalho de outros autores, identificando maior amplitude dos valores de Cp' . Com base no estudo desenvolvido por Resh e Leutheusser (1971), os autores sugeriram que as diferenças são explicadas pelo estágio de desenvolvimento da camada limite que pode afetar consideravelmente a estrutura do escoamento, sendo o desenvolvimento incompleto no experimento conduzido por Abdul-Kader e Elango (1974). Conclusões semelhantes foram propostas no estudo experimental desenvolvido por Toso e Bowers (1988).

Em 1986, Lopardo apresentou uma revisão acerca dos resultados experimentais obtidos por diferentes autores relacionados às flutuações macroturbulentas das pressões do ressalto

hidráulico. Neste trabalho, foram avaliadas características estatísticas como o coeficiente de flutuação de pressões (C_p'), o coeficiente de assimetria (A_d) e o número de Strouhal do ressalto hidráulico formado a jusante de vertedouros. Verificaram-se uma região de maior flutuação de pressões, o ponto de inversão dos valores do coeficiente de assimetria de positivos a negativos e o comportamento do número de Strouhal, que apresentou crescimento inversamente proporcional ao crescimento do número de Froude no início do ressalto hidráulico (Fr_1). Além disso, o autor salienta que as amplitudes de flutuações de pressões podem ser obtidas para diferentes probabilidades de não excedência de pressões, no intervalo 0,1% a 99,9%, através da função de densidade de probabilidades.

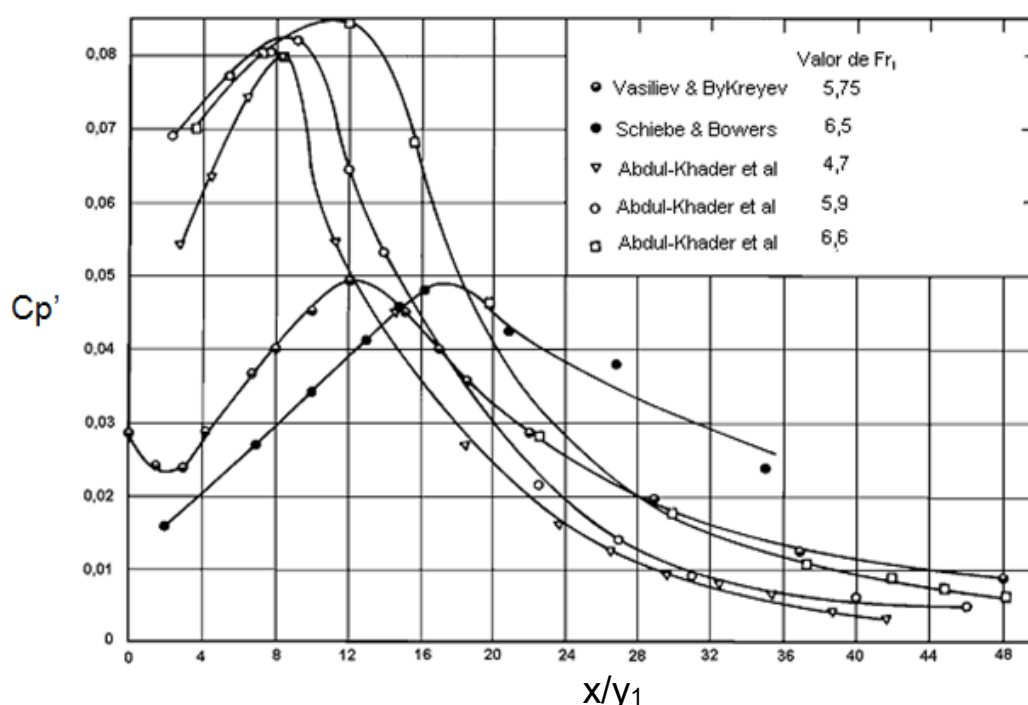


Figura 17: Coeficiente de flutuação de pressões¹² (Fonte: ABDUL-KHADER e ELANGO, 1974).

Toso e Bowers (1988) estudaram o comportamento da função densidade de probabilidades do ressalto hidráulico e também sugeriram a abordagem estatística para estudo das pressões com probabilidades de não excedência inferiores a 1%. A partir dos resultados obtidos, os autores concluíram que a função densidade de probabilidade para os valores estudados não se assemelha à distribuição Gaussiana e que o estudo das pressões com probabilidade de não excedência de 1% não é suficiente para a consideração segura das cargas hidrodinâmicas devidas ao ressalto hidráulico. Os autores também observaram que as flutuações das pressões

¹² SCHIEBE, F. R.; BOWERS, C. E. Boundary Fluctuations due to Macroturbulence in Hydraulic Jumps, Laboratory Report, St. Anthony Falls Hydraulics Laboratory, University of Minnesota, 1971. apud Abdul-Khader e Elango (1974).

tendem a atingir um limite, da ordem de 80% a 100% da carga de velocidade incidente, e que o desvio padrão da amostra tende a diminuir conforme o escoamento torna-se completamente desenvolvido.

Pinto et al. (1988) conduziram um estudo experimental sobre o comportamento das flutuações de pressões no ressalto hidráulico livre e afogado, formado a jusante de um vertedouro, em escoamentos com número de Froude entre 7,96 e 10,06 e submergências de 10%, 30% e 50%. Os autores analisaram o coeficiente de flutuação de pressões (C_p') e o número de Strouhal de pico, concluindo que:

- a) no trecho inicial da bacia de dissipação, o aumento do grau de submergência do ressalto tende a causar a atenuação dos valores de C_p' e das frequências dominantes das flutuações de pressões;
- b) no trecho final da bacia de dissipação, graus de submergência mais elevados (30% e 50%) foram relacionados a valores mais elevados de C_p' ;
- c) para os graus de submergências de 10% e 30%, os valores máximos de C_p' foram verificados no escoamento com Fr_1 igual a 7,97. Para o grau de submergência de 50%, na faixa intermediária do ressalto, os maiores valores de C_p' ocorreram no escoamento com Fr_1 igual a 10,06.

Endres (1990) buscou desenvolver um sistema de aquisição em tempo real e tratamento de dados representativos das pressões instantâneas do ressalto hidráulico, a partir da análise das pressões instantâneas a jusante de um vertedouro em escoamento com número de Froude incidente (Fr_1) entre 4,80 e 9,76. O trabalho envolveu o estudo do coeficiente de flutuação de pressões (C_p'), resultando em valores diferentes daqueles obtidos por Vasiliev e Bukreyev (1967), Abdul-Khader e Elango (1974) e Lopardo (1986). Mais uma vez, as discrepâncias foram atribuídas ao grau de desenvolvimento da camada limite do escoamento.

Fiorotto e Rinaldo (1992b) apresentaram resultados quanto à estrutura estatística das flutuações de pressões no ressalto hidráulico em bacias de dissipação, com intervalo de número de Froude entre 5,00 e 9,50. Para os experimentos realizados, foram computados as flutuações de pressões, os coeficientes de assimetria (Ad) e curtose (K) e os desvios máximos das pressões em relação à média. Os resultados incluem valores máximos, bem como correlações espaciais e temporais. Assim, entre as conclusões do trabalho, os autores observaram que:

- a) o comprimento da correlação longitudinal é maior do que o comprimento da correlação transversal;
- b) a correlação longitudinal não é homogênea, enquanto a correlação transversal é homogênea, de modo que as características estatísticas do ressalto hidráulico são dependentes apenas da coordenada x ;
- c) a relação entre as macroescalas longitudinal e transversal, ou seja, a distância a partir da qual dois valores instantâneos deixam de apresentar correlação, variou entre 5 e 6.

Marques et al. (1997) apresentaram um estudo das flutuações de pressões no ressalto hidráulico através da abordagem estatística, com análises das pressões médias, flutuações de pressões, coeficientes de assimetria (Ad) e curtose (K). As principais contribuições dos autores foram:

- a) a apresentação de relações adimensionais para representação das pressões médias, flutuações de pressões e pressões extremas do ressalto hidráulico, em função de um parâmetro adimensional para representação da distância longitudinal no ressalto hidráulico $x/(y_2-y_1)$;
- b) a proposição de uma relação para estimativa dos esforços hidrodinâmicos no ressalto hidráulico, com a introdução do coeficiente N , função da lei de distribuição estatística;
- c) a identificação de pontos característicos do ressalto hidráulico em função da diferença entre as alturas conjugadas do ressalto hidráulico (y_2-y_1), sendo: o ponto de maior flutuação de pressões ($L_{C_{pmáx}}$) localizado na posição 1,75 (y_2-y_1); o ponto de descolamento do escoamento (L_d) localizado na posição 4,00 (y_2-y_1); o fim do rolo (L_r') localizado na posição 6,00 (y_2-y_1); e, o fim do ressalto hidráulico (L_j') localizado na posição 8,50 (y_2-y_1).

Lopardo et al. (2004a) utilizaram o número de Strouhal, a correlação das frequências e a autocorrelação das flutuações de pressões para a análise das vibrações estruturais e da fadiga na ancoragem das lajes de bacias de dissipação. O estudo experimental das vibrações foi baseado em uma situação de escoamento com formação de ressalto hidráulico sobre uma laje retangular a jusante de uma comporta e número de Froude (Fr_1) igual a 3,00. Para a análise da fadiga, foram empregados escoamentos com número de Froude (Fr_1) no intervalo 3,00 a 6,00. Assim, os autores determinaram a escala temporal e o pico de frequências dos vórtices transportados pelo escoamento, ligados às vibrações das estruturas. Além disso, Lopardo et al. (2004a) estabeleceram uma metodologia para previsão de fadiga nas estruturas submetidas ao escoamento macroturbulento afogado, fornecendo também relações adimensionais para o estudo do fenômeno.

A análise e comparação das flutuações de pressões, bem como das pressões médias e extremas, do ressalto hidráulico livre e afogado deve levar em conta o grau de submergência do ressalto hidráulico. A caracterização dos parâmetros estatísticos através de coeficientes adimensionais pode levar em conta o fator de submergência (S ou S^*), segundo o qual o ressalto hidráulico livre é representado pelo valor nulo ou pela unidade, conforme a definição adotada.

Lopardo et al. (2004b) estudaram o campo de pressões instantâneas do ressalto hidráulico afogado formado a jusante de uma comporta, em escoamentos com números de Froude no intervalo 3,00 a 6,00 e fator de submergência (S^*) no intervalo de 0,1 a 1,1, definido conforme a Equação 2.15. Os autores analisaram o comprimento do ressalto hidráulico afogado, o coeficiente de flutuação de pressões (C_p'), o coeficiente de assimetria (Ad) e coeficientes de flutuação de pressões extremas positivas e negativas, considerando o intervalo 0,1% a 99,9%.

Os autores verificaram o aumento do coeficiente C_p' em função da diminuição do número de Froude incidente (Fr_1), para um valor constante de S^* . Com diferentes graus de submergência, os valores do coeficiente C_p' foram mais elevados com o aumento do fator de submergência (S^*).

Lopardo e Romagnoli (2009) estudaram as flutuações de pressões e intensidades turbulentas no ressalto livre a jusante de uma comporta, em escoamentos com número de Froude incidente (Fr_1) igual a 3,00 e 5,00.

Embora grande parte dos avanços do conhecimento sobre as pressões flutuantes do ressalto hidráulico tenha como base estudos experimentais do ressalto hidráulico com faixas mais elevadas de número de Froude, são também verificados estudos que incluíram baixos números de Froude como Souza (2012) e Souza et al. (2015), que analisaram as flutuações de pressões do ressalto hidráulico livre a jusante de um vertedouro de baixa queda, em escoamentos com número de Froude incidente (Fr_1) entre 1,70 e 7,73. Os autores apresentaram ajustes para a determinação do valor máximo do coeficiente de flutuação de pressões em função do número de Froude do início do ressalto (Fr_1).

Na Figura 18, são observados os coeficientes de flutuações de pressões (C_p') obtidos por diferentes autores (VASILIEV; BUKREYEV, 1967; SCHIEBE; BOWERS, 1971; ABDULKAHDER; ELANGO, 1974; LOPARDO, 1986; TRIERWEILER, 2006; DAI PRÁ, 2011; SOUZA, 2012), conforme apresentado por Souza (2012).

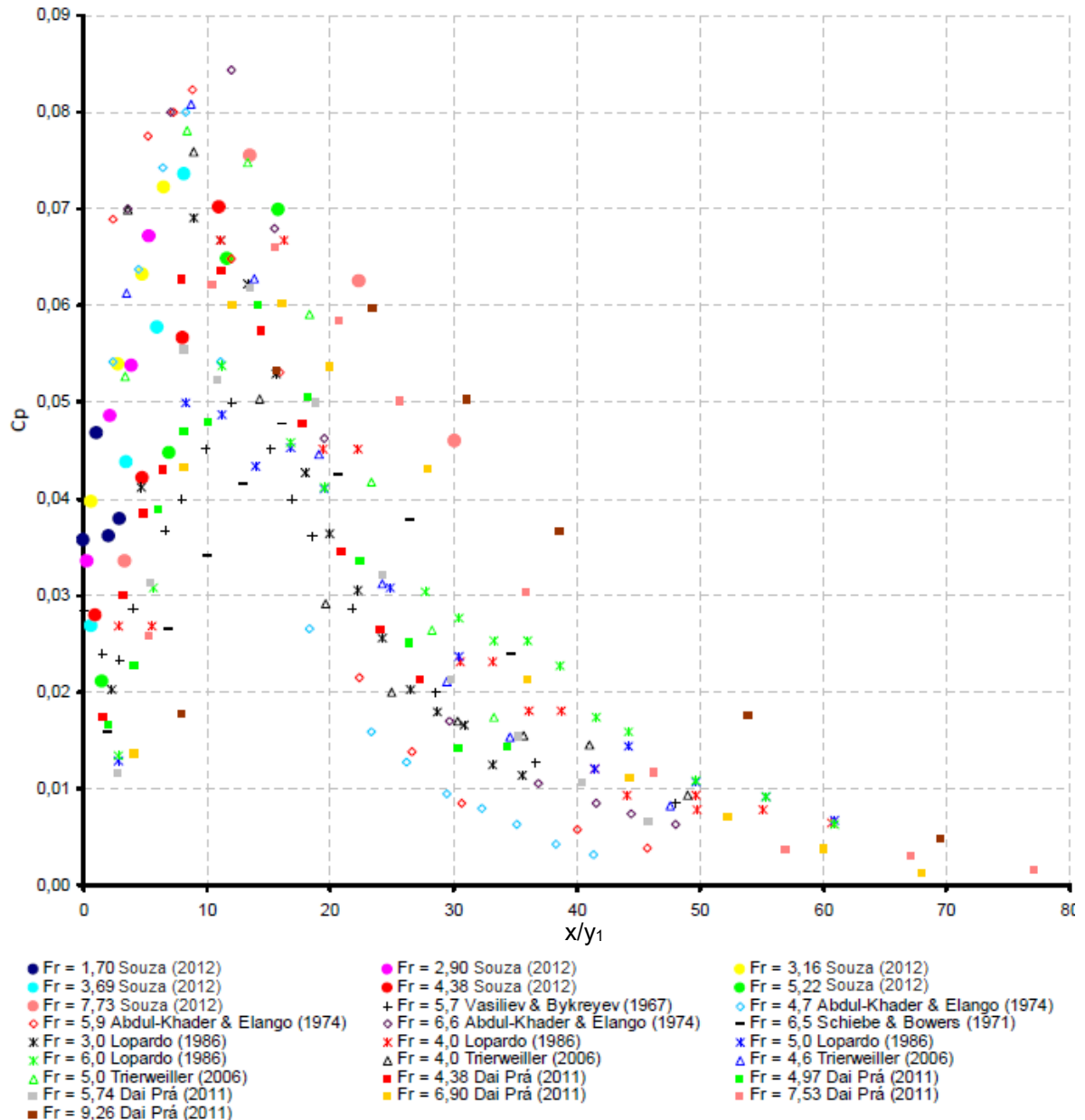


Figura 18: Coeficiente de flutuação de pressões (C_p') apresentado por Souza (2012) em comparação ao C_p' obtido por diferentes autores (Fonte: SOUZA, 2012).

Dai Prá et al. (2016) buscaram avaliar as flutuações de pressões do ressalto hidráulico a partir de uma abordagem de decomposição dos efeitos hidráulicos, individualizados em relação a diferentes condições de escoamento.

2.7.3 Pressões extremas

O processo de dissipação de energia através do ressalto hidráulico é acompanhado por intensas flutuações de pressões, podendo submeter as estruturas de dissipação de energia a esforços extremos muito superiores ou inferiores à média. Estas estruturas são sujeitas a danos como

arrançamento de lajes, fadiga de materiais, vibrações estruturais e cavitação devido a baixas pressões instantâneas (LOPARDO, 2013b).

Os danos relacionados à erosão em barragens são verificados tanto em obras antigas quanto modernas. Elevatorski (1959) observa que poucas das grandes barragens da antiguidade sobreviveram à passagem do tempo, embora muitas pontes e muralhas históricas ainda existam. Casos mais recentes de danos em barragens também são verificados como na barragem Paradise, na Austrália, onde as cheias de 2013 causaram danos a jusante do vertedouro (MCPHERSON et al., 2015).

Alguns dos danos e falhas aos quais estão sujeitas as estruturas de dissipação são diretamente relacionados com a ocorrência de pressões extremas devidas ao escoamento macroturbulento, notadamente, é o caso da cavitação. O fenômeno é caracterizado por um processo erosivo, normalmente acompanhado por ruídos e vibrações, e ocorre quando a pressão de vapor do líquido supera as pressões verificadas no próprio local. Na cavitação, formam-se bolhas de vapor espontaneamente no interior do escoamento, que posteriormente são conduzidas até regiões com pressões mais elevadas, onde se tornam instáveis. Como resultado, as bolhas de vapor implodem, gerando elevados esforços quando em contato com superfícies sólidas (LOPARDO, 2003).

Lopardo et al. (1982) e Lopardo (2003) indicam que as baixas pressões instantâneas devidas aos pulsos de pressões com baixa frequência podem aumentar o risco de danos por cavitação nas estruturas hidráulicas submetidas a escoamentos macroturbulentos, ressaltando a importância da determinação das pressões extremas do ressalto hidráulico. Portanto, os critérios de projeto das estruturas de dissipação de energia baseados apenas nas pressões e velocidades médias do ressalto não são suficientes para a garantia da segurança e eficiência das obras.

Toso e Bowers (1988) estudaram as pressões máximas e mínimas do ressalto hidráulico em escoamentos com número de Froude incidente (Fr_1) entre 3,00 e 10,00, para diferentes geometrias. Os autores salientam que as pressões extremas, assim como médias e desvio padrão, são função do número de Froude incidente (Fr_1), da distância relativa ao início do ressalto e do desenvolvimento da camada limite no escoamento incidente. Além disso, como mencionado no item 2.7.2, os autores sugerem que o intervalo de pressões com probabilidade de não excedência de 1% a 99% não é suficientemente conservador para a análise dos esforços extremos. Na Figura 19, são apresentadas as pressões médias e extremas para o ressalto hidráulico com

número de Froude incidente (Fr_1) igual a 5,67. Na porção inicial do ressalto hidráulico, verificam-se pressões substancialmente distantes da média, sendo que as pressões mínimas atingiram valores absolutos negativos.

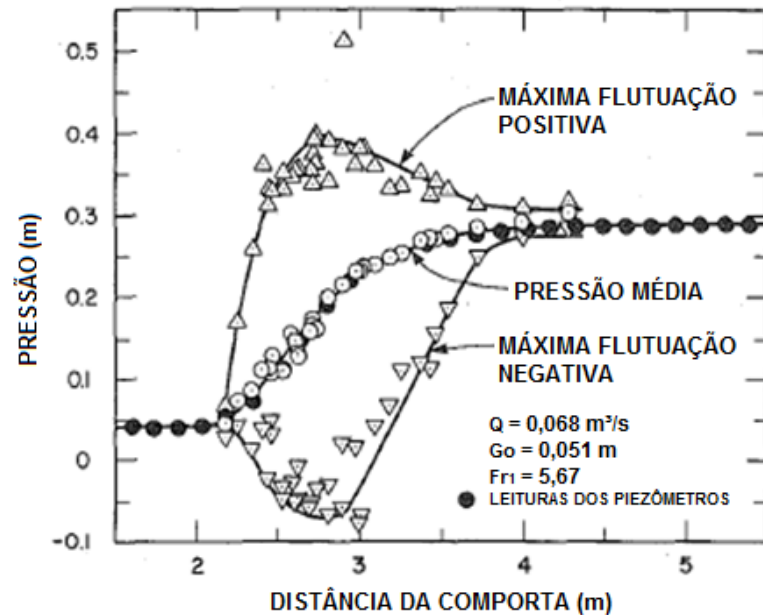


Figura 19: Pressões máximas, médias e mínimas do ressalto hidráulico livre com $Fr_1=5,67$ (Fonte: TOSO e BOWERS, 1988).

De forma semelhante ao coeficiente de flutuação de pressões (C_p'), as pressões extremas também podem ser caracterizadas a partir de coeficientes adimensionais. Toso e Bowers (1988) adotaram o coeficiente de pressões máximas e mínimas $C_{p\pm}$ (Equação 2.22), que considera o desvio positivo e negativo das pressões em relação à média e a energia cinética do escoamento incidente.

$$C_{p\pm} = \frac{\frac{\Delta P}{\gamma}}{\frac{\alpha v^2}{2g}} \quad 2.22$$

Sendo:

$C_{p\pm}$: coeficiente de pressões máximas (+) e mínimas (-);

ΔP : desvio das pressões da média

Lopardo (1985) sugeriu a consideração das probabilidades de não excedência de pressões com 0,1% e 99,9% para o projeto de estruturas hidráulicas de dissipação de energia, embora o projetista estrutural possa adotar intervalos menos conservadores como 1% a 99%, assumindo maior risco. Dessa forma, $P_{0,1\%}$ corresponde às pressões com probabilidade de 0,1% de ocorrência de valores de pressões mais negativos em relação ao seu próprio valor, enquanto $P_{99,9\%}$ é relacionada à probabilidade de 0,1% de pressões instantâneas superiores às mesmas. O autor recomenda a verificação de $P_{0,1\%}$ para a avaliação da tendência à cavitação instantânea devida ao ressalto hidráulico.

Dessa forma, a amplitude das flutuações de pressões com probabilidade de não excedência de 0,1% ($P'_{0,1\%}$), relacionadas às pressões mínimas, é representada pela Equação 2.23. O mesmo raciocínio pode ser adotado para as amplitudes de flutuações de pressões com probabilidade de não excedência de 99,9%, relacionadas às pressões máximas (Equação 2.24) (LOPARDO, 1985).

$$P'_{0,1\%} = P_{0,1\%} - \bar{P} \quad 2.23$$

$$P'_{99,9\%} = P_{99,9\%} - \bar{P} \quad 2.24$$

Sendo:

$P'_{0,1\%}$: amplitude das flutuações de pressões com 0,1% de probabilidade de ocorrência de valores iguais ou inferiores às mesmas;

$P'_{99,9\%}$: amplitude das flutuações de pressões com 99,9% de probabilidade de ocorrência de valores iguais ou inferiores às mesmas;

$P_{0,1\%}$: amostra de pressões com 0,1% de probabilidade de ocorrência de valores iguais ou inferiores às mesmas;

$P_{99,9\%}$: amostra de pressões com 99,9% de probabilidade de ocorrência de valores iguais ou inferiores às mesmas.

Portanto, o coeficiente de flutuações de pressões com 0,1% de probabilidade de não excedência (pressões mínimas) ($Cp_{0,1\%}$) pode ser representado pela Equação 2.25. De forma equivalente, o coeficiente de flutuações de pressões com 99,9% de probabilidade de não excedência (pressões máximas) ($Cp_{99,9\%}$) pode ser representado pela Equação 2.26 (LOPARDO, 1985; LOPARDO et al. 2004b).

$$Cp_{0,1\%} = \frac{P'_{0,1\%}}{\frac{\rho v_1^2}{2}} = \frac{P'_{0,1\%}}{\frac{\gamma}{2g}} \quad 2.25$$

$$Cp_{99,9\%} = \frac{P'_{99,9\%}}{\frac{\rho v_1^2}{2}} = \frac{P'_{99,9\%}}{\frac{\gamma}{2g}} \quad 2.26$$

Os coeficientes adimensionais são utilizados não apenas para a avaliação das pressões extremas em bacias de dissipação a jusante de vertedouros de calha lisa, mas também a jusante de comportas (FIOROTTO e RINALDO, 1992b), vertedouros em degraus (AMADOR et al. 2009), jatos (ERVINE et al. 1997) e outros.

Um estudo relativo às pressões flutuantes do ressalto hidráulico no interior de um conduto fechado foi apresentado por Chiew e Emadzadeh (2017), que avaliaram tanto situações onde o escoamento é semelhante a um canal de superfície livre (ensaios 1 a 10) quanto situações nas quais o ressalto hidráulico ocorre de forma pressurizada (ensaios 11 a 16). As medições foram realizadas com o auxílio de uma câmera de alta velocidade e transdutores de pressões. Diferentemente do ressalto hidráulico em canais com superfície livre, o ressalto hidráulico no interior do conduto não apresentou a redução significativa das pressões flutuantes extremas a jusante do fenômeno. Além disso, as pressões extremas das situações de ressalto hidráulico em canal aberto foram consideravelmente mais próximas à média nos casos com menores números de Froude (Fr_1), como pode-se observar na Figura 20, que apresenta as pressões longitudinais mínimas, médias e máximas dos escoamentos com número de Froude (Fr_1) 1,77 e 3,29. Enquanto o ressalto hidráulico com $Fr_1 = 3,29$ apresentou uma distribuição semelhante àquela verificada por Tosos e Bowers (1988, Figura 19), o ressalto hidráulico fraco com $Fr_1 = 1,77$ apresentou flutuações praticamente constantes em relação à média das pressões.

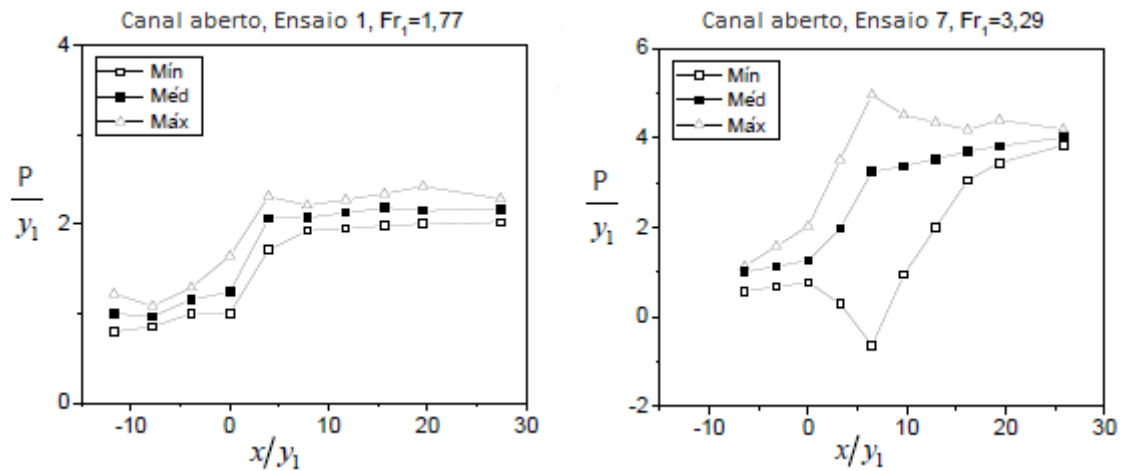


Figura 20: Amplitude das pressões extremas longitudinais do ressalto hidráulico com números de Froude (Fr_1) 1,77 e 3,29, em situações de canal com superfície livre (Fonte: CHIEW; EMADZADEH, 2017).

2.7.4 Previsão de pressões

A literatura conta com algumas metodologias para a previsão das pressões associadas ao ressalto hidráulico. Lopardo (1985) propôs uma metodologia a partir de dados obtidos experimentalmente em um modelo constituído por um vertedouro de calha lisa seguido por uma bacia de dissipação, onde foram realizadas situações de ensaio com número de Froude (Fr_1) entre 4,66 e 9,54. A equação sugerida pelo autor para a estimativa das pressões é relacionada ao número de Froude incidente (Fr_1), à posição adimensional do ressalto hidráulico x/L_j e ao coeficiente de flutuação de pressões (C_p').

Marques et al. (1997) sugeriram uma relação entre as pressões do ressalto hidráulico com diferentes probabilidades de não excedência, a pressão média e o desvio padrão da amostra de pressões e o coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades ($N_{a\%}$). Assim, os esforços com determinada probabilidade de não excedência ($P_{a\%}$) podem ser estimado a partir da relação expressa pela Equação 2.27. A partir deste trabalho, foram elaboradas uma série de metodologias para previsão de pressões no ressalto hidráulico sob diferentes condições, das quais se podem citar os trabalhos de: Teixeira (2003), Trierweiler (2006), Wiest (2008) e Dai Prá (2011).

$$P_{a\%} = P_x \pm N_{a\%} \sigma_x \quad 2.27$$

Sendo:

$P_{a\%}$: pressão com determinada probabilidade da ocorrência de pressão igual ou inferior no ponto x ;

P_x : pressão média no ponto x ;

$N_{a\%}$: coeficiente estatístico de distribuição de probabilidade no ponto x , parâmetro adimensional;

σ_x : desvio padrão no ponto x ;

x : distância horizontal relativa ao início do ressalto hidráulico, contada a partir do encontro entre o raio de concordância do vertedouro e o trecho plano da bacia de dissipação.

Além disso, grupos adimensionais que relacionam as pressões do ressalto hidráulico com as alturas conjugadas e a posição relativa no ressalto hidráulico em uma bacia de dissipação foram também propostas por Marques et al. (1997). As Equações 2.28 e 2.29 apresentam as relações adimensionais propostas para as pressões médias e as pressões com diferentes probabilidades de não excedência, respectivamente.

$$P_{x,adm} = \frac{(P_x - y_1)}{(y_2 - y_1)} = f\left(\frac{x}{y_2 - y_1}\right) \quad 2.28$$

$$P_{a\%,adm} = \frac{(P_{a\%} - y_1)}{(y_2 - y_1)} = f\left(\frac{x}{y_2 - y_1}\right) \quad 2.29$$

Da mesma forma, as flutuações de pressões são relacionadas às alturas conjugadas e à posição relativa no ressalto hidráulico, conforme a Equação 2.30. Estas são também relacionadas à perda de carga entre o início e o final da dissipação de energia pela estrutura de dissipação. Segundo Marques et al. (1997) o parâmetro $\sigma_x/\Delta H$ representa a perda de carga pontual, enquanto y_2/y_1 representa a influência do número de Froude do escoamento (Fr_1).

$$\sigma_{x,adm} = \frac{\sigma_x y_2}{\Delta H y_1} = f\left(\frac{x}{y_2 - y_1}\right) \quad 2.30$$

Sendo:

ΔH : perda de carga total na estrutura de dissipação.

Para a consideração de escoamentos com ressalto hidráulico submerso, Marques et al. (1999) sugerem a adoção do fator de submergência (S) nas relações adimensionais relativas às pressões do ressalto hidráulico. Dessa forma, são possíveis as comparações entre escoamentos com ressalto hidráulico livre e afogado. Nesse caso, a adimensionalização das pressões médias, pressões com diferentes probabilidades de não excedência e flutuações de pressões passam a ser representadas pelas Equações 2.31, 2.32 e 2.33.

$$P_{x,adm} = \frac{(P_x - y_1) \frac{1}{S}}{(y_2 - y_1)} = f\left(\frac{x}{y_2 - y_1}\right) \quad 2.31$$

$$P_{a\%,adm} = \frac{(P_{a\%} - y_1) \frac{1}{S}}{(y_2 - y_1)} = f\left(\frac{x}{y_2 - y_1}\right) \quad 2.32$$

$$\sigma_{x,adm} = \frac{\sigma_x \frac{\Delta H}{y_2} \frac{1}{S}}{y_1} = f\left(\frac{x}{y_2 - y_1}\right) \quad 2.33$$

Com base na Equação 2.27, Teixeira (2003) e Teixeira et al. (2003) sugeriram uma metodologia para previsão das pressões extremas do ressalto hidráulico livre em bacias de dissipação, formado a jusante de um vertedouro de calha lisa. O método é aplicável ao ressalto hidráulico estável ($4,50 < Fr_1 < 9,00$) e envolve a determinação de parâmetros estatísticos (pressões médias, desvio padrão e coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades) a partir da posição adimensional $x/(y_2 - y_1)$ do ressalto hidráulico. A verificação da aplicabilidade do método foi realizada com o auxílio de dados coletados no protótipo da UHE Porto Colômbia, com número de Froude no intervalo 3,88 a 8,08, adimensionalizados também em função da submergência do ressalto hidráulico.

Segundo Teixeira (2003), a pressão média adimensional ($P_{x,adm}$) pode ser estimada a partir da Equação 2.34, onde o parâmetro $x/(y_2 - y_1)$ corresponde à posição longitudinal na bacia de dissipação, adimensionalizada em função da diferença entre as alturas conjugadas. O ajuste é válido entre as posições adimensionais 0,0 e 8,0. Na Figura 21, são apresentadas pressões médias adimensionalizadas coletadas em modelos experimentais de bacias de dissipação em comparação à estimativa proposta pelo autor.

$$P_{x,adm} = 0,015 \left(\frac{x}{y_2 - y_1} \right)^2 + 0,237 \left(\frac{x}{y_2 - y_1} \right) + 0,07 \quad 2.34$$

$$\text{Onde, } 0 \leq \left(\frac{x}{y_2 - y_1} \right) \leq 8$$

Sendo:

$P_{x,adm}$: pressão média adimensional.

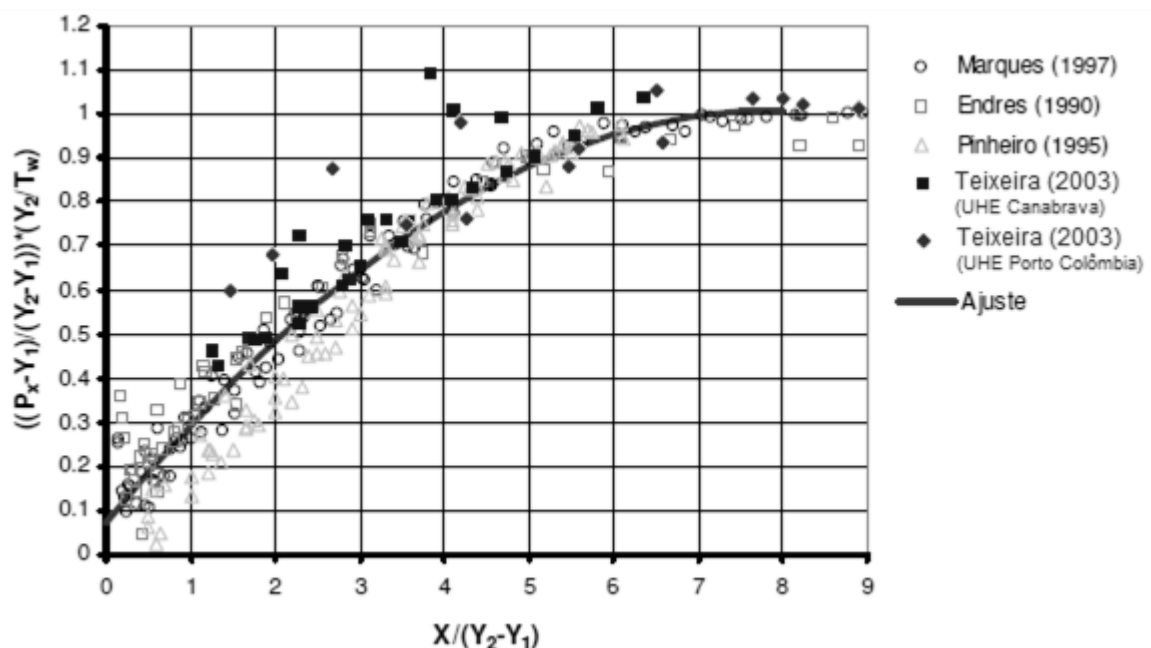


Figura 21: Pressões médias adimensionalizadas, incluindo dados dos modelos das UHEs Porto Colômbia e Canabrava, e estimativa (Fonte: TEIXEIRA, 2003).

O desvio padrão adimensional ($\sigma_{x,adm}$) foi ajustado para dois intervalos: a Equação 2.35 é válida para as posições adimensionais 0 a 2,4 da bacia de dissipação, enquanto a Equação 2.36 é aplicável às posições adimensionais 2,4 a 8,25. As estimativas são apresentadas na Figura 22 em comparação aos dados coletados na bacia de dissipação do modelo experimental da UHE Porto Colômbia e de outros autores.

$$\sigma_{x,adm} = -0,159 \left(\frac{x}{y_2-y_1} \right)^2 + 0,573 \left(\frac{x}{y_2-y_1} \right) + 0,19 \quad 2.35$$

$$\text{Onde, } 0 \leq \left(\frac{x}{y_2-y_1} \right) \leq 2,4$$

$$\sigma_{x,adm} = 0,017 \left(\frac{x}{y_2-y_1} \right)^2 - 0,281 \left(\frac{x}{y_2-y_1} \right) + 1,229 \quad 2.36$$

$$\text{Onde, } 0 \leq \left(\frac{x}{y_2-y_1} \right) \leq 2,4$$

Sendo:

$\sigma_{x,adm}$: desvio padrão adimensional.

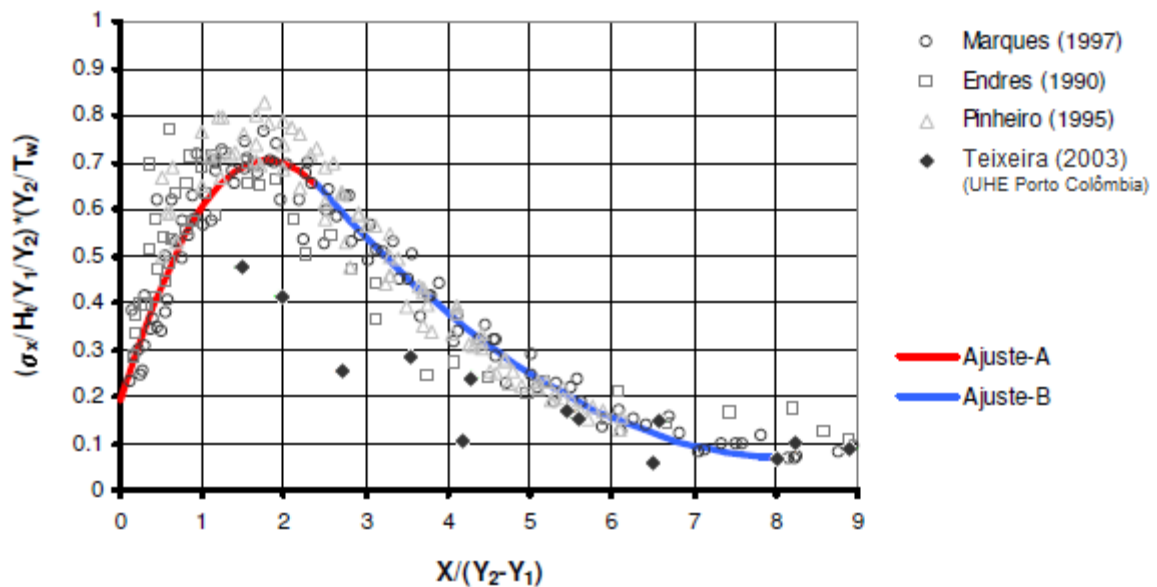


Figura 22: Desvios padrão adimensionalizados, incluindo dados do modelo da UHEs Porto Colômbia, e estimativas para cada intervalo longitudinal (Fonte: TEIXEIRA, 2003).

Por fim, o coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades ($N_{a\%}$) pode ser estimado segundo a Equação 2.37, válida para as posições adimensionais 0,0 a 8,0 na bacia de dissipação. O ajuste dos coeficientes a, b e c varia conforme a probabilidade de não excedência de pressões analisada e são listados na Tabela 4.

$$N_{a\%} = a \left(\frac{x}{y_2 - y_1} \right)^2 + b \left(\frac{x}{y_2 - y_1} \right) + c \quad 2.37$$

$$\text{Onde, } 0 \leq \left(\frac{x}{y_2 - y_1} \right) \leq 8,0$$

Sendo:

a, b, c: coeficientes de ajuste para determinação do coeficiente $N_{a\%}$, cujos valores são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Coeficientes a, b e c para determinação do coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades (Fonte: TEIXEIRA, 2003).

Probabilidade	Coeficiente	a	b	c	R ²
99%		0,0317	-0,3598	3,3008	0,86
95%		0,0171	-0,1393	1,8624	0,81
90%		0,0048	-0,0325	1,2695	0,26
80%		-0,0016	0,0297	0,6846	0,60
70%		-0,0048	0,0589	0,3313	0,68
60%		-0,0075	0,0750	0,0587	0,60
50%		-0,0076	0,0759	-0,1635	0,77
40%		-0,0064	0,0627	-0,3631	0,70
30%		-0,0076	0,0610	-0,5808	0,72
20%		-0,0036	0,0260	-0,8036	0,19
10%		-0,0032	-0,0450	-1,0869	0,59
5%		0,0130	-0,1323	-1,3061	0,73
1%		0,0512	-0,4480	-1,6601	0,92

Na Figura 23, são apresentados os coeficientes estatísticos de distribuição de probabilidades relativos às probabilidades de não excedência de 1% a 99%, conforme determinados por Teixeira (2003) a partir dos dados cedidos por Endres (1990). São verificadas distribuições longitudinais dos coeficientes semelhantes entre si na faixa de não excedência entre 5% e 95%, com o coeficiente relativo à probabilidade de não excedência 50% próximo ao valor nulo. As maiores diferenças de forma e valores são observadas nos coeficientes com probabilidades de não excedência mais extremas, 1% e 99%.

Marques et al. (2004) utilizaram a metodologia proposta por Teixeira (2003) para a estimativa dos esforços hidráulicos na bacia de dissipação de um aproveitamento na região Sul do Brasil.

Foram verificadas as vazões relacionadas aos tempos de recorrência de 100, 1.000 e 10.000 anos, para as quais foram estimadas as ocorrências de pressões extremas positivas e negativas.

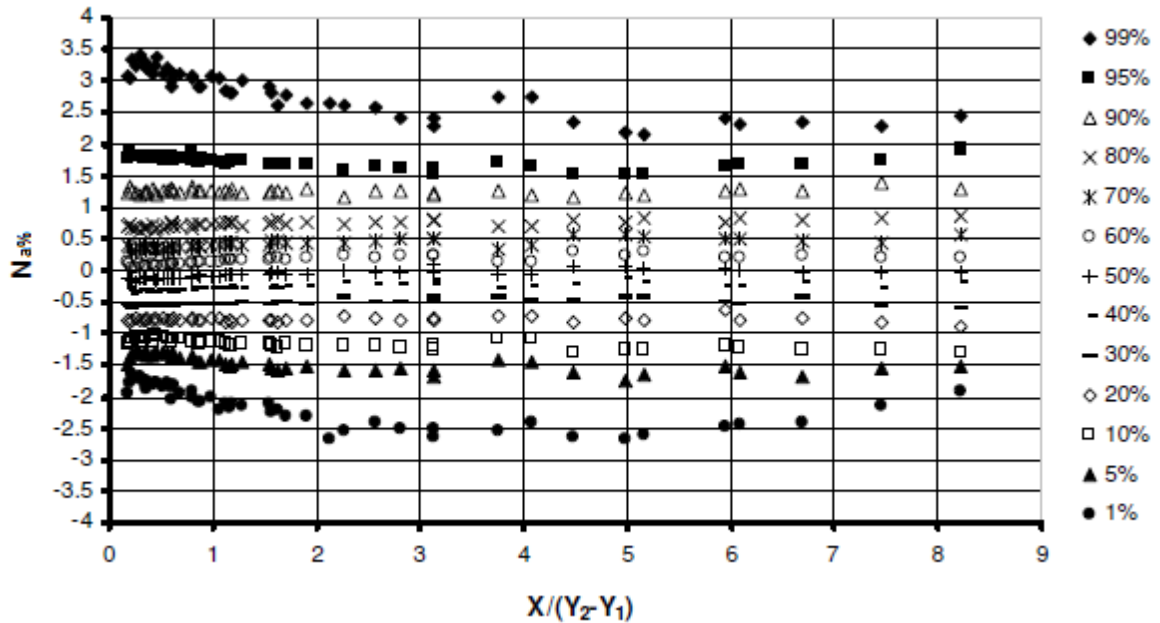


Figura 23: Distribuição longitudinal do coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades obtidos por Teixeira (2003) a partir dos dados cedidos por Endres (1990) (Fonte: TEIXEIRA, 2003).

Trierweiler (2006) sugeriu uma metodologia para a estimativa das pressões extremas do ressalto hidráulico livre e afogado formado a jusante de uma comporta, com base nas equações de previsão de parâmetros estatísticos propostas por Teixeira (2003) e na Equação 2.27. Os ensaios em laboratório incluíram escoamentos com número de Froude no início do ressalto (Fr_1) no intervalo de 3,97 a 5,88 e graus de submergência (S) da ordem de 1,00 a 1,40.

Wiest (2008) sugeriu uma metodologia para estimativa dos valores extremos de pressões no ressalto hidráulico submerso e da posição de início do ressalto hidráulico, considerando a Equação 2.27.

Dai Prá (2011) sugeriu uma metodologia para previsão das pressões no ressalto hidráulico livre e afogado, baseada na decomposição dos efeitos que geram influência sobre o fenômeno e na Equação 2.27. O estudo foi realizado com dados coletados em um modelo experimental de vertedouro seguido por uma bacia de dissipação, referentes a escoamentos com número de Froude incidente (Fr_1) entre 4,40 e 9,30 e graus de submergência (S) entre 1,00 e 1,73.

Outras abordagens incluem Cerezer (2008) que utiliza a Teoria dos Valores Extremos (TVE) para a proposição de uma metodologia de previsão de pressões extremas para o ressalto

hidráulico em bacias de dissipação a jusante de vertedouro, com base em dados obtidos no protótipo da UHE Porto Colômbia ($3,88 < Fr_1 < 8,08$). O trabalho consistiu no ajuste de uma distribuição generalizada de valores extremos e uma distribuição generalizada de Pareto.

Güven et al. (2006) utilizaram redes neurais para proposição de um modelo de previsão de pressões sob um ressalto hidráulico submerso tipo B, segundo a classificação proposta por Kindsvater (1944¹³ apud HAGER, 1992). Os resultados foram verificados com o auxílio de dados obtidos experimentalmente, em ensaios de escoamentos com número de Froude incidente (Fr_1) no intervalo de 5,00 a 8,10, observando resultados mais precisos quando comparados com resultados obtidos através de métodos de regressão.

2.8 MODELAGEM FÍSICA DO RESSALTO HIDRÁULICO

A modelagem física das estruturas de dissipação por ressalto hidráulico constitui uma ferramenta fundamental para o projeto de obras de grande porte. Apesar do avanço das técnicas de modelagem numérica do ressalto hidráulico, as particularidades de um determinado projeto podem gerar incertezas, uma vez que ainda existem lacunas no conhecimento das características do ressalto hidráulico, destacando a importância de outras ferramentas confiáveis para a comparação dos resultados.

2.8.1 Relações de escala

Um dos desafios da modelagem física para a produção de resultados confiáveis aos projetos de estruturas de dissipação, além da própria reprodução do fenômeno estudado, são os efeitos de escala gerados no modelo reduzido em relação ao protótipo estudado. Segundo Ackers (1987, p. 1, tradução nossa),

[a] Modelagem física é baseada na simulação, em escala reduzida, dos elementos que dominam o problema considerado. É quase inevitável que algumas das características secundárias não sejam fielmente simuladas e que essa limitação resulte em diferenças entre modelo e protótipo, chamadas de efeitos de escala.

Algumas tentativas de compreensão dos efeitos de escala sobre propriedades hidráulicas foram realizadas, das quais se pode citar Elder (1961) que estudou os efeitos de escala percebidos

¹³ Kindsvater, C.E. The Hydraulic Jump in Sloping Channels. Trans. ASCE, v. 109, p. 1107-1154, 1944.

entre as amplitudes e frequências das flutuações de pressões medidas em protótipo e modelo de condutos forçados com diferentes escalas. O autor salienta que, conhecidas as relações de escala, o estudo de modelos pode fornecer informações sobre as pressões turbulentas em protótipos, embora dificuldades técnicas da época dificultassem a reprodução do fenômeno de cavitação em modelos.

Lopardo et al. (1982) estudaram a tendência à cavitação relacionada às pressões macroturbulentas no ressalto hidráulico em bacias de dissipação a partir de modelagem física. O estudo incluiu a medição de flutuações de pressões em modelos hidráulicos em laboratório e na bacia de dissipação da barragem Salto Grande. Assim, os autores observaram a ocorrência de erosão devido à cavitação em situações de ensaio para as quais os valores médios de pressões foram superiores à pressão de vapor e à pressão atmosférica, indicando a importância do conhecimento das pressões extremas negativas para a avaliação do fenômeno.

Ackers (1987) apresentou uma revisão acerca do uso de modelagem física para análise de problemas relacionados à hidráulica. O autor sustentou que:

- a) alguns aspectos de sistemas hidráulicos de elevada complexidade não podem ser modelados fisicamente de forma satisfatória, sendo necessário o emprego de outras técnicas como a modelagem numérica. Apesar disso, nesses casos, a melhor solução do problema pode ser encontrada a partir de uma combinação das técnicas alternativas e da modelagem física;
- b) o avanço tecnológico dos instrumentos de medição pode ampliar as possibilidades da aplicação de modelagem física na solução de problemas, colaborando com mais informações sobre os problemas de efeitos de escala;
- c) a confiabilidade de modelos de escala apenas pode ser confirmada a partir de medições bem documentadas do comportamento das grandezas analisadas em protótipo.

Trierweiler et al. (2005) analisaram o efeito de escala observado entre modelos reduzidos e protótipo da estrutura de dissipação da UHE Porto Colômbia através da comparação dos valores de pressões média e desvio padrão coletados com transdutores de pressões. Na Figura 24, são observados os valores de desvio padrão das séries de pressões instantâneas coletadas em protótipo e nos modelos reduzidos nas escalas 1:50 e 1:100.

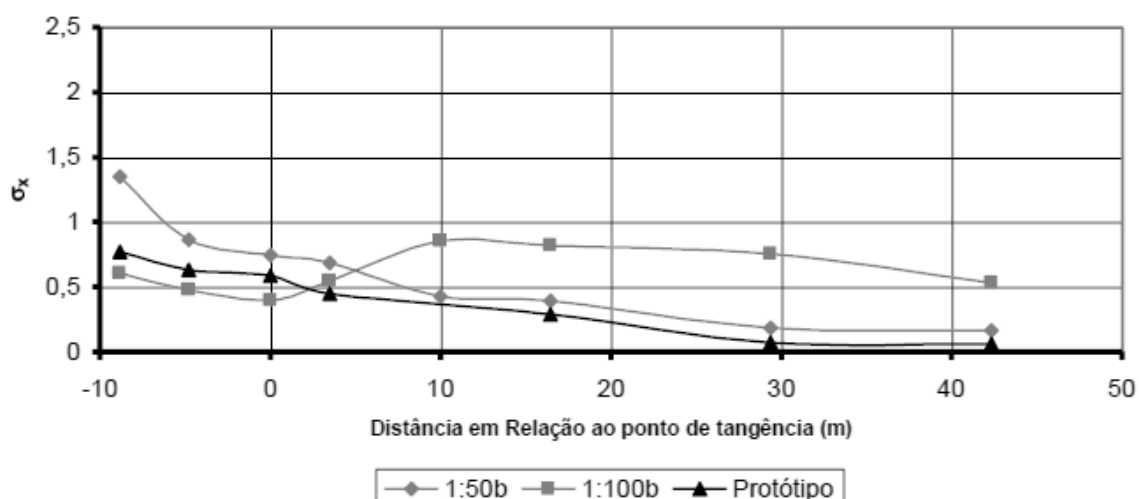


Figura 24: Desvio padrão coletado em protótipo e modelos reduzidos com diferentes escalas em relação ao início da bacia de dissipação, no ponto de tangência da bacia com a curva de concordância vertical (Fonte: TRIERWEILER et al., 2005).

Teixeira (2008) avaliou os efeitos de escala relacionados à previsão de valores extremos de pressões do ressalto hidráulico em bacias de dissipação. A pesquisa foi desenvolvida a partir de séries de dados de pressões obtidos na bacia de dissipação da UHE Porto Colômbia e modelos da mesma nas escalas 1:100, 1:50 e 1:32. Teixeira et al. (2012) analisaram os efeitos de escala nos valores de pressão média nos modelos e protótipo.

Nos estudos de Teixeira (2008) e Teixeira et al. (2012), foram percebidos efeitos de escala nos valores de pressões médias, principalmente no trecho inicial do ressalto hidráulico, relacionado à influência do raio de curvatura e da instabilidade da posição inicial do ressalto. Os valores médios de pressões coletados nos modelos foram superiores aos do protótipo, de forma inversamente proporcional à escala do modelo. Essa condição foi relacionada à aeração do escoamento, que tende a ser menor nos modelos. Também foi identificado um acréscimo de pressões atribuído ao efeito da curva de concordância entre o perfil do vertedouro e o trecho plano da bacia de dissipação, percebido não apenas nas pressões médias, mas em vários dos parâmetros analisados. Ainda, comparando-se os resultados com a metodologia proposta por Wiest (2008), o autor recomenda o uso de modelos na escala máxima de 1:20, aproximadamente, para evitarem-se efeitos de escala no estudo dos valores médios de pressões.

Teixeira (2008) não verificou efeitos de escala na avaliação da posição de início do ressalto hidráulico. A análise das flutuações de pressões de modelos e protótipo também não revelou a existência de efeitos de escala entre eles. Da mesma forma, a análise do coeficiente estatístico

de distribuição de probabilidades não indicou efeitos de escala nos ajustes para previsão do parâmetro.

A análise dos valores extremos de pressões, de forma semelhante às pressões médias, demonstrou que as pressões coletadas na bacia de dissipação dos modelos foram superiores às de protótipo, com valores inversamente proporcionais à escala dos modelos. No trecho em curva, todos os modelos apresentaram valores de pressões semelhantes e superiores aos valores de protótipo. Teixeira (2008) recomenda que as pressões extremas com probabilidade de não excedência de 1% sejam avaliadas em modelos com escala próxima a 1:60, enquanto para a probabilidade de não excedência de 99% é recomendada a escala de modelo próxima a 1:20. Caso utilizados os ajustes para previsão de pressões propostos por Wiest (2008) as escalas de modelo podem ser reduzidas para 1:15 e 1:8, respectivamente.

Chanson e Chachereau (2012) estudaram o efeito de escala relacionado às propriedades do escoamento aerado do ressalto hidráulico com número de Froude incidente (Fr_1) igual a 5,10 e número de Reynolds igual a 1.3×10^5 . A partir da comparação com resultados de outros pesquisadores, os autores observaram efeitos de escala na representação de propriedades como a intensidade de turbulência e a taxa de contagem de bolhas.

3.8.2 Medições

As condições e os parâmetros de um escoamento podem variar enormemente entre uma situação e outra. Desse fato, decorrem dificuldades na proposição de parâmetros gerais para a modelagem física dos fenômenos e medição das grandezas hidráulicas, bem como a proposição de critérios gerais aplicáveis a todos os projetos de obras hidráulicas.

No caso das bacias de dissipação, não é possível estabelecer-se uma formulação analítica geral sobre as ações hidrodinâmicas na estrutura. É comum, no entanto, o estudo das propriedades de um protótipo específico a partir da modelagem física, de modo que é necessária a adoção de critérios de medição para a obtenção de resultados adequados. Algumas das técnicas mais usuais são: modelagem dos elementos estruturais da bacia de dissipação considerando-se suas geometrias e pesos; medição direta das forças atuantes no modelo; e, medição das pressões em diferentes pontos da estrutura (NATO ADVANCED STUDY INSTITUTE, 1988).

Segundo Gardiner e Hay (1982), durante a fase de projeto da UHE Nipawin, localizada no rio Saskatchewan, Canada, observaram-se o surgimento de incertezas quanto à possível ocorrência de vibrações na casa de força devidas aos esforços hidrodinâmicos nas lajes de fundo e paredes da bacia de dissipação. Os estudos das flutuações de pressões na bacia de dissipação foram conduzidos em um modelo físico reduzido na escala 1:70, equipado com tomadas de pressões em diferentes localidades. A partir da análise da correlação espacial e temporal entre os pontos de medição, verificou-se que o método inicialmente utilizado para a coleta dos valores de pressões nas paredes da bacia de dissipação não forneceu resultados confiáveis. Então, o modelo físico foi modificado de forma a permitir a medição direta das forças dinâmicas em uma das paredes e no fundo da estrutura, por meio de células de carga.

Uma metodologia semelhante foi adotada por Yuditskii (1960¹⁴ apud NATO ADVANCED STUDY INSTITUTE, 1988) no estudo do escoamento sobre um modelo bidimensional de uma bacia de dissipação desprovida de acessórios, como as bacias do tipo I segundo a classificação USBR. O autor verificou a redução das máximas solicitações hidrodinâmicas com o aumento das dimensões da laje da bacia de dissipação.

Em modelos físicos com semelhança froudiana, sabe-se que é possível obter boa representação dos fenômenos hidráulicos, desde que a ação das forças viscosas possa ser negligenciada. Lopardo (1986¹⁵ apud TRIERWEILER, 2006) realizou medições das flutuações de pressão em um ressalto hidráulico formado a jusante de um vertedouro com número de Froude no intervalo de 4,50 a 10,00, para as quais obteve uma distribuição longitudinal do coeficiente de flutuação de pressões (C_p') semelhante aos resultados obtidos por Abdul-Khader e Elango (1974). A partir desse estudo, o autor sugeriu as seguintes recomendações para as medições de pressões flutuantes do ressalto hidráulico em modelos reduzidos com semelhança de Froude (LOPARDO, 1986¹⁴ apud TRIERWEILER, 2006, p. 32; LOPARDO, HENNING, 1984):

- a) número de Reynolds na entrada do ressalto hidráulico ≥ 100.000 ;
- b) $y_1 \geq 3$ cm;
- c) tempo de aquisição de dados = 60 s;

¹⁴ YUDITSKII, G. A. Estudo experimental das flutuações da carga hidrodinâmica numa soleira a jusante (Experimental study of hydrodynamic load fluctuations in floor slabs of a stilling basin). (In portuguese). Traduzido do russo. Izvestya VNIIG, 65, p. 117-124, 1960. T. LNEC 520, Lisboa, Portugal, 1985.

¹⁵ LOPARDO, R. A. Apunte sobre Flutuaciones Macroturbulentas de Presión, Medición, Análisis y Aplicación al Resalto Hidráulico. In: Apostila do curso de turbulência, cavitação e aeração de fenômenos hidráulicos. São Paulo, 1986, 45 p.

- d) frequência de aquisição entre 50 e 100 Hz;
- e) comprimento máximo da mangueira entre a tomada de pressão e o sensor = 55 cm, para condutos com diâmetros internos de até 5 mm.

Outros pesquisadores identificaram que o escoamento em modelos hidráulicos pode ser independente do número de Reynolds a partir de $Re > 10.000$ (ROUSE, 1938¹⁶ apud LOPARDO et al., 1982) e, no caso de superfícies cilíndricas, as flutuações de pressões podem ser independentes do adimensional a partir de $Re > 5 \times 10^5$ (ELDER, 1961).

2.8.3 Condições de entrada

A forma de ocorrência do ressalto hidráulico pode variar devido a uma série de fatores, incluindo características inerentes ao escoamento como vazões, níveis e velocidades como da geometria que o comporta. Grande parte das observações em laboratório foram realizadas em escoamentos com a formação do ressalto hidráulico em canais retangulares a jusante de comportas ou vertedouros, embora existam estudos sobre o ressalto hidráulico em condutos ou canais abertos com diferentes geometrias. Além disso, encontram-se estudos acerca da aplicabilidade de metodologias relativas ao ressalto hidráulico a situações cujas características do mesmo são distintas daquelas originalmente analisadas.

Resch e Leutheusser (1971) observam que a equação de Bélanger pode fornecer uma boa aproximação das alturas conjugadas do ressalto hidráulico somente se a energia turbulenta do escoamento a montante for negligenciável. Dessa forma, é importante o conhecimento da condição de entrada do escoamento, uma vez que o desenvolvimento da camada limite a montante do ressalto hidráulico pode causar influência sobre o mesmo. Sendo que o ressalto hidráulico com camada limite plenamente desenvolvida tende a apresentar menores alturas e maiores comprimentos, podendo a estrutura do ressalto ser considerada similar a um escoamento de jato de parede.

Segundo observa Lopardo (1986), os parâmetros flutuantes do ressalto hidráulico dependem das condições de entrada do mesmo. Lopardo e Henning (1986) estudaram o comportamento dos parâmetros flutuantes de três diferentes condições de entrada do ressalto hidráulico: comporta de fundo; vertedouro com curva de concordância entre o mesmo e a bacia de

¹⁶ ROUSE, H. Fluid Mechanics for Hydraulic Engineers. New York: McGraw-Hill, 1938.

dissipação; e vertedouro com encontro abrupto. Os autores verificaram que o ressalto hidráulico a jusante de comporta apresenta máximo coeficiente de flutuações de pressões (C_p') para o número de Froude incidente (Fr_1) próximo ao valor 4,50, enquanto que a jusante de um vertedouro com ou sem curva de concordância o máximo ocorreu próximo a $Fr_1 = 6,50$. Além disso, os coeficientes de assimetria e frequências dominantes tendem a apresentar mudanças de comportamento em torno da posição adimensional x/L_j igual a 0,45 para o ressalto hidráulico a jusante de um vertedouro com curva de concordância e 0,75 a jusante de uma comporta.

Toso e Bowers (1988) observaram a diminuição do desvio padrão das flutuações de pressões do ressalto hidráulico para escoamentos totalmente desenvolvidos a montante, em relação aos escoamentos não desenvolvidos. A magnitude dos valores máximos de flutuação de pressões, no entanto, não apresentaram diferenças significativas em função do desenvolvimento do escoamento na entrada do ressalto hidráulico. Por outro lado, a forma de distribuição das flutuações de pressões indicou que a turbulência é dissipada mais rapidamente no ressalto hidráulico com escoamento desenvolvido a montante.

Trierweiler e Marques (2008) analisaram o campo de pressões do ressalto hidráulico formado a jusante de uma comporta com diferentes graus de submergência (S). Os resultados das pressões médias e flutuantes adimensionalizados em relação às alturas conjugadas do ressalto (y_1 e y_2) e do grau de submergência, bem como os coeficientes de assimetria (Ad) e curtose (K), de maneira geral, apresentaram comportamento longitudinal semelhante aos resultados de outros pesquisadores, que estudaram o ressalto hidráulico a jusante de vertedouros de calha lisa. As principais diferenças observadas foram relacionadas ao grau de submergência e ao número de Froude do ressalto hidráulico, embora a formação de vórtices a jusante da comporta possa influenciar o comportamento da densidade espectral das amostras de pressões.

Dai Prá et al. (2012) estudaram a influência da curva de concordância vertical entre um vertedouro de calha lisa e a bacia de dissipação nas pressões médias, máximas e flutuantes do ressalto hidráulico, bem como na propagação longitudinal dos efeitos causados. Os autores concluíram que as flutuações máximas de pressões foram localizadas no centro da curva de concordância e produziram valores da ordem de 1% da energia cinética do escoamento no ponto final da curva. Além disso, a influência da curva de concordância foi estimada até aproximadamente a posição adimensional 0,5, como observado na Figura 25, que apresenta a

relação entre o coeficiente de pressões médias (C_{pC}) e o coeficiente de pressões médias máximas devido à força centrífuga (C_{pCM}) ao longo da bacia de dissipação.

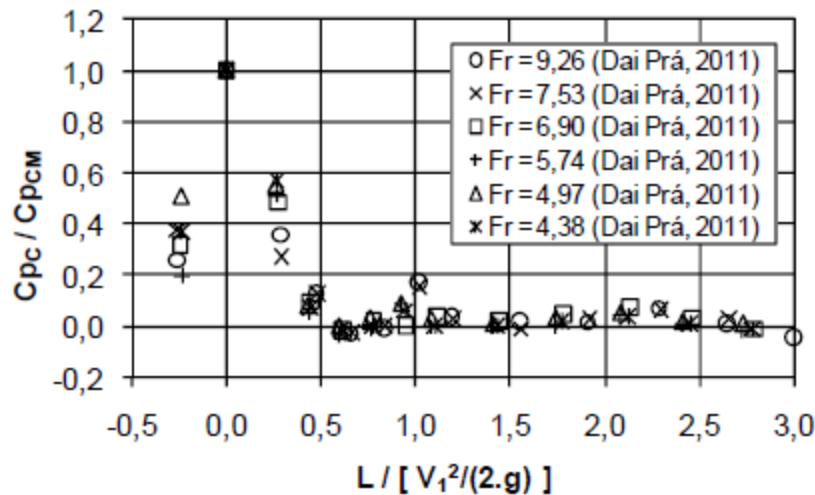


Figura 25: Comprimento de influência da curva de concordância em relação ao comprimento da bacia de dissipação (Fonte: DAI PRÁ et al., 2012).

2.8.4 Velocidades

Apesar da dificuldade de medição das características internas do ressalto hidráulico, elas são importantes para a compreensão da ação hidrodinâmica do fenômeno sobre as estruturas hidráulicas. O campo de velocidades do escoamento macroturbulento pode fornecer indicativos sobre o desenvolvimento do ressalto hidráulico ao longo do tempo e do espaço.

A investigação experimental das velocidades do ressalto hidráulico implica na utilização de equipamentos e técnicas de medições com precisão adequada e mínima interferência no escoamento. Grande parte das investigações do século passado era realizada com tubos de Pitot-Prandtl, hélices, anemômetros e sondas a filme quente, sendo muitos dos dispositivos afetados pelas bolhas de ar presentes no escoamento. Observa-se que a maioria dos equipamentos de medição de velocidades foi desenvolvida para escoamentos monofásicos (água ou ar), sendo desconhecido o desempenho dos mesmos em escoamentos bifásicos (água e ar). Atualmente, dispõe-se também de sondas e equipamentos de medição por imagem (CHANSON; BRATTBERG, 2000, PALAURO; MARQUES, 2006, OLIVEIRA; MARQUES, 2006).

Fujita et al. (1998) estudaram as velocidades do escoamento em diferentes situações hidráulicas, incluindo as velocidades médias e o campo de velocidades instantâneas no ressalto hidráulico

a jusante de um vertedouro de calha lisa controlado por uma comporta. O trabalho consistiu na avaliação do instrumento *Large-Scale Particle Image Velocimetry* (LSPIV) para a análise das velocidades de escoamentos. Segundo os autores, a técnica empregada possibilitou a observação da evolução temporal dos fenômenos estudados, enquanto o registro do campo de velocidades médias possibilitou a análise global dos escoamentos estudados.

Lennon e Hill (2006) realizaram medições das velocidades do ressalto hidráulico com número de Froude no intervalo 1,40 a 3,00, com o uso do equipamento *Particle Image Velocimetry* (PIV). O estudo proporcionou mais informações sobre o campo de velocidades médias e turbulentas do tipo de ressalto hidráulico avaliado, que em grande parte de estudos anteriores foram registrados por técnicas de medição pontuais. Os autores ressaltam, porém, que existem dificuldades associadas à medição de velocidades a partir do PIV, como a identificação visual da superfície livre nas imagens e a dispersão do laser devido às bolhas de ar na região do rolo do ressalto hidráulico.

Lopardo (2012) utilizou o equipamento micro *Acoustic Doppler Velocity Meter* (ADV) para a medição das velocidades do ressalto hidráulico em uma bacia de dissipação. Foram observadas as características do decaimento da intensidade de turbulência, função das velocidades do escoamento, em relação ao número de Froude do início do ressalto hidráulico (Fr_1).

A partir de investigações experimentais, Rajaratnam (1965b) identificou que no trecho inicial do ressalto hidráulico, a distribuição de velocidades é uniforme até 95% da profundidade, até a camada limite. Chanson e Brattberg (2000) observam que os perfis de velocidade apresentam comportamento similar ao escoamento de jato de parede. O conhecimento sobre o processo de difusão das bolhas de ar e os mecanismos de transferência de momento ainda não foi completamente consolidado.

Lopardo e Romagnoli (2009) estudaram as flutuações de pressões e velocidades do ressalto hidráulico. Os autores sugeriram uma relação entre a intensidade de turbulência e o coeficiente de flutuação de pressões. Foi verificado que para os escoamentos com número de Froude na entrada do ressalto (Fr_1) igual a 3,00 e 5,00, as flutuações de pressões foram da ordem de 60% dos valores da intensidade de turbulência, relativa às velocidades do ressalto hidráulico. Lopardo (2013b) observou a importância da avaliação dos valores extremos máximos de velocidade, relacionados a danos por erosão nos leitos fluviais a jusante de bacias de dissipação, que excedem significativamente os valores médios de velocidades.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento desta pesquisa, será analisada a metodologia de previsão de pressões proposta por Teixeira (2003) para o ressalto hidráulico estável ($4,5 < Fr_1 < 9,0$). A avaliação da aplicabilidade do método para um intervalo de número de Froude mais abrangente, incluindo a faixa de baixo número de Froude ($Fr_1 < 4,5$), será realizada a partir da comparação dos resultados obtidos a partir do método para diferentes séries experimentais de pressões instantâneas coletadas em modelos físicos reduzidos.

3.1 DADOS EXPERIMENTAIS

Neste item, são apresentados os dados experimentais a serem utilizados no desenvolvimento desta pesquisa, que incluem os dados cedidos por Souza (2012), Endres (1990), Marques (1995) e dados coletados junto ao modelo físico da UHE São Manoel, em 2016, e ao modelo físico da UHE Santo Antônio, em 2016.

3.1.1 Souza (2012)

As séries de dados com mais informações sobre o baixo número de Froude empregadas nesta pesquisa foram as amostras de pressões instantâneas obtidas no modelo físico bidimensional da UHE Santo Antônio instalado no Laboratório de Hidráulica Experimental e Recursos Hídricos (LAHE) da empresa Eletrobrás Furnas (FURNAS), cedidas por Souza (2012). Neste modelo, as vazões com tempo de recorrência de 100, 1.000 e 10.000 anos correspondem às vazões 501,29, 580,36 e 659,29, respectivamente. O modelo utilizado representa um vão completo e dois vãos com $\frac{3}{4}$ da largura de um vão completo do vertedouro da usina seguido por uma bacia de dissipação, com semelhança de Froude, em escala 1:50, cujas características são apresentadas na Tabela 5. O canal onde foi instalado o sistema extravasor possui 1,20 m de largura interna, 31,00 m de comprimento e 1,00 m de altura interna. Além disso, um trecho do canal possui paredes laterais de vidro para facilitar a visualização do fenômeno. A estrutura é apresentada em corte e planta baixa na Figura 26.

Tabela 5: Características geométricas do modelo físico bidimensional do sistema extravasor da UHE Santo Antônio (Fonte: adaptado de SOUZA, 2012).

Característica	Dimensão	
	Protótipo (m)	Modelo (m)
Cota de coroamento da barragem	75,50	0,75
Elevação da crista	47,50	0,19
Elevação do batente da comporta	46,82	0,18
Cota da bacia de dissipação	38,00	0,00
Cota do canal de aproximação	39,00	0,02
Raio da curva de concordância vertical	20,00	0,40
Equação do perfil vertente tipo Creager	$y=-0,0604046X^{1,748}$	$y=-0,0012080X^{0,03496}$
Concordância entre o perfil vertente e a curva de concordância vertical (graus)	30°	30°
Largura do canal de ensaios	-	1,20
Largura do vão central	-	0,40
Largura de cada vão parcial	-	0,30
Largura dos pilares	5,00	0,10
Comprimento do canal de ensaios	-	31,00
Distância da crista à ponta linimétrica de montante	-	5,20
Distância da crista à ponta linimétrica de jusante	-	9,80

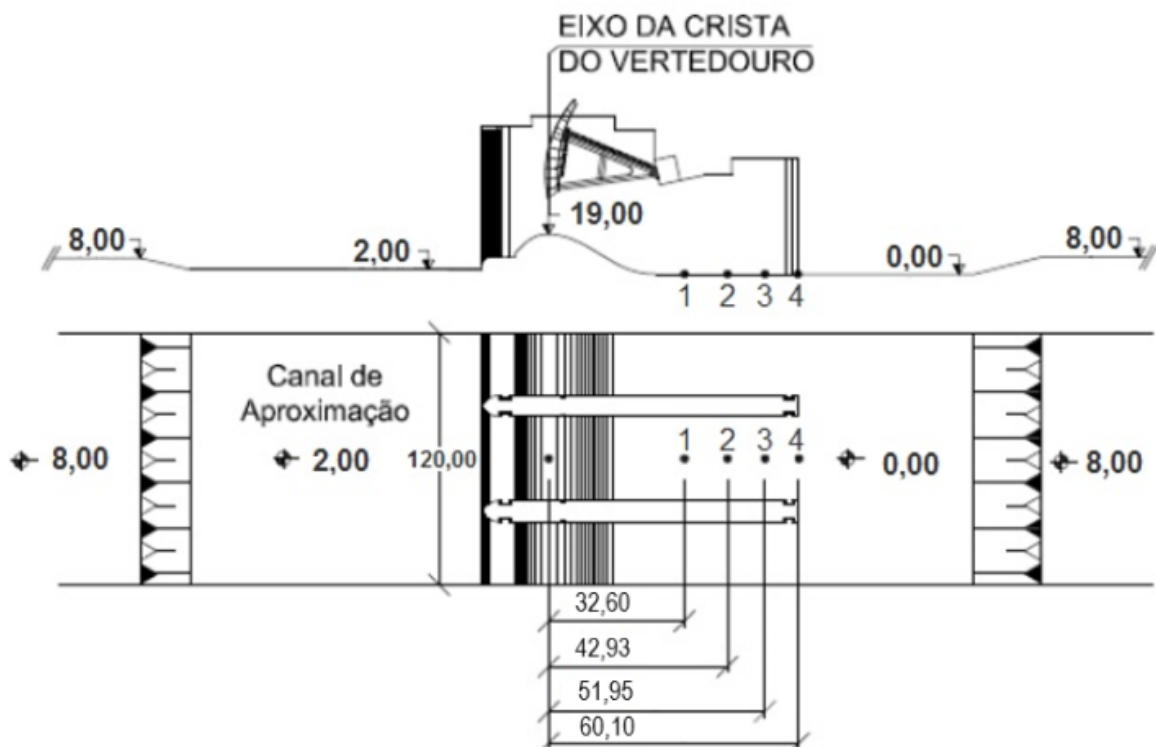


Figura 26: Modelo físico do vertedouro da UHE Santo Antônio, medidas em centímetros (Fonte: SOUZA, 2012).

A coleta das séries de pressões instantâneas foi realizada com o auxílio de 4 transdutores de pressões instalados ao longo da bacia de dissipação do modelo, no eixo central, a partir do ponto inicial da bacia, imediatamente após o final da curva de concordância vertical entre vertedouro e bacia de dissipação. A localização das tomadas de pressões são apresentadas na Figura 26 e na Figura 27. Por se tratar do modelo em detalhe do vertedouro da UHE Santo Antônio, a instalação experimental conta com transdutores de pressões instalados ao longo de todo o perfil do vertedouro e apenas 4 pontos de tomadas de pressões na bacia de dissipação. Sendo assim, apenas a porção inicial da bacia de dissipação é instrumentada, comprometendo o registro das pressões pelo desenvolvimento completo do ressalto hidráulico na estrutura. Para obtenção das pressões instantâneas, foram utilizados transdutores de pressões da marca Sitron, modelo CF-12DC, com faixa de trabalho de -1 a 2 mH₂O e precisão de 0,1% de fundo de escala. Os ensaios foram realizados com frequência de aquisição de 100 Hz, com duração de 10 minutos, totalizando 60.000 amostras de dados por tomada de pressão em cada ensaio.

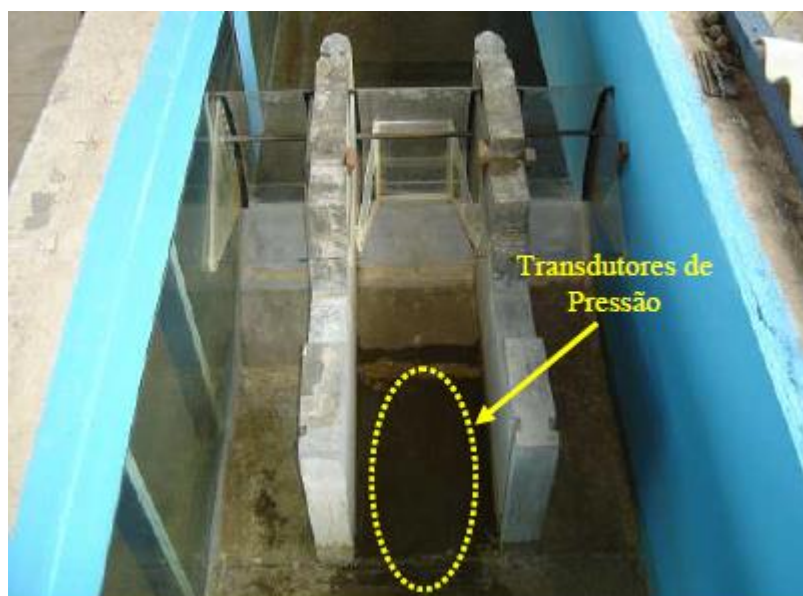


Figura 27: Modelo de detalhe do vertedouro da UHE Santo Antônio e bacia de dissipação, em escala 1:50, com indicação da posição das tomadas de pressões (Fonte: SOUZA, 2012).

As medições dos níveis d'água foram realizadas com o auxílio de três réguas linimétricas com escala graduada de Vernier e precisão de leitura de 0,1 mm. Duas réguas foram instaladas em suportes fixos dotados de poços de medição conectados ao canal, localizados a 5,20 m a montante e 9,80 m a jusante da crista do vertedouro. A terceira régua foi instalada em um suporte móvel e foi utilizada para a medição da altura conjugada rápida (y_1) do ressalto hidráulico, no vão central do modelo.

Assim, foram realizados 7 ensaios com vazões entre 444,0 l/s e 70,5 l/s ou vazões específicas no início do ressalto hidráulico (q_1) entre 2,34 e 3,53, com números de Froude no início do ressalto hidráulico (Fr_1) de 1,70 e 7,73, respectivamente. O registro fotográfico dos ensaios é apresentado no Anexo A. Um resumo das características das situações ensaiadas é apresentado na Tabela 6 e as principais grandezas observadas nos ensaios são apresentadas na Figura 28. Cabe salientar que parte das situações ensaiadas não corresponde às situações de operação do sistema extravasor da UHE Santo Antônio. A altura conjugada rápida do ressalto hidráulico (y_1) foi medida com uma régua linimétrica móvel, enquanto a altura conjugada lenta (y_2) foi estimada a partir da equação de Bélanger (Equação 2.4). A abertura da comporta (G_o) corresponde à menor distância perpendicular entre a extremidade inferior da comporta e o perfil do vertedouro. Os níveis de água de montante (Na Mont.) e jusante (Na Jus.) foram registrados a partir de réguas linimétricas fixadas ao canal e a diferença entre os valores registrados (ΔH) foi apresentada na última coluna da tabela. Os valores são apresentados em metros, na escala de modelo.

Tabela 6: Situações ensaiadas no modelo do vertedouro da UHE Santo Antônio (Fonte: SOUZA, 2012).

Situação	Vazão	q_1	Fr_1	y_1	y_2	G_o	Na Mont.	Na Jus.	ΔH
-	(l/s)	($m^3/s/m$)	-	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
1	444,0	2,34	1,70	0,19	0,37	Livre	0,52	0,35	0,17
2	325,0	2,95	2,90	0,11	0,39	0,18	0,62	0,36	0,26
3	276,0	3,07	3,16	0,09	0,37	0,15	0,62	0,33	0,28
4	227,0	3,24	3,69	0,07	0,35	0,12	0,62	0,31	0,31
5	175,0	3,50	4,38	0,05	0,31	0,09	0,61	0,27	0,34
6	122,0	3,05	5,22	0,04	0,26	0,06	0,62	0,23	0,39
7	70,5	3,53	7,73	0,02	0,21	0,03	0,67	0,16	0,51

3.1.2 Dados coletados no modelo físico da UHE Santo Antônio

Em uma nova oportunidade de ensaios, foram coletadas as pressões instantâneas de 7 situações de escoamento no modelo experimental utilizado nos ensaios realizados por Souza (2012), detalhado no item 3.1.1. As vazões ensaiadas na nova ocasião foram semelhantes às vazões utilizadas nos ensaios de Souza (2012) e são apresentadas na Tabela 7. Originalmente, as situações 1 e 7 apresentaram comportamento distinto das demais. Dessa forma, verificou-se que o comportamento das pressões instantâneas da menor vazão ensaiada (situação 7) foi semelhante às situações 2 a 6, sugerindo uma possível falha durante os ensaios originais. A situação com maior vazão (situação 1), e menor número de Froude, manteve o comportamento

das pressões instantâneas diferente das demais, indicando a necessidade de estudos mais detalhados para compreensão do fenômeno. O comportamento observado foi verificado a partir das características estatísticas das amostras como pressão média, desvio padrão e pressões extremas, analisadas ao longo da bacia de dissipação e são apresentados nos resultados desta pesquisa.

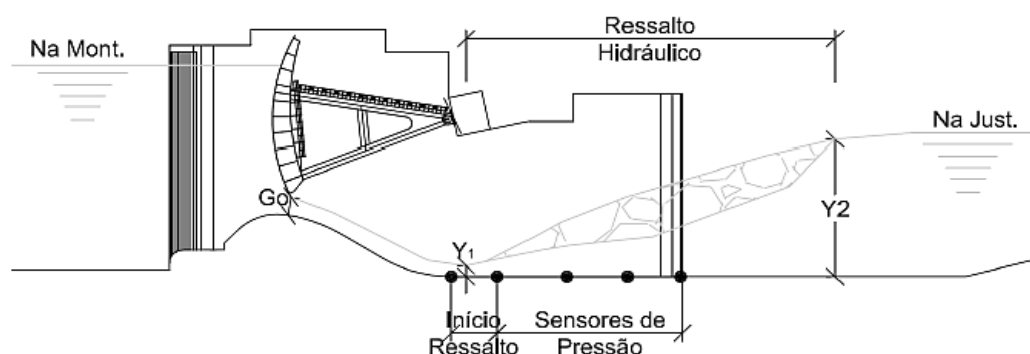


Figura 28: Esquemático das principais grandezas registradas nos ensaios (Fonte: SOUZA, 2012).

Tabela 7: Novos ensaios realizados no modelo bidimensional do sistema extravasor da UHE Santo Antônio.

Situação	Vazão	q_1	Fr_1	y_1	y_2	G_0	Na Mont.	Na Jus.	ΔH
-	(l/s)	($m^3/s/m$)	-	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
1	444,0	2,35	1,73	0,19	0,38	Livre	0,52	0,35	0,17
2	325,0	2,90	2,77	0,11	0,39	0,18	0,61	0,36	0,26
3	276,0	2,93	3,05	0,09	0,36	0,15	0,62	0,33	0,29
4	227,0	3,00	3,49	0,08	0,34	0,12	0,61	0,31	0,30
5	175,0	3,15	4,26	0,06	0,31	0,09	0,61	0,27	0,34
6	121,0	3,22	5,30	0,04	0,26	0,06	0,60	0,23	0,38
7	69,0	3,38	7,56	0,02	0,21	0,03	0,67	0,16	0,51

A partir da análise dos resultados em comparação aos resultados obtidos a partir dos dados cedidos por Souza (2012), optou-se pelo uso das pressões instantâneas coletadas em 2016 em detrimento das pressões cedidas pelo referido autor. As justificativas da escolha são apresentadas nos resultados da pesquisa, no capítulo 4.

3.1.3 Dados coletados no modelo físico da UHE São Manoel

Foram utilizadas duas séries de dados de pressões instantâneas coletadas em escoamentos com baixo número de Froude para comparação dos resultados. As pressões instantâneas foram coletadas em 2016, no modelo bidimensional do vertedouro e da bacia de dissipação da UHE

São Manoel, na escala 1:60, localizado no LAHE/FURNAS. O registro fotográfico dos ensaios é apresentado no Anexo A.

O modelo, com 0,87 m de largura, é composto por um vão central completo e dois vãos parciais, com metade da largura de um vão completo, separados por pilares. A estrutura foi instalada em um canal que representa um trecho de aproximadamente 500 m da calha do rio. Quanto à coleta de valores de pressões, o modelo foi instrumentado com 20 pontos de medição de pressões médias a partir de piezômetros e 9 tomadas de pressões instantâneas ao longo do eixo longitudinal central do vertedouro e da bacia de dissipação. Nesta pesquisa, foram utilizados os dados de pressões instantâneas coletados pelas tomadas de pressões T4 a T9, correspondentes aos pontos localizados no trecho plano da bacia de dissipação, como apresentado em perfil longitudinal na Figura 29 e em planta baixa na Figura 30.

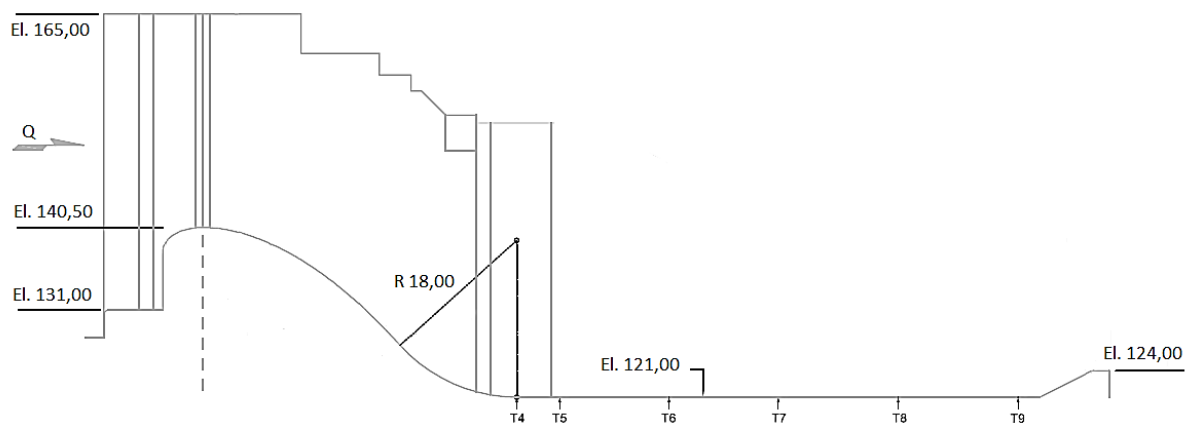


Figura 29: Perfil longitudinal do vertedouro e bacia de dissipação da UHE São Manoel, com elevações e raio da curva de concordância nas dimensões de protótipo em metros, e disposição das tomadas de pressões no trecho plano da bacia.

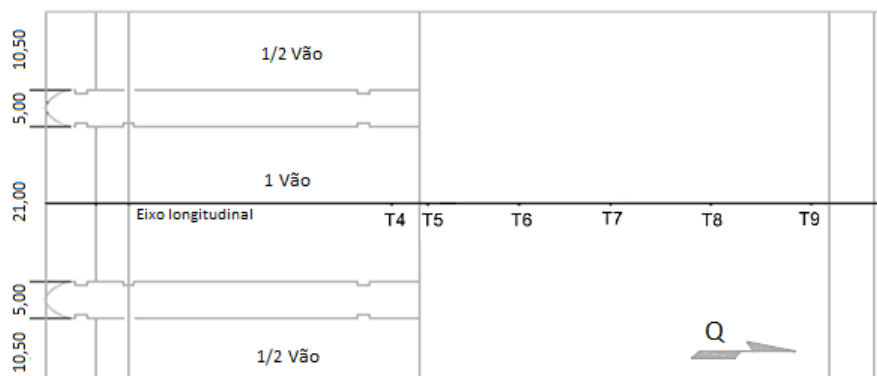


Figura 30: Planta baixa do modelo do vertedouro e bacia de dissipação da UHE São Manoel na escala 1:60, com larguras de vãos e pilares em dimensões de protótipo em metros, e disposição das tomadas de pressões no trecho plano da bacia.

Os ensaios foram realizados com tempo de aquisição de 10 minutos e frequência de 100 Hz. Na Tabela 8, são apresentadas as características de ensaio das duas situações de escoamento utilizadas para comparação dos resultados desta pesquisa. As vazões de 182,6 l/s e 142,6 l/s corresponderam às vazões de protótipo com tempos de recorrência de 10 e 2 anos, respectivamente. Na Figura 31, é apresentado o ensaio referente à vazão 182,6 l/s no modelo. As dimensões relativas ao ressalto hidráulico (posição horizontal do início do ressalto hidráulico medida a partir do eixo da crista do vertedouro X_1 , altura do início do ressalto hidráulico a partir da cota da bacia de dissipação Z_1 , altura conjugada rápida do ressalto hidráulico tipo B (afogado) h_1 e nível d'água incidente N_1) foram estimadas com o uso de imagens. A submergência teórica foi estimada a partir da metodologia de previsão da posição de início do ressalto hidráulico proposta por Wiest (2008), conforme a Equação 4.11.

Tabela 8: Características dos ensaios realizados no modelo da UHE São Manoel no LAHE/FURNAS.

UHE São Manoel		Situação	
		1	2
Q modelo	(l/s)	182,6	142,6
q_1	(m ³ /s/m)	2,84	2,61
Fr_1^*	-	3,07	3,21
X_1	(m)	0,44	0,47
Z_1	(m)	0,18	0,12
N_1	(m)	0,10	0,08
h_1	(m)	0,07	0,06
y_1	(m)	0,092	0,078
S	-	1,16	1,07
G_o	(m)	0,18	0,14
Na Mont.	(m)	0,67	0,67
Na Jus. (h_2)	(m)	0,37	0,33
ΔH	(m)	0,31	0,34

A altura conjugada rápida teórica do ressalto hidráulico tipo A (livre) y_1 foi estimada a partir da média de diferentes métodos de estimativa, ponderados em relação à razão entre a altura conjugada e a altura crítica do escoamento (y_1/h_c). Os métodos utilizados consideraram a submergência teórica, a relação entre as alturas conjugadas do ressalto hidráulico proposta por Bélanger (1941 apud CHANSON, 2008), conforme a Equação 2.4, e/ou a conservação de energia entre as seções do escoamento.



Figura 31: Modelo bidimensional da UHE São Manoel, em escala 1:60, ensaio com vazão 182,3 l/s.

3.1.4 Endres (1990)

Para comparação dos resultados, utilizaram-se as séries de pressões instantâneas cedidas por Endres (1990), obtidas em um modelo experimental instalado no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS. As instalações constituíram um vertedouro seguido por uma bacia de dissipação com as dimensões do canal: 0,72 m de largura, 0,72 m de elevação da crista do vertedouro e 15,00 m de comprimento, conforme ilustrado na Figura 32.

A medição das vazões foi realizada com o auxílio de vertedores de soleira delgada e o nível d'água a jusante do modelo foi controlado por uma comporta tipo guilhotina. A bacia de dissipação foi instrumentada com 11 transdutores de pressões, da marca Endevco, modelo S8506-2 e faixa de trabalho de 0 a 13,8 kPa, no eixo longitudinal central. Os ensaios foram realizados para cinco situações de escoamento com número de Froude no intervalo de 4,3 a 8,6, com duração de 100 s e frequência de aquisição de 100 Hz.

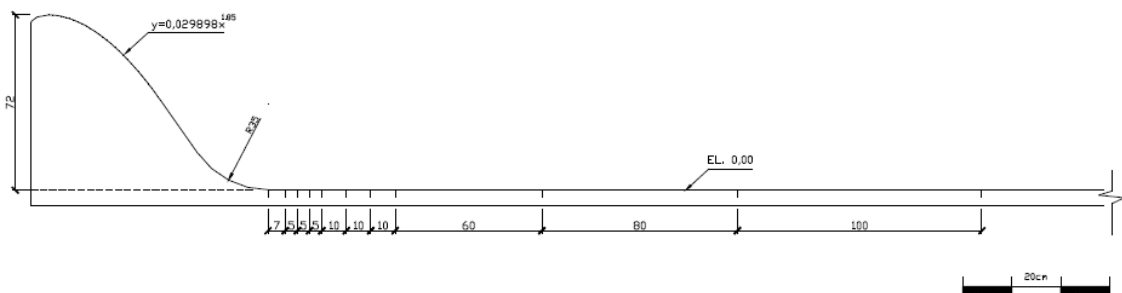


Figura 32: Perfil longitudinal do canal de ensaios utilizado por Endres (1990) e localização das tomadas de pressões, medidas em centímetros (Fonte: ENDRES, 1990).

3.1.5 Marques (1995)

O conjunto de dados de pressões instantâneas cedido por Marques (1995) também foi utilizado para comparação dos resultados obtidos nesta pesquisa. A instalação experimental utilizada pelo autor corresponde a um canal com 0,60 m de largura, 0,72 m de elevação da crista do vertedouro e 12,00 m de comprimento, construído no Laboratoire d’Hydraulique du Département de Génie Civil de l’Université Laval, em Québec, Canadá. Foram instaladas 22 tomadas de pressões e os ensaios foram realizados com frequência de aquisição de 50 Hz e duração de 200 s, para seis situações de escoamento com número de Froude no intervalo de 4,2 a 9,3. A Figura 33 apresenta o perfil longitudinal do canal de ensaios e a localização dos transdutores de pressão. Cabe salientar que a geometria do modelo é semelhante àquela utilizada por Endres (1990). Na Figura 34, é apresentado o ressalto hidráulico livre com número de Froude incidente 4,9, verificado pelo autor, no canal de ensaios.

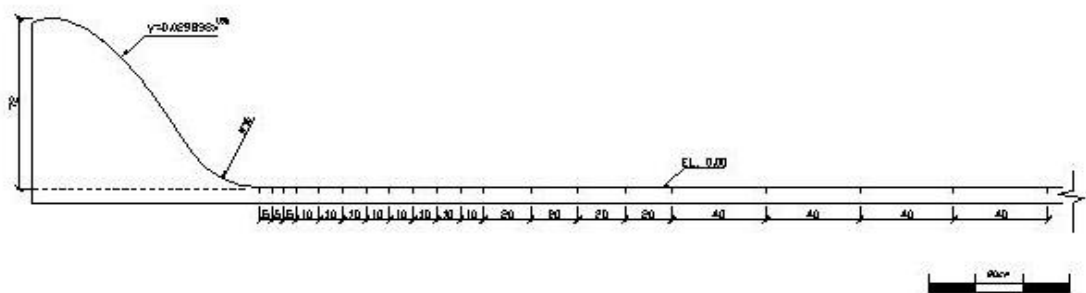


Figura 33: Perfil longitudinal do canal de ensaios utilizado por Marques (1995) e localização das tomadas de pressões, medidas em centímetros (Fonte: MARQUES, 1995).



Figura 34: Modelo físico experimental utilizado por Marques (1995), ensaio com $Fr_1=4,9$ (Fonte: MARQUES, 1995).

3.2 METODOLOGIA

Neste item são descritos os métodos empregados para o desenvolvimento desta pesquisa, incluindo a metodologia utilizada para a comparação quantitativa dos resultados e os métodos analíticos empregados na análise e comparação dos resultados.

3.2.1 Análise Preliminar dos Dados Amostrais

Primeiramente, foi realizada uma análise preliminar dos dados candidatos a serem utilizados nesta pesquisa. Foram comparadas as séries de pressões coletadas no modelo bidimensional da UHE Santo Antônio, em 2012 por Souza (2012) e em 2016 em nova oportunidade de ensaios, para a escolha do conjunto de dados a ser utilizado no desenvolvimento da presente pesquisa. A motivação para a escolha de um conjunto de dados em detrimento do outro foi a semelhança apresentada entre as séries. Por um lado, ensaios análogos podem fornecer indícios sobre a ocorrência de falhas nos ensaios ou instrumentos de medição; por outro lado, o emprego de ambos os conjuntos na presente pesquisa resultaria em um volume maior de dados sem necessariamente um aumento efetivo de informações sobre o fenômeno estudado.

Em complemento à análise preliminar dos dados, todas as séries de pressões instantâneas foram verificadas quanto à consistência dos valores a partir da verificação dos valores máximos, médios e mínimos de pressões. Foi verificado se os dados apresentavam comportamento semelhante em relação ao tempo. Além disso, foi verificada a grandeza dos valores coletados, a fim de identificarem-se discrepâncias significativas entre os dados.

3.2.2 Análises Estatísticas dos Dados Amostrais

A análise estatística dos dados amostrais consistiu no cálculo dos seguintes parâmetros estatísticos: pressão média, desvio padrão, coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades ($N_{a\%}$) e pressões com diferentes probabilidades de não excedência, que correspondem aos percentis de 99,9% a 0,1% das séries de pressões instantâneas medidas. As características estatísticas mencionadas foram analisadas longitudinalmente, ao longo da bacia de dissipação do modelo físico, com o uso das técnicas de adimensionalização propostas por Marques et al. (1997). Foram empregadas as Equações 2.31, 2.32 e 2.33 para a determinação dos valores adimensionais das pressões médias, pressões com diferentes probabilidades de não

excedência e desvio padrão, respectivamente. No caso do ressalto hidráulico livre, com submergência $S = 1$, as equações são resumidas ao caso particular representado pelas Equações 2.28, 2.29 e 2.30, respectivamente.

Foram determinadas as pressões médias das amostras de pressões. A pressão média da amostra corresponde à média aritmética de cada série de pressões instantâneas coletadas por cada transdutor de pressões em cada situação ensaiada. Posteriormente, as pressões médias foram adimensionalizadas conforme as Equações 2.28 ou 2.31. Da mesma forma, foi calculado o desvio padrão da amostra, que representa as flutuações de pressões em relação à média aritmética do conjunto de pressões instantâneas amostradas. Os valores amostrais foram adimensionalizados conforme as Equações 2.30 ou 2.33. A adimensionalização dos valores teve por objetivo permitir a comparação dos resultados com diferentes ordens de grandeza, obtidos a partir das séries de dados coletadas em modelos com geometrias distintas.

As pressões com probabilidades de não excedência de 99,9% a 0,1% foram calculadas a partir dos percentis de 99,9% a 0,1% da amostra de dados. Após, os resultados foram adimensionalizados segundo as Equações 2.29 ou 2.31. Por fim, o coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades ($N_{a\%}$) foi calculado a partir da relação apresentada na Equação 2.26, que pode ser reescrita conforme a Equação 3.1.

$$N_{a\%} = \frac{P_x \pm P_{a\%}}{\sigma_x} \quad 3.1$$

3.2.3 Complementação da Metodologia de Previsão de Pressões Proposta por Teixeira (2003)

Para a estimativa do coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades ($N_{a\%}$), foi proposto o ajuste dos coeficientes a , b e c , necessários para a determinação do coeficiente $N_{a\%}$, para as probabilidades de não excedência de 99,9% e 0,1%, complementando a metodologia proposta por Teixeira (2003).

3.2.4 Estimativa dos Parâmetros Estatísticos

Uma vez calculados os parâmetros estatísticos mencionados anteriormente para os valores amostrais de pressões instantâneas, foram determinados os correspondentes valores estimados, através da metodologia de previsão de pressões proposta por Teixeira (2003). A metodologia consistiu no ajuste dos parâmetros adimensionalizados da Equação 2.29: pressão média (Equação 2.34), desvio padrão (Equações 2.35 ou 2.36) e coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades (Equação 2.37 e Tabela 4). As pressões médias e desvios padrão foram obtidos a partir das relações adimensionais propostas por Marques et al. (1997), apresentados nas Equações 2.28 e 2.30, respectivamente. No caso de afogamento do ressalto hidráulico, foram utilizadas as relações adimensionais expressas nas Equações 2.31 e 2.33, respectivamente. Após, foram calculados os coeficientes $N_{a\%}$ correspondentes às probabilidades de não excedência de 99,9% a 0,1%, a partir da Equação 2.37.

Finalmente, as pressões com probabilidades de não excedência de 99,9% a 0,1% foram calculadas segundo a Equação 2.26, utilizando-se os parâmetros estatísticos P_x e σ_x na forma dimensional e $N_{a\%}$. Os resultados foram adimensionalizados conforme as Equações 2.29 ou 2.32.

3.2.5 Comparação dos Resultados e Avaliação da Aplicabilidade do Método ao Baixo Número de Froude

Para a comparação dos resultados, foi utilizada uma metodologia para a adimensionalização das pressões médias, flutuações de pressões e pressões com diferentes probabilidades de não excedência, proposta por Marques et al. (1997). Além disso, com o intuito de quantificar a exatidão da metodologia de previsão de pressões em escoamentos com baixo número de Froude, foram calculadas as diferenças relativas ($Dr_{a\%}$) dos valores estimados de pressões em relação aos valores amostrais (Equação 3.2). Por fim, foi avaliada a aplicabilidade da metodologia de previsão de pressões no ressalto hidráulico proposta por Teixeira (2003) quanto a sua aplicabilidade a escoamentos com baixo número de Froude ($Fr_1 < 4,5$).

$$Dr_{a\%} = \frac{P_{estimada} - P_{amostral}}{P_{amostral}} \quad 3.2$$

Sendo:

$P_{amostral}$: pressão $P_{a\%}$ obtida a partir da amostra de pressões instantâneas;

$P_{estimada}$: pressão $P_{a\%}$ estimada a partir da metodologia proposta por Teixeira (2003) e Equação 2.27.

3.2.6 Sugestão de Novas Estimativas

Uma vez determinada a aplicabilidade da metodologia proposta por Teixeira (2003) à previsão dos esforços extremos do ressalto hidráulico com baixo número de Froude ($Fr_1 < 4,5$), foi considerada a proposição de novos ajustes para o desvio padrão σ_x .

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste item, são apresentados os resultados da pesquisa. Foram estudados os conjuntos de séries de pressões coletados no modelo bidimensional da UHE Santo Antônio, por Souza (2012) e em 2016, cedido para o presente estudo, cujos parâmetros estatísticos são apresentados em comparação aos dados cedidos por Endres (1990) e Marques (1995), bem como aos dados coletados no modelo bidimensional do vertedouro e da bacia de dissipação da UHE São Manoel.

Além disso, são apresentados os coeficientes a , b e c para determinação do coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades a partir da metodologia proposta por Teixeira (2003), abrangendo as probabilidades de não excedência 0,1% a 99,9%. A metodologia foi empregada para a estimativa das pressões extremas do ressalto hidráulico com baixo número de Froude e sua aplicabilidade foi avaliada com base nas diferenças relativas em relação às amostras de dados. Por fim, são apresentados os resultados e considerações sobre a proposição de novo ajuste para o ressalto hidráulico com baixo número de Froude.

Os seis conjuntos de resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia analítica proposta foram esquematizados na Figura 35: Resultados apresentados na pesquisa (em azul) obtidos conforme o método analítico utilizado e correspondem aos subitens deste capítulo.

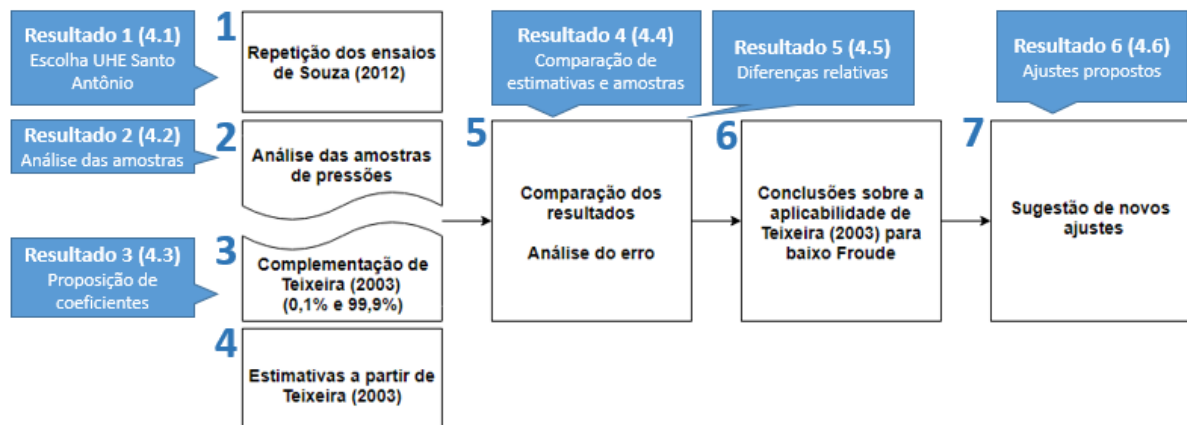


Figura 35: Resultados apresentados na pesquisa (em azul) obtidos conforme o método analítico utilizado

4.1 ANÁLISE PRELIMINAR DOS DADOS: MODELO DA UHE SANTO ANTÔNIO

Neste item, são apresentados os resultados das comparações realizadas entre os conjuntos de dados coletados no modelo bidimensional do sistema extravasor da UHE Santo Antônio, por Souza (2012) e em 2016 como alternativa para o presente estudo. São apresentados pressões médias, desvios padrão, coeficientes N e pressões extremas relacionadas às probabilidades não excedência de 0,1% e 99,9%, comparados entre si, com os dados cedidos por Endres (1990) e Marques (1995) e com os valores dos ensaios no modelo bidimensional do vertedouro e bacia de dissipação da UHE São Manoel.

4.1.1 Pressão Média

As pressões médias coletadas no modelo de detalhe do vertedouro da UHE Santo Antônio foram comparadas entre si e com os resultados obtidos a partir dos dados cedidos por Endres (1990) e Marques (1995), conforme apresentado na Figura 36, em valores adimensionais. Verificou-se que os dados se encontraram em uma mesma região, próximos às distribuições longitudinais das pressões médias de Endres (1990) e Marques (1995). Os dados coletados no modelo da UHE Santo Antônio, no entanto, apresentaram maior dispersão de dados, com parte dos valores de pressões superior aos resultados dos referidos autores. Para melhor visualização dos resultados, as 4 situações de escoamentos com valores mais extremos de vazão de cada conjunto de dados, coletados por Souza (2012) e em 2016 cedido para o presente estudo, foram comparados individualmente e são apresentadas na Figura 37 (as demais comparações podem ser consultadas no Apêndice A deste trabalho).

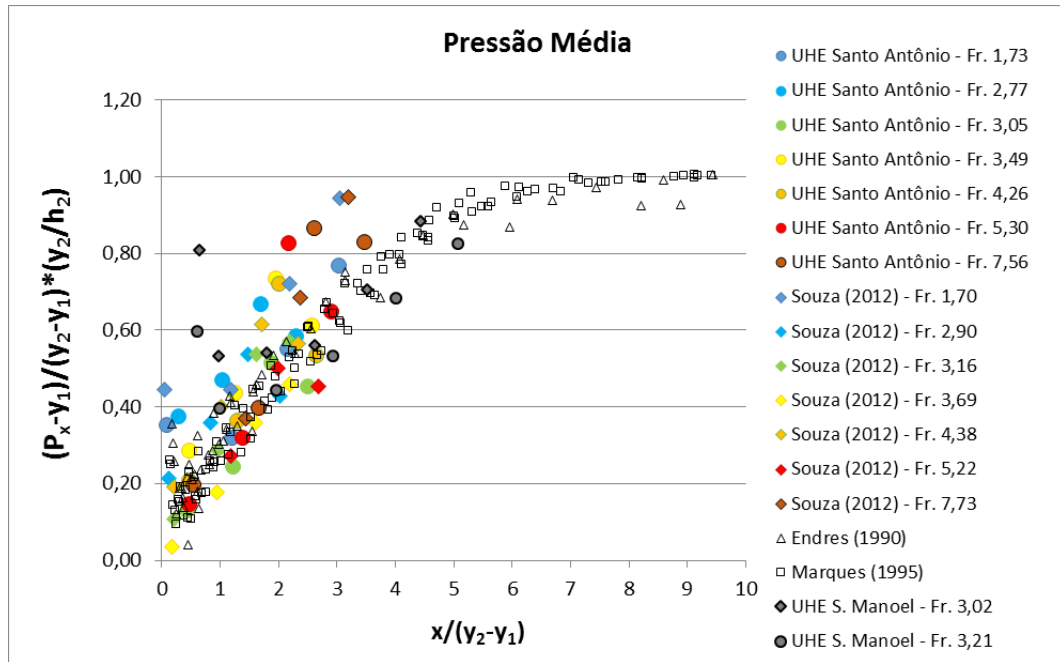


Figura 36: Pressões médias coletadas no modelo bidimensional da UHE Santo Antônio, por Souza (2012) e como alternativa para o presente estudo, em comparação com dados cedidos por Endres (1990) e Marques (1995) e dados coletados no modelo bidimensional da UHE São Manoel.

A partir da comparação das situações com maiores e menores números de Froude dos valores médios das séries de pressões instantâneas analisadas (Figura 37), observou-se que:

- em ambos os conjuntos de dados, a situação com menor número de Froude incidente (1,73 e 1,70) apresentou uma distribuição longitudinal de pressões médias distinta das demais situações: não foi verificado decréscimo das pressões na quarta tomada de pressões. Cabe salientar que os referidos escoamentos encontram-se no limiar da classificação entre o ressalto ondulatório e o ressalto fraco;
- a elevação das pressões na primeira tomada pode ser resultado da influência da curva de concordância, verificada principalmente nos escoamentos com menor número de Froude incidente, embora mais estudos sejam necessários para a determinação da origem do fenômeno observado. Segundo Dai Prá et al. (2012), a influência da curva de concordância pode ser observada até aproximadamente a posição adimensional 0,5;
- a elevação das pressões na terceira tomada de pressões, responsável pelo distanciamento dos dados analisados em relação aos resultados de Endres (1990) e Marques (1995) (Figura 36), deve ser mais bem investigada em novos estudos envolvendo vertedouros com baixa queda, nos quais seja possível a instrumentação de todo o comprimento da bacia de dissipação. O fenômeno será observado novamente com a análise dos dados provenientes do modelo físico da UHE São Manoel;
- as pressões médias do escoamento com número de Froude incidente 7,73, cedidas por Souza (2012), apresentaram um comportamento distinto das demais situações de ensaios, sugerindo a possibilidade de falha no ensaio ou

equipamento de medição. Deve-se observar que a posição da tomada em relação ao ressalto hidráulico é localizada em uma região de elevada turbulência.

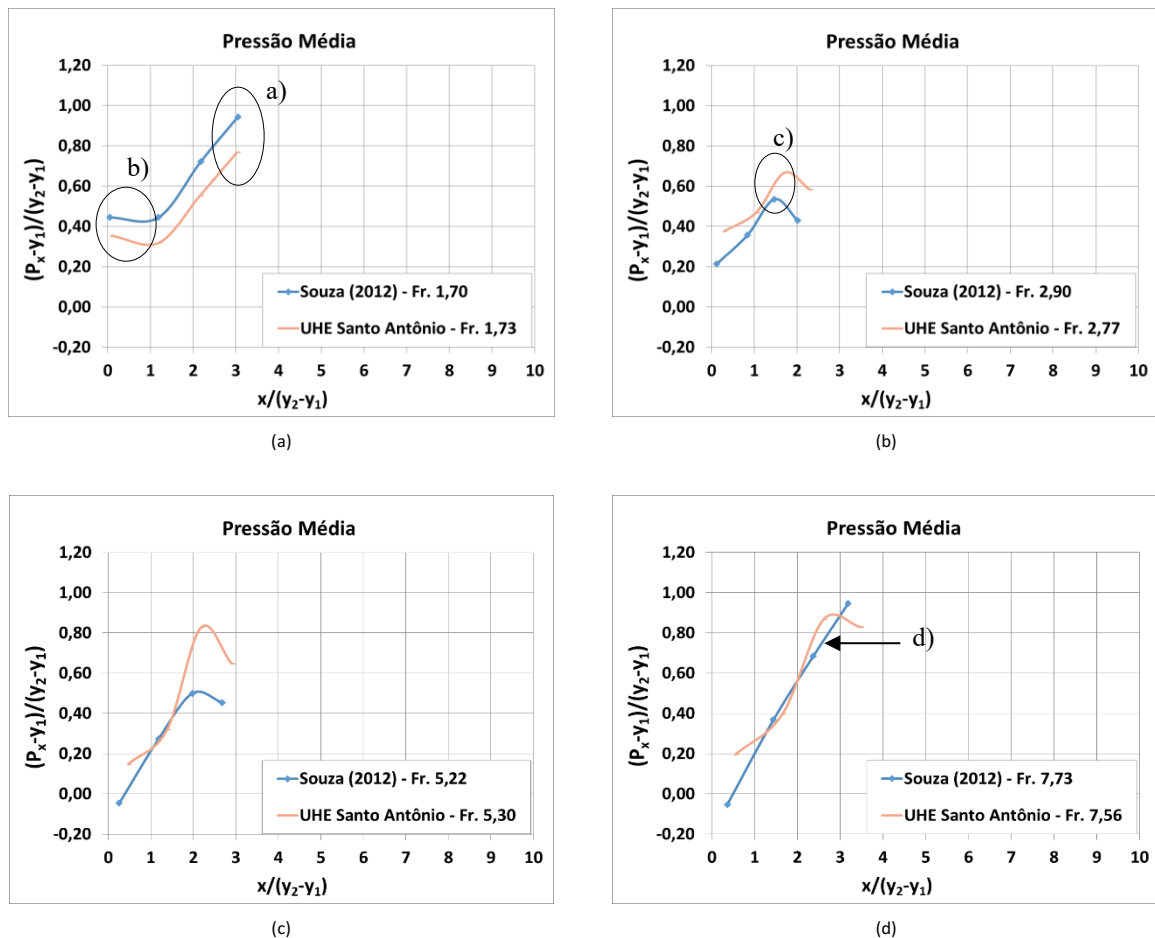


Figura 37: Pressões médias coletadas no modelo bidimensional da UHE Santo Antônio com: (a) Fr_1 1,73 e 1,70; (b) Fr_1 2,77 e 2,90; (c) Fr_1 5,30 e 5,22; (d) Fr_1 7,56 e 7,73.

4.1.2 Desvio Padrão

De forma semelhante à comparação das pressões médias coletadas no modelo de detalhe do vertedouro da UHE Santo Antônio, o desvio padrão das amostras de pressões instantâneas é apresentado na Figura 38, em valores adimensionais. Observou-se maior dispersão dos resultados a partir da posição adimensional 2, também observada nas pressões médias. Além disso, o escoamento com $Fr_1 = 1,73$ apresentou valores inferiores aos demais a partir da referida posição. Os escoamentos com menores e maiores números de Froude incidentes dos dados coletados por Souza (2012) e em alternativa para o presente estudo são apresentados na Figura 39. As comparações individuais do desvio padrão para os demais números de Froude podem ser consultadas no Apêndice A.

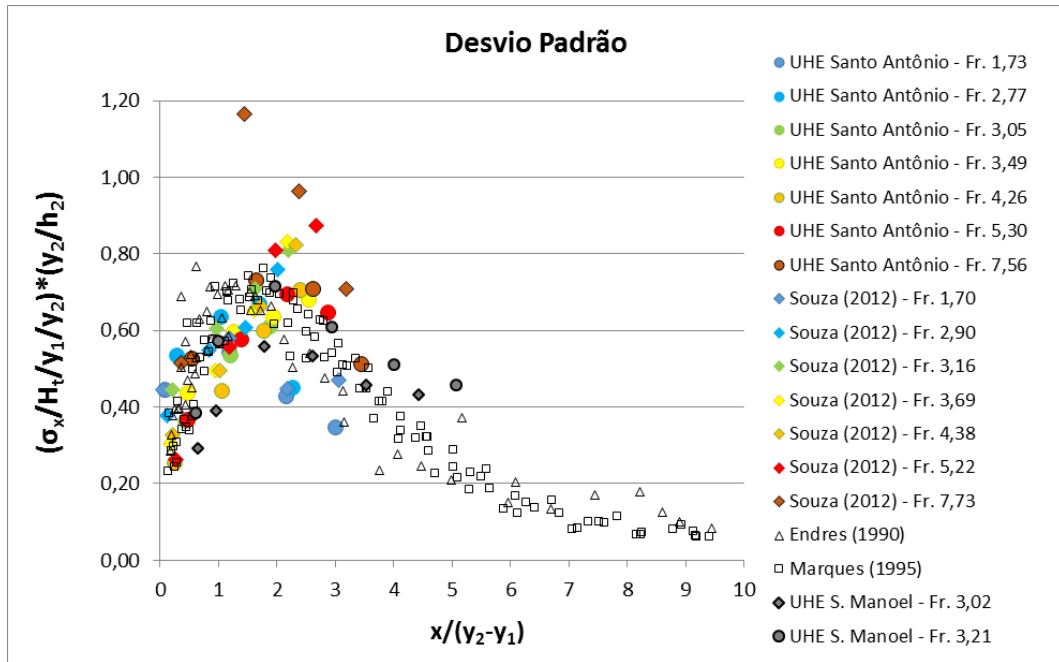


Figura 38: Desvios padrão coletados no modelo bidimensional da UHE Santo Antônio, por Souza (2012) e como alternativa para o presente estudo, em comparação com dados cedidos por Endres (1990) e Marques (1995) e dados coletados no modelo bidimensional da UHE São Manoel.

A partir da Figura 39, que apresenta a comparação entre os escoamentos com maiores e menores números de Froude incidente dos conjuntos de dados analisados, observou-se que:

- a) a distribuição longitudinal do desvio padrão das amostras de pressões apresentou comportamento variado, principalmente nos dados coletados por Souza (2012);
- b) a maioria das distribuições apresentou valores próximos, exceto pelos escoamentos com maior número de Froude, para o qual o comportamento dos dados coletados por Souza (2012) não foi replicado na nova oportunidade de ensaios. Somado às observações das pressões médias do mesmo escoamento, sugere-se novamente a possibilidade de falha no ensaio ou no equipamento de medição utilizado;
- c) de maneira geral, a quarta tomada de pressões apresentou valores mais elevados para os dados coletados por Souza (2012).

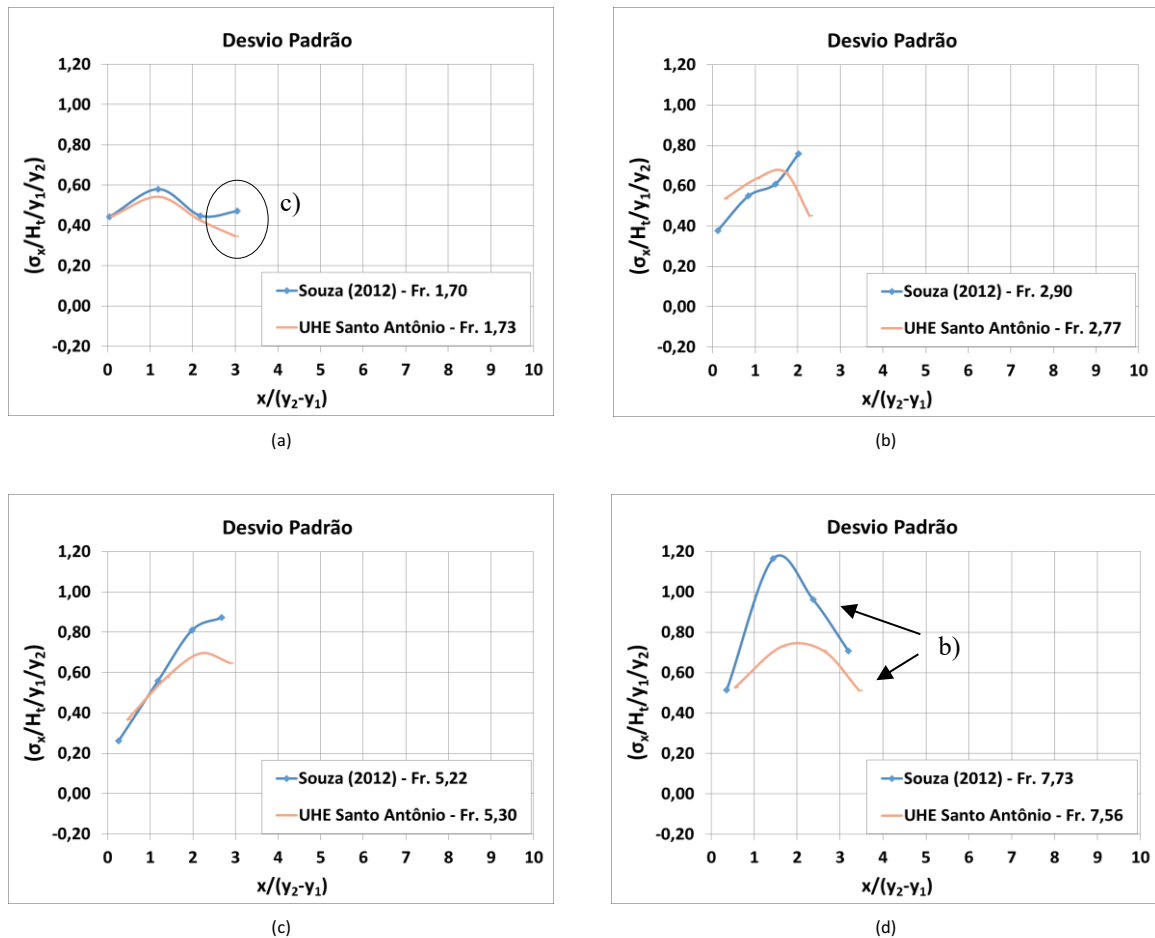


Figura 39: Desvios padrão coletados no modelo bidimensional da UHE Santo Antônio com: (a) Fr_1 1,73 e 1,70; (b) Fr_1 2,77 e 2,90; (c) Fr_1 5,30 e 5,22; (d) Fr_1 7,56 e 7,73.

4.1.3 Pressões Extremas: 0,1% e 99,9%

Foram determinadas as pressões com probabilidades não excedência de 0,1% e 99,9% para as séries de pressões instantâneas coletadas no modelo bidimensional da UHE Santo Antônio, em ambos os conjuntos de ensaios analisados. As pressões extremas determinadas foram comparadas com os resultados de Endres (1990) como referência. Assim, a Figura 40 apresenta as pressões médias e extremas obtidas a partir dos escoamentos com números de Froude incidentes 1,70 e 1,73. Da mesma forma, a Figura 41 apresenta os valores extremos de pressões relativos aos escoamentos com números de Froude incidentes 3,16 e 3,05 e a Figura 42 apresenta os valores extremos de pressões relativos aos escoamentos com números de Froude incidentes 4,38 e 4,26, enquanto a Figura 43 apresenta resultados relativos aos escoamentos com números de Froude incidentes 7,56 e 7,73. Para facilitar a visualização das distribuições,

linhas foram traças entre os valores de pressões referentes aos ensaios realizados para o presente estudo.

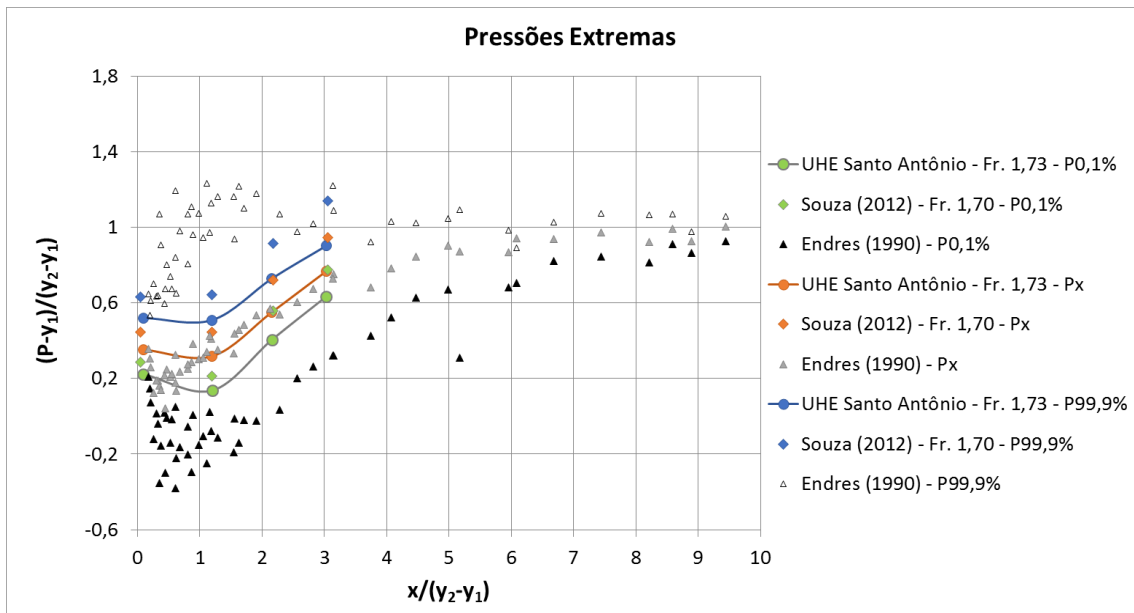


Figura 40: Fr_1 1,70 e 1,73: pressões médias e com probabilidades não excedência de 0,1% e 99,9% obtidas a partir dos dados coletados no modelo bidimensional da UHE Santo Antônio, por Souza (2012) e como alternativa para o presente estudo (UHE Santo Antônio), em comparação com dados cedidos por Endres (1990).

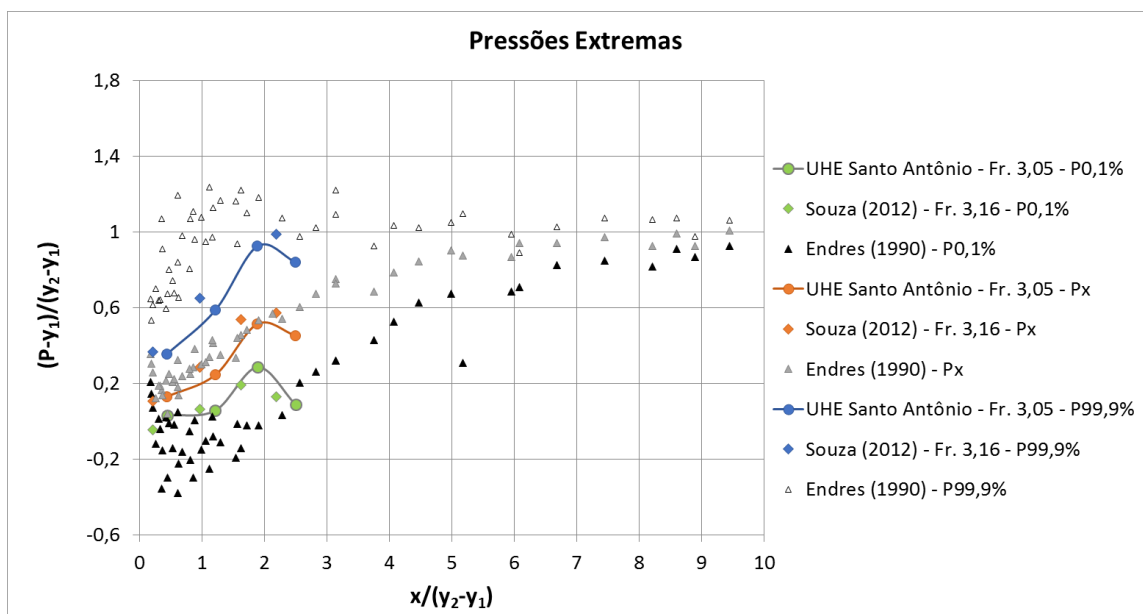


Figura 41: Fr_1 3,16 e 3,05: pressões médias e com probabilidades não excedência de 0,1% e 99,9% obtidas a partir dos dados coletados no modelo bidimensional da UHE Santo Antônio, por Souza (2012) e como alternativa para o presente estudo (UHE Santo Antônio), em comparação com dados cedidos por Endres (1990).

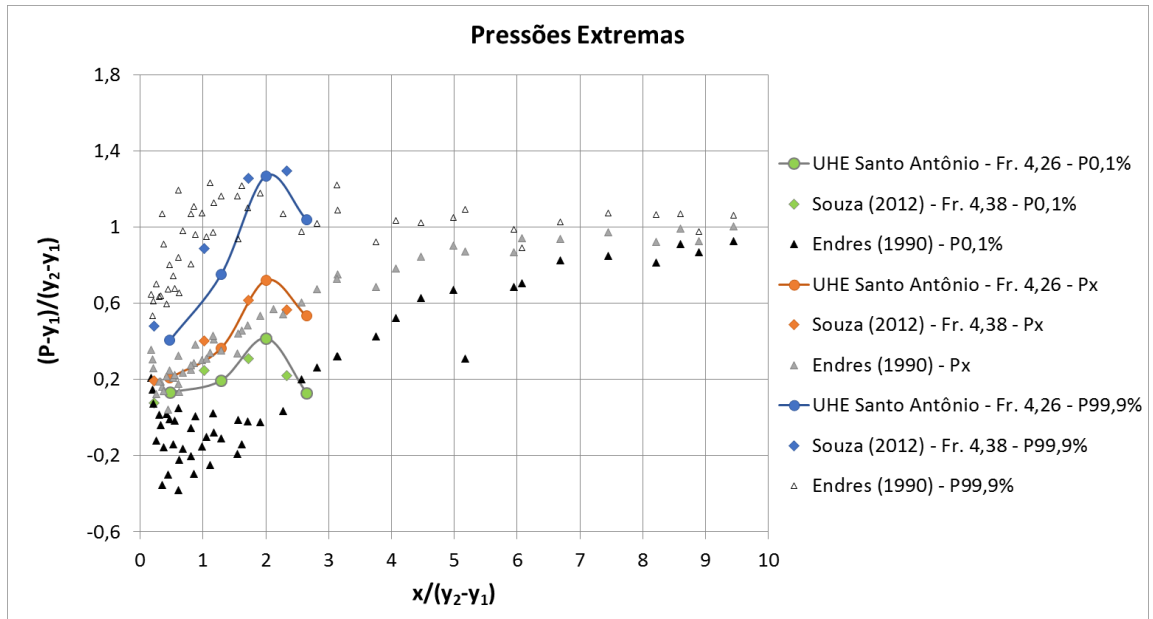


Figura 42: Fr_1 4,38 e 4,26: pressões médias e com probabilidades não excedência de 0,1% e 99,9% obtidas a partir dos dados coletados no modelo bidimensional da UHE Santo Antônio, por Souza (2012) e como alternativa para o presente estudo (UHE Santo Antônio), em comparação com dados cedidos por Endres (1990).

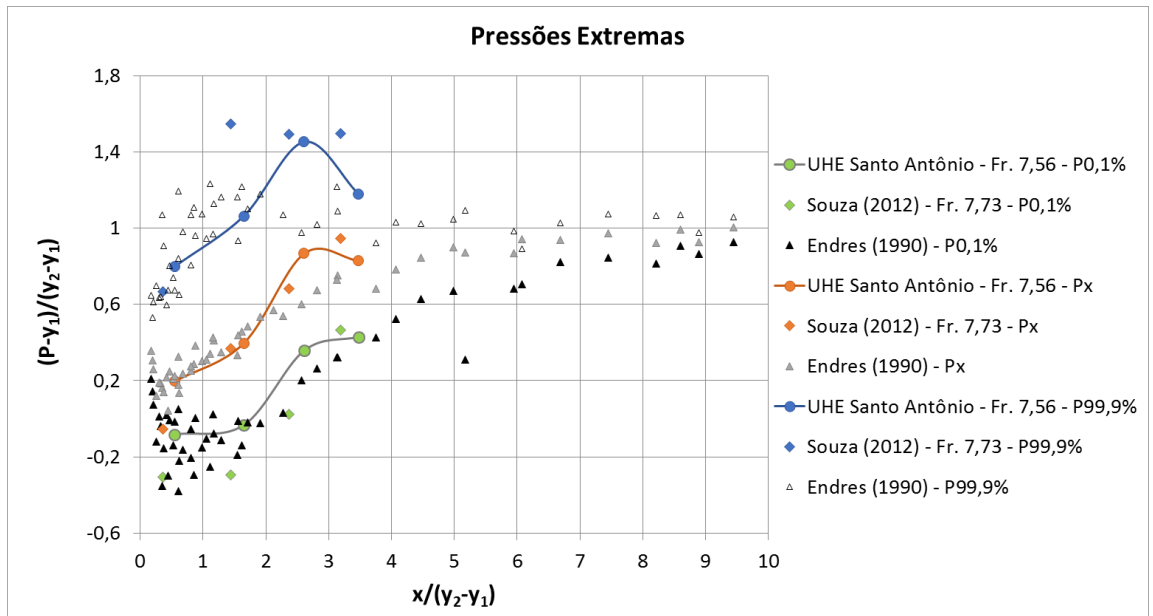


Figura 43: Fr_1 7,56 e 7,73: pressões médias e com probabilidades não excedência de 0,1% e 99,9% obtidas a partir dos dados coletados no modelo bidimensional da UHE Santo Antônio, por Souza (2012) e como alternativa para o presente estudo (UHE Santo Antônio), em comparação com dados cedidos por Endres (1990).

A partir dos resultados obtidos, verificou-se que os valores extremos dos escoamentos com menores números de Froude incidentes encontram-se mais próximos à média. Este comportamento corrobora os resultados obtidos por Chiew e Emadzadeh (2017), que estudaram

o desenvolvimento do ressalto hidráulico confinado, em situação semelhante a um canal a superfície livre. Apesar disso, a região do ressalto hidráulico com ocorrência de valores extremos negativos foi próxima à região identificada para os dados cedidos por Endres (1990).

As demais comparações entre as pressões extremas com probabilidades não excedência de 0,1%, 1%, 5%, 10%, 90%, 95%, 99% e 99,9% cedidas por Souza (2012) e referentes à repetição dos ensaios para o presente estudo são apresentadas no Apêndice A.

4.1.4 Coeficiente Estatístico de Distribuição de Probabilidades

Com base nos valores amostrais de pressões médias, pressões extremas e desvios padrão, foram determinados os coeficientes estatísticos de distribuição de probabilidades referentes às séries de dados coletadas no modelo físico bidimensional da UHE Santo Antônio em 2016 para o presente estudo. Os resultados encontrados foram comparados aos respectivos valores cedidos por Souza (2012) para as probabilidades não excedência 0,1%, 1%, 5%, 10%, 90%, 95%, 99% e 99,9%, conforme apresentado na Figura 44. Os coeficientes N referentes às probabilidades 0,1% e 1%, bem como 99% e 99,9% são apresentados em detalhe na Figura 45 e na Figura 46, respectivamente.

A partir dos resultados verificados, identificou-se que, conforme esperado, em ambas as séries de dados, os valores tendem a apresentar menor dispersão conforme a probabilidade não excedência analisada se aproxima da probabilidade de não excedência de 50%. As maiores dispersões foram observadas para as probabilidades de não excedência de 0,1% e 99,9%.

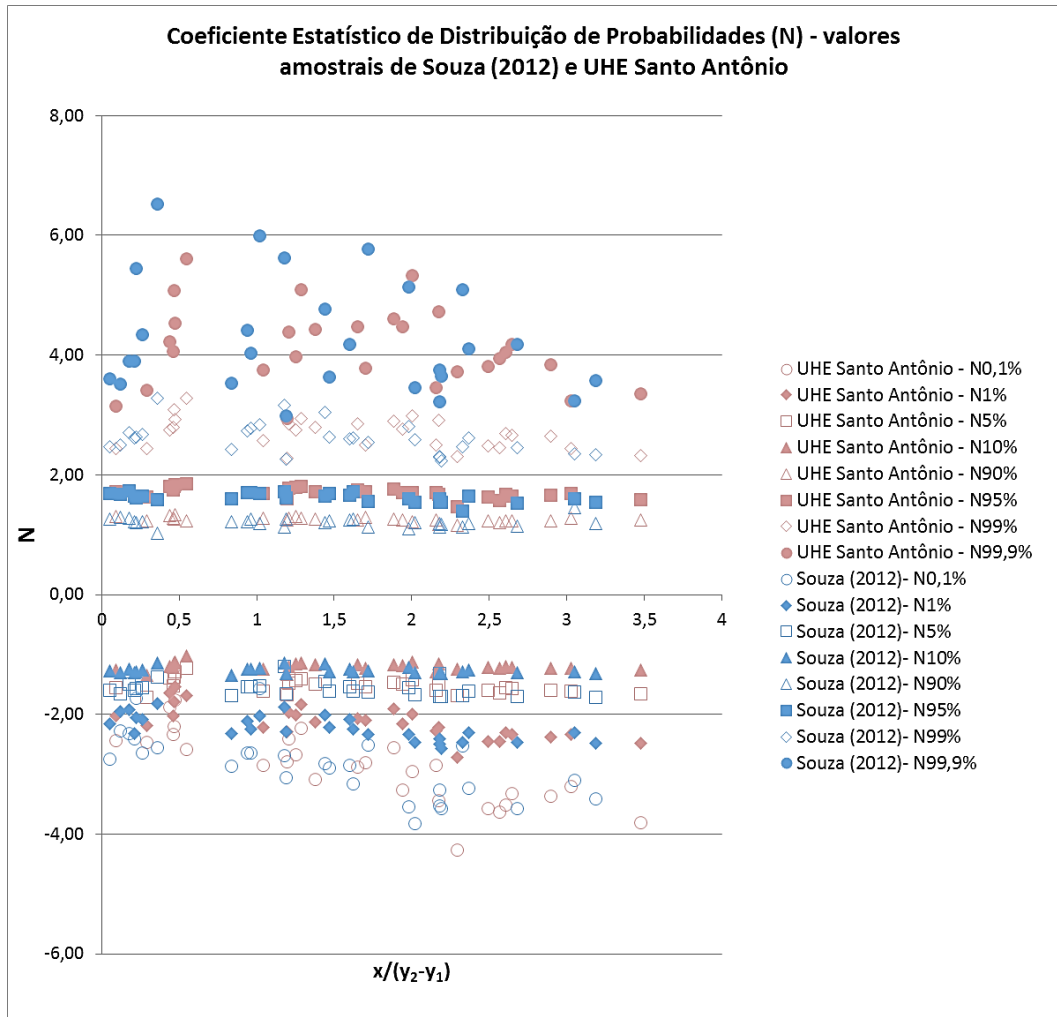


Figura 44: Coeficientes Estatísticos de Distribuição de Probabilidades (N) com probabilidade de não excedência 0,1%, 1%, 5%, 10%, 90%, 95%, 99% e 99,9% coletados no modelo bidimensional da UHE Santo Antônio, por Souza (2012) e em 2016 para o presente estudo (UHE Santo Antônio).

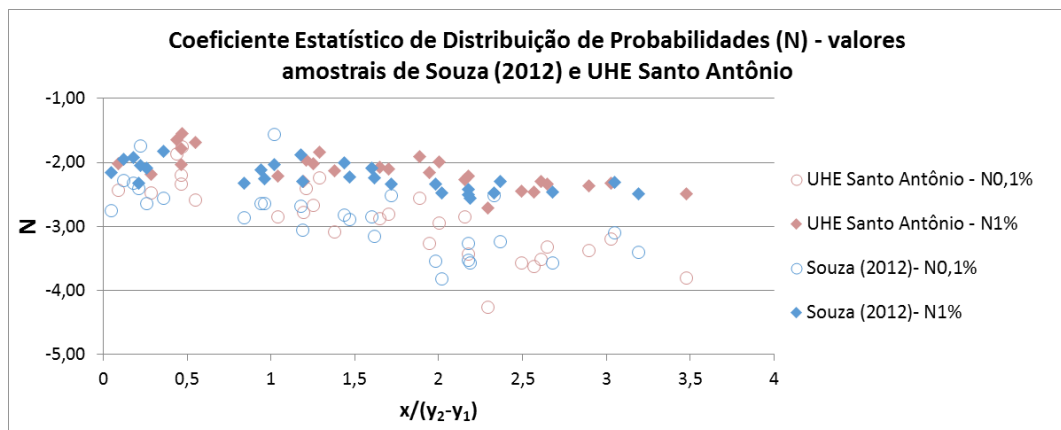


Figura 45: Coeficientes Estatísticos de Distribuição de Probabilidades (N) com probabilidade de não excedência 0,1% e 1% coletados no modelo bidimensional da UHE Santo Antônio, por Souza (2012) e em 2016 para o presente estudo (UHE Santo Antônio).

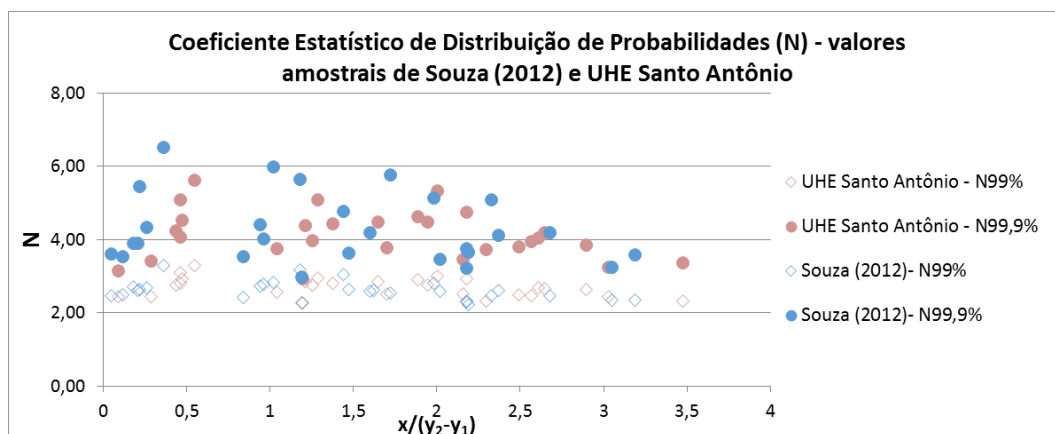


Figura 46: Coeficientes Estatísticos de Distribuição de Probabilidades (N) com probabilidade de não excedência 99% e 99,9% coletados no modelo bidimensional da UHE Santo Antônio, por Souza (2012) e em 2016 para o presente estudo (UHE Santo Antônio).

4.1.5 Escolha dos Dados Utilizados

A partir dos resultados obtidos, observaram-se diferenças entre os parâmetros estatísticos dos dois conjuntos de dados analisados. Em função principalmente da amostra de pressões relativa ao escoamento com número de Froude incidente 7,73, coletada por Souza (2012), apresentar uma tendência distinta dos demais escoamentos, tanto em relação à pressão média quanto ao desvio padrão, optou-se pela utilização das séries de pressões instantâneas coletadas em 2016, no modelo bidimensional do sistema extravasor da UHE Santo Antônio.

Verificou-se, no entanto, uma falha no registro da posição horizontal do início do ressalto hidráulico na bacia de dissipação para o escoamento com número de Froude incidente 4,26. O problema foi superado com a interpolação do valor perdido e acredita-se que a solução adotada não causou prejuízo aos resultados. Assim, estes dados foram utilizados em conjunto com os dados coletados no modelo físico da UHE São Manoel e dados cedidos por Endres (1990) e Marques (1995), conforme detalhado no capítulo 4 desta pesquisa.

4.2 ANÁLISE DAS PRESSÕES EXTREMAS

Neste item são apresentadas as comparações dos parâmetros estatísticos da amostra de dados utilizada no presente estudo, cuja seleção foi abordada no item 4.1, com os dados cedidos por Endres (1990) e Marques (1995) e com os dados coletados no modelo bidimensional do sistema extravasor da UHE São Manoel.

As pressões médias (Figura 47) verificadas na amostra do presente estudo apresentaram valores semelhantes ou superiores aos dados cedidos por Endres (1990) e Marques (1995), cujos intervalos de números de Froude incidentes são próximos à faixa considerada estável ($4,5 < Fr_1 < 9,0$). Os valores mais distantes da tendência observada no gráfico não se limitam apenas aos escoamentos com baixo número de Froude ($Fr_1 < 5,0$), sugerindo a influência de outro fator, tal como a geometria do modelo de ensaios.

Para a inclusão dos valores referentes aos dados da UHE São Manoel, o fator de submergência $S=h_2/y_2=T_w/y_2$ foi incluído na adimensionalização dos valores a fim de aproximar os dados do ressalto hidráulico afogado ao livre, conforme proposto por Marques et al (1999). Verificaram-se valores de pressões mais altos do que os demais dados nas posições iniciais do ressalto hidráulico e a aproximação aos dados de Endres (1990) e Marques (1995) a partir da posição aproximada $x/(y_2-y_1)=2$, independentemente séries estudadas apresentarem baixo número de Froude incidente. Comportamento semelhante foi observado por Trierweiler (2006) no estudo do ressalto hidráulico submerso a jusante de uma comporta com intervalo de números de Froude 3,97 a 5,88.

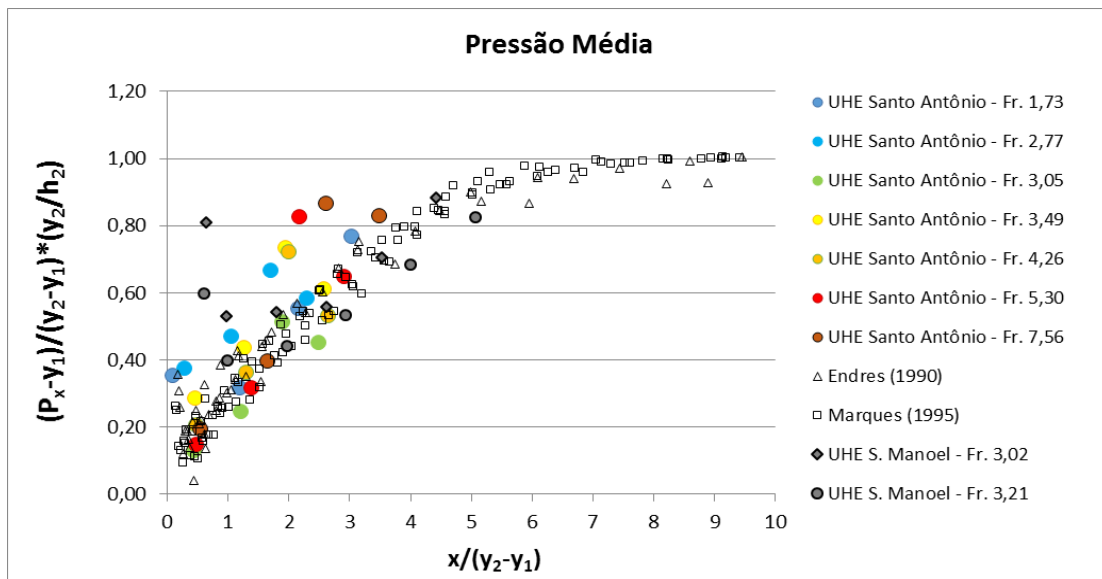


Figura 47: Pressões médias coletadas no modelo bidimensional da UHE Santo Antônio, em 2016 para o presente estudo, em comparação com dados cedidos por Endres (1990) e Marques (1995) e dados coletados no modelo bidimensional da UHE São Manoel.

Os desvios padrão (Figura 48) da amostra analisada no presente estudo apresentaram valores próximos aos valores das amostras de Endres (1990) e Marques (1995) a partir do escoamento com número de Froude 3,05. Os escoamentos com números de Froude incidente 1,73 e 2,77,

no entanto, apresentaram dispersão dos dados nas posições iniciais e entre as posições adimensionais 2,0 e 3,0, onde se verificaram valores inferiores à tendência observada no gráfico.

Trierweiler (2006) observou a atenuação dos valores do desvio padrão, na região de maior flutuação de pressões, conforme o aumento da submergência do ressalto hidráulico.

Os desvios padrão referentes às amostras de dados coletados no modelo bidimensional da UHE São Manoel apresentaram valores superiores aos demais dados após a posição adimensional aproximada 4,0. Devido à falta de dados ao longo do desenvolvimento completo do ressalto hidráulico, não se pode afirmar que os desvios padrão das séries coletadas no modelo seguem a mesma tendência observada para os dados cedidos por Endres (1990) e Marques (1995).

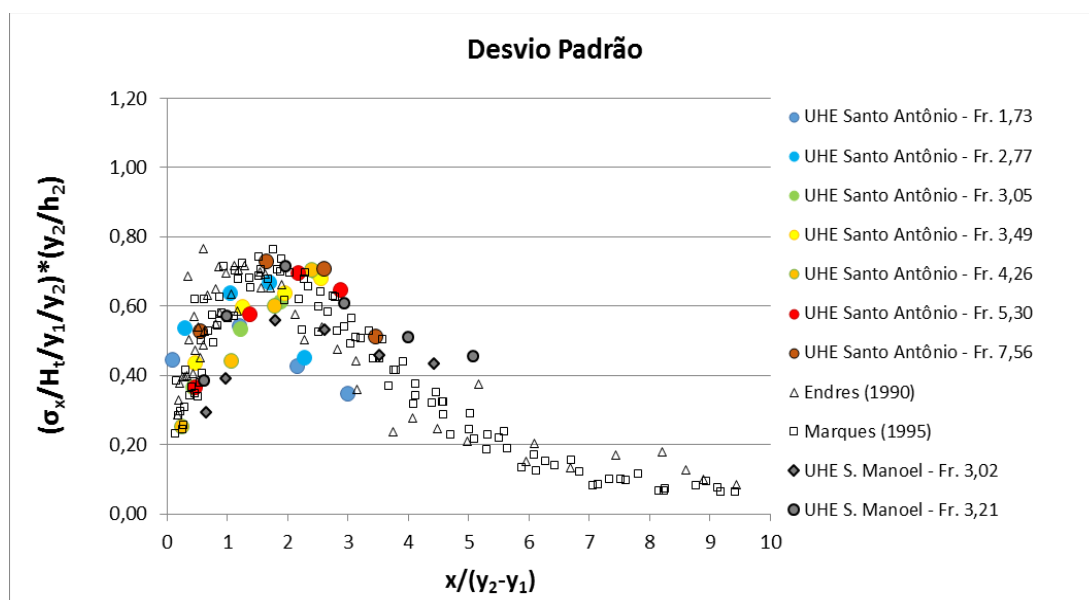


Figura 48: Desvios padrão coletados no modelo bidimensional da UHE Santo Antônio, em 2016 para o presente estudo, em comparação com dados cedidos por Endres (1990) e Marques (1995) e dados coletados no modelo bidimensional da UHE São Manoel.

Na análise das pressões extremas da amostra de dados utilizada no presente estudo, foram admitidas as probabilidades de não excedência 0,1% (Figura 49), 1% (Figura 50), 5%, 10%, 90%, 95%, 99% (Figura 51) e 99,9% (Figura 52). Verificou-se que os dados coletados para o presente estudo com probabilidades de não excedência de 0,1% e 1% apresentaram valores adimensionais semelhantes ou superiores aos dados cedidos por Endres (1990) e Marques (1995). Comportamento semelhante foi observado para as probabilidades de não excedência de 5% e 10%, cujos gráficos podem ser consultados no Apêndice A. Considerando que não se dispõe de dados de pressões instantâneas ao longo do desenvolvimento completo do

ressalto hidráulico no modelo, não se pode afirmar que as pressões convergem aos dados dos autores nas posições seguintes.

Assim como observado nas pressões médias, as pressões extremas adimensionais com probabilidades de não excedência de 0,1% e 1% das séries de dados coletadas no modelo bidimensional da UHE São Manoel são mais elevadas em relação ao demais dados nas posições iniciais do ressalto hidráulico. No entanto, nas proximidades da posição adimensional 2,0, as pressões extremas passam a apresentar valores semelhantes aos dados cedidos por Endres (1990) e Marques (1995). Estes resultados sugerem que o afastamento das pressões do presente estudo em relação aos dados cedidos por Endres (1990) e Marques (1995) não é devido unicamente à faixa de número de Froude incidente dos escoamentos; há possivelmente a influência de outros fatores, como a geometria do modelo de ensaios (relações entre vazão, altura do vertedouro e níveis d'água de montante e jusante, submergência, raio da curva, desenvolvimento da camada limite, etc.).

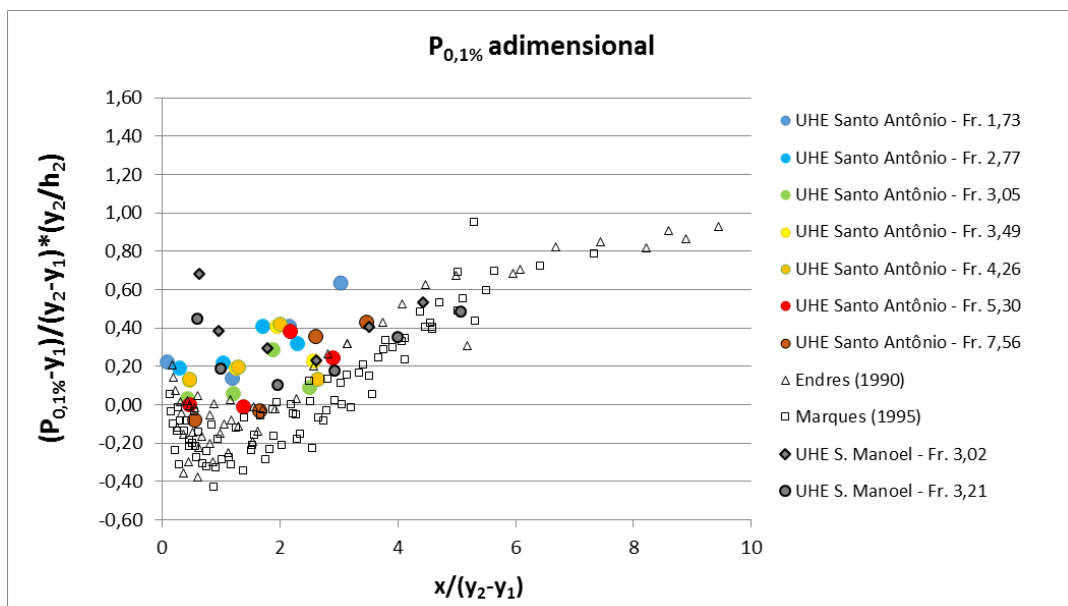


Figura 49: Pressões extremas adimensionais com probabilidade de não excedência de 0,1% coletadas no modelo bidimensional da UHE Santo Antônio, em 2016 para o presente estudo, em comparação com dados cedidos por Endres (1990) e Marques (1995) e dados coletados no modelo bidimensional da UHE São Manoel.

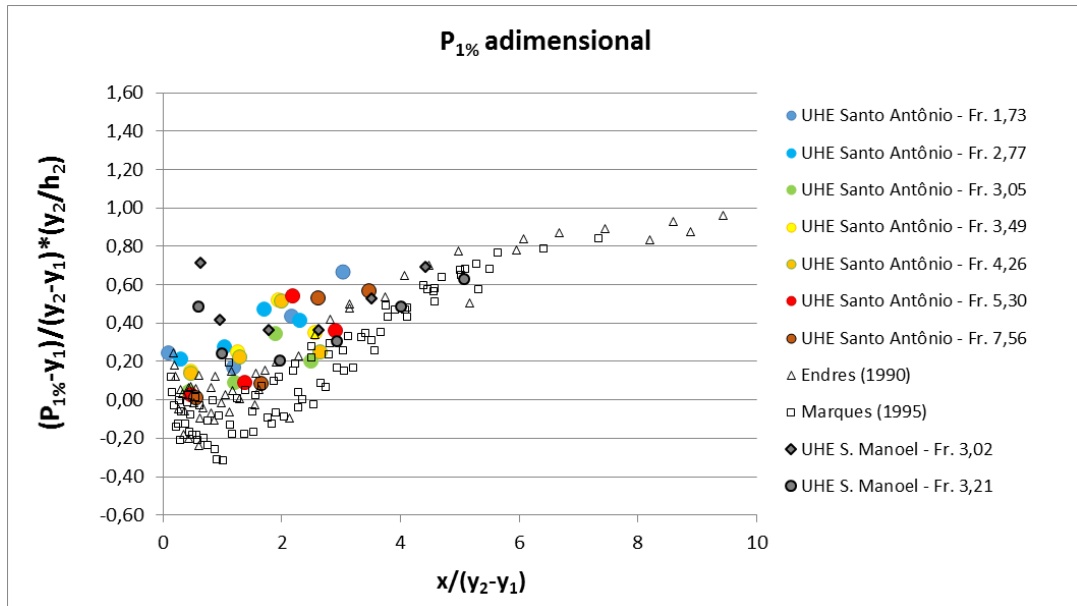


Figura 50: Pressões extremas adimensionais com probabilidade de não excedência de 1% coletadas no modelo bidimensional da UHE Santo Antônio, em 2016 para o presente estudo, em comparação com dados cedidos por Endres (1990) e Marques (1995) e dados coletados no modelo bidimensional da UHE São Manoel.

As pressões extremas com probabilidades de não excedência de 99% e 99,9% referentes à amostra coletada para o presente estudo, com exceção dos escoamentos com números de Froude incidente 5,30 e 7,56, apresentaram valores semelhantes ou inferiores às pressões extremas de Endres (1990) e Marques (1995). Resultados semelhantes foram observados para as probabilidades de não excedência de 90% e 95% (Apêndice A). As pressões extremas referentes à amostra de dados coletada no modelo bidimensional da UHE São Manoel apresentaram comportamento semelhante aos escoamentos com baixo número de Froude incidente do presente estudo, com exceção dos valores iniciais de pressões, que se admite sofrerem efeito da submergência do ressalto hidráulico.

Observou-se também a aproximação dos dados coletados no modelo bidimensional da UHE São Manoel aos dados cedidos por Endres (1990) e Marques (1995) a partir da posição adimensional aproximada 4,0, tendendo à unidade. Por outro lado, não se verificou a convergência das pressões extremas do presente estudo no trecho do ressalto hidráulico do qual se dispõe dados.

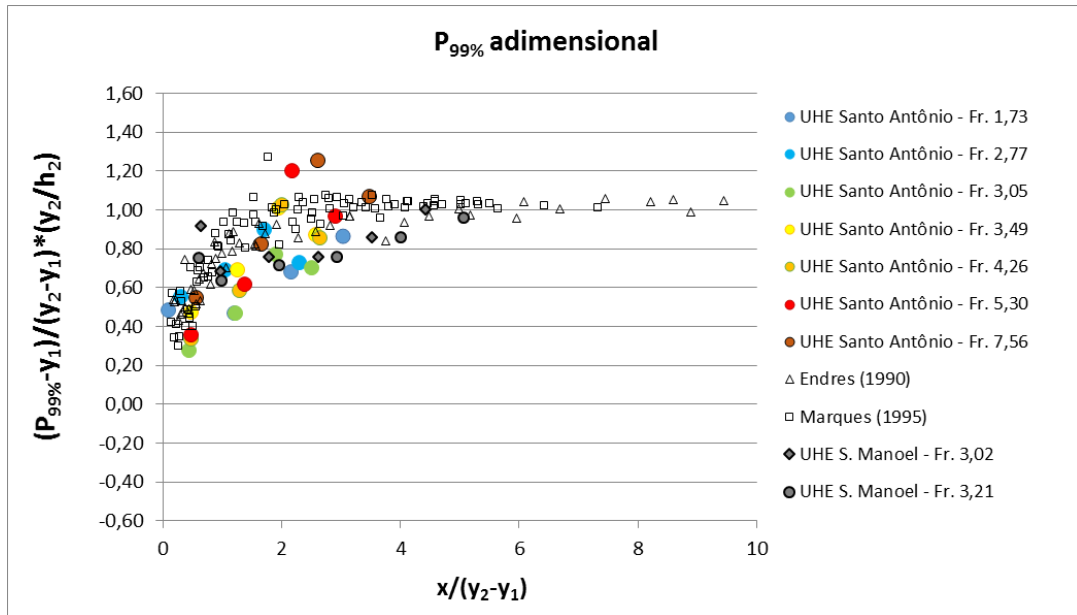


Figura 51: Pressões extremas adimensionais com probabilidade de não excedência de 99% coletadas no modelo bidimensional da UHE Santo Antônio, em 2016 para o presente estudo, em comparação com dados cedidos por Endres (1990) e Marques (1995) e dados coletados no modelo bidimensional da UHE São Manoel.

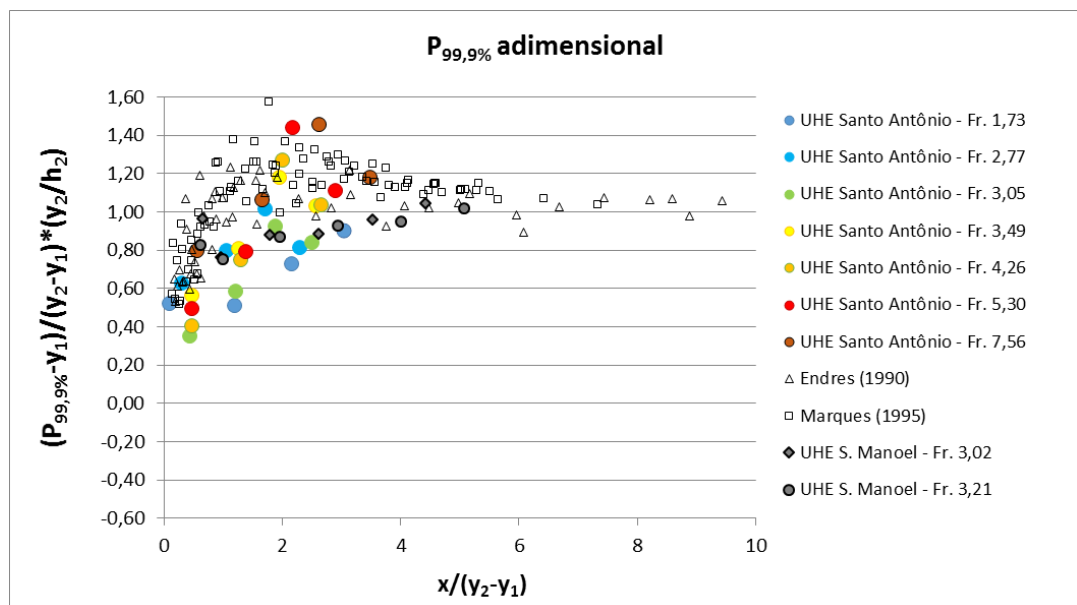


Figura 52: Pressões extremas adimensionais com probabilidade de não excedência de 99,9% coletadas no modelo bidimensional da UHE Santo Antônio, em 2016 para o presente estudo, em comparação com dados cedidos por Endres (1990) e Marques (1995) e dados coletados no modelo bidimensional da UHE São Manoel.

4.3 COEFICIENTE ESTATÍSTICO DE DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADES: 0,1% E 99,9%

Para a análise da metodologia proposta por Teixeira (2003) para a previsão das pressões extremas, foram ajustados os coeficientes a , b e c para determinação do coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades ($N_{a\%}$), relativos às probabilidades de 0,1% e 99,9%. A relação completa dos coeficientes é apresentada na Tabela 9.

Tabela 9: Coeficientes a , b e c para determinação do coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades no intervalo de não excedência de 0,1% a 99,9%.

Probabilidade \ Coeficiente	a	b	c	R ²
99,9%	0,0021	-0,3172	5,0504	0,55
99%	0,0317	-0,3598	3,3008	0,86
95%	0,0171	-0,1393	1,8624	0,81
90%	0,0048	-0,0325	1,2695	0,26
80%	-0,0016	0,0297	0,6846	0,60
70%	-0,0048	0,0589	0,3313	0,68
60%	-0,0075	0,0750	0,0587	0,60
50%	-0,0076	0,0759	-0,1635	0,77
40%	-0,0064	0,0627	-0,3631	0,70
30%	-0,0076	0,0610	-0,5808	0,72
20%	-0,0036	0,0260	-0,8036	0,19
10%	-0,0032	-0,0450	-1,0869	0,59
5%	0,0130	-0,1323	-1,3061	0,73
1%	0,0512	-0,4480	-1,6601	0,92
0,1%	0,1353	-1,1957	-1,9377	0,91

4.4 ESTIMATIVA DAS PRESSÕES EXTREMAS A PARTIR DA METODOLOGIA PROPOSTA POR TEIXEIRA (2003)

Neste item, são apresentados os resultados da aplicação da metodologia proposta por Teixeira (2003) para a estimativa das pressões extremas dos escoamentos do presente estudo. Os parâmetros pressões médias e desvio padrão, cujos resultados são apresentados em escala de modelo, e o coeficiente N foram analisados separadamente.

As pressões médias estimadas a partir da metodologia apresentaram, de modo geral, valores bastante próximos às pressões médias da amostra para toda a faixa de número de Froude estudada. O ajuste proposto por Teixeira (2003), embora baseado em geometrias de canal de

ensaios distintas do presente estudo, mostrou-se adequada para a previsão dos escoamentos. Os resultados adimensionais podem ser consultados no Apêndice B. Na Figura 53, são apresentadas as pressões médias amostrais e estimadas a partir da metodologia avaliada. Além disso, Figura 54, são apresentadas em detalhe as pressões médias referentes aos escoamentos com baixo número de Froude incidente. Observou-se que, a partir da vazão com Fr_1 igual a 3,05, a estimativa é bastante próxima aos valores amostrais, à exceção da terceira tomada de pressões.

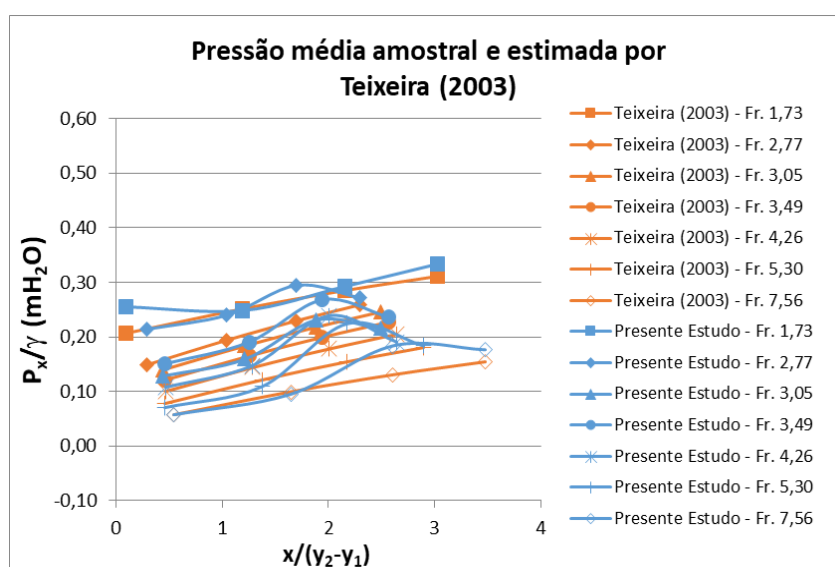


Figura 53: Pressões médias amostrais e estimadas a partir da metodologia proposta por Teixeira (2003), em escala de modelo.

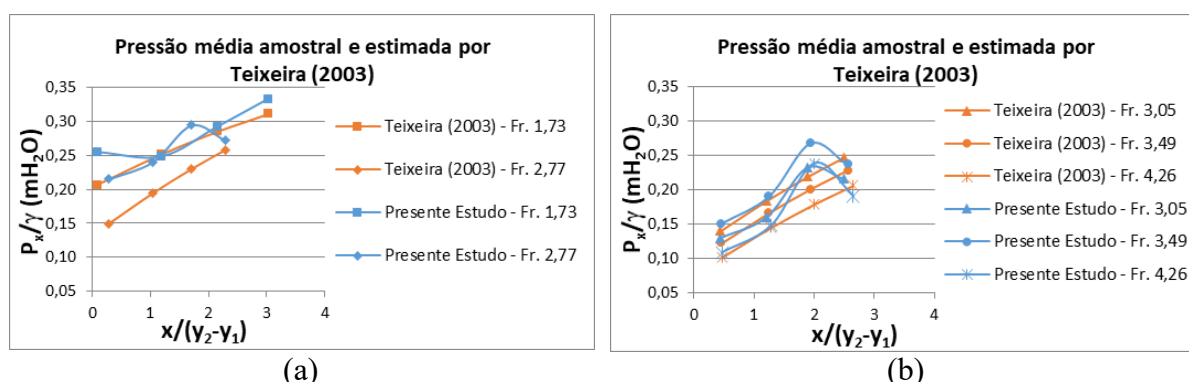


Figura 54: Pressões médias com baixo número de Froude incidente ($Fr_1 < 4,5$) amostrais e estimadas a partir da metodologia proposta por Teixeira (2003), em escala de modelo: a) Fr_1 1,73 e 2,77; b) Fr_1 3,05, 3,49 e 4,26.

No entanto, a metodologia analisada não foi adequada para a estimativa do desvio padrão da amostra. Enquanto o comportamento dos dados estimados foi compatível com o observado, a adimensionalização dos resultados não foi satisfatória, com pode-se verificar na Figura 55 e

Figura 56 (valores adimensionais). Observaram-se valores sobrestimados para toda a faixa de número de Froude estudada. Na análise detalhada dos escoamentos com baixo número de Froude incidente, como é apresentado na Figura 57, verificou-se que as vazões com números de Froude mais baixos apresentaram maior distanciamento entre estimativa e amostra.

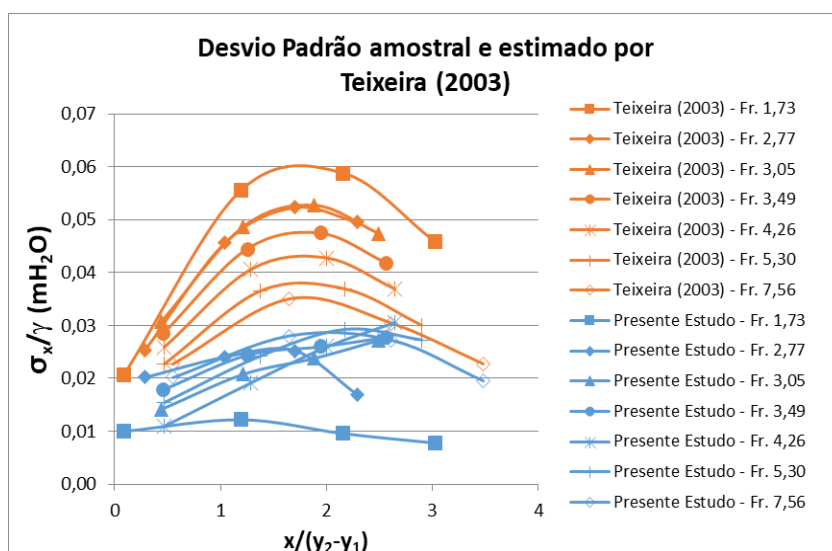


Figura 55: Desvios padrão amostrais e estimados a partir da metodologia proposta por Teixeira (2003), em escala de modelo.

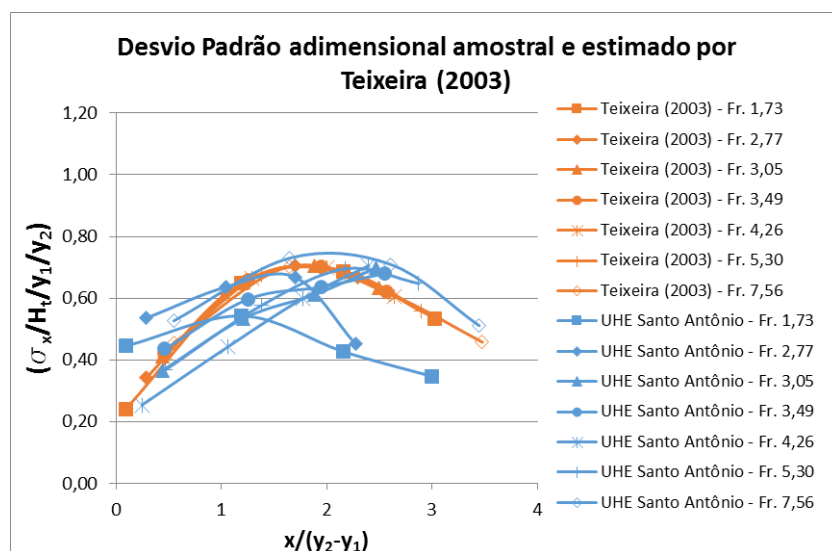


Figura 56: Desvios padrão amostrais e estimados a partir da metodologia proposta por Teixeira (2003), valores adimensionais.

Além disso, observou-se um comportamento distinto do desvio padrão amostral do escoamento com número de Froude incidente 1,73 em relação aos demais. A diferença pode ser explicada pelo escoamento encontrar-se no limite sugerido pela literatura entre o ressalto hidráulico

ondulatório e o fraco, ou pré-ressalto, caracterizados pela baixa dissipação de energia e propagação dos efeitos por longas distâncias.

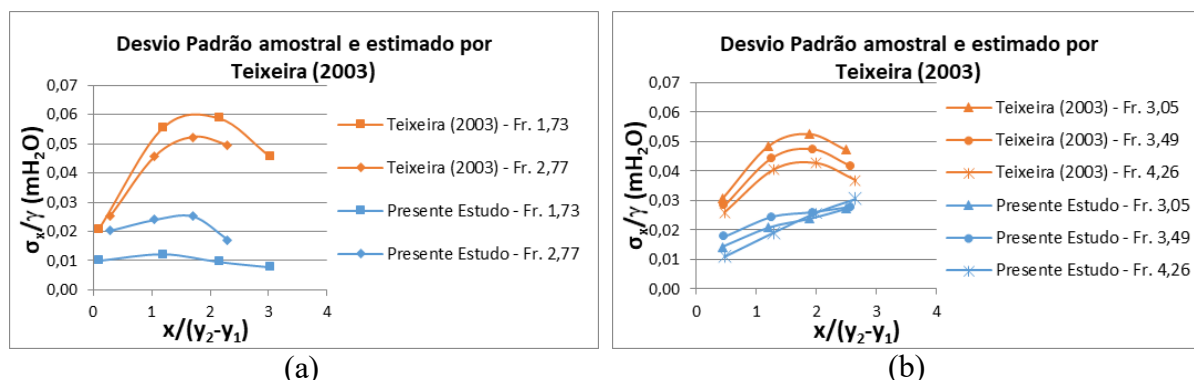


Figura 57: Desvios padrão com baixo número de Froude incidente ($Fr_1 < 4,5$) amostrais e estimados a partir da metodologia proposta por Teixeira (2003), em escala de modelo: a) Fr_1 1,73 e 2,77; b) Fr_1 3,05, 3,49 e 4,26.

A Figura 58 apresenta a estimativa do coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades em comparação aos valores amostrais. Verificou-se que o ajuste proposto por Teixeira (2003) foi adequado para o intervalo de probabilidades de não excedência 5% a 95%. Para as probabilidades de não excedência mais extremas, observou-se que a maior dispersão dos dados impossibilita um único ajuste quadrático eficaz para a previsão de cada ponto estudado. Apesar disso, os resultados estimados apresentam-se compatíveis com a tendência dos dados observada no gráfico.

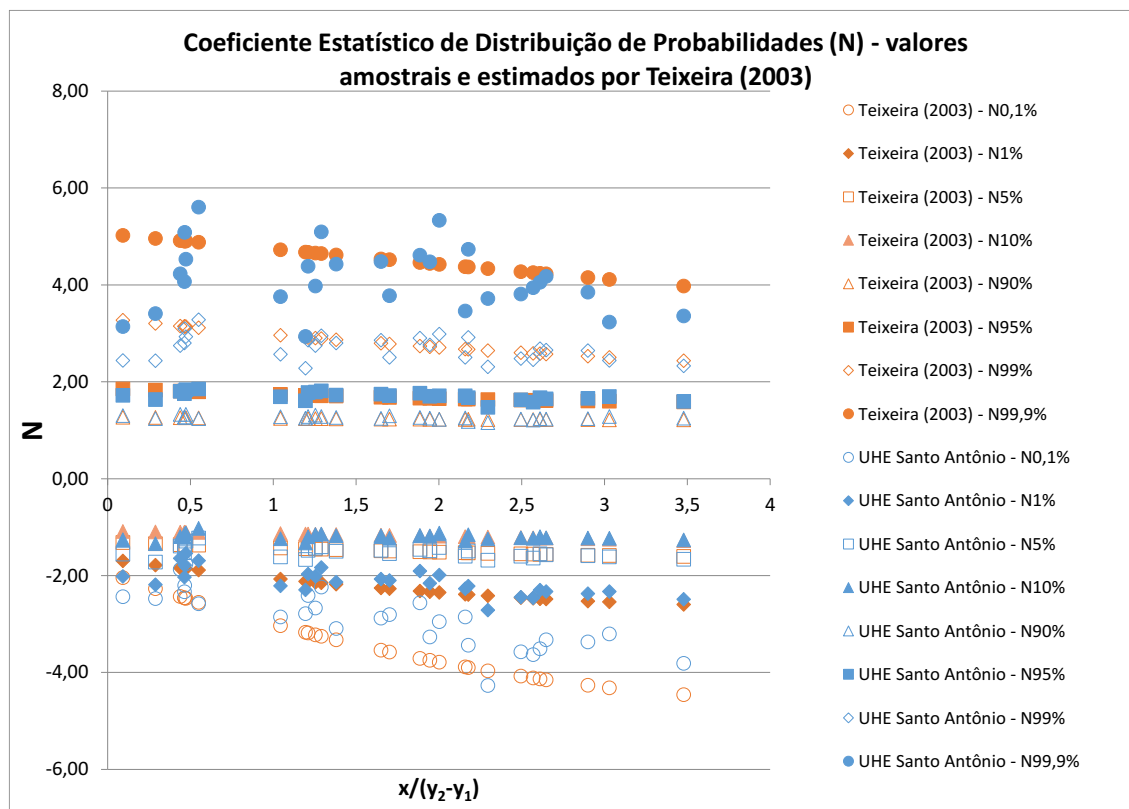


Figura 58: Coeficientes estatísticos de distribuição de probabilidades (N) amostrais e estimados a partir da metodologia proposta por Teixeira (2003), valores adimensionais.

Na Figura 59 e na Figura 60, são apresentados detalhadamente os coeficientes N referentes às probabilidades de não excedência 0,1% e 1%, bem como 99% e 99,9%, respectivamente. A partir dos resultados, observou-se que, apesar da considerável dispersão dos valores amostrais, as estimativas foram próximas aos dados coletados nos ensaios.

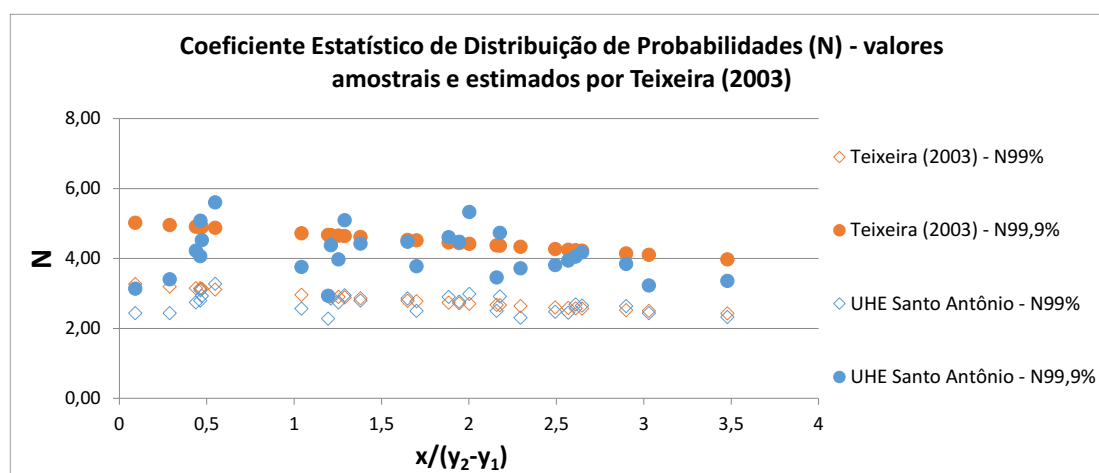


Figura 59: Coeficientes estatísticos de distribuição de probabilidades (N) amostrais e estimados a partir da metodologia proposta por Teixeira (2003), com probabilidades de não excedência de 0,1% e 1%, valores adimensionais.

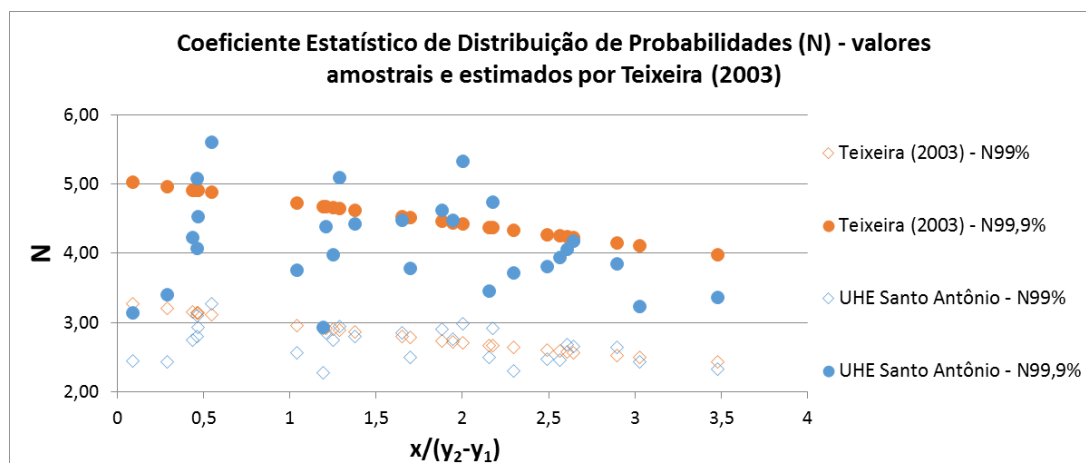


Figura 60: Coeficientes estatísticos de distribuição de probabilidades (N) amostrais e estimados a partir da metodologia proposta por Teixeira (2003), com probabilidades de não excedência de 99% e 99,9%, valores adimensionais.

As pressões extremas com probabilidade de não excedência de 0,1% (Figura 61) e 1% (Figura 62) estimados a partir da metodologia proposta por Teixeira (2003) apresentaram valores mais negativos em relação à amostra. A partir das probabilidades de não excedência de 5% e 10% (Apêndice B), observou-se maior aproximação entre os valores estimados e amostrais. Em todos os casos, as pressões estimadas referentes ao escoamento com número de Froude incidente 1,73 encontraram-se mais distantes dos valores da amostra, em consequência às diferenças verificadas na estimativa do desvio padrão do mesmo escoamento.

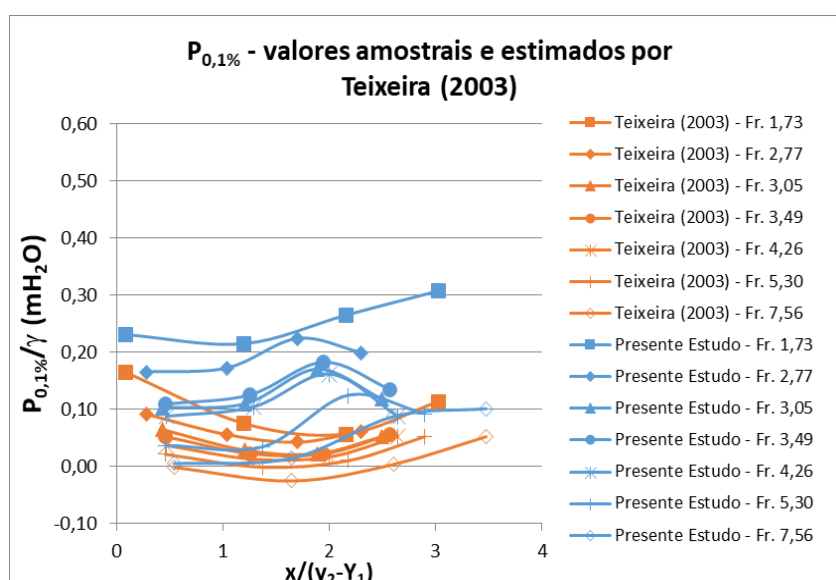


Figura 61: Pressões extremas com probabilidade de não excedência de 0,1% amostrais e estimadas a partir da metodologia proposta por Teixeira (2003), em escala de modelo.

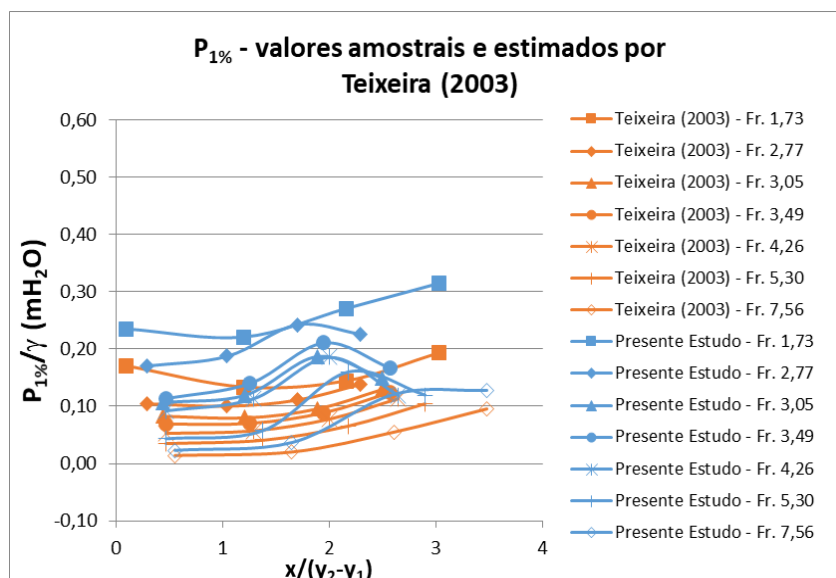


Figura 62: Pressões extremas com probabilidade de não excedência de 1% amostrais e estimadas a partir da metodologia proposta por Teixeira (2003), em escala de modelo.

A metodologia proposta por Teixeira (2003) foi adequada para a previsão da pressões extremas com probabilidades de não excedência de 90% e 95% (Apêndice B). As estimativas relativas às probabilidade de não excedência 99% (Figura 63) e 99,9% (Figura 64) apresentaram maior distanciamento às pressões amostrais, especialmente em relação ao escoamento com número de Froude incidente 1,73.

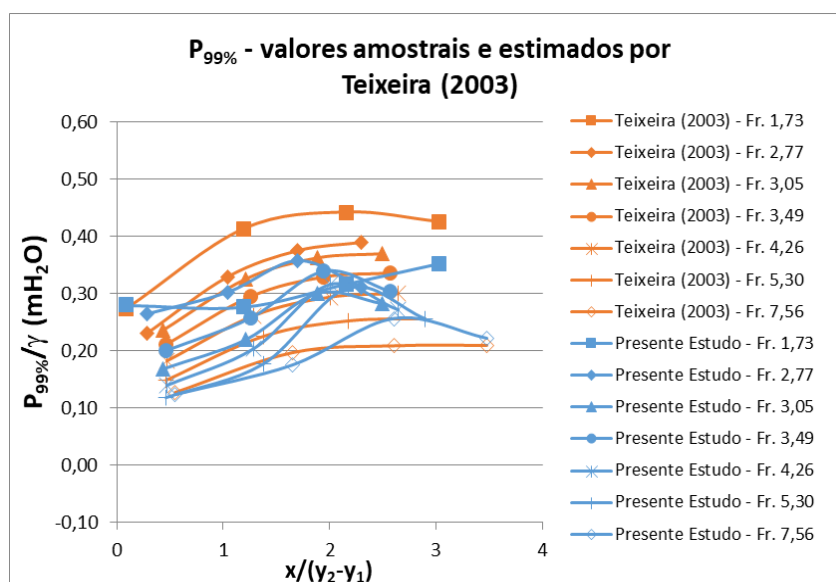


Figura 63: Pressões extremas com probabilidade de não excedência de 99% amostrais e estimadas a partir da metodologia proposta por Teixeira (2003), em escala de modelo.

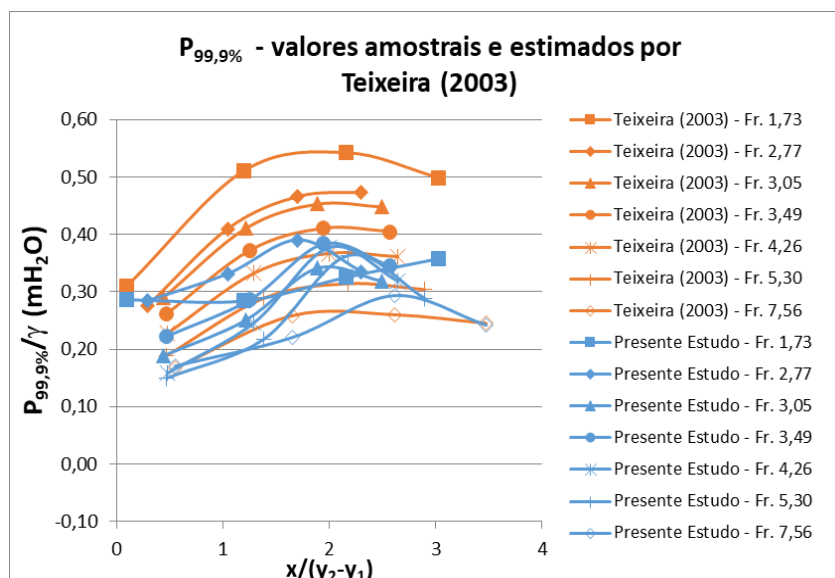


Figura 64: Pressões extremas com probabilidade de não excedência de 99,9% amostrais e estimadas a partir da metodologia proposta por Teixeira (2003), em escala de modelo.

4.5 COMPARAÇÃO DAS PRESSÕES EXTREMAS AMOSTRAIS E ESTIMADAS

A aplicabilidade da metodologia de previsão de pressões extremas proposta por Teixeira (2003) foi avaliada com base nas diferenças relativas entre estimativa e amostra. Dessa forma, verificaram-se as diferenças relativas na previsão das pressões extremas, bem como das pressões médias, desvios padrão e coeficiente N.

A diferença relativa, ao longo do desenvolvimento longitudinal do ressalto hidráulico, calculado entre as pressões médias estimadas a partir do ajuste proposto por Teixeira (2003) e a amostra de pressões do presente estudo é apresentado na Figura 65. Para referência, foram incluídas ao gráfico as posições do primeiro quartil (Q1) e terceiro quartil (Q3) da série de dados apresentada. Quando analisados os escoamentos com baixo número de Froude incidente separadamente, não foi observada diferença significativa dos valores e tendências das pressões médias da amostra estudada (Figura 66).

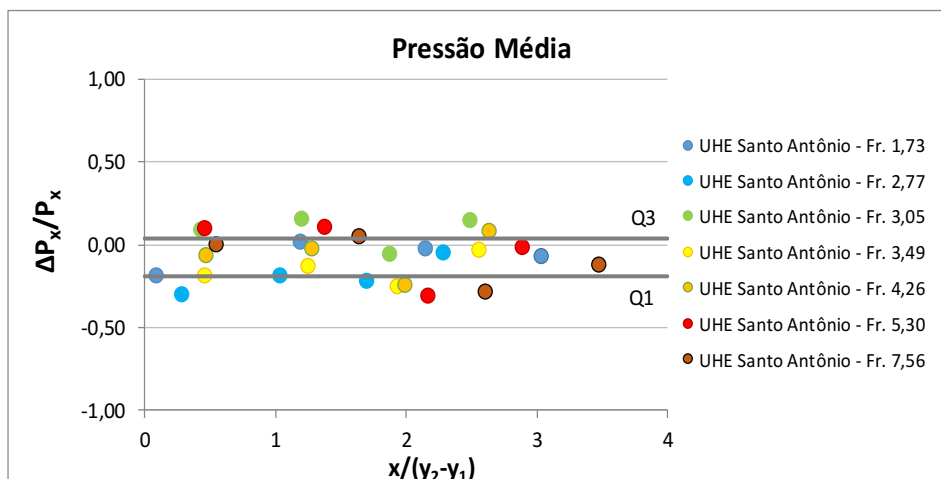


Figura 65: Diferença relativa entre as pressões médias estimadas a partir da metodologia proposta por Teixeira (2003) e amostrais.

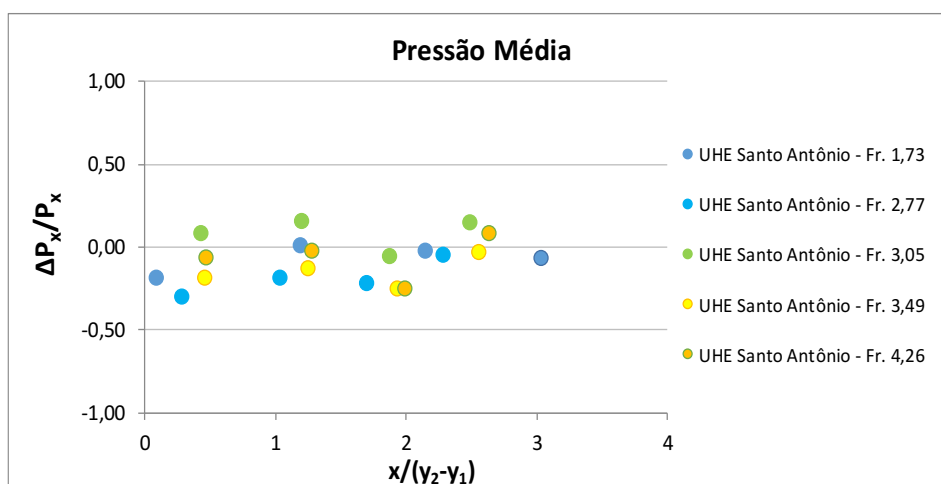


Figura 66: Diferença relativa entre as pressões médias estimadas a partir da metodologia proposta por Teixeira (2003) e amostrais, com baixo número de Froude incidente ($Fr_1 < 4,5$).

Da mesma forma, a diferença relativa encontrada na determinação do desvio padrão é apresentada na Figura 67. Observou-se que a distância interquartílica ($Q3 - Q1$) na estimativa do desvio padrão, 0,94, foi superior à distância interquartílica da diferença relativa na previsão dos valores de pressões médias, 0,23. O resultado era esperado, uma vez que o ajuste proposto por Teixeira (2003) em conjunto com o método de adimensionalização empregado não estimaram adequadamente o desvio padrão da amostra. A partir dos resultados, verificou-se que o escoamento com número de Froude incidente 1,73 apresentou maior distanciamento da série de dados. Para melhor visualização dos resultados, na Figura 68, são apresentadas as diferenças relativas inferiores a 2,0, onde se observam diferenças relativas mais elevadas na estimativa do desvio padrão dos escoamentos com baixo número de Froude incidente ($Fr_1 < 4,5$).

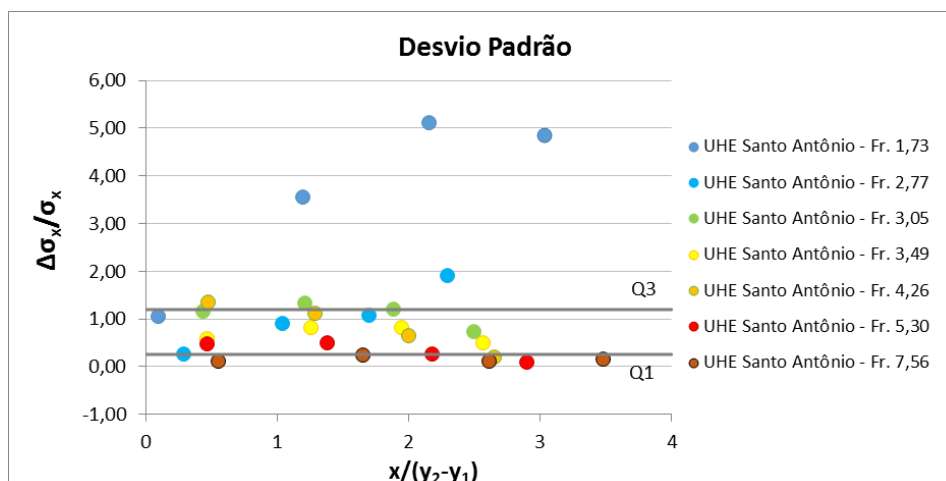


Figura 67: Diferença relativa entre os desvios padrão estimados a partir da metodologia proposta por Teixeira (2003) e amostrais.

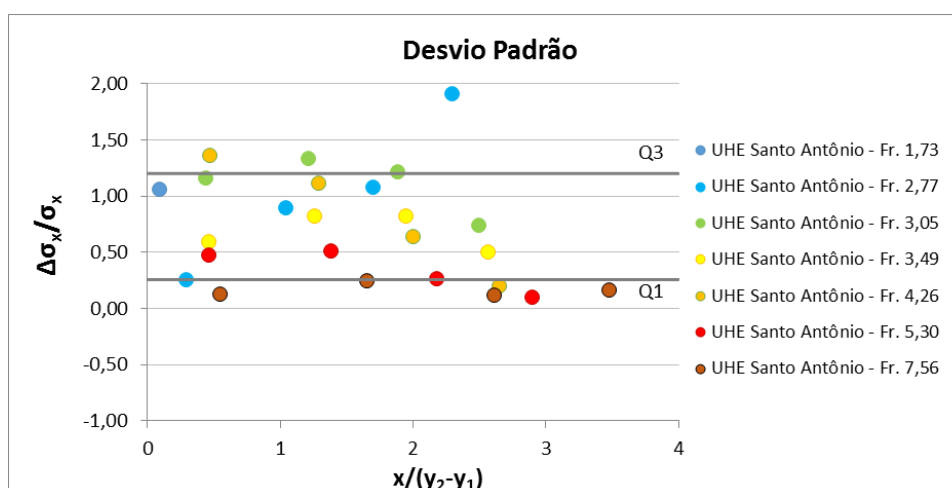


Figura 68: Diferença relativa entre os desvios padrão estimados a partir da metodologia proposta por Teixeira (2003) e amostrais, em detalhe, intervalo de diferença relativa -1,0 a 2,0.

Na Figura 69, são apresentadas as diferenças relativas na estimativa do coeficiente de distribuição de probabilidades para as ocorrências de 0,1%, 1%, 99% e 99,9%, sendo as demais probabilidades de não excedência apresentadas no Apêndice C. Na faixa de não excedência entre 5% e 95%, observaram-se resultados aproximadamente concentrados no intervalo de diferenças relativas $\pm 20\%$ (Apêndice C). Por outro lado, verificou-se maior variação para as probabilidades de não excedência mais extremas, que reflete a maior dispersão observada nos respectivos valores da amostra.

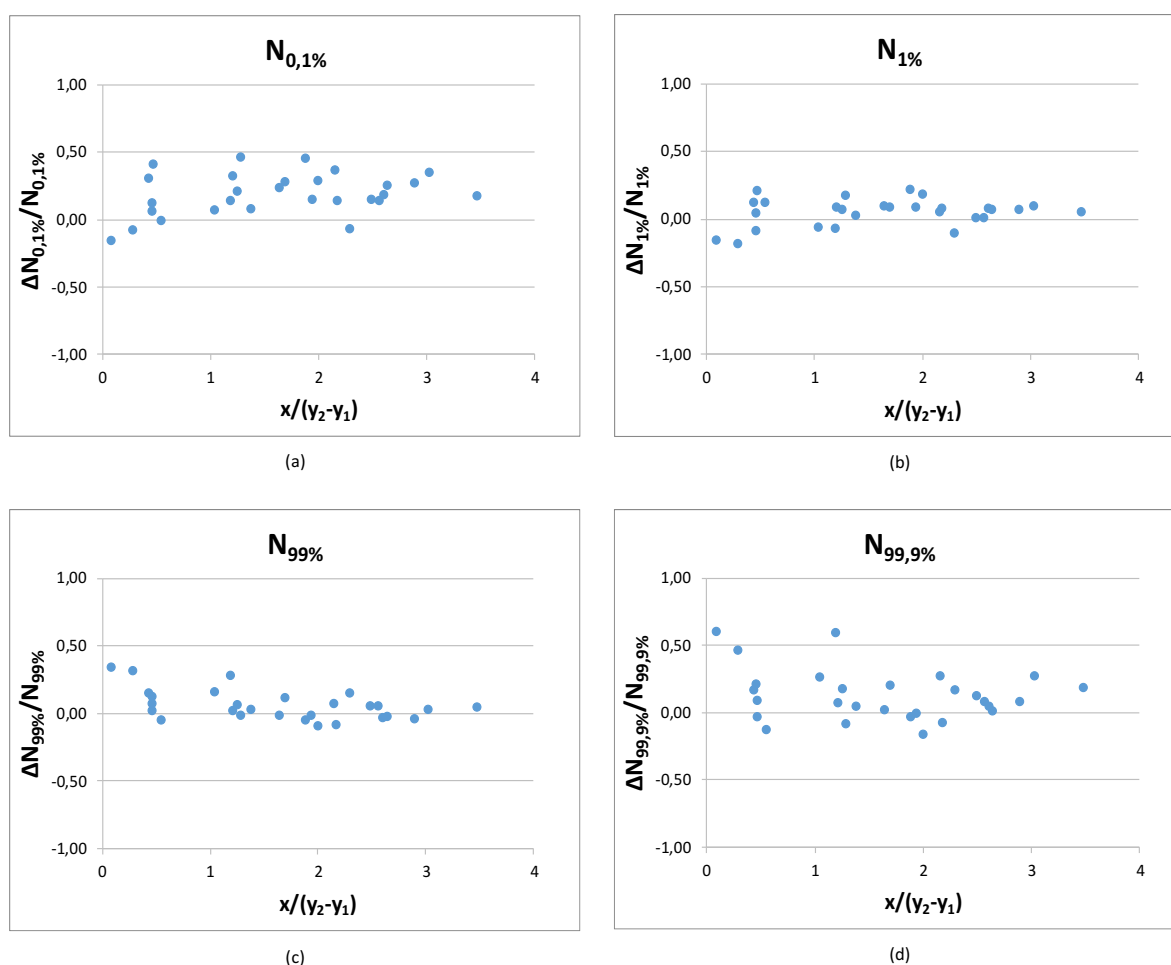


Figura 69: Diferenças relativas entre os coeficientes estatísticos de distribuição de probabilidades estimados a partir da metodologia proposta por Teixeira (2003) e amostrais, com probabilidades de não excedência: (a) 0,1%; (b) 1%; (c) 99%; (d) 99,9%.

A diferença relativa na determinação das pressões extremas com probabilidade de não excedência de 0,1% é apresentada na Figura 70. Verificou-se um valor extremo atípico, com valor inferior ao primeiro quartil reduzido em $4,5 \cdot (Q_3 - Q_1)$, pertencente ao escoamento com número de Froude incidente 7,56 (Figura 71a). Este resultado é devido à proximidade da pressão extrema e estimativa nessa posição ao valor nulo. Na Figura 71, são apresentadas as diferenças relativas na estimativa das pressões extremas com probabilidades de não excedências de 0,1%, 1%, 99% e 99,9%, sendo as demais probabilidades de não excedência apresentadas no Apêndice C.

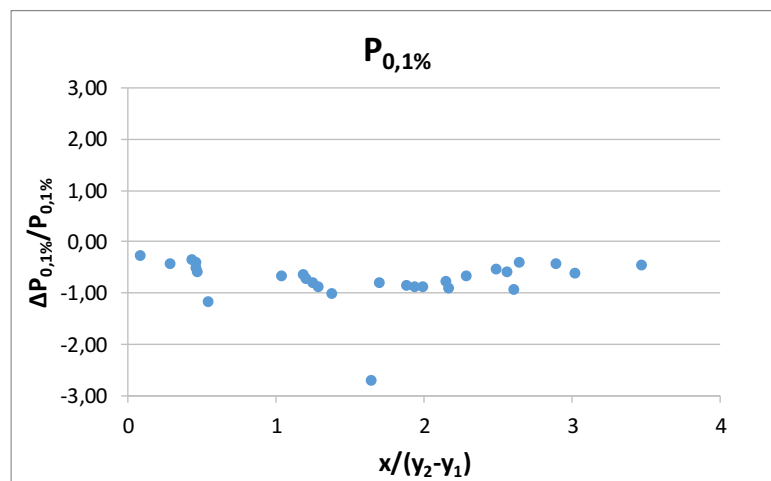


Figura 70: Diferença relativa entre as pressões extremas com probabilidade de não excedência de 0,1% estimadas a partir da metodologia proposta por Teixeira (2003) e amostrais.

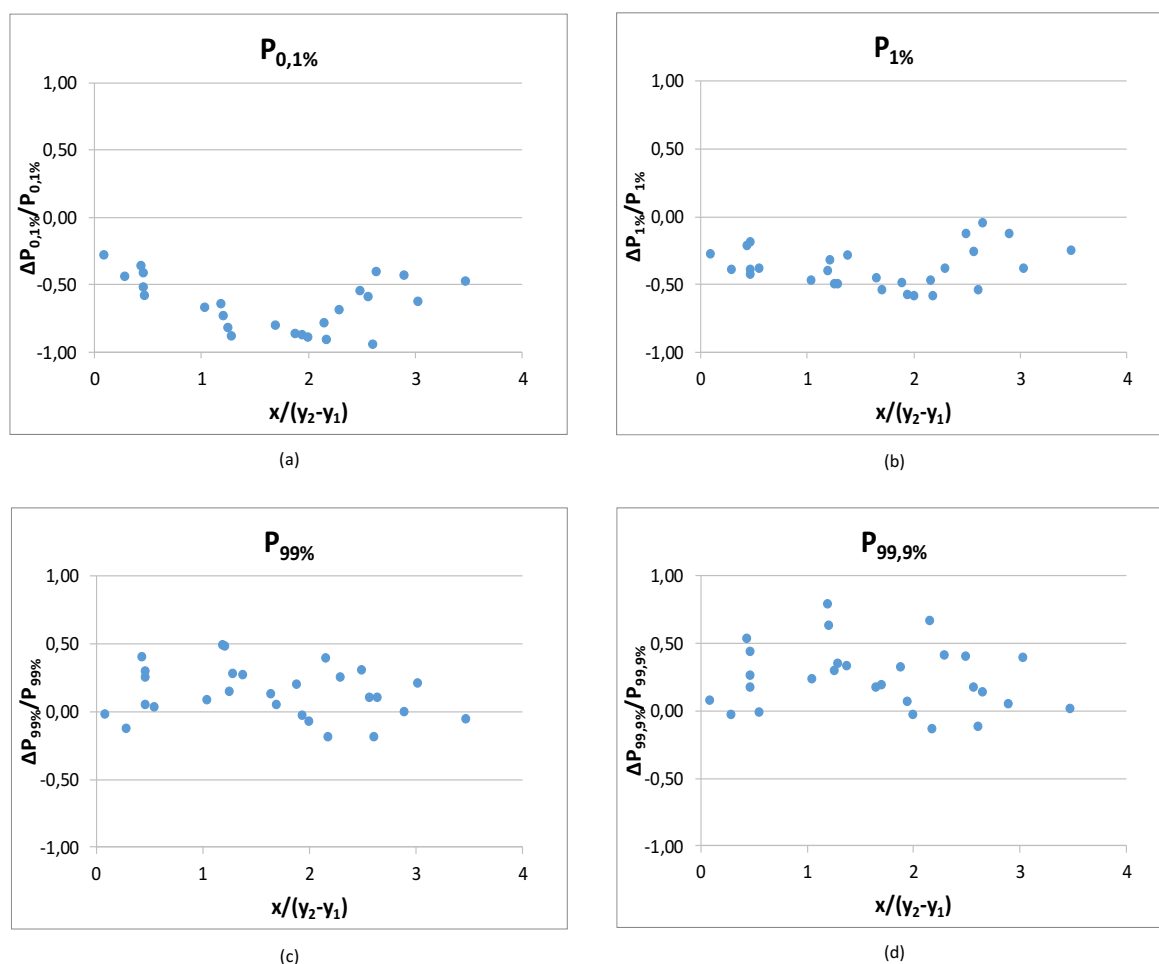


Figura 71: Diferença relativa entre as pressões extremas estimadas a partir da metodologia proposta por Teixeira (2003) e amostrais, com probabilidades de não excedência: (a) 0,1%; (b) 1%; (c) 99%; (d) 99,9%.

Os resultados indicam que a metodologia proposta por Teixeira (2003) pode ser aplicada para a determinação da ordem de grandeza das pressões extremas do ressalto hidráulico livre em uma estrutura semelhante ao modelo bidimensional da UHE São Manoel. Discretizado, o método não fornece estimativas para o desvio padrão tão aproximadas quanto para os demais parâmetros e não foi bem-sucedido na estimativa do desvio padrão para o escoamento com número de Froude 1,73. A proposição de um novo ajuste para a previsão do desvio padrão poderia resultar em estimativas de pressões extremas mais eficientes para escoamentos semelhantes aos analisados neste trabalho.

4.6 PROPOSIÇÃO DE NOVO AJUSTE PARA METODOLOGIA DE PREVISÃO DE PRESSÕES

Com base nos resultados obtidos, observou-se que a metodologia proposta por Teixeira (2003) poderia ser otimizada para a aplicação aos dados do presente estudo ou semelhantes a partir de um novo ajuste de previsão para o desvio padrão. Assim, foram realizadas 3 tentativas de atualização do método baseadas na proposição de um novo ajuste a ser utilizado em substituição à Equação 2.35 que fornece a estimativa do desvio padrão para as posições adimensionais 0,0 a 2,4. A equação sugerida foi utilizada em conjunto com o demais equacionamento proposto por Teixeira (2003) e aplicado aos dados coletados no modelo bidimensional da UHE São Manoel, quando apropriado.

Dessa forma, a primeira tentativa tomou por base o desvio padrão da amostra de pressões instantâneas do modelo bidimensional UHE Santo Antônio. O segundo ajuste proposto foi baseado no desvio padrão dos escoamentos com baixo número de Froude incidente ($Fr_1 < 4,5$) da amostra de pressões mencionada. Por fim, o terceiro ajuste foi baseado unicamente no desvio padrão amostral do escoamento com número de Froude incidente 1,73, dado que este apresentou um comportamento distinto dos demais valores amostrais. As curvas de ajustes em comparação com as amostras de dados utilizadas na sua determinação são apresentadas no Apêndice D.

4.6.1 Ajuste 1: UHE Santo Antônio

Para a proposição do primeiro ajuste, foi utilizada a mesma metodologia empregada por Teixeira (2003), porém com base nos dados do presente estudo. Dessa forma, determinou-se o

ajuste quadrático em função da posição adimensional do ressalto hidráulico na bacia de dissipação dado pela Equação 4.1. Como mencionado anteriormente, o ajuste substitui a Equação 2.35 da metodologia proposta por Teixeira (2003), válida entre as posições adimensionais 0,0 e 2,4 do ressalto hidráulico livre (Figura 22). Não foi proposto um novo ajuste para a Equação 2.36, aplicada à estimativa do desvio padrão no intervalo adimensional 2,4 a 8,0, porque os dados coletados no modelo bidimensional da UHE Santo Antônio, base do ajuste 1 proposto, não contemplam o ressalto hidráulico em sua totalidade, sendo limitados às posições adimensionais próximas a 3,0.

$$\sigma_{x,adm} = -0,071 \left(\frac{x}{y_2 - y_1} \right)^2 + 0,292 \left(\frac{x}{y_2 - y_1} \right) + 0,324 \quad 4.1$$

$$\text{Onde, } 0 \leq \left(\frac{x}{y_2 - y_1} \right) \leq 2,4$$

Para a validação do ajuste sugerido, não se dispôs de outras séries de dados coletadas em estruturas que proporcionem escoamentos com ressalto hidráulico livre e baixo número de Froude incidente. Dessa forma, optou-se pela aplicação da equação proposta aos dados coletados no modelo bidimensional da UHE São Manoel e comparação à metodologia proposta por Teixeira (2003), proporcionando, também, informações complementares sobre a aplicabilidade da metodologia ao ressalto hidráulico com baixo número de Froude.

Primeiramente, são apresentadas as estimativas das pressões médias e desvios padrão comparadas à amostra coletada no modelo bidimensional do vertedouro e bacia de dissipação da UHE São Manoel nas Figura 72 e Figura 73, respectivamente. Observa-se que os valores do desvio padrão são da ordem aproximada de 10% das pressões médias dos escoamentos.

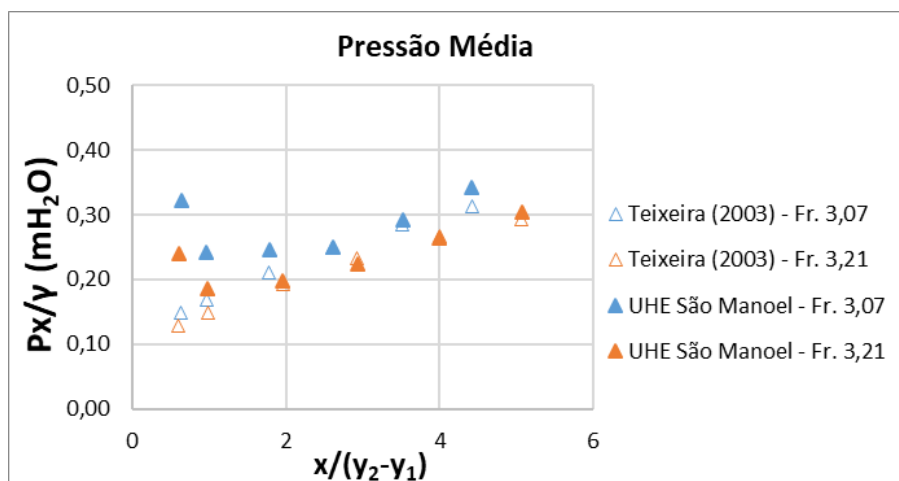


Figura 72: Pressão média da amostra coletada no modelo bidimensional da UHE São Manoel, comparação à estimativa proposta por Teixeira (2003), valores em metros, escala de modelo.

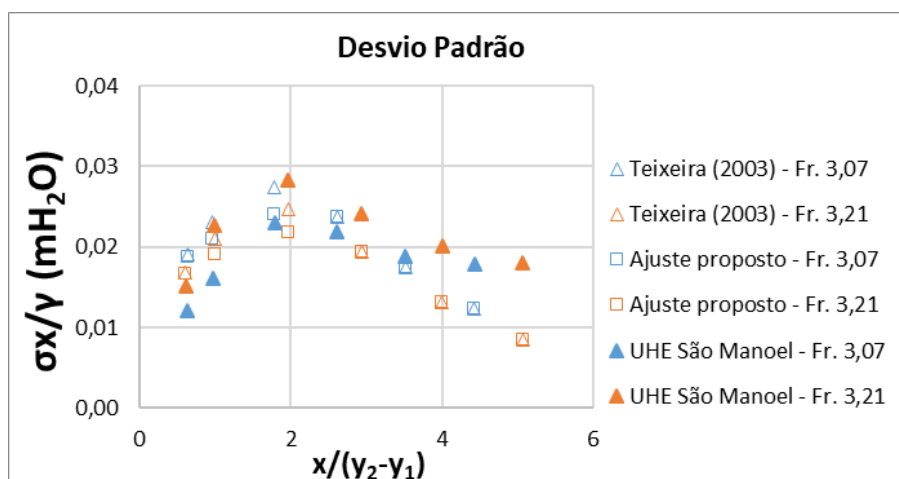


Figura 73: Desvio padrão da amostra coletada no modelo bidimensional da UHE São Manoel, comparação ao ajuste 1 proposto e ao ajuste proposto por Teixeira (2003), valores em metros, escala de modelo.

A partir da aplicação da metodologia de previsão proposta por Teixeira (2003) e novo ajuste proposto para a determinação do desvio padrão (Figura 74), verificou-se que nenhum ajuste descreveu os dados da amostra com grande precisão ao longo de todo o trecho estudado. Observou-se que o ajuste proposto obteve melhores resultados nos trechos iniciais da bacia de dissipação. Além disso, admite-se que, nas posições iniciais, existe influência da submergência do ressalto hidráulico e da curva de concordância entre a calha e a bacia de dissipação.

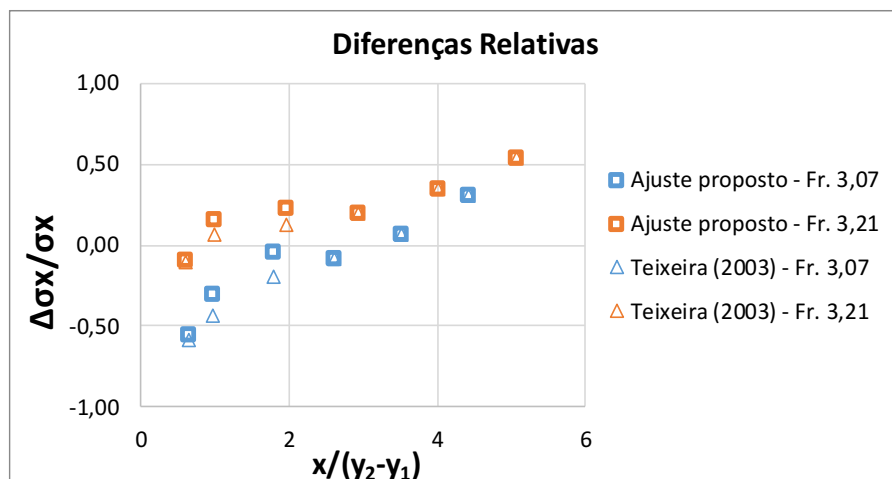


Figura 74: Diferença relativa na estimativa do desvio padrão da UHE São Manoel a partir da metodologia original proposta por Teixeira (2003) e ajuste 1 proposto.

O cálculo das pressões extremas a partir da equação original proposta por Teixeira (2003) para previsão do desvio padrão e a partir do novo ajuste proposto resultou em valores bastante próximos, como pode-se observar na Figura 75 e na Figura 76, para as probabilidades de não excedência de 0,1% e 99,9%, respectivamente. As pressões com as demais probabilidades de não excedência são apresentadas no Apêndice D. Os métodos apresentam resultados semelhantes, indicando que o ajuste do desvio padrão apresenta baixa influência na estimativa das pressões extremas.

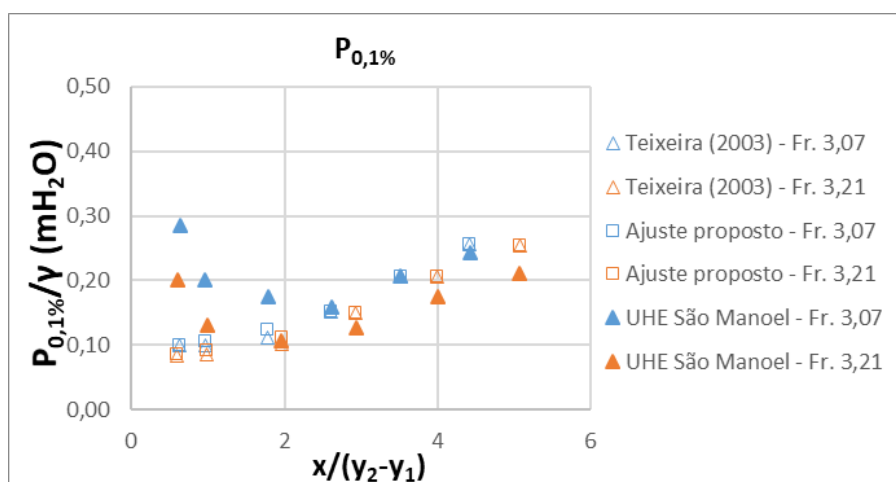


Figura 75: Estimativa das pressões extremas com probabilidade de não excedência de 0,1% da UHE São Manoel a partir da metodologia original proposta por Teixeira (2003) e incluindo o ajuste 1 proposto para o desvio padrão.

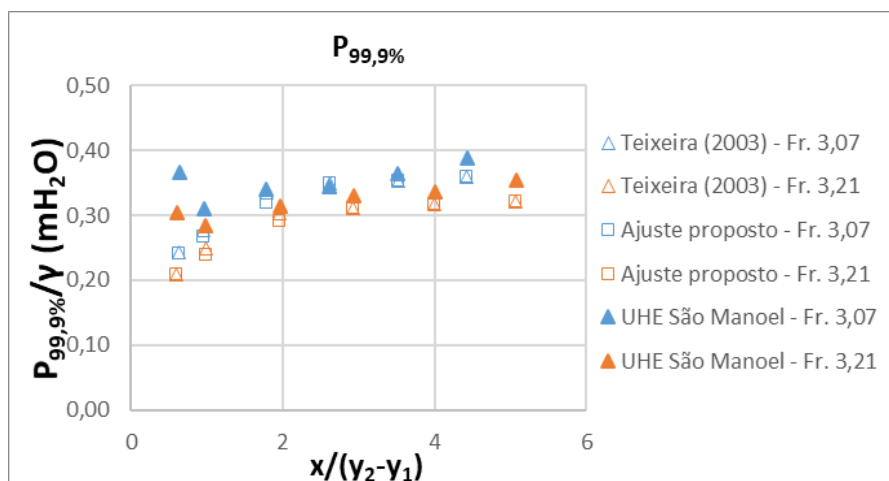


Figura 76: Estimativa das pressões extremas com probabilidade de não excedência de 99,9% da UHE São Manoel a partir da metodologia original proposta por Teixeira (2003) e incluindo o ajuste 1 proposto para o desvio padrão.

As diferenças relativas na determinação das pressões extremas com probabilidade de não excedência de 0,1% e 99,9% são apresentadas nas Figura 77 e Figura 78. As diferenças relativas referentes às demais probabilidades de não excedência são apresentadas no Apêndice D. Como mencionado anteriormente, a semelhança dos resultados é devida aos baixos valores dos desvios padrão contribuírem ao valor das pressões extremas em menor proporção do que as pressões médias, cuja determinação foi bem-sucedida.

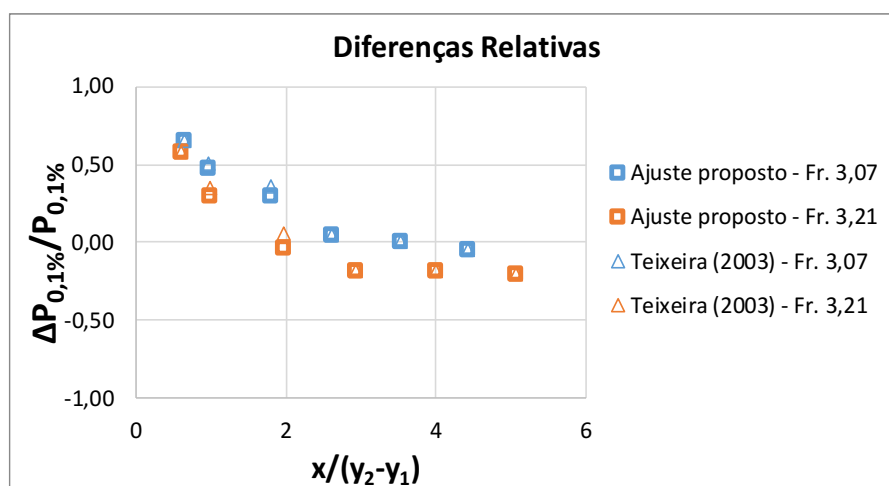


Figura 77: Diferença relativa na estimativa das pressões extremas com probabilidade de não excedência de 0,1% da UHE São Manoel a partir da metodologia original proposta por Teixeira (2003) e incluindo o ajuste 1 proposto para o desvio padrão.

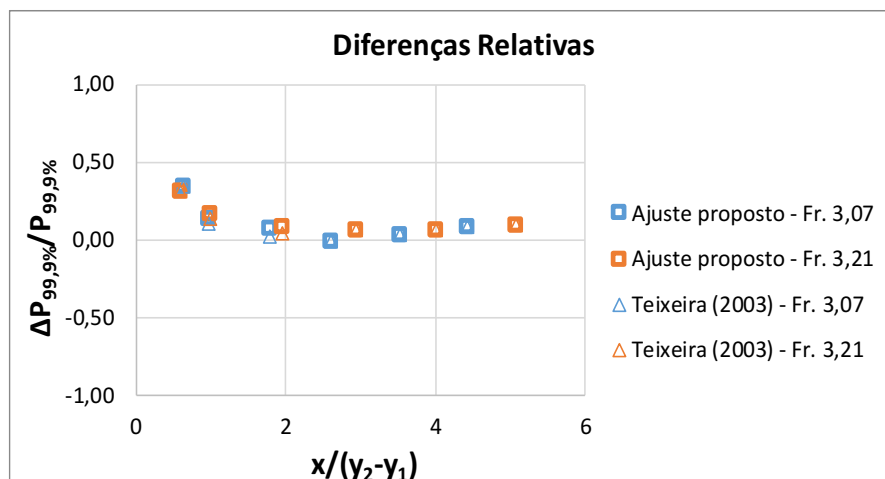


Figura 78: Diferença relativa na estimativa das pressões extremas com probabilidade de não excedência de 99,9% da UHE São Manoel a partir da metodologia original proposta por Teixeira (2003) e incluindo o ajuste 1 proposto para o desvio padrão.

4.6.2 Ajuste 2: baixo número de Froude

Na segunda tentativa realizada, optou-se pela utilização dos dados coletados no modelo bidimensional da UHE Santo Antônio referentes aos escoamentos com baixo número de Froude ($Fr_1 < 4,5$). A estimativa proposta para substituição da Equação 2.35, que compõe a metodologia de previsão de pressões proposta por Teixeira (2003), é apresentada na Equação 4.2. Da mesma forma que o ajuste 1, apresentado no item anterior, a equação sugerida é válida para as posições adimensionais 0,0 a 2,4 do ressalto hidráulico na bacia de dissipação.

$$\sigma_{x,adm} = -0,087 \left(\frac{x}{y_2 - y_1} \right)^2 + 0,314 \left(\frac{x}{y_2 - y_1} \right) + 0,320 \quad 4.2$$

$$\text{Onde, } 0 \leq \left(\frac{x}{y_2 - y_1} \right) \leq 2,4$$

O ajuste quadrático para determinação do desvio padrão em função da posição adimensional do ressalto hidráulico resultou semelhante ao ajuste proposto no item anterior deste trabalho, sugerindo que, para o caso estudado, os desvios padrão são pouco dependentes do número de Froude. Dessa forma, a Figura 79 apresenta o desvio padrão estimado a partir do ajuste proposto

e da metodologia sugerida por Teixeira (2003) em comparação à amostra e a Figura 80 apresenta a correspondente diferença relativa.

Assim como na estimativa do desvio padrão, as pressões extremas previstas a partir da metodologia proposta por Teixeira (2003) e com a inclusão do ajuste proposto neste item foram semelhantes, conforme apresentado no Apêndice D. As diferenças relativas na estimativa das pressões extremas com probabilidade de não excedência de 0,1% e 99,9% são apresentadas na Figura 81: Diferença relativa na estimativa das pressões extremas com probabilidade de não excedência de 0,1% da UHE São Manoel a partir da metodologia original proposta por Teixeira (2003) e incluindo o ajuste 2 proposto para o desvio padrão. e na Figura 82, respectivamente. A diferença relativa para as demais probabilidades de não excedência é apresentado no Apêndice D.

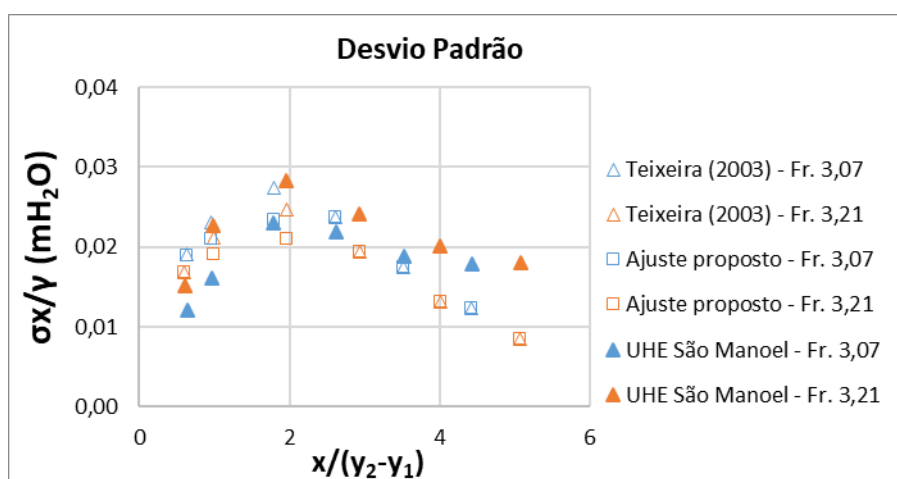


Figura 79: Desvio padrão da amostra coletada no modelo bidimensional da UHE São Manoel, comparação ao ajuste 2 proposto e ao ajuste proposto por Teixeira (2003), valores em metros, escala de modelo.

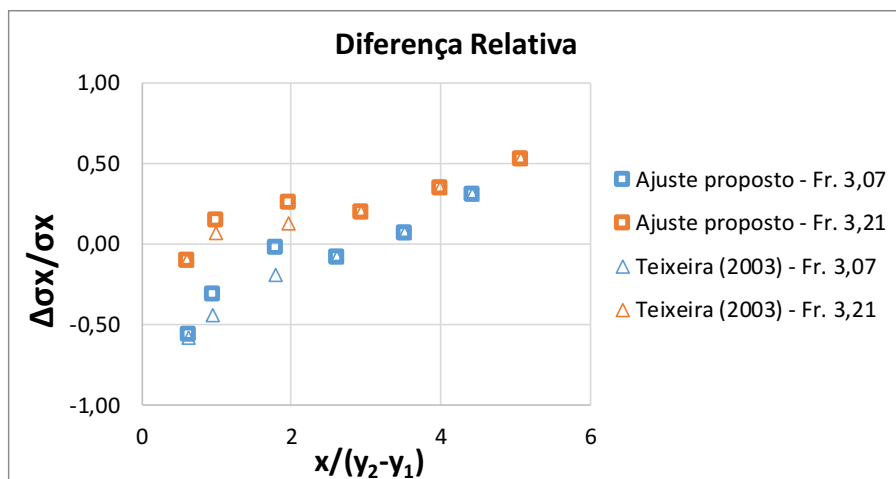


Figura 80: Diferença relativa na estimativa do desvio padrão da UHE São Manoel a partir da metodologia original proposta por Teixeira (2003) e ajuste 2 proposto.

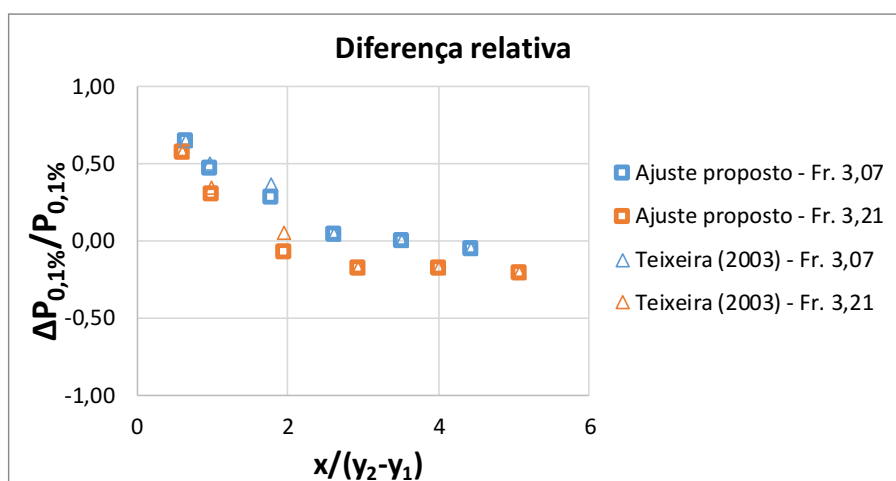


Figura 81: Diferença relativa na estimativa das pressões extremas com probabilidade de não excedência de 0,1% da UHE São Manoel a partir da metodologia original proposta por Teixeira (2003) e incluindo o ajuste 2 proposto para o desvio padrão.

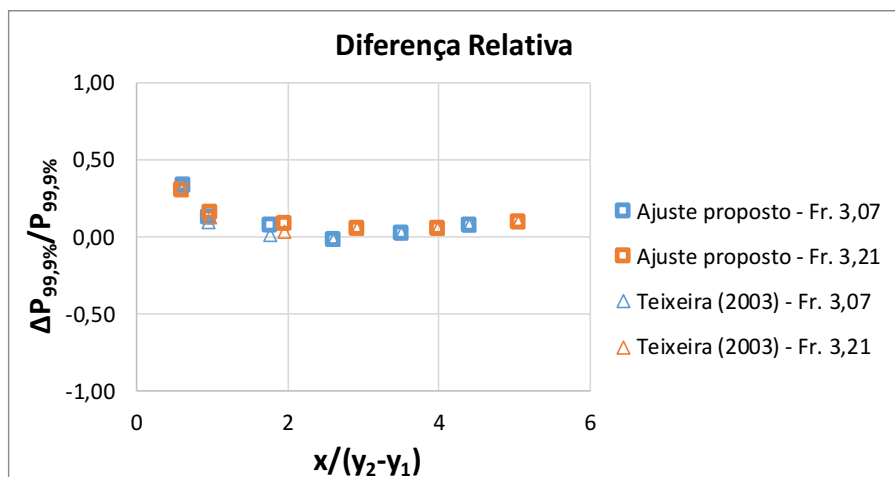


Figura 82: Diferença relativa na estimativa das pressões extremas com probabilidade de não excedência de 99,9% da UHE São Manoel a partir da metodologia original proposta por Teixeira (2003) e incluindo o ajuste 2 proposto para o desvio padrão.

4.6.3 Ajuste 3: número de Froude incidente 1,73

Ainda, estudou-se o desvio padrão do escoamento coletado no modelo bidimensional da UHE Santo Antônio com número de Froude incidente 1,73, uma vez que este apresentou comportamento distinto dos demais valores amostrais. A Equação 4.3 apresenta o ajuste quadrático que melhor descreveu os valores do desvio padrão em função da posição adimensional do ressalto hidráulico na bacia de dissipação, entre as posições adimensionais 0,0 e 2,4.

$$\sigma_{x,adm} = -0,053 \left(\frac{x}{y_2 - y_1} \right)^2 + 0,122 \left(\frac{x}{y_2 - y_1} \right) + 0,443 \quad 5.3$$

$$\text{Onde, } 0 \leq \left(\frac{x}{y_2 - y_1} \right) \leq 2,4$$

O ajuste proposto é apresentado na Figura 83, em comparação aos valores amostrais da UHE Santo Antônio utilizados na sua determinação, bem como o ajuste proposto por Teixeira (2003) em comparação aos desvios padrão amostrais cedidos por Endres (1990) e Marques (1995). O ajuste sugerido não foi aplicado a outra série de dados para validação, uma vez que a única série

amostral com número de Froude semelhante que se possui, escoamento com $Fr_1 = 1,70$ cedido por Souza (2012), foi coletada no mesmo modelo de ensaios do presente estudo.

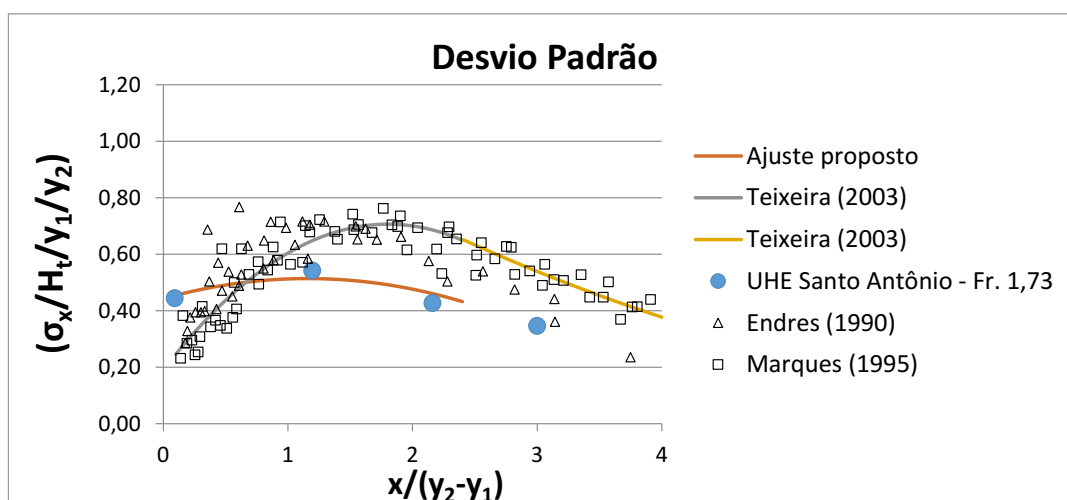


Figura 83: Ajuste 3 proposto para o desvio padrão do escoamento com $Fr_1 = 1,73$ em comparação à metodologia de previsão de pressões proposta por Teixeira (2003) e séries amostrais de Endres (1990) e Marques (1995).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo desta pesquisa foi a verificação da aplicabilidade da metodologia de previsão de pressões proposta por Teixeira (2003), válida para o ressalto hidráulico livre com número de Froude classificado como estável ($4,5 < Fr_1 < 9,0$). Para tanto, foram utilizadas duas amostras de dados com baixo número de Froude incidente, porém com características distintas:

- a) amostra coletada no modelo bidimensional do vertedouro da UHE Santo Antônio, em escala 1:50, correspondente à repetição aproximada dos ensaios realizados por Souza (2012). Os sete escoamentos apresentaram ressalto hidráulico livre, com números de Froude incidente no intervalo de 1,73 a 7,56, com tomadas de pressões na porção inicial da bacia de dissipação. As medições não abrangeram o desenvolvimento longitudinal completo do ressalto hidráulico. Os baixos números de Froude foram proporcionados por altas vazões e baixa queda da estrutura;
- b) amostra coletada no modelo bidimensional do vertedouro e bacia de dissipação da UHE São Manoel, em escala 1:60, cedidos por LAHE/FURNAS para o presente estudo. Os dois escoamentos com números de Froude incidente 3,07 e 3,21 apresentaram grau de submergência $S=1,16$ e $S=1,07$, respectivamente. As medições abrangeram um comprimento longitudinal mais longo do ressalto hidráulico, embora também incompleto. Além disso, a altura conjugada rápida não foi medida diretamente durante o ensaio, podendo acarretar erros. A estrutura também possui baixa queda (em protótipo, altura da soleira do vertedouro até o fundo da bacia igual a 19,5 m), porém não tão baixa quanto o modelo da UHE Santo Antônio (em protótipo, altura igual a 9,5 m).

A análise das amostras de pressões instantâneas utilizadas na presente pesquisa forneceram informações importantes à compreensão das particularidades dos escoamentos com baixo número de Froude e a estudos futuros para o desenvolvimentos de metodologias assertivas para a previsão de pressões nessa situação. Assim, a Tabela 10: Considerações finais – amostra de dados apresenta as observações resultantes da pesquisa realizada com base nos valores amostrais de pressões coletadas nos modelos bidimensionais das UHE Santo Antônio e UHE São Manoel, com baixo número de Froude ($Fr_1 < 4,5$), e amostras cedidas por Endres (1990) e Marques (1995), com número de Froude incidente na faixa estável ($4,5 < Fr_1 < 9,0$).

Tabela 10: Considerações finais – amostra de dados

Pressão média	<ul style="list-style-type: none"> • O distanciamento entre os dados de pressões médias do ressalto hidráulico com baixo número de Froude em relação ao dados de outros autores não é função do número de Froude exclusivamente, mas de outros fatores, como possivelmente a geometria do modelo. No caso da UHE Santo Antônio, cujas pressões de ensaio foram mais distantes dos dados de outros autores, o modelo bidimensional utilizado inclui um vertedouro de calha lisa de baixa queda correspondente a 9,5 m em escala de protótipo; • As pressões médias e extremas verificadas no modelo bidimensional da UHE São Manoel apresentaram comportamento mais próximo aos dados do ressalto hidráulico estável ($4,5 < Fr_1 < 9,0$) cedidos por Endres (1990) e Marques (1995), com exceção da porção inicial da bacia de dissipação, onde pode haver efeito da submergência do ressalto hidráulico.
Desvio Padrão	<ul style="list-style-type: none"> • O desvio padrão medido nos modelos bidimensionais da UHE São Manoel e da UHE Santo Antônio foi da ordem de 1 a 3 cm, possibilitando o acúmulo de incertezas na manipulação dos dados e cálculo da diferença relativa das estimativas; • O desvio padrão do escoamento com $Fr_1=1,73$ (UHE Santo Antônio) foi particularmente baixo em relação à pressão média, representando baixíssimas flutuações de pressões no trecho analisado, característico do ressalto ondulatório e ressalto fraco. Além disso, nos ensaios realizados no modelo bidimensional da UHE Santo Antônio, observou-se a formação de um ‘colchão d’água’ sob o ressalto hidráulico, que pode ser responsável pela atenuação das flutuações de pressões medidas.
Coeficiente N	<ul style="list-style-type: none"> • Observou-se maior dispersão do coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades para as probabilidades de não excedência mais extremas (0,1%, 1%, 99% e 99,9%).
Pressões Extremas	<ul style="list-style-type: none"> • As pressões extremas positivas (99,9%, 99%, 95% e 90%) com baixo número de Froude ($Fr_1 < 4,5$) foram semelhantes ou inferiores aos escoamentos com número de Froude estável ($4,5 < Fr_1 < 9,0$); • As pressões extremas negativas (0,1%, 1%, 5% e 10%) com baixo número de Froude ($Fr_1 < 4,5$) foram semelhantes ou superiores aos escoamentos com número de Froude estável ($4,5 < Fr_1 < 9,0$).

A partir da aplicação da metodologia proposta por Teixeira (2003), verificou-se que o método pode ser aplicado para a previsão das pressões extremas para situações semelhantes aos ensaios realizados no modelo bidimensional da UHE Santo Antônio, resultando em diferenças relativas de até aproximadamente 60% (diferenças absolutas de até aproximadamente 7 mH₂O, em valor de protótipo), conforme a probabilidade de não excedência analisada. No entanto, para as probabilidades de não excedência de 0,1% e 99,9%, a diferença relativa verificada foi de até aproximadamente 100% (diferenças absolutas de até aproximadamente 11,5 mH₂O, em valor de protótipo). No caso da UHE São Manoel, a diferença relativa para as probabilidades de não excedência de 0,1% e 99,9% foi próximo a 50% (diferenças absolutas de até aproximadamente 11 mH₂O, em valor de protótipo), nas posições iniciais do ressalto hidráulico, onde se verificam efeitos atribuídos à submergência. A partir da terceira tomada de pressões, a diferença relativa apresentou valores de até aproximadamente 35% (diferenças absolutas de até aproximadamente 3,5 mH₂O, em valor de protótipo).

Ademais, observou-se que o método não foi eficiente na determinação dos valores do desvio padrão da amostra de pressões coletada no modelo bidimensional da UHE Santo Antônio. Embora as estimativas adimensionais tenham resultado em valores razoavelmente próximos aos valores amostrais, o método de adimensionalização não foi adequado. Além disso, não foi possível a previsão do desvio padrão para o escoamento com $Fr_1=1,73$, cujo comportamento foi distinto dos demais escoamentos estudados.

A etapa subsequente desta pesquisa foi a proposição de novos ajustes para otimização da metodologia de previsão de pressões proposta por Teixeira (2003) para o caso estudado. A principal limitação enfrentada nessa fase foi a falta de dados com características semelhantes aos coletados no modelo bidimensional da UHE Santo Antônio para validação dos resultados. Foram utilizados para validação, no entanto, as pressões amostrais coletadas no modelo bidimensional da UHE São Manoel. Estes, embora referentes a escoamentos com baixo número de Froude incidente, apresentaram comportamento da amostra consideravelmente semelhantes aos dados cedidos por Endres (1990) e Marques (1995), não constituindo, dessa forma, o candidato ideal para a validação dos ajustes propostos nesta pesquisa.

A despeito do fato apresentado, os resultados obtidos com a aplicação dos dois primeiros ajustes propostos nesta pesquisa (ajuste 1 baseado no desvio padrão amostral coletado no modelo bidimensional da UHE Santo Antônio e ajuste 2 baseado no desvio padrão amostral do ressalto

hidráulico com baixo número de Froude incidente no mesmo modelo) indicaram que as previsões de desvios padrão e pressões extremas foram semelhantes às da metodologia proposta por Teixeira (2003). Dessa forma, observou-se pouca participação do desvio padrão, cujos valores nos modelos foram da ordem de 3 centímetros (representando cerca de 1,5 m em valor de protótipo, considerando a escala geométrica do modelo da UHE Santo Antônio de 1:50), no cálculo das pressões extremas.

O terceiro e último ajuste proposto nesta pesquisa para a determinação do desvio padrão do ressalto hidráulico com baixo número de Froude ($Fr_1 < 4,5$) foi baseado exclusivamente no escoamento com número de Froude $Fr_1 = 1,73$, coletado no modelo bidimensional da UHE Santo Antônio. Este escoamento apresentou comportamento distinto das demais vazões de ensaio, característico do ressalto hidráulico ondulado ou ressalto fraco, com baixíssimas flutuações de pressões no modelo, da ordem de 1 centímetro (representando cerca de 0,5 m em valor de protótipo). O ajuste não foi testado porque não se dispôs de dados de pressões do ressalto hidráulico com número de Froude semelhante e, portanto, novos estudos são necessários.

Em conclusão, a metodologia proposta por Teixeira (2003) pode contribuir para estudos preliminares ao dimensionamento de estruturas semelhantes à UHE Santo Antônio. Em função da geometria particular, porém novos estudos são necessários para o ajuste da metodologia à situação avaliada. Foram propostos ajustes na presente pesquisa, entretanto os mesmos devem ser validados para a situação semelhante ao caso estudado. Na situação dos dados coletados no modelo bidimensional da UHE São Manoel, por outro lado, o método sugerido por Teixeira (2003) foi eficiente, demonstrando que a metodologia proposta pelo autor para a previsão de pressões extremas pode ser aplicada ao baixo número de Froude em determinados casos ($Fr_1 > 3,0$).

6 RECOMENDAÇÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS

Uma das maiores dificuldades no estudo do ressalto hidráulico com baixo número de Froude é a disponibilidade de amostras de pressões instantâneas coletadas ao longo do desenvolvimento completo do fenômeno. Em partes, isso é devido ao ressalto hidráulico com estas características normalmente se desenvolver por distâncias muito maiores do que o ressalto hidráulico estável. Dessa forma, nos modelos de ensaios de vertedouros, como é o caso do modelo bidimensional da UHE Santo Antônio, a instrumentação é limitada à calha do vertedouro e a parte inicial da bacia de dissipação.

Assim, para a continuidade desta pesquisa, sugere-se a investigação dos seguintes temas:

- a) estudo das características do ressalto hidráulico com baixo número de Froude a partir de medições ao longo do desenvolvimento completo do fenômeno;
- b) estudo de modelo de ensaio com geometrias distintas capazes de reproduzir o ressalto hidráulico com baixo número de Froude a fim de se compreender melhor as diferenças observadas no presente estudo;
- c) estudo de escoamentos com números de Froude abaixo de 3,0 para identificação do limite da aplicabilidade da previsão do desvio padrão proposta por Teixeira (2003);
- d) validação dos ajustes propostos nesta pesquisa para previsão do desvio padrão das pressões do ressalto hidráulico a jusante de vertedouro de baixa queda, semelhante ao modelo estudado (UHE Santo Antônio);
- e) estudo de métodos para adimensionalização do desvio padrão das pressões do ressalto hidráulico a jusante de vertedouro de baixa queda, semelhante ao modelo estudado (UHE Santo Antônio);

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.
- ACKERS, P. Scale models: examples of how, why and when-with some ifs and buts. In: IAHR CONGRESS, 22., 1987, Lausanne, Switzerland. **Proc. of Technical Session B**. Lausanne, Switzerland: IAHR, 1987.
- AKBARI, M. E.; MITTAL, M. K.; PANDE, P. K. Pressure fluctuations on the floor of free and forced hydraulic jumps. In: Int. Conf. On the Hydraulic Modeling of Civil Eng. Struc. 1982, Coventry, England. **Proceedings...** v. 1. Coventry, England: BHRA Fluid Eng., 1982. Paper C, p. 87-96.
- AMADOR, A.; SÁNCHEZ-JUNY, M.; DOLZ, J. Developing flow region and pressure fluctuations on steeply sloping stepped spillways. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 135, n. 12, p. 1092-1100, 2009.
- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 3. ed. Brasília, 2008. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas3ed.pdf>>. Acesso em: 02 nov. 2017.
- ARAUJO Filho, M. F.; OTA, J. J. Modelagem Computacional Tridimensional de um Vertedouro de Baixa Queda. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n. 2, p. 360-376, 2016.
- ARMENIO, V.; TOSCANO, P.; FIOROTTO, V. On the effects of a negative step in pressure fluctuations at the bottom of a hydraulic jump. **Journal of Hydraulic Research**, v. 38, n. 5, p. 359-368, 2000.
- BOWERS, C. Edward; TOSO, Joel. 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.; KUHA, R. M. **Hydraulic Studies of The Spillway of The Karnafuli Hydroelectric Project East Pakistan**. Project Report n. 73. Minneapolis, Minnesota: University of Minnesota, St. Anthony Falls Hydraulic Laboratory, 1964.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Colaboração Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Plano Nacional de Energia 2030: geração hidrelétrica**. v. 3. Brasília: MME: EPE, 2007. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/PNE/20080512_3.pdf>. Acesso em: 02 nov. 2017.
- BUFFON, F. T. **Determinação de pressões em fossas de erosão a jusante de dissipadores tipo salto esqui**. 2016. 70 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.
- CASTRO-ORGAZ, O.; ROLDÁN, J.; DOLZ, J. Resalto Hidráulico Ondulatorio. **Ingeniería del agua**, v. 19, n. 2, p. 63-74, 2015.

CBDB. Comitê Brasileiro de Barragens. **Grandes vertedouros brasileiros: uma panorâmica da prática e da experiência brasileira em projeto e construção de vertedouros para grandes barragens.** Rio de Janeiro, 2010.

CEREZER, Simone Maffini. **Uso da teoria de valores extremos para estimar valores de pressões hidrodinâmicas em um ressalto hidráulico formado a jusante de um vertedouro: o caso da UHE Porto Colômbia.** 2008. 135 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

CHANSON, H. **Jean-Baptiste Charles Joseph Bélanger (1790-1874), the Backwater Equation and the Bélanger Equation.** Report No. CH69/08. St. Lucia, Queensland, Australia: University of Queensland, 2008.

CHANSON, H.; BRATTBERG, T. Experimental study of the air–water shear flow in a hydraulic jump. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 26, n. 4, p. 583-607, 2000.

CHANSON, H.; CHACHEREAU, Y. Scale effects affecting two-phase flow properties in hydraulic jump with small inflow Froude number. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 45, p. 234-242, 2013.

CHIEW, Y. M.; EMADZADEH, A. Experimental investigation of free surface dynamics and pressure fluctuations in a closed-conduit hydraulic jump. In: IAHR WORLD CONGRESS, 37., 2017, Kuala Lumpur, Malaysia. **E-Proceedings...** Kuala Lumpur, Malaysia, 2017.

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.** 172 f. 2011. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

DAI PRÁ, M., COLLARES, G. L., MEES, A. A. A., MARQUES, M. G. Pressões médias e flutuantes devidas ao escoamento em uma curva de concordância vertical entre vertedouro e canal horizontal: estudo experimental. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, n. 3, p. 197-207, 2012.

DAI PRÁ, M.; PRIEBE, P. D. S.; TEIXEIRA, E. D.; MARQUES, M. G. Avaliação das flutuações de pressão em ressalto hidráulico pela dissociação de esforços. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n. 1, p. 222-231, 2016.

ELDER, R. A. Model-prototype turbulence scaling. In: IAHR CONGRESS, 9., 1961, Dubrovnik, Iugoslávia. **Proceedings...** Dubrovnik: Proleter, 1962. p. 24-31.

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.** 1990. 104f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1990.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco energético nacional 2018**: ano base 2017. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <<http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-303/topico-419/BEN2018.pdf>>. Acesso em: 03 nov. 2018.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. Série Estudos da Demanda. Nota Técnica DEA 03/15. **Projeção da demanda de energia elétrica**: para os próximos 10 anos (2015-2024). Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/DEA%2003-2015-%20Proje%C3%A7%C3%B5es%20da%20Demanda%20de%20Energia%20EI%C3%A9trica%202015-2024.pdf>>. Acesso em: 02 nov. 2017.

ERVINE, D. A.; FALVEY, H. T.; WITHERS, W. Pressure fluctuations on plunge pool floors. **Journal of Hydraulic Research**, v. 35, n. 2, p. 257-279, 1997.

FARHOUDI, J; NARAYANAN, R. Force on slab beneath hydraulic jump. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 117, n. 1, p. 64-82, 1991.

FIOROTTO, V.; RINALDO, A. Fluctuating uplift and lining design in spillway stilling basins. **Journal of hydraulic engineering**, v. 118, n. 4, p. 578-596, 1992a.

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

FUJITA, I.; MUSTE, M.; KRUGER, A. Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications. **Journal of hydraulic Research**, v. 36, n. 3, p. 397-414, 1998.

GARDINER, S. R. M.; HAY, D. Dynamic force measurement on stilling basin floor and sidewalls. In: INT. CONF. ON HYDRAULIC MODELLING OF CIVIL ENGINEERING STRUCTURES, 1982, Coventry, England. Proceedings... Coventry, England: BHRA Fluid Engineering, 1982. p. 123-130.

GHARANGIK, A.M.; CHAUDHRY, M. H. Numerical simulation of hydraulic jump. **Journal of hydraulic engineering**, v. 117, n. 9, p. 1195-1211, 1991.

GOMES, J. F. **Visualização de escoamento turbulento: ressalto hidráulico a jusante de uma comporta**. 2000. 90 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

GONZÁLEZ-BETANCOURT, Mauricio. Uplift force and momenta on a slab subjected to hydraulic jump. **Dyna**, v. 83, n. 199, p. 124-133, 2016.

GOVINDA RAO, N. S.; RAJARATNAM, N. The submerged hydraulic jump. **Journal of the Hydraulics Division**, v. 89, n. 1, p. 139-162, 1963.

GÜVEN, A.; GÜNAL, M.; CEVIK, A. Prediction of pressure fluctuations on sloping stilling basins. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 33, n. 11, p. 1379-1388, 2006.

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**. Water Science and Technology Library. v. 8, 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. 591-608, 1990.

HICKIN, E. J. **The momentum equation for open-channel flow**. ch. 3. In: River hydraulics and channel form. Wiley, Chichester, 2004.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Key world energy statistics**. Paris, France, 2016. Disponível em: <<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2016.pdf>>. Acesso em: 02 nov. 2017.

LENNON, J. M.; HILL, D. F. Particle image velocity measurements of undular and hydraulic jumps. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 132, n. 12, p. 1283-1294, 2006.

LOPARDO, R. A. Metodología de estimación de presiones instantáneas en cuencos amortiguadores. In: **Anales de la Universidad de Chile**. 1985. p. 437-455.

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

LOPARDO, R. A. Cavitación em fluxos macroturbulentos. **Matematicae Notae**, , Año XLII, v. 2, p. 19-40, 2003.

LOPARDO, R. A. Internal Flow of Free Hydraulic Jump in Stilling Basins. In: IAHR INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HYDRAULIC STRUCTURES, 4., 2012, Porto, Portugal. **Proceedings...** Porto, Portugal: IAHR, 2012.

LOPARDO, R. A. Extreme velocity fluctuations below free hydraulic jumps. **Journal of Engineering**, v. 2013, 2013a.

LOPARDO, R. A. Presiones Mínimas y Velocidades Máximas Instantáneas em um Disipador a Resalto Hidráulico Oscilante. In: Congreso Nacional del Agua, 24., 2013, San Juan, Argentina. **Proceedings...** San Juan, Argentina, 2013b.

LOPARDO, R. A.; FATTOR, C. A.; CASADO, J. M.; LOPARDO, M. C. Aspects of vibrations and fatigue of materials related to coherent structures of macroturbulent flows. In: International Conference of Hydraulics of Dams and River Structures, 2004, Tehran, Iran. **Proceedings...** Tehran, Iran: CRC Press, 2004a.

LOPARDO, R. A.; FATTOR, C. A.; LOPARDO, M. C.; CASADO, J. M. Instantaneous pressure field on a submerged jump stilling basin. **Hydraulics of dams and river structures**. London: AA Balkema, p. 133-138, 2004b.

LOPARDO, R. A.; HENNING, R. E. Temas practicos de la medicion y analisis de presiones instantaneas en laboratorio. In: CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRAULICA, 11., 1984, Buenos Aires, Argentina. **Anales...** Buenos Aires, Argentina: Asociación Internacional de Investigaciones Hidráulicas, 1984.

LOPARDO, R. A.; HENNING, R. E. Efectos de las condiciones de ingreso al resalto sobre el campo de presiones instantáneas. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, 12., 1986, São Paulo. **Anais...** São Paulo: 1986. v. 1, p. 116-127.

LOPARDO, R. A.; LIO, J. C. D. and VERNET, G. F. Physical Modelling on Cavitation Tendency for Macroturbulence of Hydraulic Jump. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE HYDRAULIC MODELLING OF CIVIL ENGINEERING STRUCTURES, 1982, Conventry, England. **Proceedings...** Conventry, England: BHRA Fluid Engineering, 1982. p. 109 - 121.

LOPARDO, R. A.; LOPARDO, M. C.; CANELLAS, A. V.; MARQUES, M. G. Auscultação em Estruturas Hidráulicas. In: Simpósio Brasileiro sobre Pequenas e Médias Centrais Hidrelétricas, 5., 2006, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: Tractebel Energia, 2006.

LOPARDO, R. A.; ROMAGNOLI, M. Pressure and velocity fluctuations in stilling basins. In: **Advances in Water Resources and Hydraulic Engineering**. Springer, Berlin, Heidelberg, 2009. p. 2093-2098.

MARQUES, M. G. Nouvelle **Approche Pour Le Dimensionnement des Dissipateurs à Auge**. 1995. 221f. Tese (Doutorado) – Faculte des sciences et génie de La Université Laval, Quebec, Canadá, 1995.

MARQUES, M. G.; ALMEIDA, F. M.; ENDRES, L. A. M. Adimensionalização de pressões médias em bacias de dissipação por ressalto hidráulico. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 13., 1999, Belo Horizonte. **Anais...** 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.; ENDRES, L. A. M.; TEIXEIRA, E. D.; TRIERWEILER Neto, E. F. Previsão de pressões extremas junto ao fundo de uma bacia de dissipação por ressalto hidráulico estudo de caso. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE PEQUENAS E MÉDIAS CENTRAIS HIDROELÉTRICAS, 4., 2004, Porto de Galinhas. **Anais...** Porto de Galinhas: Comitê Brasileiro de Barragens, 2004.

MARQUES, M. G.; HAMPE, R. F.; SOUZA, P. E. de A; TEIXEIRA, E. D. Previsão de Pressões Extremas Mínimas em Bacia de Dissipação com Baixo Número de Froude. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 31., 2017, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: Comitê Brasileiro de Barragens, 2017.

MARQUES, M. G.; OLLERMANN, G.; WEILLER, C.; ENDRES, L. A. M. Perda de carga no interior de um ressalto hidráulico a jusante de um vertedouro. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE HIDRÁULICA, 18., 1998, Oaxaca, México. **Anais...** Oaxaca, México: IAHR, 1998.

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, 2015, Brisbane, Australia. **Proceedings...** Hobart, Tasmania: ANCOLD: 2015. p. 1-8.

MEES, A. A. A. **Caracterização das solicitações hidrodinâmicas em bacias de dissipação por ressalto hidráulico com baixo número de Froude**. 2008. 135 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

MOSSA, M.; PETRILLO, A. A brief history of the jump of Bidone. In: IAHR CONGRESS: Water Engineering and Research in a Learning Society: Modern Developments and Traditional Concepts, 30., 2003, Madrid, Spain. **Proceedings...** Madrid: IAHR, 2003. p. 371-378.

NATO ADVANCED STUDY INSTITUTE. **Proceedings of the NATO Advanced Study Institute on 'Recent Advances in Hydraulic Physical Modelling'**. Lisboa, Portugal: Kluwer Academic Publishers, 1988.

OLIVEIRA, R. Z.; MARQUES, M. G. (Orient.). Concepção de um dispositivo de calibração para medições em escoamento aerado. In: SALÃO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 18., 2006, Porto Alegre. **Livro de resumos**. Porto Alegre: UFRGS, 2006.

PALAURO, C.; MARQUES, M. G. (Orient.). Dispositivo de medição de velocidades em escoamento aerado-tubo de Pitot-Pandtl modificado. In: SALÃO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 18., 2006, Porto Alegre. **Livro de resumos**. Porto Alegre: UFRGS, 2006.

PETERKA, A. J. **Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators**. Washington: U. S. Govt. Print. Off, 1957.

PINTO, L. C. S.; VASCONCELLOS, J. E.; SEYSSEL, R. L. Análise experimental da flutuação de pressão na base de um ressalto livre e afogado. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE HIDRAULICA, 13., Havana, 1988. **Memorias...** Havana: IAHR, 1988. v. 2, p. 182-194.

PULS, L. G. **Mechanics of the hydraulic jump**. Bureau of Reclamation Technical Memorandum, Hydraulic Laboratory Report No. HYD-99. Denver, Colorado, 1941.

RAJARATNAM, N. Submerged hydraulic jump. **Journal of the Hydraulics Division**, v. 91, n. 4, p. 71-96, 1965a.

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

RAJARATNAM, N. **Hydraulic jump**. In: Chow, V. T. (Ed.). *Advances in Hydrosience*. v. 4. New York: Academic Press, 1967. p. 218-219.

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. On the use of dimensionless numbers. **Civil Engineering**, v. 4, n. 11, p. 563-568, 1934.

ŞENTÜRK, F. **Hydraulics of dams and reservoirs**. Highlands Rancha: Water Resources Publication, 1994.

SMITH, C. D.; CHEN, W. The hydraulic jump in a steeply sloping square conduit. **Journal of Hydraulic Research**, v. 27, n. 3, p. 385-399, 1989.

SOUZA, P. E. de A. **Bacias de dissipação por ressalto hidráulico com baixo número de Froude: análise das pressões junto ao fundo da estrutura**. 2012. 76 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

SOUZA, P. E. de A.; MARQUES, M. G.; TRIERWEILER Neto, E. F.; TEIXEIRA, E. D. Flutuação de pressão em um ressalto hidráulico de baixa queda e baixo número de froude a jusante de um vertedouro. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 30., 2015, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: Comitê Brasileiro de Grandes Barragens, 2015.

SPIEGEL, M. R. **Estatística**. Tradução e revisão técnica Pedro Consentino. 3. ed. São Paulo: Makron, 1993.

TEIXEIRA, E. D. **Previsão dos valores de pressão junto ao fundo em bacias de dissipação por ressalto hidráulico**. 2003. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

TEIXEIRA, E. D. **Efeito de escala na previsão dos valores extremos de pressão junto ao fundo em bacias de dissipação por ressalto hidráulico**. 178 f. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

TEIXEIRA, E. D.; DAI PRÁ, M.; WIEST, R. A.; MARQUES, M. G. Efeito de escala nos valores de pressão média junto ao fundo em bacias de dissipação por ressalto hidráulico Submerso. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, n. 2, p. 87-100, 2012.

TEIXEIRA, E. D.; TRIERWEILER, E. F. N.; ENDRES, L. A. M.; MARQUES, M. G. Determinação do coeficiente estatístico de distribuição de probabilidade para valores extremos de pressões no ressalto hidráulico. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 15, 2003, Curitiba. **Anais...** Curitiba: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2003.

TOSO, J.W.; BOWERS, C. 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 submersão**. 2006. 174f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

TRIERWEILER Neto, E. F. AMANTE, R. C. R.; TEIXEIRA, E. D.; MARQUES, M. G. Comparação das medições de pressão em bacia de dissipação por ressalto hidráulico no protótipo e nos modelos reduzidos da UHE Porto Colômbia. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 26., 2005, Goiânia. **Anais...** Goiânia: Comitê Brasileiro de Grandes Barragens, 2005.

TRIERWEILER Neto, E. F.; MARQUES, M. G. Análise do Campo de Pressões em Ressalto Hidráulico Submerso a Jusante de uma Comporta. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 13, n. 4, p. 55-68, 2008.

USBR. United States Bureau of Reclamation. **Research study on stilling basins and bucket dissipators**. Laboratory Report No. HYD-380. Denver, Colorado, 1954.

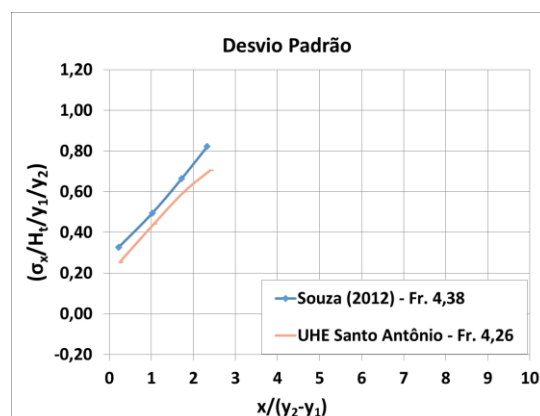
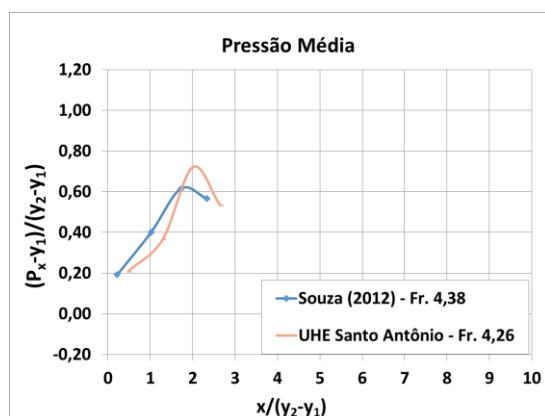
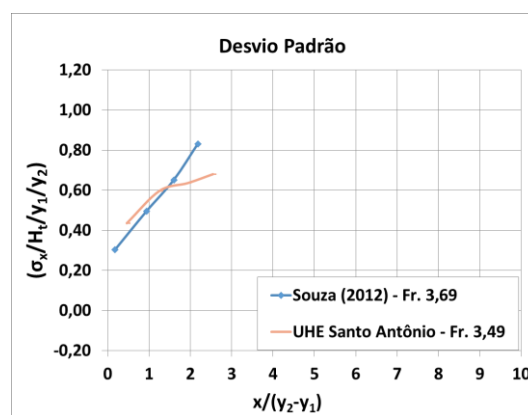
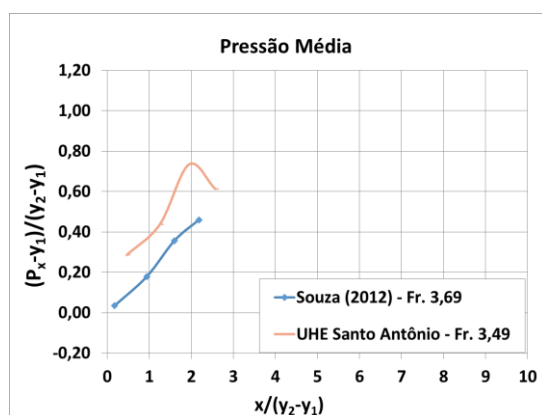
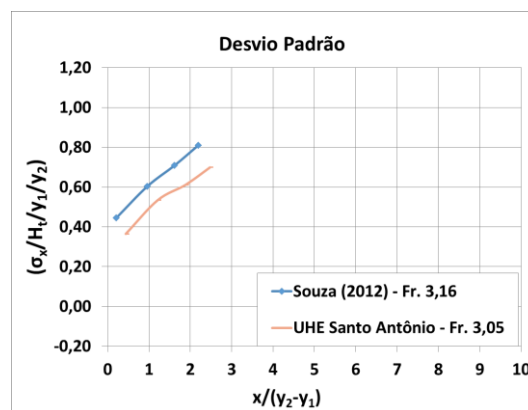
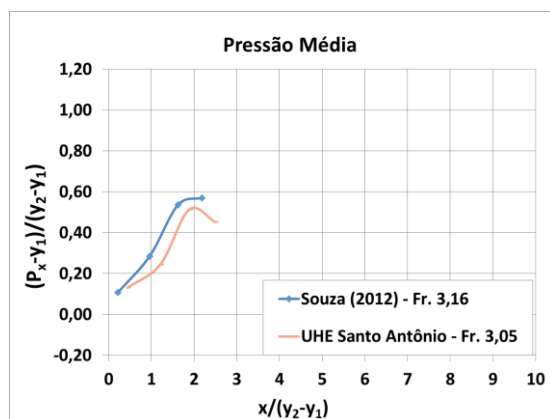
VASILIEV, O. F.; BUKREYEV, V. I. Statistical characteristics of pressure fluctuations in the region of hydraulic jump. In: CONGRESS OF THE IAHR, 12., 1967, Fort Collins, Colorado. **Proceedings...** v. 2, n. 1. Fort Collins, Colorado, 1967. p. 1-8.

WIEST, R. A. **Avaliação do campo de pressões em ressalto hidráulico formado a jusante de um vertedouro com diferentes graus de submersão**. 2008. 125 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

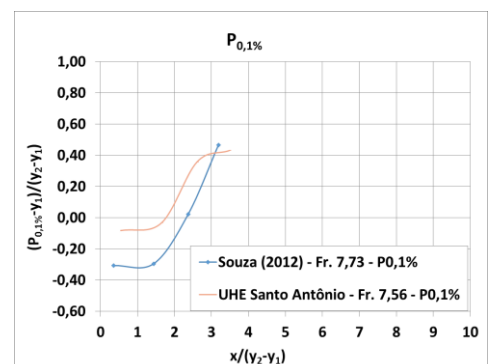
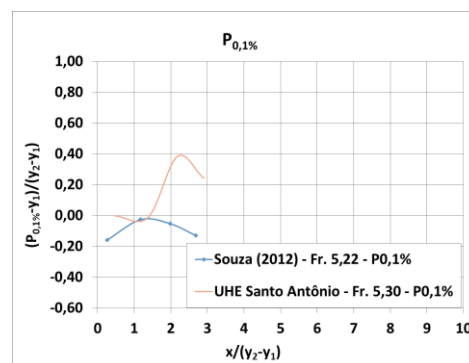
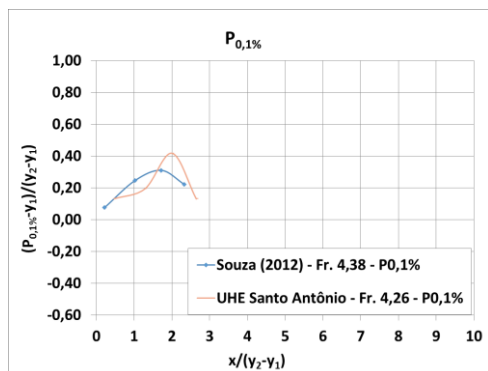
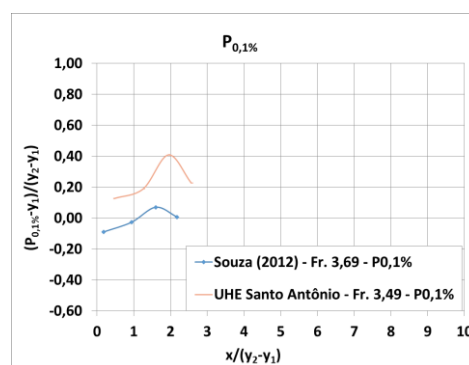
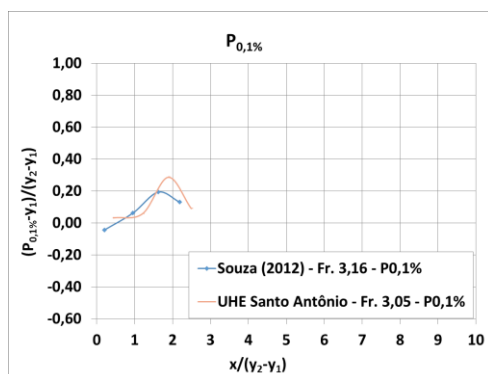
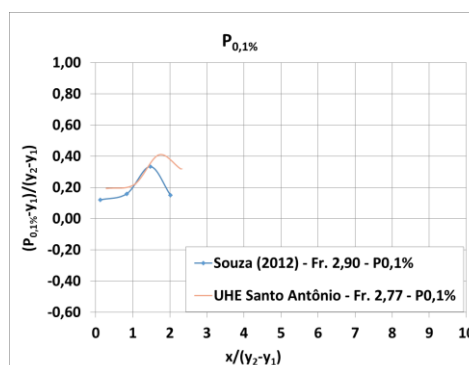
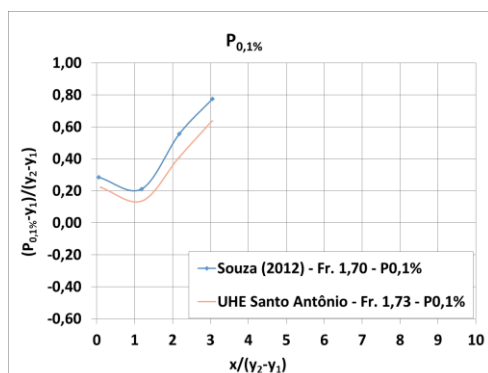
APÊNDICE A – Modelo UHE Santo Antônio

Pressões médias adimensionais coletadas no modelo bidimensional da UHE Santo Antônio com números de Froude: 3,16 e 3,05; 3,69 e 3,49; 4,38 e 4,26.

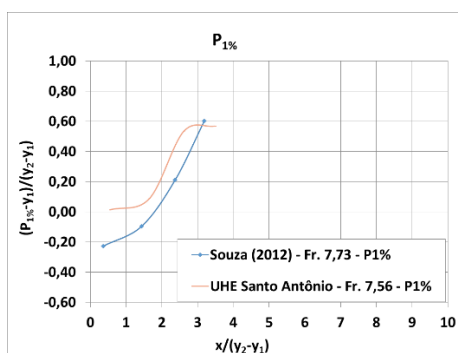
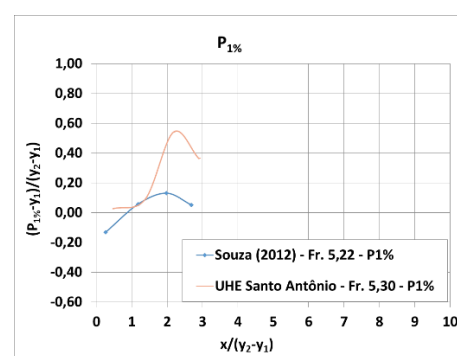
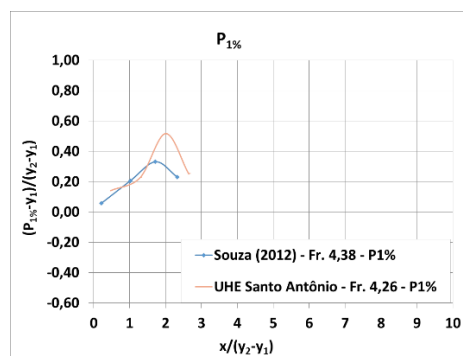
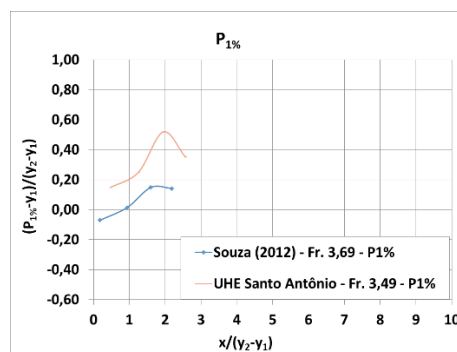
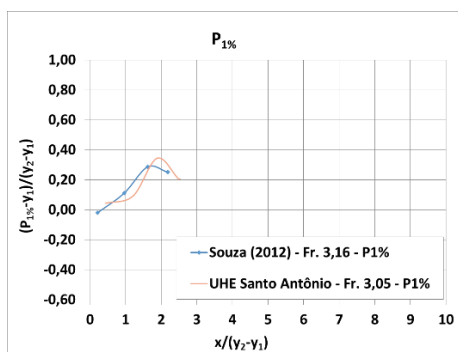
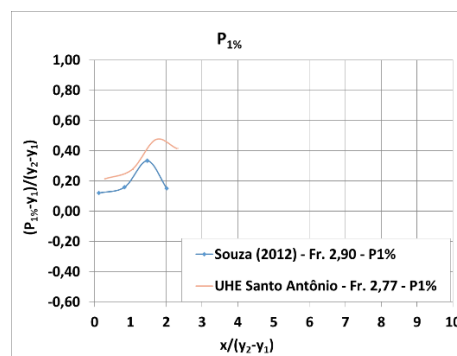
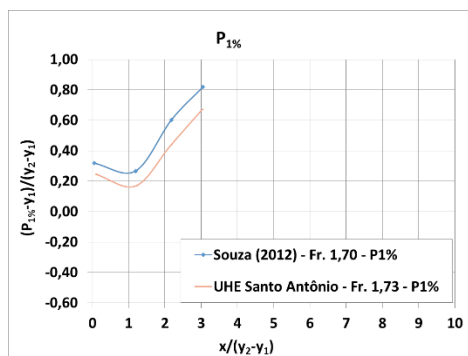
Desvios padrão adimensionais coletados no modelo bidimensional da UHE Santo Antônio com números de Froude: 3,16 e 3,05; 3,69 e 3,49; 4,38 e 4,26.



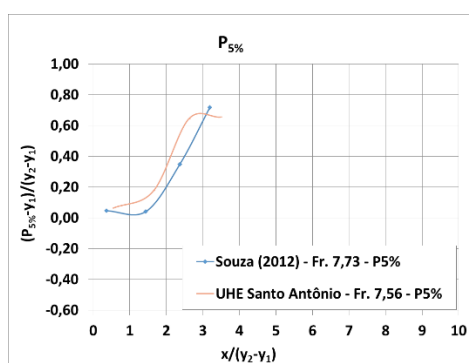
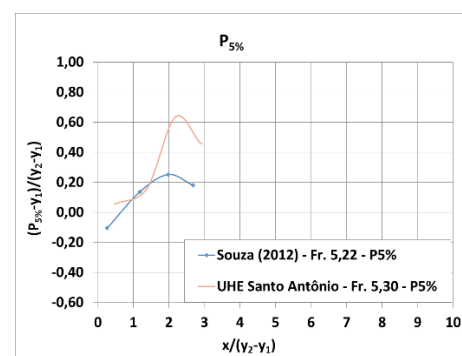
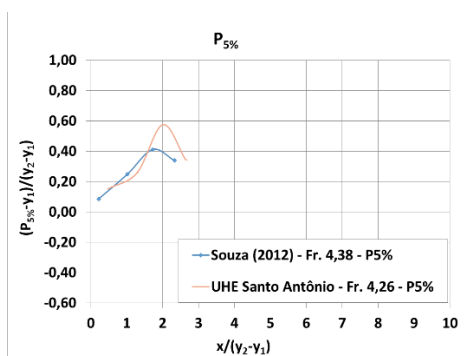
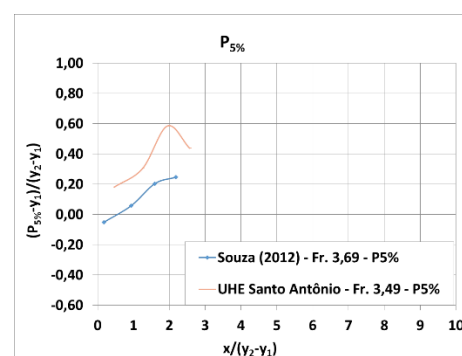
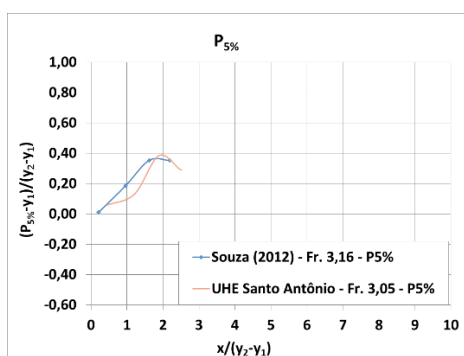
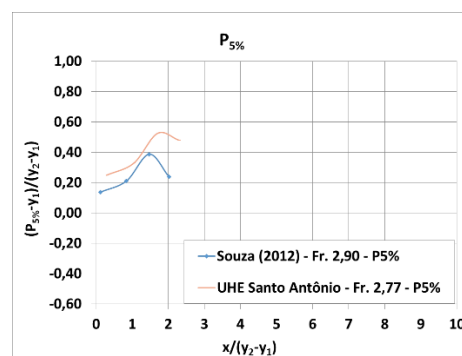
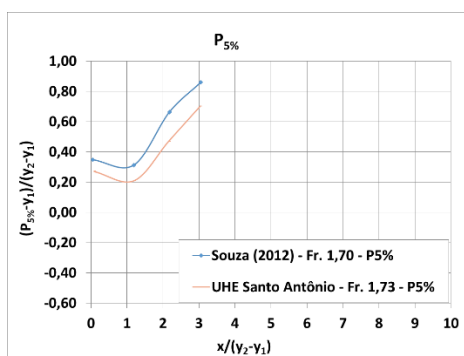
Pressões extremas adimensionais com probabilidade de não excedência de 0,1% coletadas no modelo bidimensional da UHE Santo Antônio com números de Froude: 1,70 e 1,73; 2,90 e 2,77; 3,16 e 3,05; 3,69 e 3,49; 4,38 e 4,26; 5,22 e 5,30; 7,73 e 7,56.



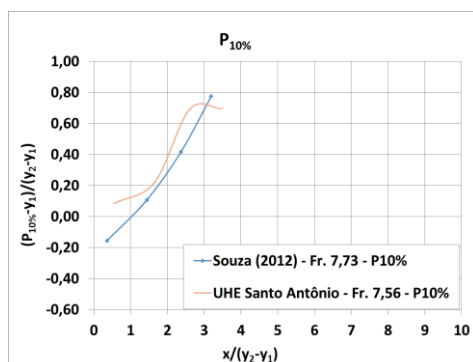
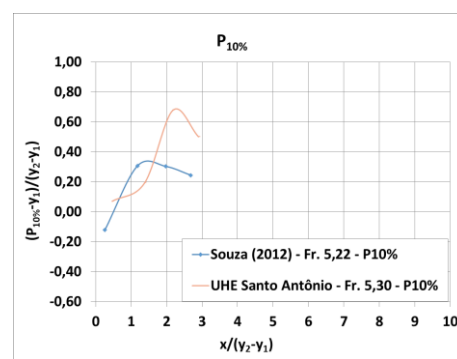
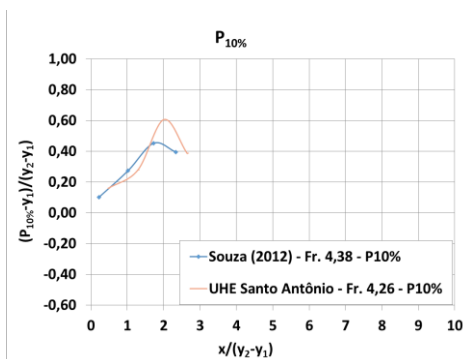
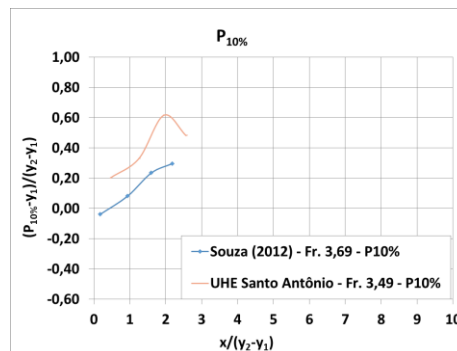
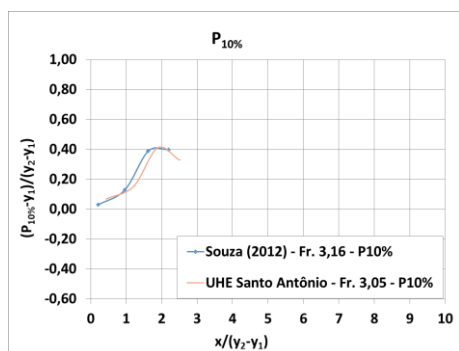
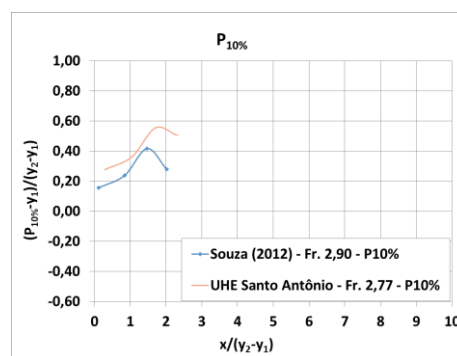
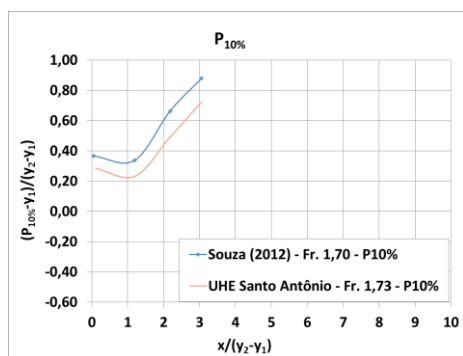
Pressões extremas adimensionais com probabilidade de não excedência de 1% coletadas no modelo bidimensional da UHE Santo Antônio com números de Froude: 1,70 e 1,73; 2,90 e 2,77; 3,16 e 3,05; 3,69 e 3,49; 4,38 e 4,26; 5,22 e 5,30; 7,73 e 7,56.



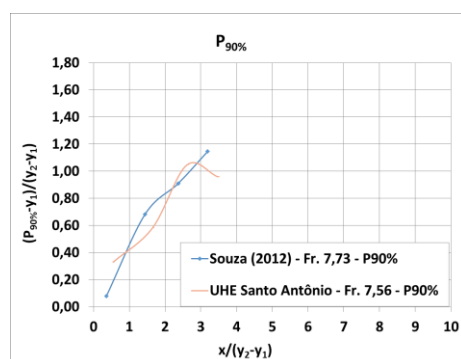
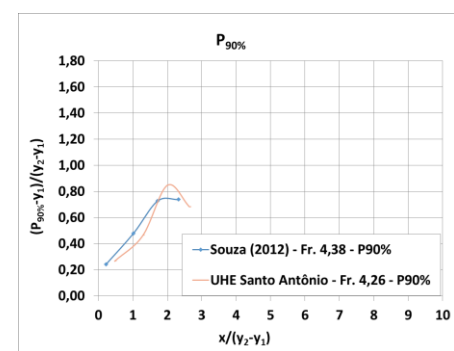
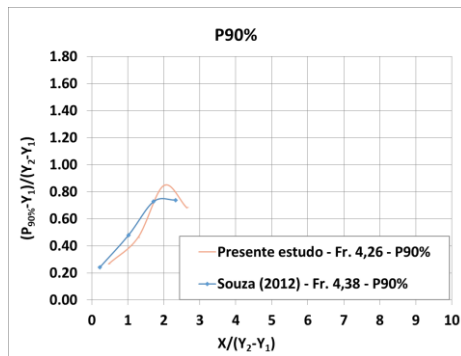
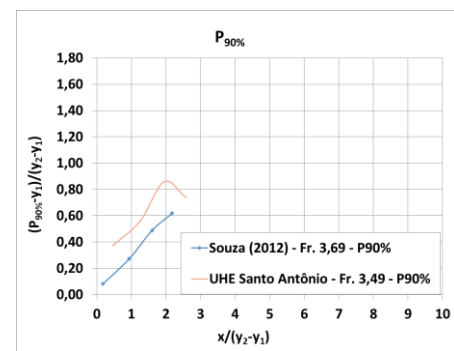
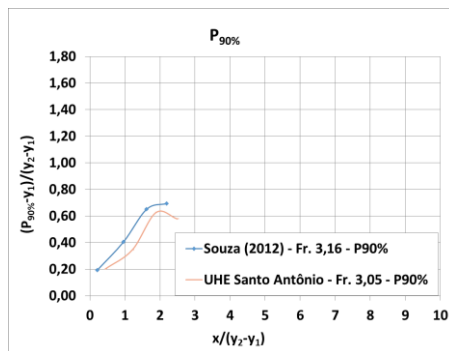
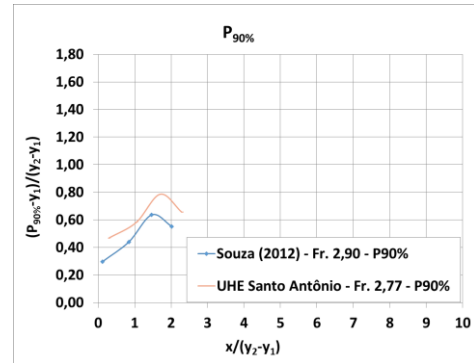
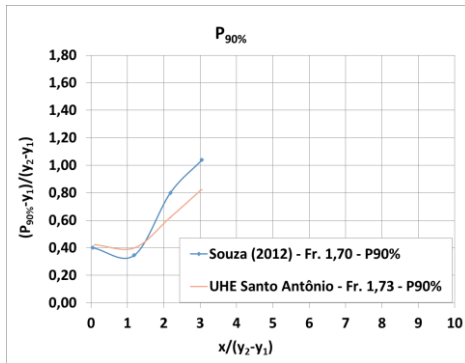
Pressões extremas adimensionais com probabilidade de não excedência de 5% coletadas no modelo bidimensional da UHE Santo Antônio com números de Froude: 1,70 e 1,73; 2,90 e 2,77; 3,16 e 3,05; 3,69 e 3,49; 4,38 e 4,26; 5,22 e 5,30; 7,73 e 7,56.



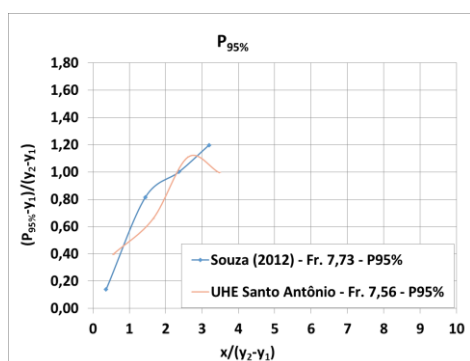
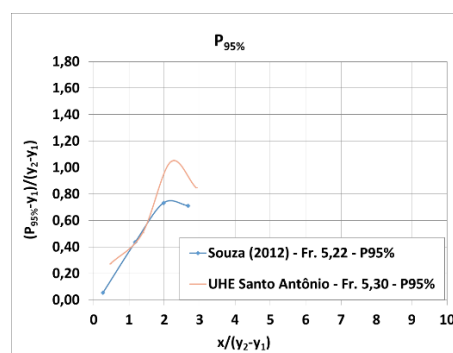
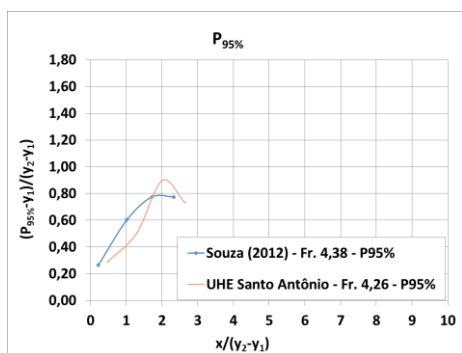
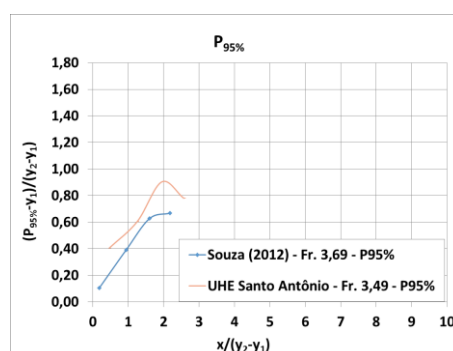
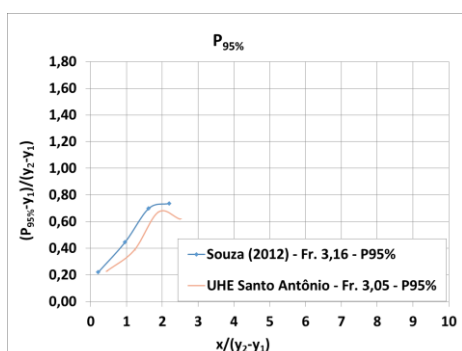
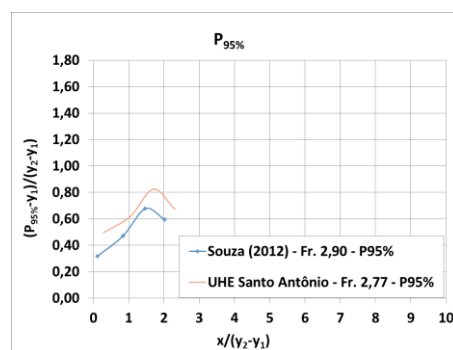
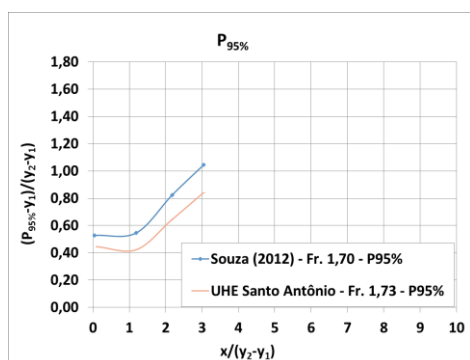
Pressões extremas adimensionais com probabilidade de não excedência de 10% coletadas no modelo bidimensional da UHE Santo Antônio com números de Froude: 1,70 e 1,73; 2,90 e 2,77; 3,16 e 3,05; 3,69 e 3,49; 4,38 e 4,26; 5,22 e 5,30; 7,73 e 7,56.



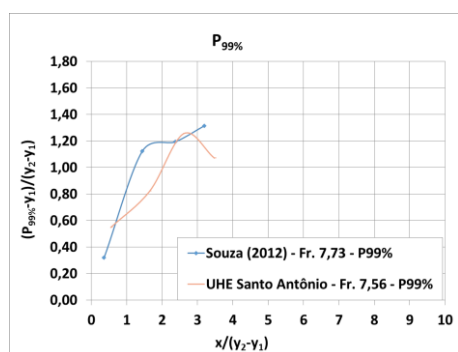
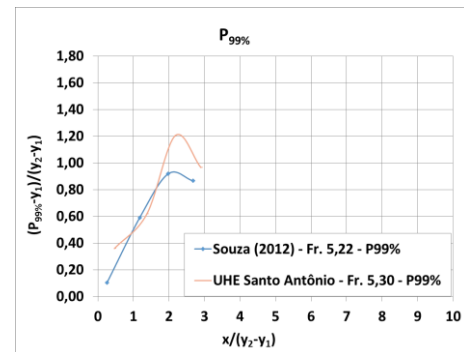
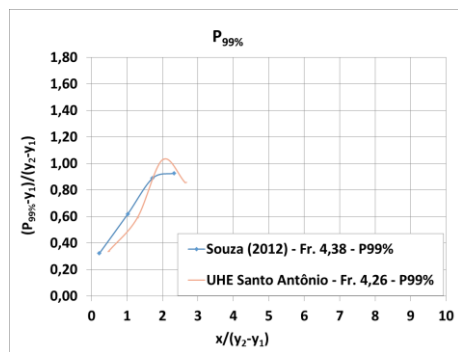
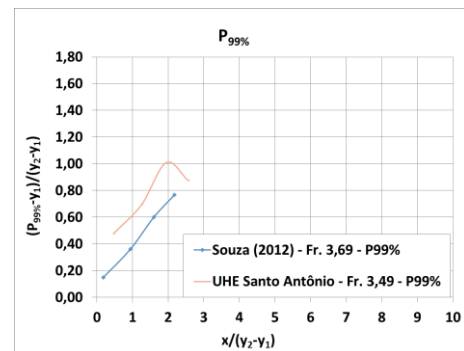
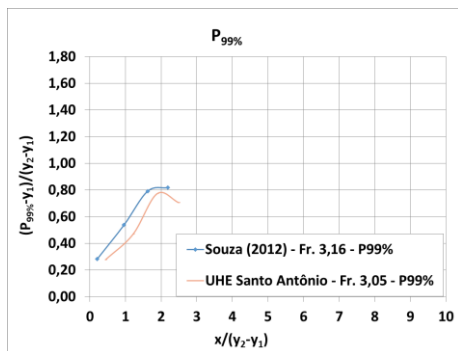
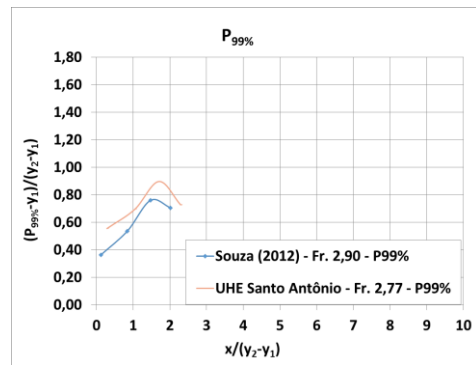
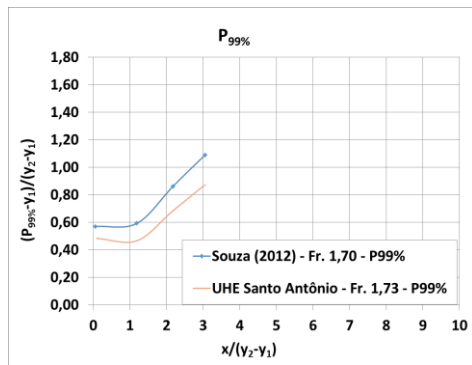
Pressões extremas adimensionais com probabilidade de não excedência de 90% coletadas no modelo bidimensional da UHE Santo Antônio com números de Froude: 1,70 e 1,73; 2,90 e 2,77; 3,16 e 3,05; 3,69 e 3,49; 4,38 e 4,26; 5,22 e 5,30; 7,73 e 7,56.



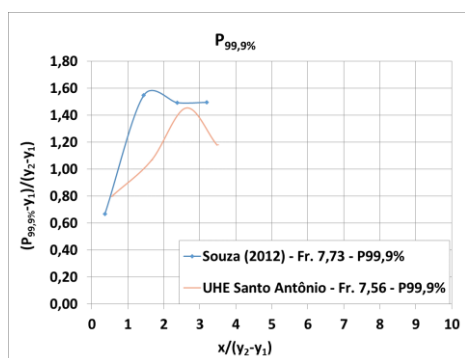
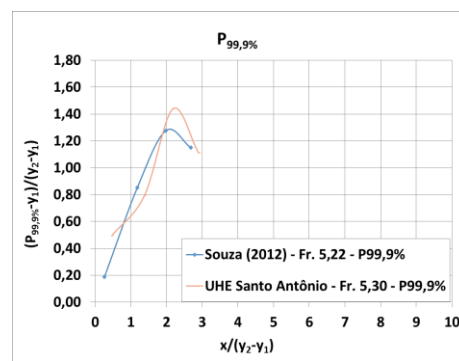
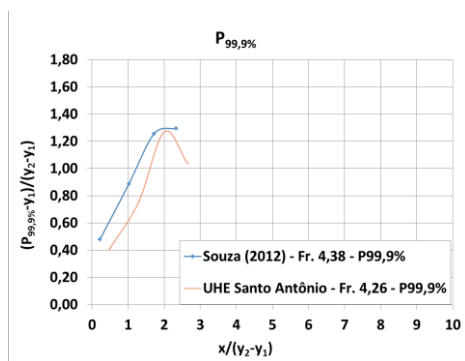
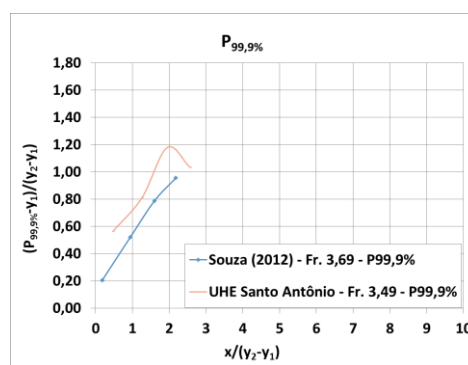
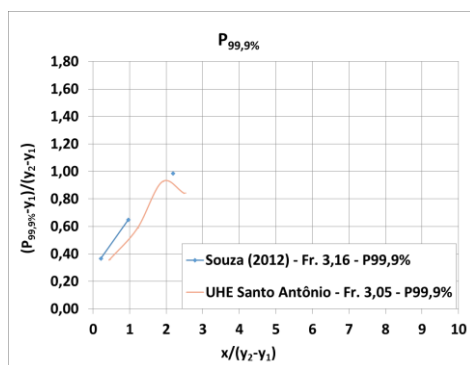
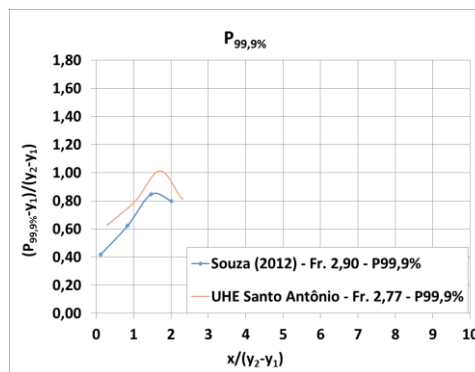
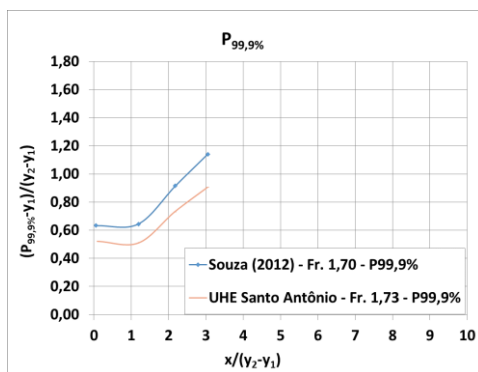
Pressões extremas adimensionais com probabilidade de não excedência de 95% coletadas no modelo bidimensional da UHE Santo Antônio com números de Froude: 1,70 e 1,73; 2,90 e 2,77; 3,16 e 3,05; 3,69 e 3,49; 4,38 e 4,26; 5,22 e 5,30; 7,73 e 7,56.



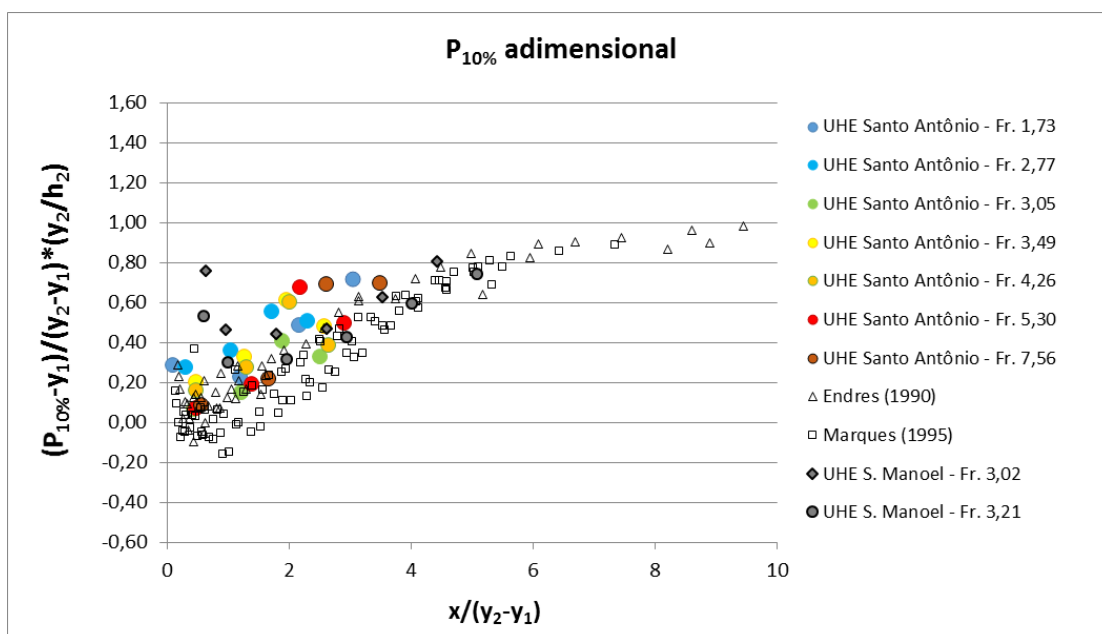
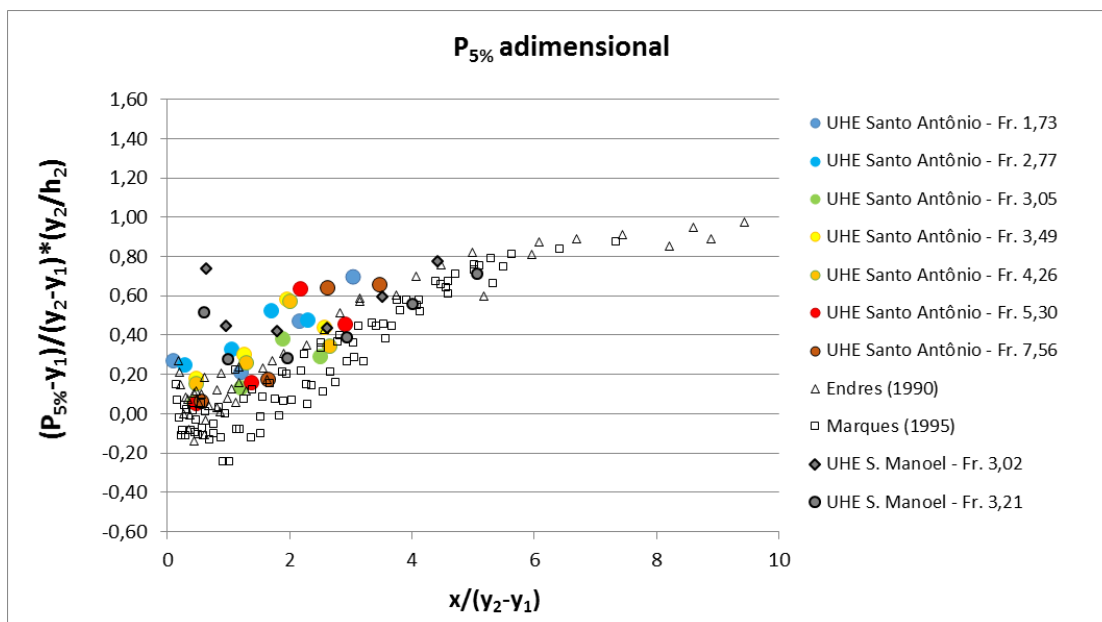
Pressões extremas adimensionais com probabilidade de não excedência de 99% coletadas no modelo bidimensional da UHE Santo Antônio com números de Froude: 1,70 e 1,73; 2,90 e 2,77; 3,16 e 3,05; 3,69 e 3,49; 4,38 e 4,26; 5,22 e 5,30; 7,73 e 7,56.

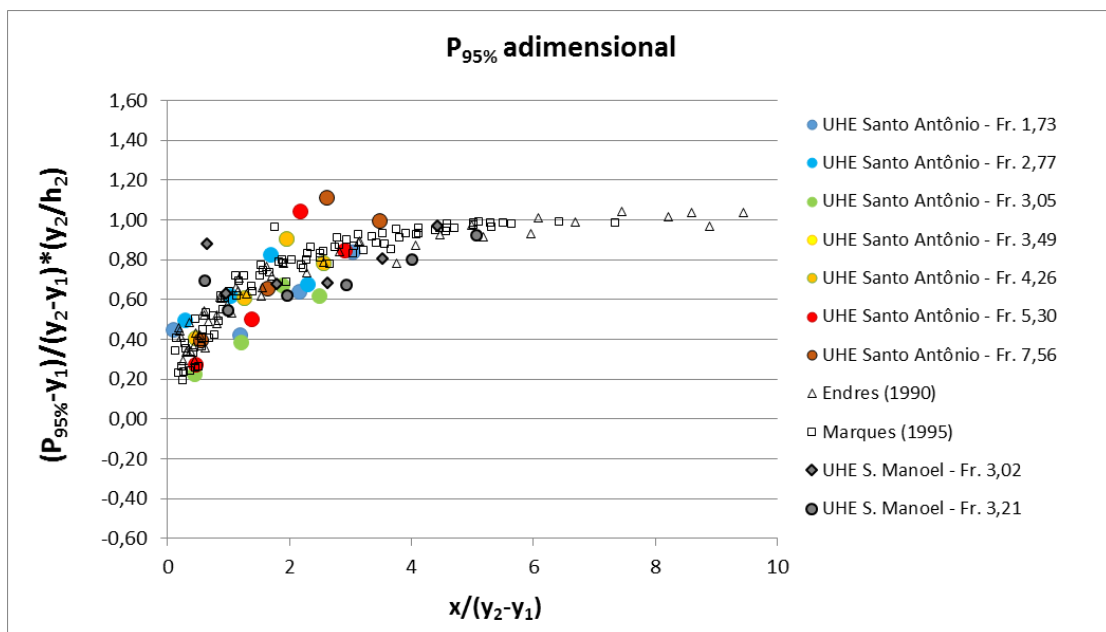
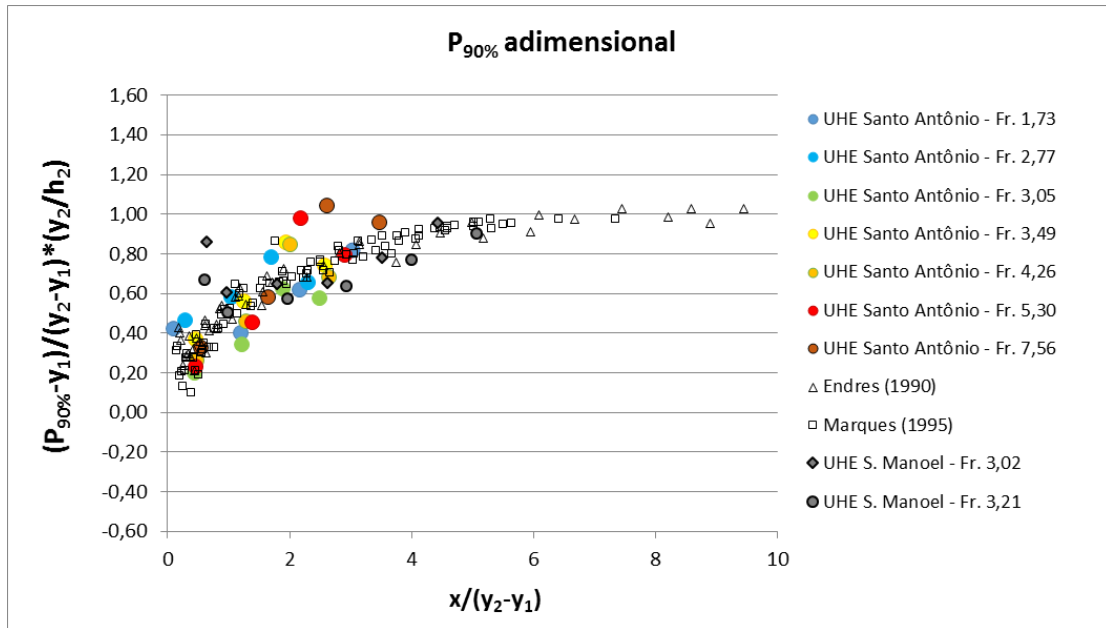


Pressões extremas adimensionais com probabilidade de não excedência de 99,9% coletadas no modelo bidimensional da UHE Santo Antônio com números de Froude: 1,70 e 1,73; 2,90 e 2,77; 3,16 e 3,05; 3,69 e 3,49; 4,38 e 4,26; 5,22 e 5,30; 7,73 e 7,56.



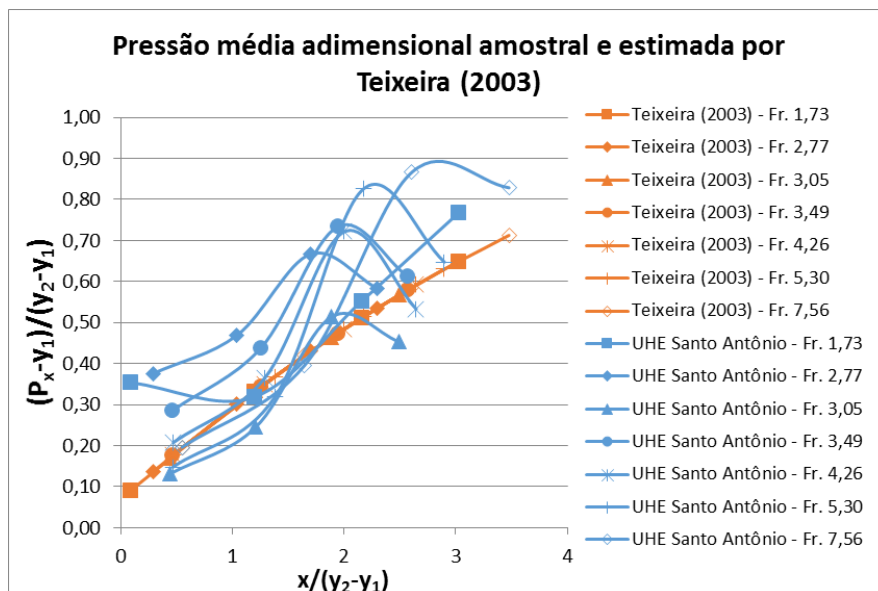
Pressões extremas adimensionais com probabilidade de não excedência de 5%, 10%, 90% e 95% coletadas no modelo bidimensional da UHE Santo Antônio em 2016 para o presente estudo comparadas aos dados cedidos por Endres (1990), Marques (1995) e coletadas no modelo da UHE São Manoel.



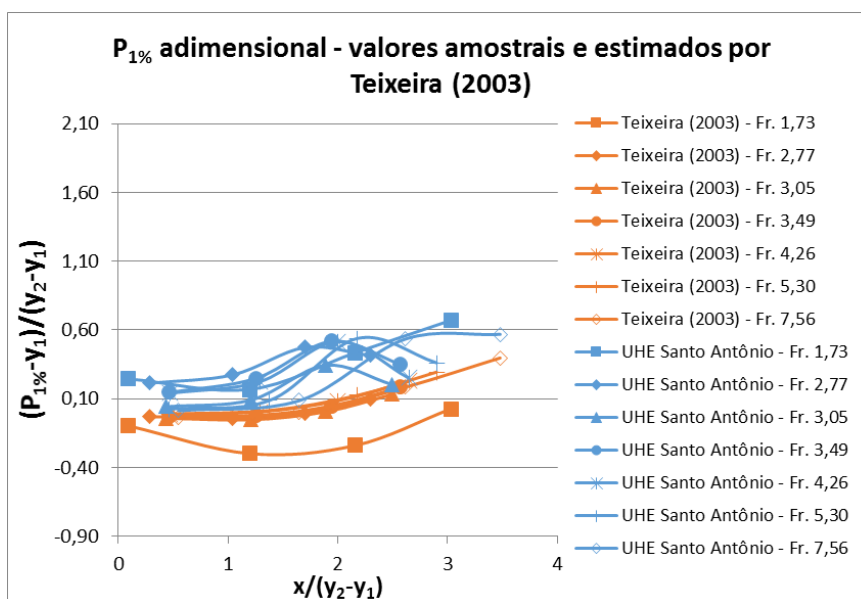
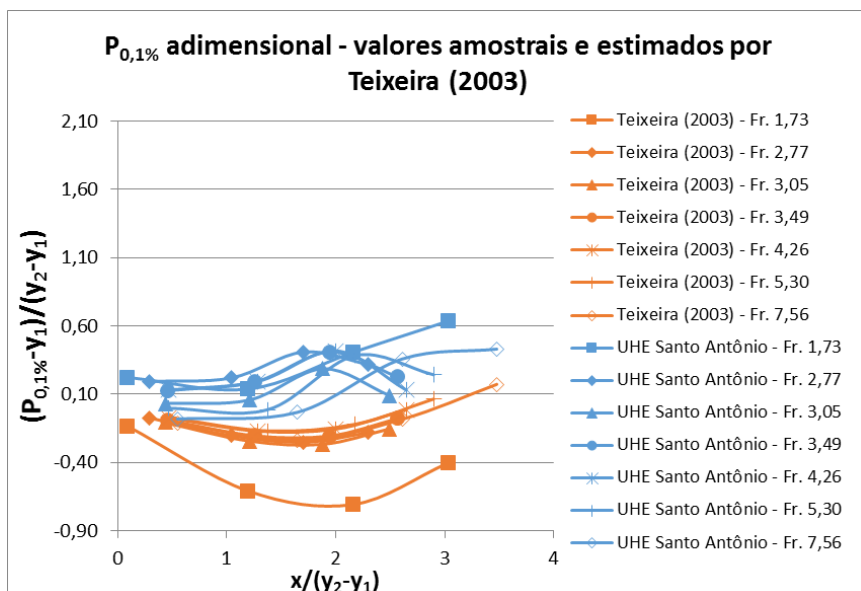


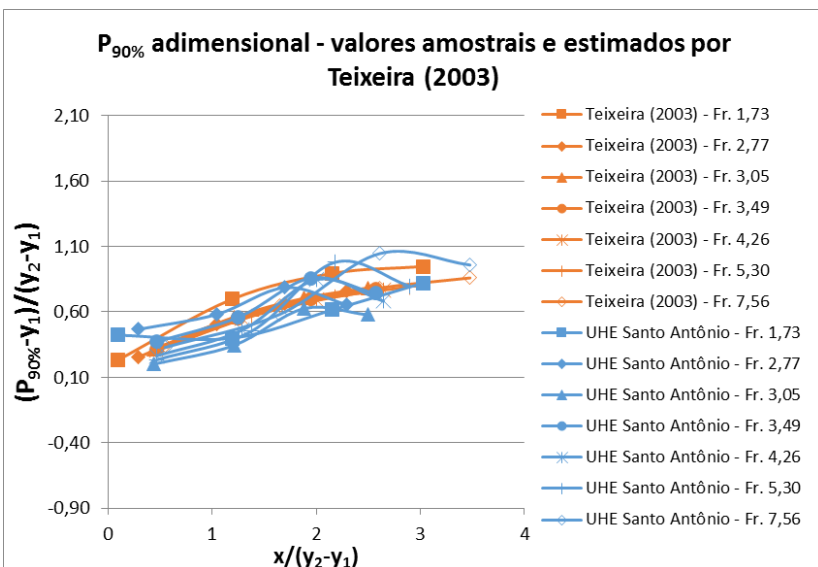
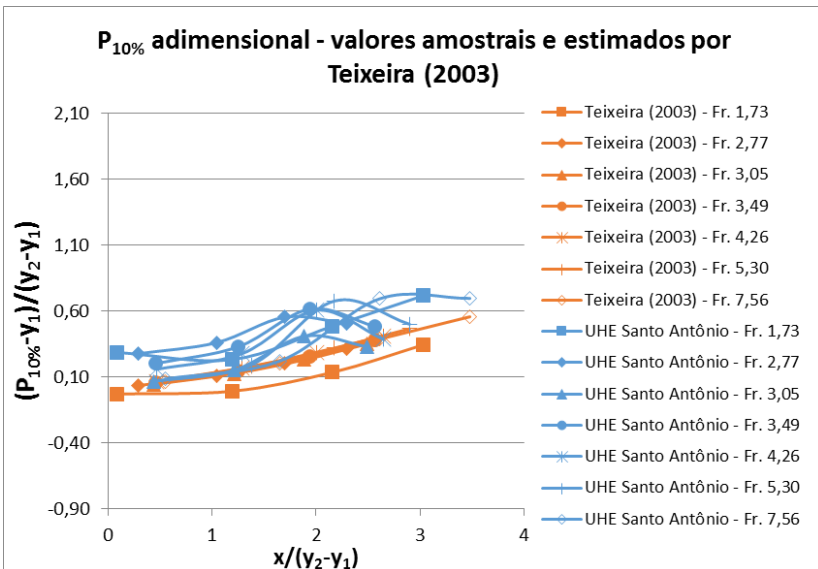
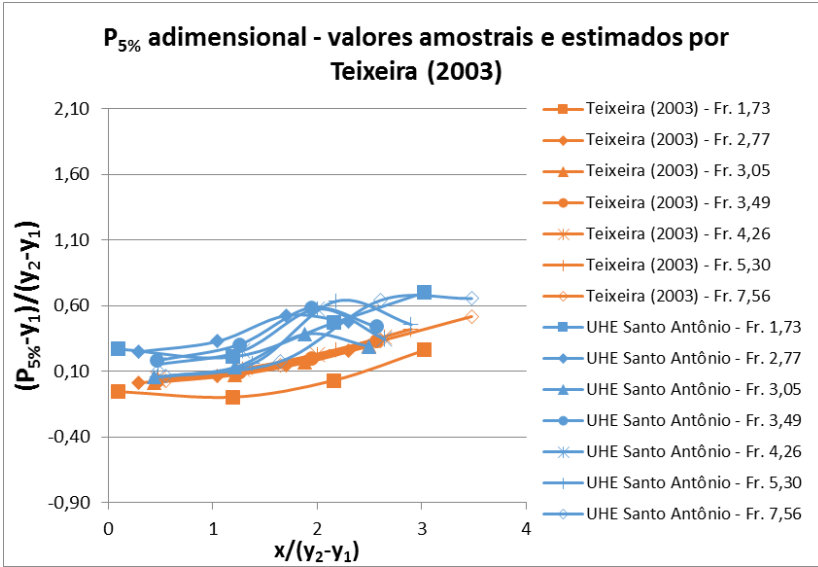
APÊNDICE B – Aplicação da metodologia proposta por Teixeira (2003)

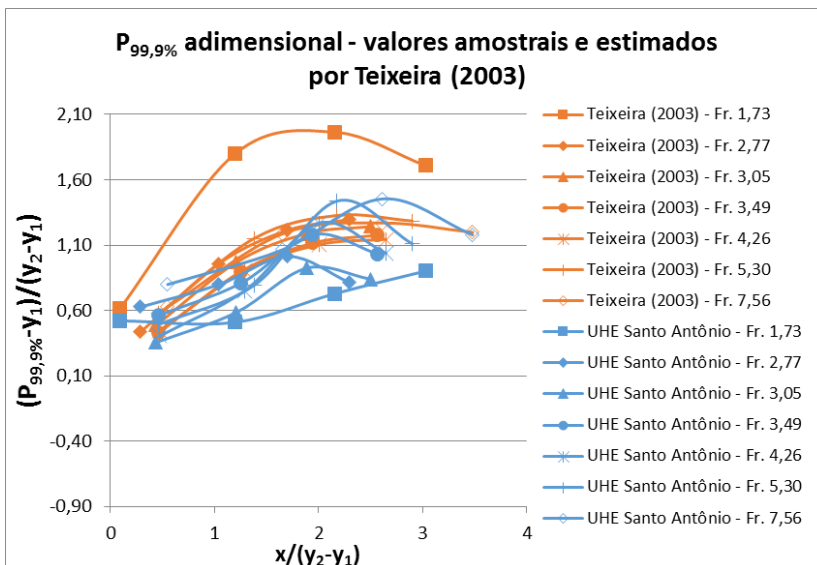
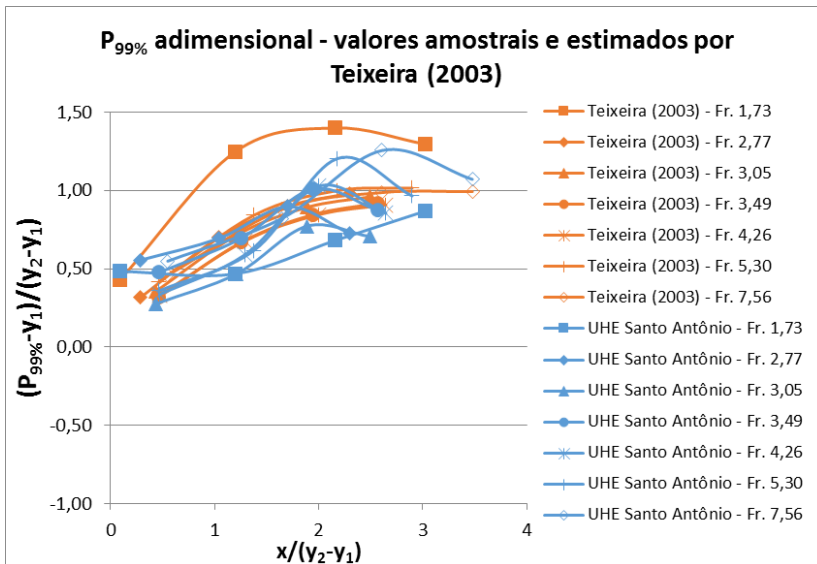
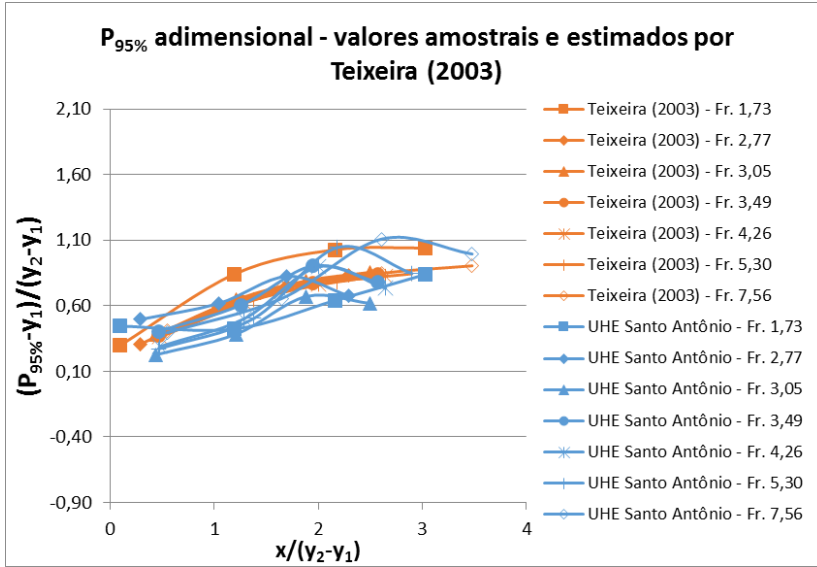
Pressões médias adimensionais estimadas a partir da metodologia proposta por Teixeira (2003) e amostra coletada no modelo físico bidimensional da UHE Santo Antônio em nova oportunidade de ensaios em 2016.



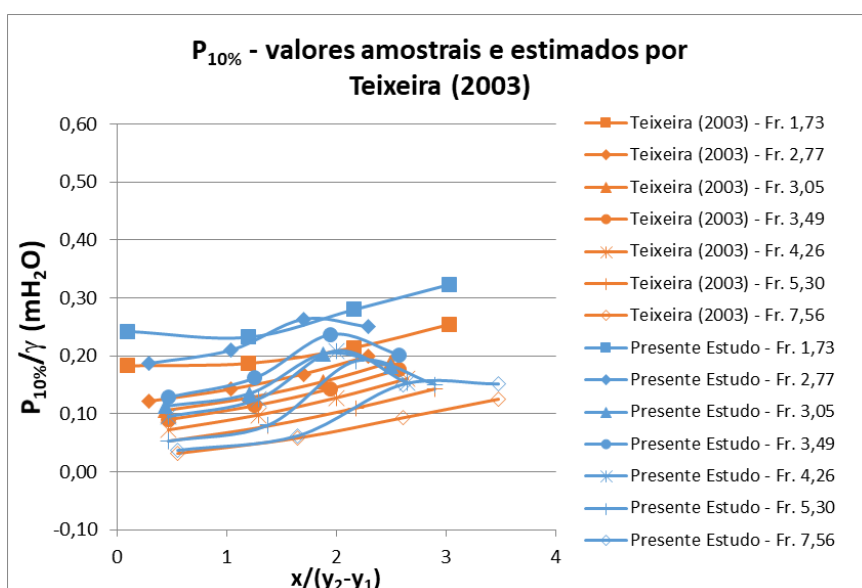
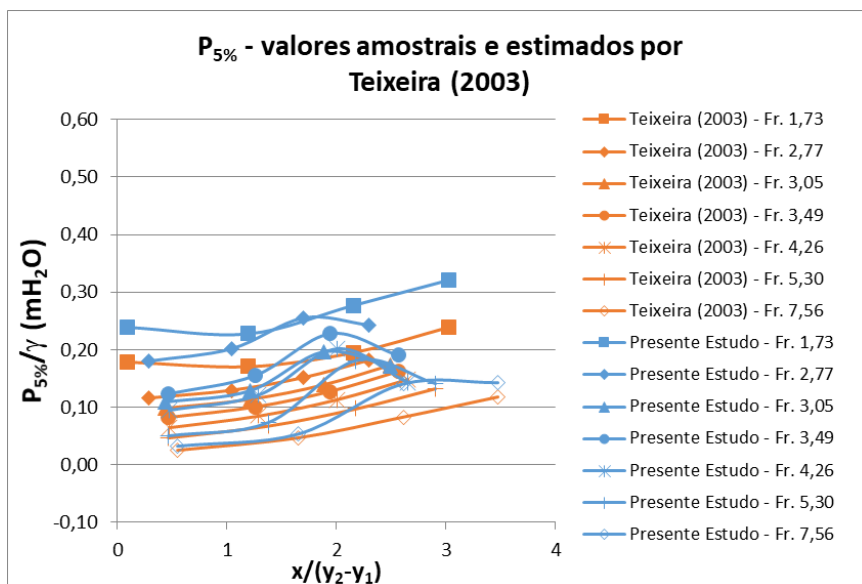
Pressões extremas adimensionais estimadas a partir da metodologia proposta por Teixeira (2003) e amostra coletada no modelo físico bidimensional da UHE Santo Antônio em nova oportunidade de ensaios em 2016, com probabilidades de não excedência de 0,1%, 1%, 5%, 10%, 90%, 95%, 99% e 99,9%.

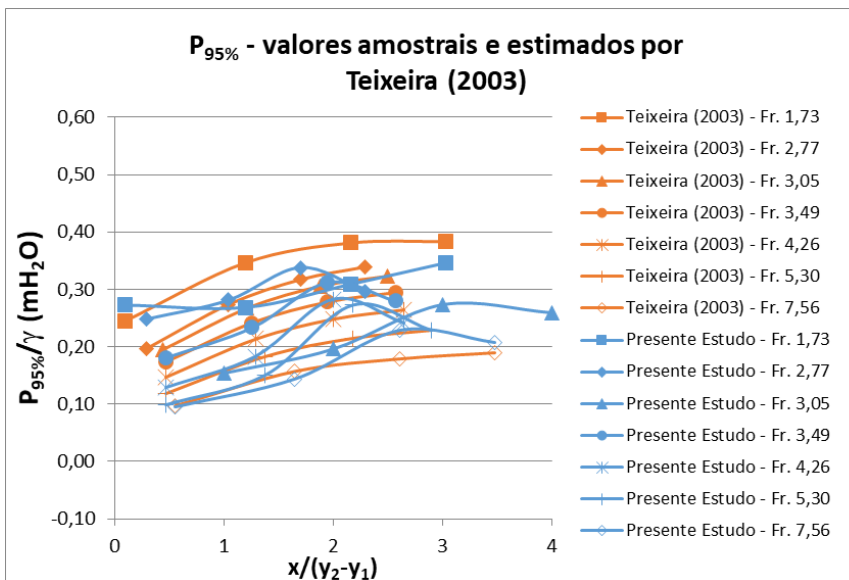
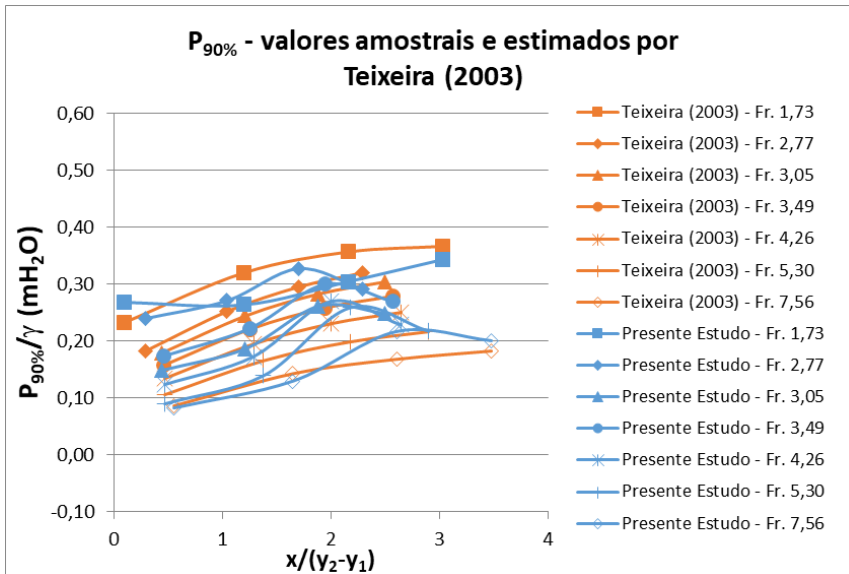






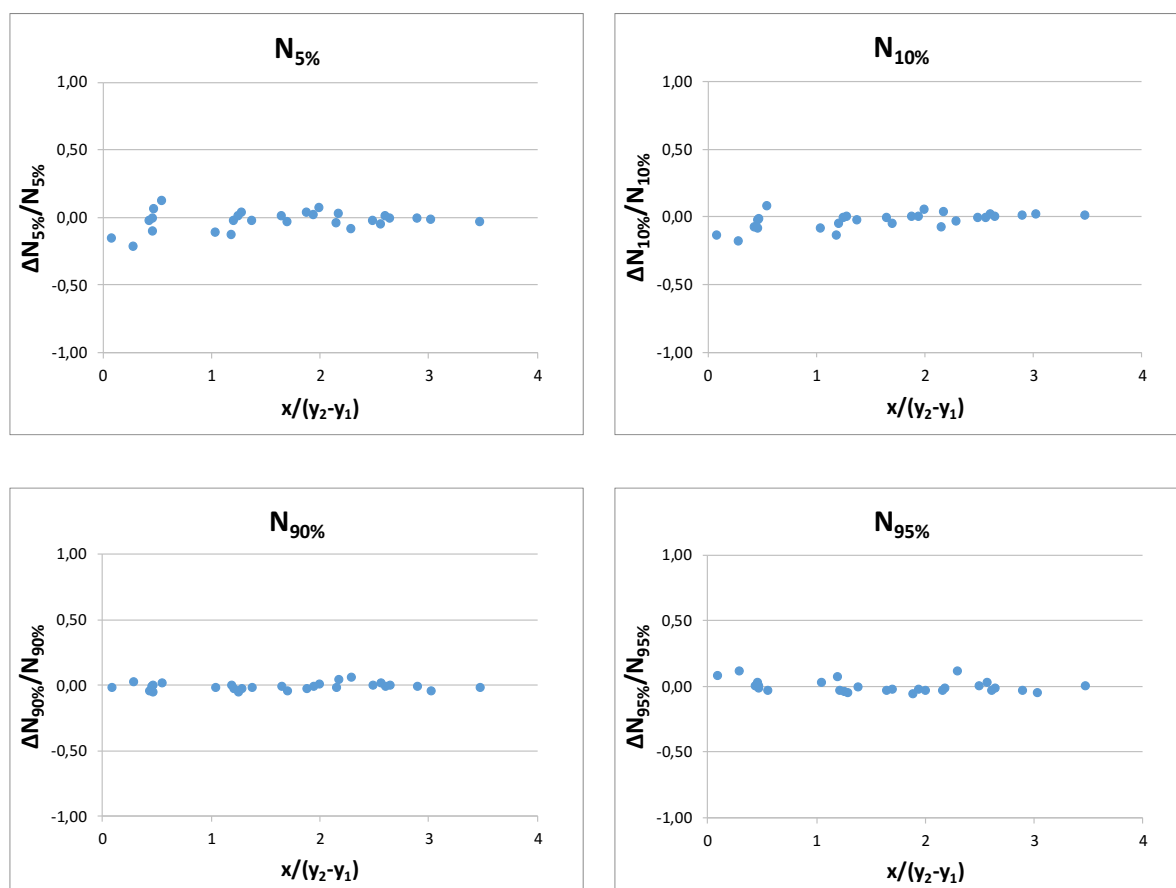
Pressões extremas estimadas a partir da metodologia proposta por Teixeira (2003) e amostra coletada no modelo físico bidimensional da UHE Santo Antônio em nova oportunidade de ensaios em 2016, com probabilidades de não excedência de 5%, 10%, 90% e 95%.



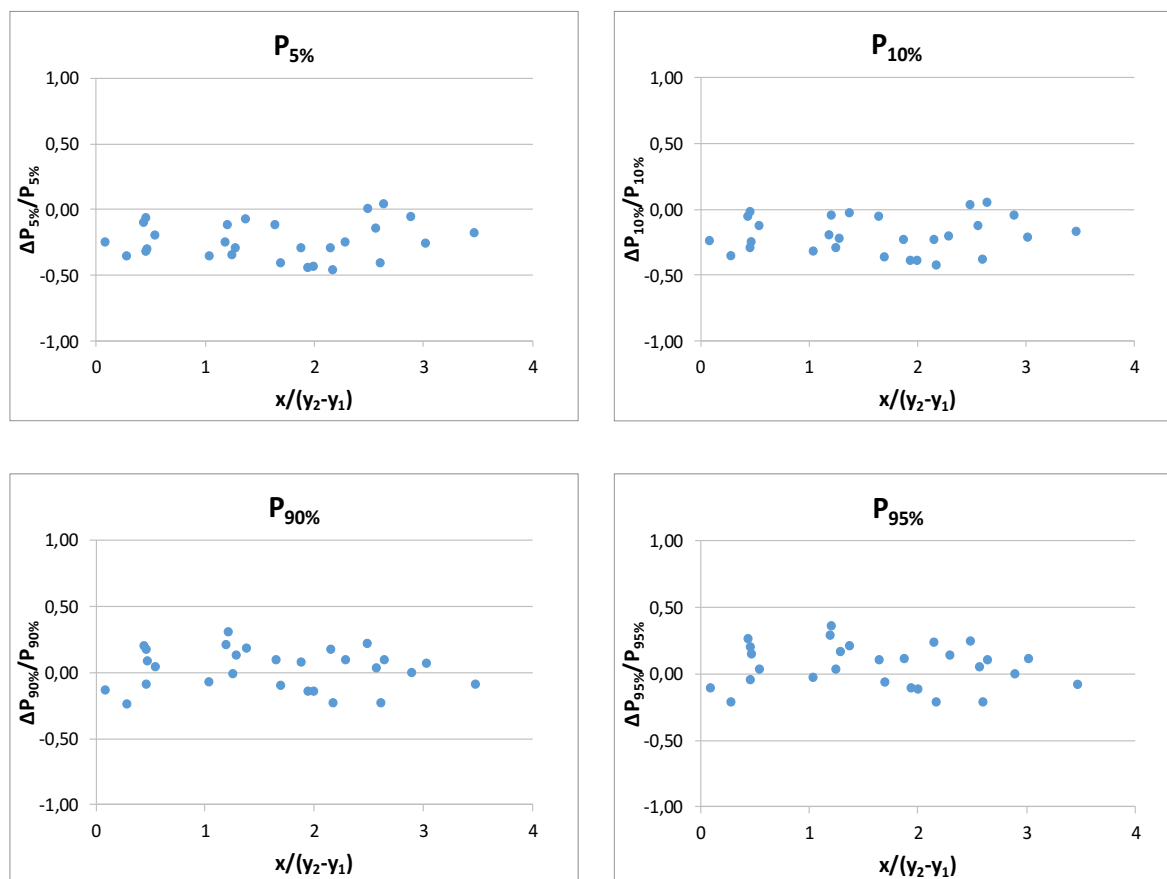


**APÊNDICE C – Diferença relativa referente à aplicação da metodologia
proposta por Teixeira (2003)**

Diferença relativa na estimativa do coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades (N) a partir da metodologia proposta por Teixeira (2003) em relação aos dados amostrais coletados no modelo físico bidimensional da UHE Santo Antônio em nova oportunidade de ensaios em 2016, com probabilidades de não excedência de 5%, 10%, 90% e 95%.

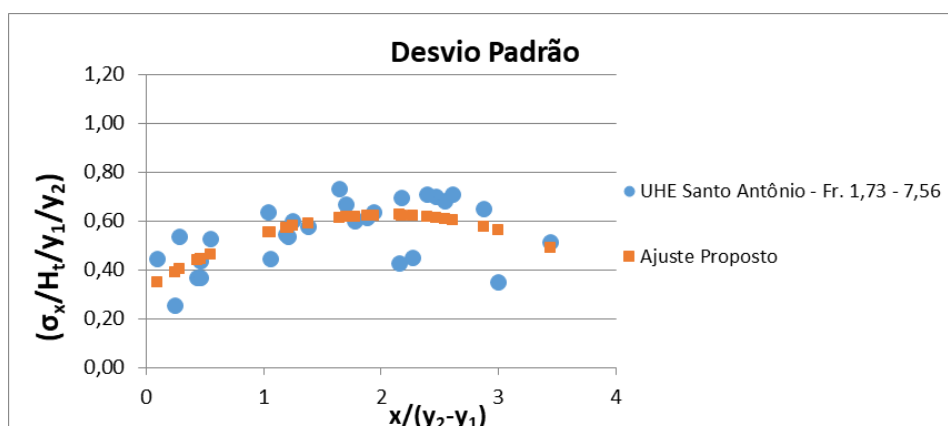


Diferença relativa na estimativa das pressões extremas a partir da metodologia proposta por Teixeira (2003) em relação aos dados amostrais coletados no modelo físico bidimensional da UHE Santo Antônio em nova oportunidade de ensaios em 2016, com probabilidades de não excedência de 5%, 10%, 90% e 95%.

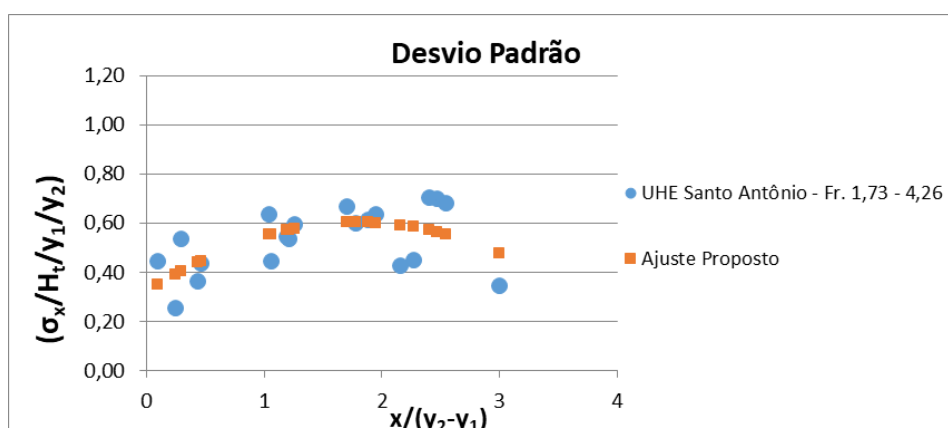


APÊNDICE D – Novos ajustes propostos

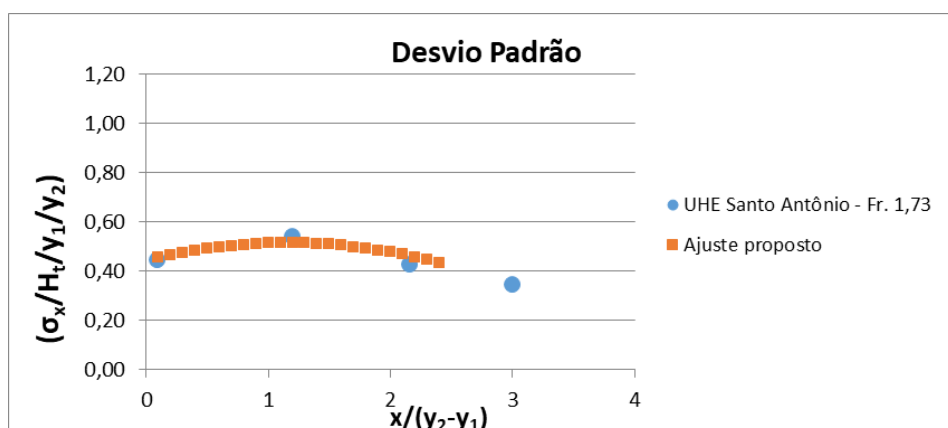
Ajuste 1 proposto a partir dos dados amostrais coletados no modelo físico bidimensional da UHE Santo Antônio em nova oportunidade de ensaios em 2016 (Fr. 1,73 a Fr. 7,56).



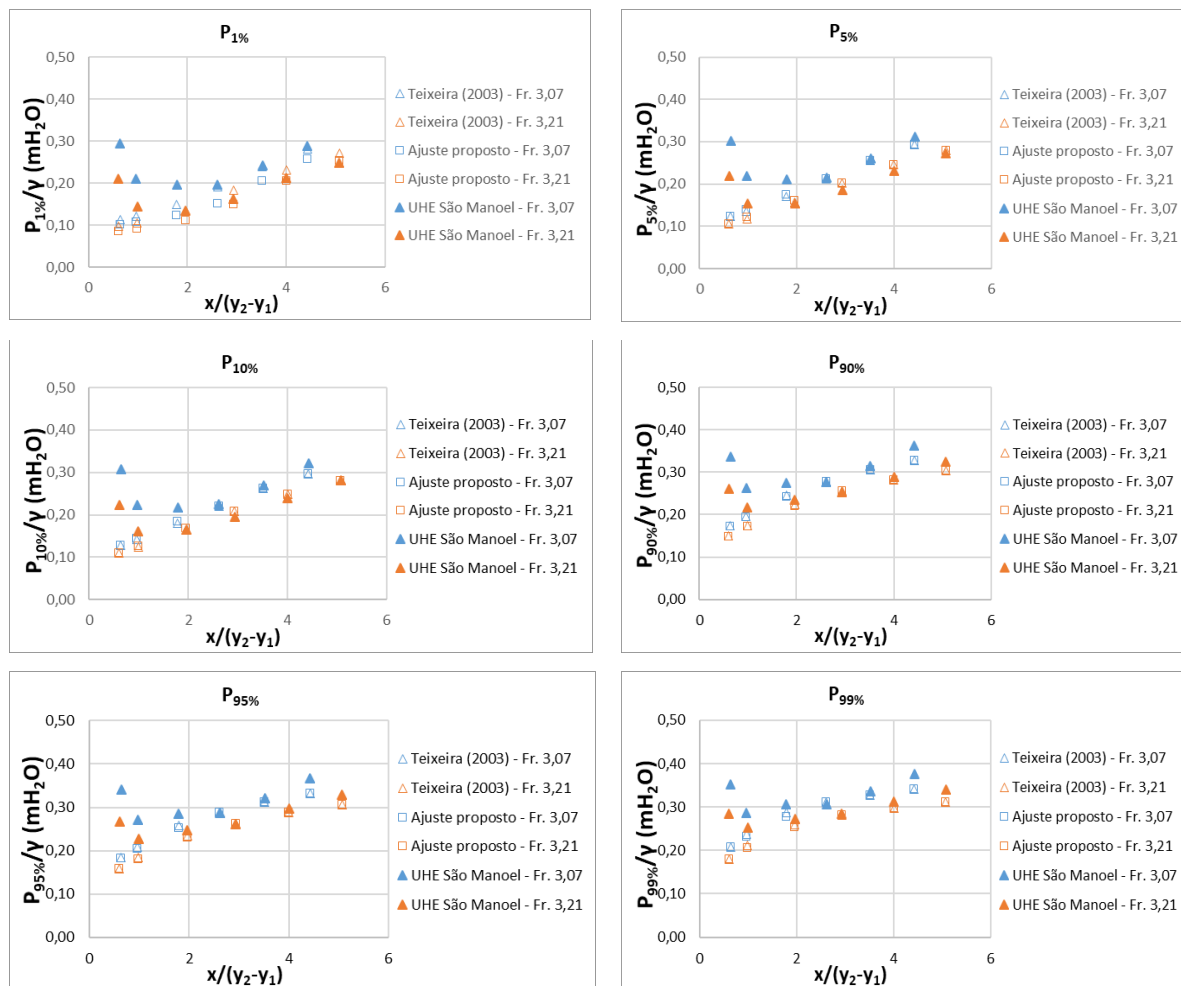
Ajuste 2 proposto a partir dos dados amostrais coletados no modelo físico bidimensional da UHE Santo Antônio em nova oportunidade de ensaios em 2016 (Fr. 1,73 a Fr. 4,26).



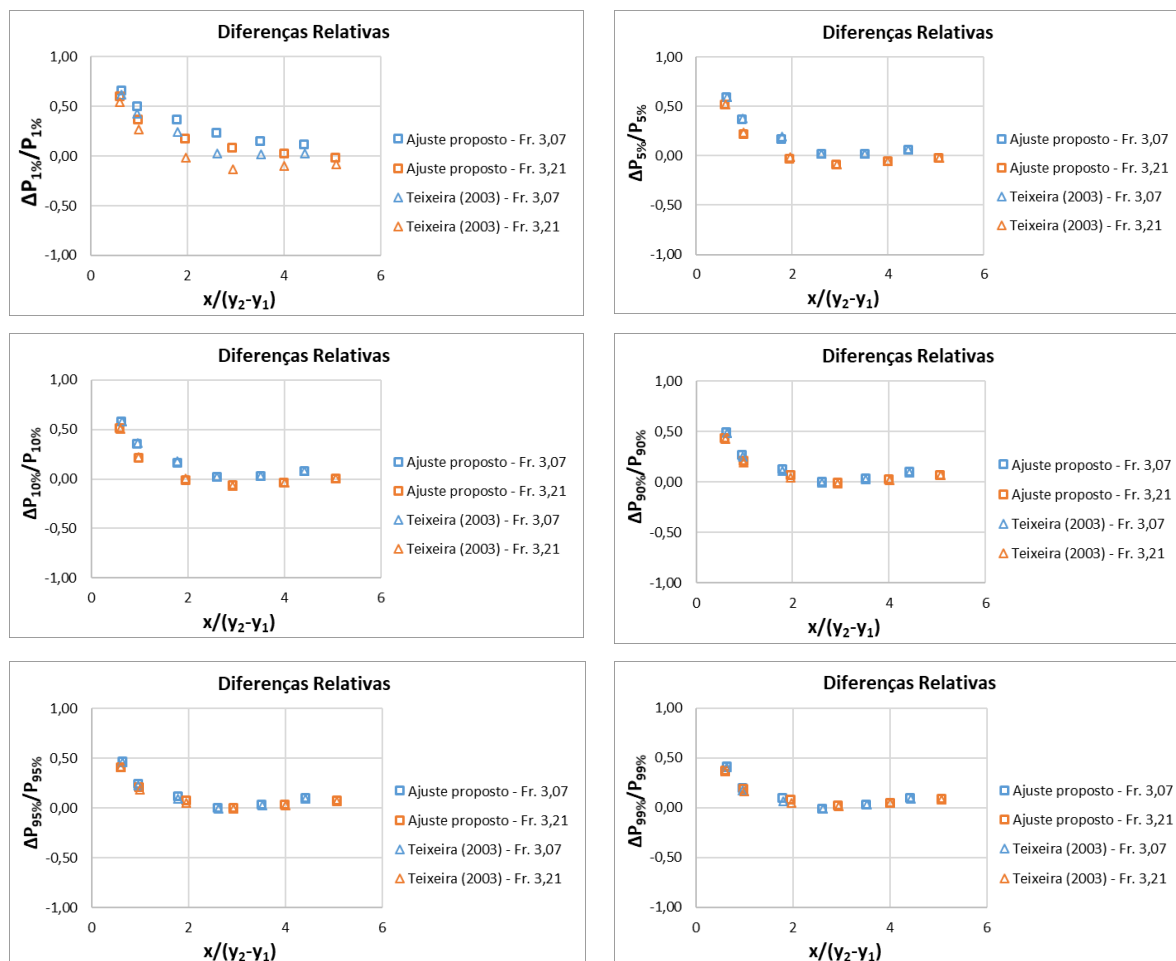
Ajuste 3 proposto a partir dos dados amostrais coletados no modelo físico bidimensional da UHE Santo Antônio em nova oportunidade de ensaios em 2016 (Fr. 1,73).



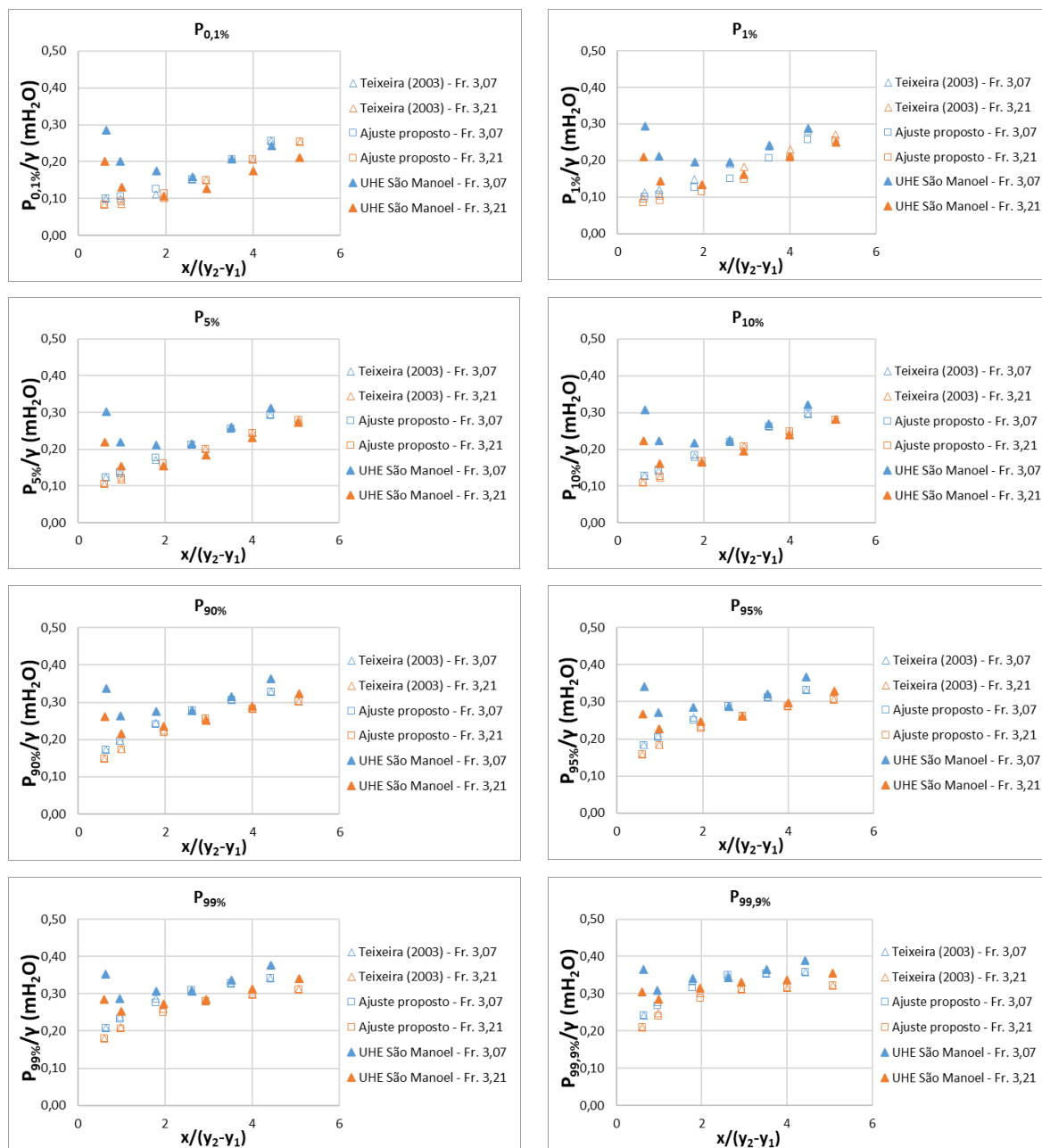
Pressões extremas estimadas, a partir da metodologia proposta por Teixeira (2003) e ajuste 1 proposto no presente trabalho, e amostra coletada no modelo da UHE São Manoel referente às probabilidades de não excedência de 1%, 5%, 10%, 90%, 95% e 99%.



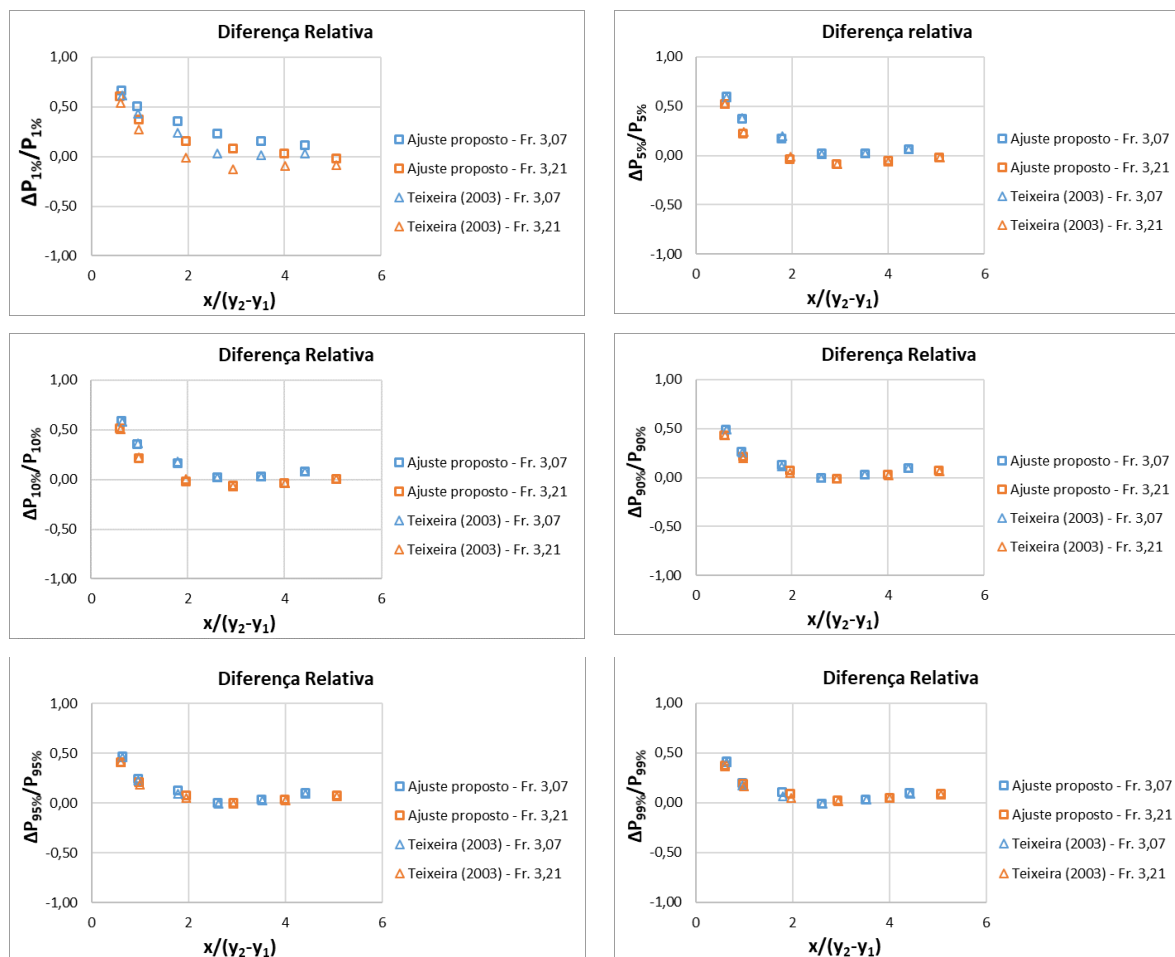
Diferença relativa na estimativa das pressões extremas, a partir da metodologia proposta por Teixeira (2003) e ajuste 1 proposto no presente trabalho, e amostra coletada no modelo da UHE São Manoel referente às probabilidades de não excedência de 1%, 5%, 10%, 90%, 95% e 99%.



Pressões extremas estimadas, a partir da metodologia proposta por Teixeira (2003) e ajuste 2 proposto no presente trabalho, e amostra coletada no modelo da UHE São Manoel referente às probabilidades de não excedência de 0,1%, 1%, 5%, 10%, 90%, 95%, 99% e 99,9%.



Diferença relativa na estimativa das pressões extremas, a partir da metodologia proposta por Teixeira (2003) e ajuste 2 proposto no presente trabalho, e amostra coletada no modelo da UHE São Manoel referente às probabilidades de não excedência de 1%, 5%, 10%, 90%, 95% e 99%.



ANEXO A – Ensaio UHE Santo Antônio e UHE São Manoel

Registro fotográfico dos ensaios experimentais realizados no modelo bidimensional da UHE Santo Antônio cedido por Souza (2012)

UHE Santo Antônio, 1:50. $Q = 444 \text{ l/s}$, $Fr.1 = 1,70$ (Fonte: Souza, 2012):



UHE Santo Antônio, 1:50. $Q = 325 \text{ l/s}$, $Fr.1 = 2,90$ (Fonte: Souza, 2012):



UHE Santo Antônio, 1:50. $Q = 276 \text{ l/s}$, $Fr.1 = 3,16$ (Fonte: Souza, 2012):



UHE Santo Antônio, 1:50. $Q = 227$ l/s, $Fr_1 = 3,69$ (Fonte: Souza, 2012):



UHE Santo Antônio, 1:50. $Q = 175$ l/s, $Fr_1 = 4,38$ (Fonte: Souza, 2012):



UHE Santo Antônio, 1:50. $Q = 122$ l/s, $Fr_1 = 5,22$ (Fonte: Souza, 2012):



UHE Santo Antônio, 1:50. $Q = 70,5$ l/s, $Fr_1 = 7,73$ (Fonte: Souza, 2012):



Registro fotográfico dos ensaios experimentais realizados no modelo bidimensional da UHE São Manoel cedido por LAHE/FURNAS

UHE São Manoel, 1:60. $Q = 182,3$ l/s, $Fr_1 = 3,07$, $S = 1,16$ (Fonte: LAHE/FURNAS):



UHE São Manoel, 1:60. $Q = 142,6$ l/s, $Fr_1 = 3,21$, $S = 1,07$ (Fonte: LAHE/FURNAS):

