

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

Pedro Ernesto de Albuquerque e Souza

BACIAS DE DISSIPACÃO POR RESSALTO
HIDRÁULICO COM BAIXO NÚMERO DE FROUDE –
ANÁLISE DAS PRESSÕES JUNTO AO FUNDO DA
ESTRUTURA

Porto Alegre

2012

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

Pedro Ernesto de Albuquerque e Souza

BACIAS DE DISSIPACÃO POR RESSALTO
HIDRÁULICO COM BAIXO NÚMERO DE FROUDE –
ANÁLISE DAS PRESSÕES JUNTO AO FUNDO DA
ESTRUTURA

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

Orientador: Prof. Marcelo Giulian Marques

Porto Alegre

2012

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.

Área de Concentração:

Hidráulica

Professor Orientador:

Prof. Dr. Marcelo Giulian Marques (IPH/UFRGS)

Banca Examinadora:

Eder Daniel Teixeira

Luiz Augusto de Magalhães Endres

Luiz Rafael Palmier

Maurício Dai Prá

Data da defesa: 31 de agosto de 2012.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Professor Marcelo Giulian Marques, pelos ensinamentos, troca de experiência e confiança passada.

A equipe técnica do LAHE: Jair Carneiro Freitas, Gilvan Carneiro Freitas e Wellington Dantas, que trabalharam na coleta de dados.

Ao Programa de Pós-Graduação de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Ao Laboratório de Hidráulica Experimental (LAHE) – ELETROBRAS – FURNAS, pela estrutura oferecida para a realização deste trabalho.

Aos colegas de trabalho e pesquisa Engenheiros Cassius Palauro e Edgar Trierweiler Neto, pela amizade e ensinamentos durante minha moradia no Rio Janeiro.

A minha família, que sempre deu suporte para que eu sempre terminasse este trabalho.

E finalmente a Fabiana, por seu carinho e compreensão durante a confecção deste trabalho.

RESUMO

Atualmente, está se tornando cada vez mais usual, na engenharia brasileira e internacional, aproveitamentos hidroelétricos com baixa queda e elevada vazão específica, resultando em um escoamento na entrada do dissipador de energia hidráulica com baixos números de Froude (Fr_1). Os aproveitamentos da UHE Santo Antonio, da UHE Jirau e da AHE Belo Monte pertencem a essa classe e se encontram atualmente em fase de construção. Tendo em vista que, até recentemente, eram raros os casos de bacias de dissipação por ressalto hidráulico projetadas com baixo número de Froude, menor que 4,5, para esses casos, a literatura especializada não oferece estudos específicos sobre o comportamento da dissipação de energia nem das características da distribuição longitudinal de pressão.

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo explorar a faixa em que o número de Froude, na entrada da bacia de dissipação, é inferior a 5. Além disso, também pretende complementar os gráficos disponíveis para auxiliar o dimensionamento de vertedouros de baixa queda, bem como verificar se as considerações já existentes para os casos em que o número de Froude é maior que 4,5 podem ou não ser adotadas para prever os valores de pressão junto ao fundo de bacias de dissipação.

Como resultados finais desta pesquisa são apresentados os gráficos, nos quais foram inseridos os casos analisados para baixa queda e número de Froude anteriormente especificados.

O estudo foi experimental, utilizando-se a técnica da modelação física. Foi utilizado o modelo de detalhe do vertedouro da UHE Santo Antonio na escala 1:50, obedecendo o critério de escala proposto por Froude.

Os resultados deste trabalho se mostraram satisfatórios, tendo em vista que acrescentaram mais resultados experimentais a gráficos conhecidos e trouxeram novas tendências que possivelmente estão somente presentes em aproveitamentos de baixa queda e elevada vazão específica.

Palavras-Chave: Baixo Número de Froude, Bacia de Dissipação, Ressalto Hidráulico.

ABSTRACT

Currently, is becoming increasingly common in the Brazilian and international engineering hydroelectric developments with low head and high specific flow rate, resulting in a flow with low Froude number at the energy dissipator entrance. The hydroelectric power plants (HPP) of Santo Antonio, Jirau and Belo Monte belongs to this case and are currently under construction. Considering that until recently the cases of stilling basins designed for hydraulic jump with low Froude number (less than 4.5) have been rare, the specialized literature offer no specific studies on the energy dissipation behavior or on the characteristics of the longitudinal distribution pressure.

This work aims to specifically explore the range in which the Froude number (Fr_1) at the dissipation basin entrance is less than 5. Furthermore, it also intends to supplement the available graphs to assist the design of low-drop spillways and verify that the considerations made for Froude numbers greater than 4.5 can be adopted to predict pressure values on the bottom of the dissipation basin (stilling basin).

The final results of this research are presented in graphs, in which were inserted the analyzed cases of low-head and low Froude number as specified above.

The experimental study was made using the physical modeling technique. A 1:50 scale model of the spillway of HPP Santo Antonio was used according to the criterion proposed by Froude.

The results were satisfactory, considering that they added more experimental results to the known graphs and brought new trends that are likely to be present at low head hydroelectric power plants and high specific flow.

Key-Words: Low Froude Number, Stilling Basin, Hydraulic Jump.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	1
1.2	OBJETIVO GERAL	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	ASPECTOS GERAIS DA DISSIPACÃO DE ENERGIA	5
2.2	DESCRIÇÃO DO RESSALTO HIDRÁULICO	6
2.3	DETERMINAÇÃO DE ALTURAS CONJUGADAS	6
2.4	CLASSIFICAÇÃO DO RESSALTO QUANTO AO NÚMERO DE FROUDE (Fr_1)	10
2.5	CLASSIFICAÇÃO DO RESSALTO QUANTO AO GRAU DE AFOGAMENTO	11
2.6	ESFORÇOS ATUANTES JUNTO AO FUNDO DE BACIAS DE DISSIPACÃO POR RESSALTO HIDRÁULICO	12
3	MATERIAL E MÉTODOS	33
3.1	MODELO DE DETALHE DO VERTEDOURO	33
3.2	CANAL EXPERIMENTAL	36
3.3	ALIMENTAÇÃO	37
3.4	MEDIÇÕES DE VAZÃO	38
3.5	MEDIÇÕES DE NÍVEL DE ÁGUA	39
3.6	TRANSDUTORES DE PRESSÃO	41
3.6.1	AFERIÇÃO DE TRANSDUTORES	41
3.6.2	TEMPO DE AMOSTRAGEM E FREQUÊNCIA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	42
3.7	ABERTURAS PARCIAIS DE COMPORTA	42
3.8	CARACTERÍSTICAS DOS ENSAIOS	44
3.8.1	ESCOLHA DE SÉRIE DE VAZÕES	44
3.8.2	DETERMINAÇÃO DE ALTURAS CONJUGADAS	50
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS DE ENSAIO	52
4.1	ANÁLISE DA PRESSÃO MÉDIA JUNTO AO FUNDO DO RESSALTO HIDRÁULICO	53
4.2	FLUTUAÇÃO DE PRESSÃO	55
4.3	ANÁLISE DO COEFICIENTE DE ASSIMETRIA (Ad)	61
4.4	ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO LONGITUDINAL DO COEFICIENTE DE CURTOSE (K)	62
4.5	COEFICIENTE ESTATÍSTICO (N)	64
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	67
6	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS POSTERIORES	69
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Vertedouro principal da UHE Santo Antonio: restituição da vazão ao leito natural do Rio Madeira, visto de jusante para montante, vazão 8450m ³ /s ($Fr_1:1,34$).....	3
Figura 1.2: Modelo de detalhe do vertedouro da UHE Santo Antonio; $Fr_1:2,90$;.....	4
Figura 2.1: Ressalto hidráulico na bacia de dissipação do vertedouro da UHE Santo Antonio: vazão em 10 vãos de aproximadamente 35.000m ³ /s.....	5
Figura 2.2: Esquema de um ressalto hidráulico com baixo número de Froude.	7
Figura 2.3: Ressalto hidráulico em modelo reduzido: vazão em 2,5 vãos de 444 l/s; $Fr_1:1,70$; $Y_1:0,37m$; abertura livre.....	7
Figura 2.4: Classificação do Ressalto Hidráulico formado a jusante de um vertedouro (Hager, 1988).	11
Figura 2.5: Flutuação de pressão adimensionalizada em relação à distância de início do ressalto (X) e à altura conjugada rápida (Y_1) (Khader & Elango, 1974).....	15
Figura 2.6: Flutuação de pressão adimensionalizada em relação à distância de início do ressalto (X) e à altura conjugada rápida (Y_1) (Lopardo, 1986).....	17
Figura 2.7: Flutuação de pressão adimensionalizada em relação à distância de início do ressalto (X) e à altura conjugada na entrada do ressalto hidráulico (Y_1) (Endres, 1990).....	19
Figura 2.8: Posição (X/Y_1) relativa ao $C_{pmáx}$ em função do número de Froude (Fr_1) - adaptado de Drapeau (1994).	19
Figura 2.9: $C_{pmáx}$ em função do número de Froude (Fr_1) - adaptado de Drapeau (1994).	20
Figura 2.10: Pressão média adimensionalizada a partir da posição relativa do início do ressalto hidráulico e das alturas conjugadas junto ao fundo de bacia de dissipação (Marques et al., (1997). ..	21
Figura 2.11: Desvio Padrão adimensionalizado a partir da posição relativa do início do ressalto hidráulico e das alturas conjugadas junto ao fundo de bacia de dissipação (Marques et al., 1997).....	22
Figura 2.12: Distribuição longitudinal da pressão media para os dados de Marques (1995) e ajustes propostos por Teixeira (2003).	24
Figura 2.13: Distribuição longitudinal do desvio padrão da amostra de pressão para os dados de Marques (1995) e ajustes propostos por Teixeira (2003).	24
Figura 2.14: $C_{pmáx}$ em função do número de Froude (Fr_1) (Marques et al. (2004c).	26
Figura 2.15: Posição (X/Y_1) relativa ao $C_{pmáx}$ em função do número de Froude (Fr_1) (Marques et al., 2004c).....	26
Figura 2.16: Variação do coeficiente de flutuação de pressão (C_p) em função do número de Froude para ressaltos hidráulicos submergidos formados a jusante de uma comporta, $S^* = 0,3$ (Lopardo et al., (2004b).	27
Figura 2.17: Variação do coeficiente de flutuação de pressão (C_p) em função do fator de submergência (S^*) para ressaltos hidráulicos formados a jusante de uma comporta, $Fr_1 = 3,0$ (Lopardo et al., 2004b).	28
Figura 2.18: Coeficiente de flutuação de pressão (C_p) (Dai Prá, 2011).....	30
Figura 2.19: Coeficiente de assimetria (Dai Prá, 2011).	31
Figura 2.20: Coeficiente de curtose (Dai Prá, 2011).....	31

Figura 3.1: Modelo de detalhe do vertedouro da UHE Santo Antonio - escala 1:50. (vista superior)...	33
Figura 3.2: Modelo de detalhe do vertedouro da UHE Santo Antonio - escala 1:50. (vista lateral).	34
Figura 3.3: Disposição dos transdutores de pressão na bacia de dissipação do modelo do vertedouro.	35
Figura 3.4: Disposição dos transdutores de pressão na bacia de dissipação do modelo do vertedouro. (Dimensões em escala de protótipo).	35
Figura 3.5: Comporta plana na extremidade de jusante do canal experimental.	36
Figura 3.6 Tranquilização na entrada do canal experimental.	36
Figura 3.7: Casa de bombas do reservatório de nível constante e tubulação.....	37
Figura 3.8: Medidor de vazão usado neste estudo.	38
Figura 3.9: Régua linimétrica e poço de medição usados neste estudo.....	40
Figura 3.10: Régua linimétrica móvel de medição usada neste estudo.	40
Figura 3.11: Transdutores de pressão instalados no fundo da bacia de dissipação.....	41
Figura 3.12: Gabarito metálico para imposição de abertura parcial.	42
Figura 3.13. Croqui de gabarito para imposição de abertura parcial de comporta. Medidas de protótipo.....	43
Figura 3.14. Distância entre o perfil do vertedouro e a parte inferior da comporta (Go).	43
Figura 3.15: Principais grandezas dos ensaios realizados.	47
Figura 3.16: Situação 1; Vazão: 444 l/s; Fr_1 :1,70; Y_1 :0,19m; Abertura Livre.....	48
Figura 3.17: Situação 2; Vazão: 325 l/s; Fr_1 : 2,90; Y_1 : 0,11m; Abertura Go: 0,18m.....	48
Figura 3.18: Situação 3; Vazão: 276 l/s; Fr_1 : 3,16; Y_1 : 0,09m; Abertura Go:0,15m.....	49
Figura 3.19: Situação 4; Vazão 227 l/s; Fr_1 : 3,69; Y_1 : 0,07m Abertura Go:0,12m.....	49
Figura 3.20: Situação 5; Vazão: 175 l/s; Fr_1 : 4,38; Y_1 : 0,05; Abertura Go: 0,09m.....	49
Figura 3.21: Situação 6; Vazão: 122 l/s; Fr_1 : 5,22; Y_1 : 0,04m Abertura Go: 0,06m.....	50
Figura 3.22: Situação 7; Vazão: 70 l/s; Fr_1 : 7,73; Y_1 : 0,02m Abertura Go: 0,03m.....	50
Figura 4.1: Pressões médias adimensionalizadas em comparação entre o presente estudo e resultados de outros autores.....	53
Figura 4.2: Situação 1; Vazão: 444 l/s; Fr_1 : 1,70; Y_1 : 0,19m; Abertura Livre; Lâmina de água sob os transdutores de pressão.....	55
Figura 4.3: Flutuações de pressão adimensionalizadas em comparação entre o presente estudo e resultados de outros autores.....	56
Figura 4.4 Coeficientes de pressão (C_p) de diferentes autores em comparação com o presente estudo.....	57
Figura 4.5: Comparativo do coeficiente de flutuação de pressão (C_p) por faixa de número de Froude unitária.....	58
Figura 4.6: Situação 7; Vazão 70 l/s; Fr_1 : 7,73; Y_1 : 0,02m Abertura Go: 0,03m, comprimento sugerido do ressalto hidráulico.	59
Figura 4.7: Coeficiente de flutuação de pressão ($C_{p_{máx}}$) em comparação com outros autores.	59
Figura 4.8: Coeficiente de flutuação de pressão ($C_{p_{máx}}$) tendências observada e esperada.	60

Figura 4.9: Comparação entre a posição da máxima flutuação de pressão adimensionalizada conforme o coeficiente de flutuação de pressão (C_p).....	60
Figura 4.10: Coeficientes de assimetria (A_d) em comparação entre o presente estudo e os resultados de outros autores.	62
Figura 4.11: Coeficientes de curtose em comparação entre o presente estudo e os resultados de outros autores.....	63
Figura 4.12: Distribuição longitudinal do coeficiente estatístico (N) em função da posição relativa ao início do ressalto hidráulico.	65
Figura 4.13: Coeficiente estatístico do ressalto hidráulico clássico (Tipo A): probabilidade de não excedência de 0,1%.	66
Figura 4.14: Coeficiente estatístico do ressalto hidráulico clássico (Tipo A): probabilidade de não excedência de 1,0%.	66

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.1: Barragens brasileiras com elevadas vazões específicas e número de Froude menor que 5,0 - adaptado de Tamada (1989) e Mess (2008).	2
Tabela 2.1: Relação entre as alturas conjugadas para canal retangular com fundo plano (Elevatorski, 1959 e Bhutto et al., 1989).	8
Tabela 3.1: Relações das escalas de Froude usadas neste trabalho.	33
Tabela 3.2: Características do modelo reduzido do vertedouro do AHE Santo Antonio.	34
Tabela 3.3: Características do canal experimental do vertedouro do AHE Santo Antonio	37
Tabela 3.4: Comparação entre dois métodos de medição de vazão.....	39
Tabela 3.5: Resumo das dimensões para confecção de gabaritos de abertura parcial.....	44
Tabela 3.6: Relação de faixas de Froude (Fr_1) ensaiadas por diferentes autores, com ressalto livre ($S=1,0$) ou tipo A.	45
Tabela 3.7: Situações ensaiadas neste estudo: dados em escala de modelo.	47
Tabela 3.8: Posições adimensionalizadas apresentadas neste trabalho.	51
Tabela 4.1: Intervalo de Fr_1 ensaiado por autores que utilizaram a adimensionalização proposta por Marques <i>et al.</i> (1997) e inclusos neste estudo.	52

LISTA DE SÍMBOLOS

A_d	Coeficiente de assimetria
b	Largura do canal [L]
C_p	Coeficiente adimensional de flutuação de pressão
$C_{p\text{ máx}}$	Valor máximo do coeficiente de flutuação de pressão
f	Frequência [T^{-1}]
F	Função de diferentes variáveis
Fr_1	Número de Froude na seção inicial do ressalto hidráulico
Fr_2	Número de Froude na seção final do ressalto hidráulico
FURNAS	Furnas Centrais Elétricas S.A.
f_v	Frequência de formação de vórtices [T^{-1}]
g	Aceleração gravitacional [LT^{-2}]
H_t	Perda de energia total no ressalto hidráulico [L]
k	Coeficiente de curtose
LAHE	Laboratório de Hidráulica Experimental e Recursos Hídricos de FURNAS
N	Coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades
$N_{just.}$	Nível de jusante [L]
$N_{mont.}$	Nível de montante [L]
P_x	Pressão média em posição adimensionalizada X
$P_{\%}$	Pressão com diferentes probabilidades de ocorrência [L]
PVC	Policloreto de vinila
q	Vazão específica [L^2T^{-1}]
Re_1	Número de Reynolds na seção inicial do ressalto hidráulico
S	Fator de submergência proposto por Marques <i>et al.</i> (1999)
t	Tempo [T]
T_1	Transdutor de 1 a 4 presentes neste trabalho
T_W	Lâmina d'água a jusante do ressalto hidráulico [L]
V_1	Velocidade média na seção de início do ressalto hidráulico [LT^{-1}]
V_2	Velocidade média na seção final do ressalto hidráulico [LT^{-1}]
X	Distância horizontal a partir do início do ressalto hidráulico [L]

- $X_{Cpm\acute{a}x}$ Posi\c7\~ao longitudinal adimensionalizada do m\~aximo valor do coeficiente de flutua\c7\~ao de press\~ao
- Y_1 Altura conjugada r\~apida do ressalto hidr\~aulico [L]
- Y_2 Altura conjugada lenta do ressalto hidr\~aulico [L]

SÍMBOLOS GREGOS

X	Relação entre a distância horizontal a partir do início do ressalto hidráulico e o comprimento do rolo
$\Delta\Omega_s$	Diferença relativa entre o desvio padrão adimensionalizado do ressalto hidráulico submergido e do ressalto hidráulico livre
$\Delta\Psi_s$	Diferença relativa entre as pressões adimensionalizadas do ressalto hidráulico submergido e do ressalto hidráulico livre
Γ	Distância longitudinal a partir do início do ressalto adimensionalizada em função das diferenças das alturas conjugadas
γ	Peso específico [$ML^{-2}T^{-2}$]
λ_L	Relação de escala geométrica
λ_t	Relação de escala temporal
λ_v	Relação de escala de velocidades
ν	Viscosidade cinemática da água [L^2T^{-1}]
ρ	Massa específica da água [ML^{-3}]
σ_L	Desvio padrão referente ao ressalto hidráulico livre
σ_s	Desvio padrão referente ao ressalto hidráulico submergido
σ_x	Desvio padrão da amostra de pressão em uma determinada posição X do ressalto hidráulico [L]
Ω	Desvio padrão adimensionalizado em função dos parâmetros hidráulicos do escoamento para o ressalto hidráulico livre
Ω_s	Desvio padrão adimensionalizado em função dos parâmetros hidráulicos do escoamento para o ressalto hidráulico submergido
Ψ	Pressão média adimensionalizada em função dos parâmetros hidráulicos do escoamento para o ressalto hidráulico livre
Ψ_C	Pressão média adimensionalizada próxima a comporta
Ψ_s	Pressão média adimensionalizada em função dos parâmetros hidráulicos do escoamento para o ressalto hidráulico submergido

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Gerais

A dissipação de energia hidráulica a jusante de um aproveitamento hidrelétrico tem como objetivo fazer com que a vazão, ao ser restituída ao leito natural, se faça de uma forma mais próxima possível das condições naturais, antes da construção do aproveitamento hidrelétrico. Assim sendo, é necessário que a energia em excesso criada pela execução da obra se dissipe de uma forma adequada, sem que provoque danos à estrutura (elevação, vibrações na estrutura, erosões ou cavitação nas lajes) ou a jusante da mesma (erosões excessivas no leito do rio), que coloquem em perigo a obra.

A dissipação de energia é uma transformação parcial da energia potencial da água em energia de turbulência e, em seguida, em calor. Para provocar esse fenômeno, são projetadas estruturas diversas, escolhendo-se, para cada caso, a estrutura mais adequada sob o ponto de vista hidráulico e econômico.

Grande parte da bibliografia encontrada no meio técnico aborda casos em que o número de Froude, na entrada do dissipador, encontra-se acima de 4,5. Essas características são bastante comuns a aproveitamentos hidroelétricos de grande queda e baixa vazão específica. Sendo que tais características anteriormente listadas são encontradas em abundância em vários projetos no Brasil. Porém, o crescimento econômico do Brasil tornou necessária a construção de aproveitamentos em locais de baixa queda e elevada vazão específica, como ocorre na Bacia Amazônica e suas proximidades.

A Tabela 1.1 apresenta a relação de alguns aproveitamentos hidroelétricos com vazão específica próxima a $100 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ e baixo número de Froude na entrada da bacia de dissipação. Neste momento é importante salientar que alguns aproveitamentos citados têm o ressalto afogado à jusante do vertedouro na bacia de dissipação.

Tabela 1.1: Barragens brasileiras com elevadas vazões específicas e número de Froude menor que 5,0 - adaptado de Tamada (1989) e Mess (2008).

NOME	Rio	Estado	Vazão Específica máxima (m³/s/m)	Fr₁
Porto Primavera	Paraná	Mato Grosso do Sul e São Paulo	220,0	1,4
Rosana	Paranapanema	São Paulo e Paraná	176,0	1,5
Coracy 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 Antonio	Madeira	Rondônia	187,2	3,5
Funil	Grande	Minas Gerais	147,1	3,6
Aimorés	Doce	Minas Gerais	92,6	3,7
Nova Avanhandava	Tietê	São Paulo	104,4	3,7
Belo Monte	Xingu	Pará	86,7	4,5

A Tabela 1.1 mostra, em relação crescente do número de Froude, as usinas em fase de construção na Bacia Amazônica (Jirau, Santo Antonio e Belo Monte) no contexto de outros empreendimentos já em operação no Brasil.

1.2 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral analisar o comportamento da distribuição de pressão junto ao fundo da bacia de dissipação por ressalto hidráulico com baixo número de Froude. Entende-se como baixo número a faixa de escoamentos com número de Froude na entrada do ressalto hidráulico menor que 4,5.

Para alcançar este objetivo foi necessário efetuar as seguintes atividades e objetivos secundários:

- Adaptar o vertedouro da UHE Santo Antonio (Figura 1.1) em uma estrutura de modelagem física (escala 1:50) para permitir a realização dos ensaios com números de Froude entre 1,7 a 7,73;
- Desenvolver pesquisa bibliográfica sobre bacias de dissipação por ressalto hidráulico com baixo número de Froude;

- Instrumentar o modelo físico com transdutores de pressão;
- Calibrar os transdutores de pressão;
- Realizar ensaios em modelo físico hidráulico;
- Analisar os dados em relação à distribuição longitudinal das pressões médias, flutuações de pressão, coeficientes de assimetria e de curtose e dos parâmetros de probabilidade para pressões com diferentes probabilidades.

Por fim, neste trabalho pretende-se pesquisar esses casos e os conduzir no sentido de complementar os estudos já conhecidos, acrescentando alguns pontos na zona de baixo número de Froude.

Em muitos casos, a utilização de bacias de dissipação por ressalto hidráulico pode tornar obras inviáveis sob o ponto de vista econômico, tornando-se excessivamente caras. Por esse motivo, será explorada a utilização de uma estrutura compacta (bacia curta), de custo proporcionalmente menor, que pode viabilizar uma obra, porém são necessários cuidados especiais no controle da dissipação, pois geralmente também resultam nestes casos dissipadores de baixo rendimento e grande agitação, havendo necessidade de se dar atenção adequada à proteção a jusante da estrutura e taludes a jusante da barragem e das margens do rio.



Figura 1.1: Vertedouro principal da UHE Santo Antonio: restituição da vazão ao leito natural do Rio Madeira, visto de jusante para montante, vazão $8450\text{m}^3/\text{s}$ ($Fr_1:1,34$).

Para a efetivação do trabalho experimental, foram utilizados diferentes equipamentos e instalações adequados para esse tipo de desenvolvimento. Esta

estrutura faz parte do Núcleo de Estudos do Rio Madeira, situado na Subestação São José de Eletrobrás Furnas, em Belford Roxo, no estado do Rio de Janeiro.

Fazem parte desta estrutura os seguintes modelos reduzidos:

- Modelo de Conjunto escala - 1:80;
- Modelo de detalhe do Circuito de Geração - escala 1:40 e
- Modelo de detalhe do Vertedouro - escala 1:50 (utilizado neste trabalho).

Finalmente cabe salientar que este estudo foi desenvolvido no modelo físico de detalhe do vertedouro da UHE Santo Antonio, com escala de 1:50, conforme ilustrado pela Figura 1.2.



Figura 1.2: Modelo de detalhe do vertedouro da UHE Santo Antonio; Fr_1 : 2,90;

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Aspectos Gerais da Dissipação de Energia

As barragens são estruturas hidráulicas de grande porte projetadas para o controle de grande volume de água. Na base dessas estruturas, a quantidade de energia é extremamente elevada, sendo necessário, através de algum mecanismo, transformar essa energia em calor, de tal forma que a energia residual não venha a comprometer a segurança da obra.

O processo de dissipação de energia por ressalto hidráulico (Figura 2.1) consiste na transformação de grande parte da energia cinética, na base da estrutura, em turbulência, que, por sua vez, se dissipa por ação da viscosidade. A bacia de dissipação construída na base do perfil do vertedouro tem a função de receber essa energia, dissipar o excesso e proporcionar condições de escoamento adequadas ao canal de restituição, ou mesmo ao leito natural do rio.



Figura 2.1: Ressalto hidráulico na bacia de dissipação do vertedouro da UHE Santo Antonio: vazão em 10 vãos de aproximadamente 35.000m³/s.

A dissipação de energia no ressalto hidráulico se processa sempre acompanhada de intensas flutuações, tanto de pressão como de nível na superfície livre do escoamento. Essas flutuações atuam sobre lajes, muros e demais partes da estrutura. Em se tratando de casos de dissipação de energia de barragens de baixa queda e elevada vazão específica, onde o número de Froude (Fr_1) varia entre 1,5 e

4,5, o controle de ondas geradas no processo de dissipação torna-se extremamente difícil, e geralmente com pequeno acréscimo na extensão da estrutura não traz nenhum benefício, havendo mesmo necessidade de contar com a participação do próprio canal de restituição para dissipar parte da energia.

Por exemplo, um vertedouro de baixa queda pode gerar fortes flutuações de nível, que se propagam para jusante da estrutura, havendo, portanto, necessidade de se tomar medidas adequadas para proteger os taludes da barragem e das margens. Isso se explica pela própria característica do fenômeno da turbulência, cuja estrutura é constituída de uma sucessão de turbilhões, movendo-se uns dentro dos outros. Em vista desse movimento turbilhonar, pode-se notar a existência simultânea de flutuações de velocidade, de pressão e de nível.

Assim, as ações dinâmicas do escoamento sobre as fronteiras que o contêm, podem provocar, em determinadas condições, danos (elevação de lajes, erosões, cavitação, vibrações) estruturais importantes. Por isso, é fundamental o conhecimento das características estatísticas das flutuações de pressão nas estruturas, na zona do ressalto hidráulico.

2.2 Descrição do Ressalto Hidráulico

Os estudos sobre o ressalto hidráulico remontam ao século XVIII. Sendo a quantidade de material disponível bastante extensa, esta revisão bibliográfica se limitará a executar um breve relato das principais características inerentes ao fenômeno e que de certa maneira influenciam sobremaneira na sua avaliação geral, principalmente as ligadas à distribuição longitudinal de pressões. Inicialmente os estudos enfocavam a descrição das características externas, enquanto que nas últimas décadas tem crescido o interesse na avaliação das características internas desse tipo de escoamento e principalmente das flutuações de pressão junto ao fundo do canal.

2.3 Determinação de Alturas Conjugadas

O ressalto corresponde a uma brusca elevação do nível de água, passando do regime rápido (supercrítico ou torrencial) para o regime lento (subcrítico ou fluvial)

com grande agitação e conseqüente perda de energia, conforme esquematizado nas Figura 2.2 e Figura 2.3.

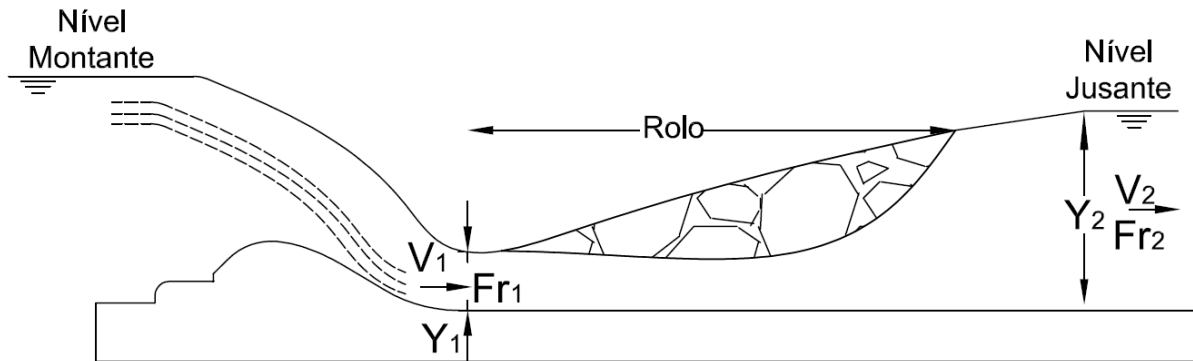


Figura 2.2: Esquema de um ressalto hidráulico com baixo número de Froude.



Figura 2.3: Ressalto hidráulico em modelo reduzido: vazão em 2,5 vãos de 444 l/s; Fr_1 : 1,70; Y_1 : 0,37m; abertura livre.

O ressalto é caracterizado pelas alturas ou profundidades Y_1 e Y_2 imediatamente anterior e posterior a formação do ressalto (alturas conjugadas), sendo a profundidade Y_1 correspondente ao escoamento supercrítico ou altura rápida, e a profundidade Y_2 , ao escoamento subcrítico ou altura lenta. Analogamente às alturas conjugadas, é usual utilizar as mesmas nomenclaturas para as velocidades médias (V_1 e V_2) e para os números de Froude (Fr_1 e Fr_2). O número de Froude é obtido pela equação 2.1:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot Y}} = \frac{V}{c} \quad 2.1$$

Sendo:

V = velocidade média do escoamento;

g = aceleração da gravidade;

Y = altura ou profundidade do escoamento e

c = celeridade do escoamento.

As alturas conjugadas constituem importante fator na descrição do ressalto hidráulico, influenciando na determinação do tipo de ressalto e de características como da dissipação de energia ao longo do escoamento. Teixeira (2003) e Trierweiler (2006) apresentam uma série de trabalhos que estabeleceram relações para o cálculo das alturas conjugadas (Tabela 2.1).

Tabela 2.1: Relação entre as alturas conjugadas para canal retangular com fundo plano (Elevatorski, 1959 e Bhutto et al., 1989).

Autor	Ano	Equação
Bidone	1820	$Y_2 - Y_1 = \frac{V_1^2 - V_2^2}{2g}$
Bélanger	1828	$\frac{Y_2}{Y_1} = \frac{1}{2} \times \left[\sqrt{1 + 8 \times Fr_1^2} - 1 \right]$ $\frac{Y_1}{Y_2} = \frac{1}{2} \times \left[\sqrt{1 + 8 \times Fr_2^2} - 1 \right]$
Andrew	1928	$Y_2 = \frac{(V_1)^2}{2g} \pm \left[\left(\frac{(V_1)^2 Y_1}{g} \right) \left(\frac{(V_1)^2}{2g} \right)^2 \right]^{1/2}$
Unwin	1928	$Y_2 = \pm \left[\frac{2Y_1 (V_1)^2}{g} + \frac{(Y_1)^2}{4} \right]^{1/2} - \frac{Y_1}{2}$
Silvester	1964	$\left(\frac{Y_2}{Y_1} \right)^2 = 1 + 2Fr_1^2 \left[1 - \left(\frac{Y_1}{Y_2} \right) \right]$
Rajaratnam	1965	$\left(\frac{Y_2}{Y_1} \right)^3 - \left(\frac{Y_2}{Y_1} \right) (1 - K_1 + 2Fr_1^2) + 2Fr_1^2 = 0$
Leutheusser & Kartha	1972	$Fr_1^2 = \frac{\frac{Y_2}{Y_1} \left[\left(\frac{Y_2}{Y_1} \right)^2 \right] - 1}{2,06 \left[\left(\frac{Y_2}{Y_1} \right) - 1 \right] - 0,0244 \left(\frac{Y_2}{Y_1} \right)^2}$

Autor	Ano	Equação
Merriman	1984	$Y_2 = \pm \left(\frac{Y_1 (V_1)^2}{g} \right)^{1/2}$
Hager & Bremen	1989	$Y^* = Y_0 \left[1 - 3,25 \omega e^{(Fr_1/7)} (\log Re_1)^{-3} \right]$ $Y_0 = \frac{Y_2}{Y_1} \left[1 - 0,7 (\log Re_1)^{-2,5} e^{Fr_1/8} \right]$ $\omega = \frac{Y_1}{b}$
Ohtsu & Yasuda	1994	$\left(\frac{Y_2}{Y_1} \right)^3 - \{ 2Fr_1^2 + 1 - S_f \} \left(\frac{Y_2}{Y_1} \right) + 2Fr_1^2 = 0$ $S_f = 0,12 (Fr_1 - 1)^2$

Entretanto, não existe um consenso quanto à relação mais adequada, sendo que a mais utilizada é a relação estabelecida por Bélanger (1828) (equação 2.2).

$$\frac{Y_2}{Y_1} = \frac{1}{2} \cdot \left[\sqrt{1 + 8 \cdot Fr_1^2} - 1 \right] \qquad \frac{Y_1}{Y_2} = \frac{1}{2} \cdot \left[\sqrt{1 + 8 \cdot Fr_2^2} - 1 \right] \qquad 2.2$$

Sendo:

Y_1 = altura conjugada rápida a montante do ressalto (entrada do ressalto);

Y_2 = altura conjugada lenta a jusante do ressalto (saída do ressalto);

Fr_1 = número de Froude correspondente a Y_1 e

Fr_2 = número de Froude correspondente a Y_2 .

Destacam-se que na equação de Bélanger (Equação 2.2) são consideradas as seguintes hipóteses:

- Canal de seção transversal retangular;
- Fundo do canal horizontal;
- escoamento permanente e fluido incompressível;
- Distribuição uniforme de velocidade imediatamente a montante e a jusante das seções de controle;

- Ausência de força devido à viscosidade e
- Distribuição hidrostática de pressão nas seções de controle.

Como tais hipóteses se aproximam das condições de ensaio do presente estudo, foi utilizada a equação de Bélanger para a determinação da altura conjugada lenta (Y_2) do ressalto hidráulico. A altura conjugada rápida foi medida durante o ensaio (esses procedimentos serão detalhados no capítulo 3 deste trabalho).

2.4 Classificação do Ressalto Quanto ao Número de Froude (Fr_1)

Os escoamentos de superfície livre são governados, principalmente, por forças de origem gravitacionais. Desta forma um aspecto bastante relevante para a classificação do ressalto hidráulico é o número de Froude na entrada do ressalto hidráulico (Fr_1).

Abaixo é descrita a classificação do ressalto em função do número de Froude na entrada do ressalto hidráulico (Fr_1), feita por Peterka (1974) e Silvestre (1979).

- **$Fr_1 \leq 1$:** O regime é subcrítico ou crítico, logo não é possível a ocorrência do fenômeno ressalto hidráulico.
- **$1,2 \leq Fr_1 < 1,7$:** Pequenas diferenças nas alturas conjugadas - ocorrem pequenas oscilações na superfície: desta forma não é possível caracterizar o ressalto. Tais oscilações se assemelham com uma onda estacionária e não com um ressalto estável, também classificado como falso ressalto ou ondulado.
- **$1,7 \leq Fr_1 < 2,5$:** Observa-se que existe uma série de pequenos rolos se desenvolvem na superfície, essa forma é conhecida como pré-ressalto. O pré-ressalto pode ser facilmente encontrado em vertedouros de baixa e elevada vazão específica. Sua dissipação de energia ou perda de carga no ressalto é baixa, próxima de 20% menor do que a entrada.
- **$2,5 \leq Fr_1 < 4,5$:** O ressalto hidráulico já apresenta limites mais definidos, mas é instável e gera pulsações não-periódicas, que se propagam para jusante com amplitude quase que constante por um comprimento muito grande. O ressalto hidráulico neste caso é conhecido como ressalto oscilante ou fraco.
- **$4,5 \leq Fr_1 < 10$:** O ressalto hidráulico é bem estabilizado, sendo conhecido como ressalto estável, estacionário ou verdadeiro. A energia dissipada está entre 45% e 70% da energia de entrada.

- **$Fr_1 \geq 10,0$:** O ressalto hidráulico adquire dimensões maiores: esta forma é conhecida como ressalto forte. O ressalto hidráulico apresenta uma intensa formação de vórtices, emulsionamento de ar, agitação da superfície e jatos de alta turbulência se propagam para jusante por uma longa distância. A perda de energia é alta e pode alcançar 85% da energia de entrada.

2.5 Classificação do Ressalto Quanto ao Grau de Afogamento

Outro aspecto bastante importante ao se classificar o ressalto hidráulico é seu grau de afogamento ou o local de início de sua formação em relação à estrutura. A Figura 2.4 apresenta a classificação do ressalto hidráulico formado a jusante de canais com mudança de declividade ou vertedouro.

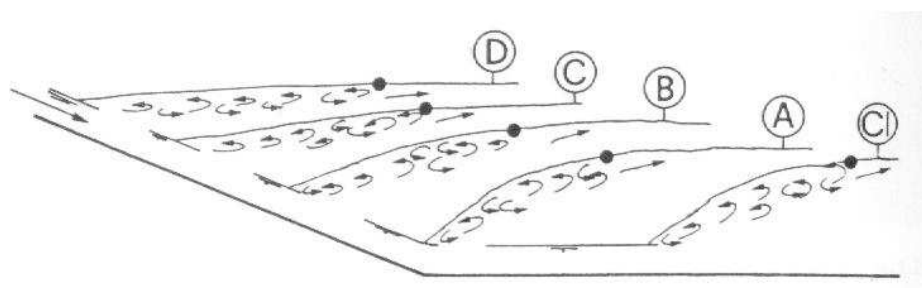


Figura 2.4: Classificação do Ressalto Hidráulico formado a jusante de um vertedouro (Hager, 1988).

- **Ressalto do tipo A (A - jump):** formado quando a altura conjugada lenta (Y_2) calculada pela equação de Bélanger é igual a lâmina d'água sobre a bacia de dissipação, sendo que o ressalto formado encontra-se inteiramente no canal horizontal a jusante do vertedouro e inicia-se logo após a mudança de declividade do canal. Esse tipo de ressalto é o objeto deste presente estudo.
- **Ressalto do tipo CI (CI - jump):** caracterizado por se formar totalmente na parte horizontal da estrutura e longe do canal de maior inclinação (paramento inclinado do vertedouro). Forma-se devido ao fato da lâmina d'água a jusante ser inferior à altura conjugada lenta correspondente ao ressalto do tipo A. À medida que se incrementa a altura da lâmina d'água a jusante, de maneira que o nível de água a jusante torna-se

maior que Y_2 , o ressalto desloca-se em direção ao vertedouro, ocorrendo assim o afogamento do ressalto. Dependendo da posição do ressalto sobre o vertedouro ou grau de afogamento, podem ocorrer três tipos de ressaltos hidráulicos:

- **Ressalto do tipo B (B - jump):** quando a altura conjugada rápida Y_1 encontra-se no paramento do vertedouro;
- **Ressalto do tipo C (C - jump):** quando a seção de ocorrência da altura Y_2 encontra-se no início da estrutura de dissipação;
- **Ressalto do tipo D (D - jump):** caracterizado pela formação do ressalto inteiramente sobre o paramento do vertedouro, caracterizando um grande afogamento.

2.6 Esforços Atuantes Junto ao Fundo de Bacias de Dissipação por Ressalto Hidráulico.

O ressalto hidráulico é uma forma de dissipação de energia bastante usual em vertedouros brasileiros. O principal objetivo da estrutura de dissipação de energia é estabelecer um fluxo a jusante em condições adequadas de modo a evitar problemas que podem comprometer a segurança da obra.

O conhecimento da verdadeira grandeza dos esforços atuantes em bacias de dissipação de energia por ressalto hidráulico e a jusante das mesmas é de grande interesse para engenheiros calculistas de obras hidráulicas, possibilitando projetar a estrutura de dissipação de energia com maior segurança. Além disso, tal conhecimento permite avaliar problemas causados à estrutura atribuídos à fadiga, cavitação e ressonância. Segundo Toso & Bowers (1988), bacias de dissipação de vertedouros de grandes barragens sofrem danos consideráveis em função das flutuações de pressão, entretanto o projeto dessas estruturas hidráulicas, até a época em questão, utilizava informações sobre as flutuações de pressão de forma ineficiente, baseada apenas em medições de pressões médias.

Antes da utilização de transdutores de pressão, que permitem a aquisição de dados em tempo real, a análise da dissipação de energia era feita somente de forma qualitativa com os seguintes métodos:

- Ensaios em fundo móvel;

- Quadros e mangueiras piezométricas e
- Medições de velocidades médias.

Com o passar do tempo, a tecnologia permitiu o registro em tempo real de pressões instantâneas em bacias de dissipação por ressalto em protótipo e em modelos físicos reduzidos.

A flutuação de pressão junto ao fundo em um ressalto hidráulico pode ser descrita em função dos parâmetros hidráulicos do escoamento e dos parâmetros geométricos do canal onde este se desenvolve. A equação 2.3 apresenta a flutuação de pressão (ΔP) em função dos parâmetros acima mencionados:

$$\Delta P = f(t; x; y; z; H_t; V_1; Y_1; V_2; Y_2; L_j; g; T_w) \quad 2.3$$

Sendo:

ΔP = amplitude média da flutuação de pressão;

t = tempo;

x, y, z = coordenadas do ponto da medição em relação a um ponto de referência;

H_t = perda de carga no ressalto hidráulico;

ν = coeficiente de viscosidade cinemático da água;

ρ = massa específica da água e

T_w = altura da lâmina d'água imediatamente a jusante do ressalto hidráulico.

Nem todos os parâmetros são independentes e também não se comportam sempre como variáveis. Existe interdependência entre algumas relações, tal como na equação da continuidade para fluido incompressível e largura unitária do canal, dada pela equação 2.4.

$$q = Y_1 V_1 = Y_2 V_2 \quad 2.4$$

Como no caso em estudo as pressões serão medidas junto ao fundo sobre o eixo longitudinal do canal, as coordenadas y e z podem ser negligenciadas. Sendo assim, a flutuação de pressão pode ser escrita na forma da equação 2.5.

$$\Delta P = F(x, H_t, Y_1, Y_2, L_j, \nu, \rho, g) \quad 2.5$$

Através da análise dimensional, é possível apresentar a expressão sob outras formas (equação 2.6).

$$\frac{\Delta P}{\gamma Y_2} = F\left(\frac{x}{L_j}, \frac{L_j}{H_t}, Fr_1, Re_1, \frac{Y_1}{Y_2}\right) \quad 2.6$$

Sendo:

$$Fr_1 = \frac{V_1}{\sqrt{g Y_1}}$$

$$Re_1 = \frac{V_1 Y_1}{\nu}$$

A amplitude média da flutuação de pressão (amplitude média quadrática) pode ser avaliada através da equação 2.7.

$$\Delta P = \left(\frac{1}{T_a} \sum_0^{T_a} (P_i - P_x)^2 \cdot dt\right)^{1/2} \quad 2.7$$

Sendo:

T_a = tempo de aquisição dos dados.

Já as frequências associadas a medições de flutuação de pressão podem ser apresentadas como funções das variáveis apresentadas na equação 2.8.

$$f = F(x, V_1, Y_1, \nu, \rho, g) \quad 2.8$$

Para ações viscosas desprezíveis, resulta no número adimensional de Strouhal (equação 2.9).

$$S_t = \frac{f V_1}{Y_1} = F(x/Y_1, Fr_1) \quad 2.9$$

A seguir serão apresentados alguns dos estudos sobre flutuação de pressão em ordem cronológica, buscando verificar o direcionamento das pesquisas realizadas ao longo dos anos.

Khader & Elango. (1974), Lopardo e Solari (1980) e Akbari *et al.* (1982) utilizam o coeficiente de flutuação de pressão (C_p), que representa uma medida da flutuação de pressão em relação à energia cinética na entrada, conforme a equação 2.10.

$$C_p = \frac{\sigma_x}{V^2} \frac{1}{2g} \quad 2.10$$

Sendo:

σ_x = desvio padrão da amostra de pressões instantâneas.

Khader & Elango (1974) apresentam a distribuição do coeficiente de flutuação de pressão ao longo do ressalto hidráulico para números de Froude variando entre 4,7 e 6,6. Os autores comparam os seus resultados com os obtidos por Vasiliev & Bukreyev (1967), como pode ser visto na Figura 2.5. Verifica-se que o coeficiente de flutuação de pressão apresenta valores máximos próximos ao início do ressalto hidráulico.

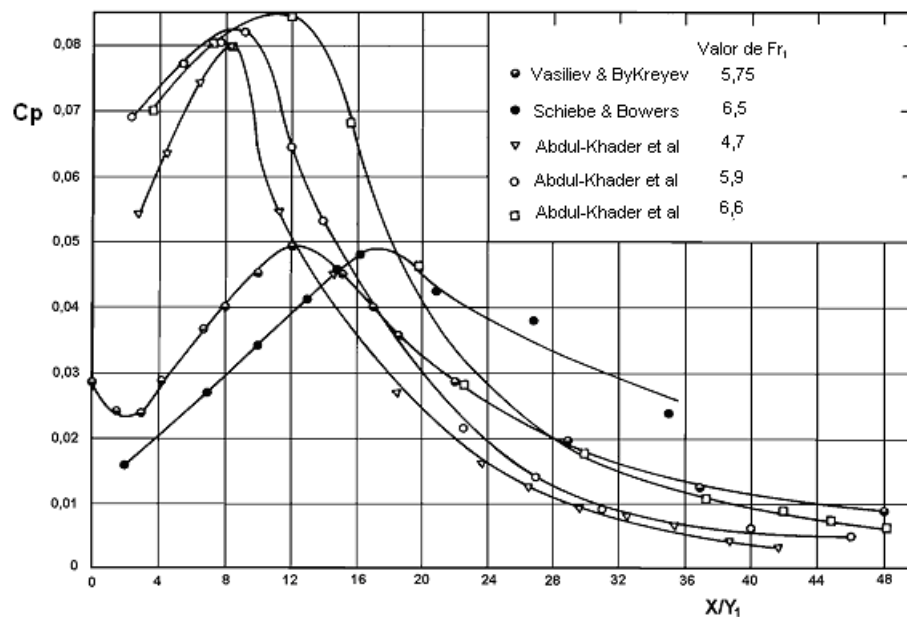


Figura 2.5: Flutuação de pressão adimensionalizada em relação à distância de início do ressalto (X) e à altura conjugada rápida (Y_1) (Khader & Elango, 1974).

Lopardo & Solari (1980) estudaram a flutuação de pressão em um ressalto formado a jusante de uma comporta de fundo para números de Froude entre 2,5 e 7,5 e encontraram o valor mais elevado para o coeficiente de flutuação de pressão ($C_p = 0,084$) para um ressalto hidráulico com número de Froude (Fr_1) = 4,5, localizado próximo a 30% do comprimento do ressalto hidráulico. É interessante destacar que o valor $Fr_1 = 4,5$ caracteriza a transição entre ressaltos ondulados e estáveis. Foi verificado pelos autores que o valor do coeficiente de flutuação de pressão decresce com o aumento do número de Froude do escoamento. Os mesmos autores verificaram que os valores extremos não diferem muito entre situações de ressalto com camada limite desenvolvida ou em desenvolvimento.

Lopardo *et al.* (1982) estudaram o fenômeno da cavitação através da medição da flutuação de pressão, verificando que no trecho inicial do ressalto podem ocorrer altas flutuações de pressão.

Lopardo (1986) apresenta resultados de medições de flutuação de pressão em um ressalto hidráulico formado a jusante de um vertedouro para o número de Froude variando entre 4,5 e 10, apresentados na Figura 2.6. O mesmo autor recomenda que sejam seguidas algumas condições em estudos sobre flutuação de pressão em modelos reduzidos:

- a) $Re_1 \geq 100.000$;
- b) $Y_1 \geq 3$ cm;
- c) tempo de aquisição de dados ≥ 60 s;
- d) frequência de aquisição entre 50 e 100 Hz e
- e) comprimento máximo da mangueira entre a tomada de pressão e o sensor de 55 cm para condutos com diâmetros internos de até 5mm.

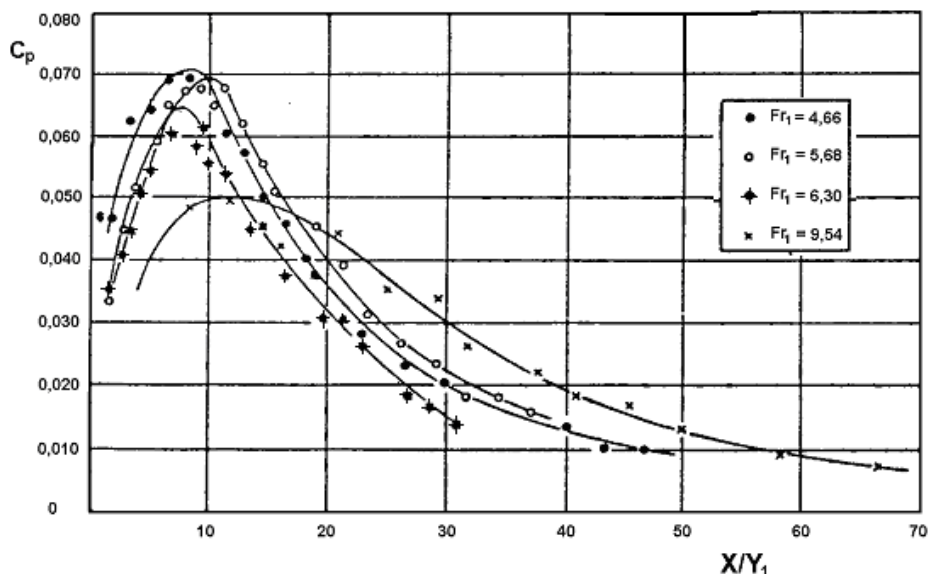


Figura 2.6: Flutuação de pressão adimensionalizada em relação à distância de início do ressalto (X) e à altura conjugada rápida (Y_1) (Lopardo, 1986).

Verifica-se na Figura 2.6 que o coeficiente de flutuação de pressão atinge seu valor máximo ($C_p = 0,070$) para um número de Froude (Fr_1) = 4,66, concentrando os maiores valores na parte inicial do ressalto. Os valores apresentados por Lopardo (1986) são cerca de 20% menores que os publicados por Lopardo & Solari (1980) para ressaltos formados a jusante de uma comporta de fundo.

Lopardo (1986) também apresentou a variação do coeficiente de assimetria e as semi-amplitudes com diferentes probabilidades de ocorrência em função do comprimento do ressalto. O autor verifica a existência de uma diminuição do número de Strouhal em função do aumento do número de Froude (Fr_1) do ressalto hidráulico.

Lopardo & Henning (1986) *apud* Lopardo (1986) estudaram a influência das condições de entrada do ressalto hidráulico com base em um estudo com ressaltos formados a jusante de uma comporta e a jusante do vertedouro, com e sem raio de concordância junto ao início da bacia de dissipação. Os autores verificaram que os maiores valores do coeficiente de flutuação de pressão ocorrem para os valores de números de Froude (Fr_1) próximos a 4,5, para o ressalto hidráulico a jusante da comporta, e para valores de números de Froude (Fr_1) próximos a 6,5, no caso de ressaltos formados a jusante do vertedouro. Foram verificadas diferenças entre a distribuição do coeficiente de assimetria ao longo do ressalto para as três condições ensaiadas. O ressalto hidráulico a jusante da comporta apresentou valores negativos de assimetria somente junto ao seu final, aproximadamente a 75% de seu comprimento, sendo que no ressalto a jusante do vertedouro com curva de

concordância verificam-se valores negativos do coeficiente de assimetria a partir de 45% de seu comprimento. Ao analisarem as frequências dominantes, os autores verificaram a tendência de redução dos valores do número de Strouhal ao longo do ressalto, apresentando também uma queda brusca junto a 45% de seu comprimento para ressaltos formados a jusante do vertedouro com curva de concordância, e a 75% do comprimento do ressalto formado a jusante da comporta. Esse resultado parece confirmar que existe mudança da estrutura macroturbulenta do ressalto hidráulico junto às posições mencionadas.

Toso & Bowers (1988) estudaram a influência de ângulo da entrada do vertedouro (0° , 15° , 30° e 45°) sobre a distribuição da flutuação de pressão do ressalto hidráulico para valores do número de Froude (Fr_1) variando entre 2,9 e 10,0. Os autores analisaram a flutuação de pressão no ressalto hidráulico utilizando parâmetros estatísticos, como a média, desvio padrão e coeficientes de assimetria e curtose. Mostrou-se que existe diferença na flutuação de pressão no ressalto devido às condições de entrada do escoamento, de acordo com o desenvolvimento da camada limite (escoamento parcialmente desenvolvido e escoamento totalmente desenvolvido). Concluiu-se que a flutuação de pressão, bem como os valores extremos de pressão, sofrem a influência do ângulo do paramento do vertedouro e do número de Froude do escoamento. Entre outros resultados dos estudos, é possível citar que a máxima flutuação de pressão ocorre próxima à posição que representa um terço do comprimento do ressalto, e que a distribuição da flutuação de pressão difere substancialmente de uma distribuição normal (Gaussiana).

Endres (1990) analisou a flutuação de pressão a jusante de um vertedouro para números de Froude variando entre 4,5 e 10,0. Seus resultados (Figura 2.7) possuem a mesma tendência que os de Lopardo (1986), mostrando que as recomendações deste último autor devem ser seguidas e que se podem obter resultados semelhantes desde que as condições hidráulicas e de medição sejam respeitadas.

Marques *et al.* (1991) sugerem que se use, ao longo do ressalto, a relação $X/(Y_2 - Y_1)$ como parâmetro para representar a posição relativa da flutuação de pressão. Usando dados apresentados por Endres (1990) Figura 2.7, mostrou-se que o conhecimento das condições de entrada é muito importante para comparar resultados entre autores diferentes.

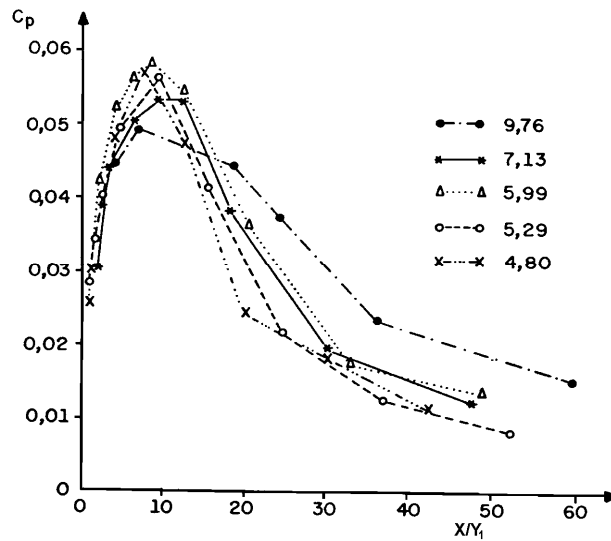


Figura 2.7: Flutuação de pressão adimensionalizada em relação à distância de início do ressalto (X) e à altura conjugada na entrada do ressalto hidráulico (Y_1) (Endres, 1990).

Fiorotto & Rinaldo (1992) usaram a flutuação de pressão para determinar as forças aplicadas no fundo de uma bacia de dissipação, com o objetivo de dimensionar a ancoragem de fundo.

Drapeau (1994) apresenta a tendência do comportamento do coeficiente de flutuação de pressão e da posição de máxima flutuação de pressão para o ressalto hidráulico livre em função do número de Froude, ajustando expressões para o comportamento verificado (Figura 2.8 e Figura 2.9).

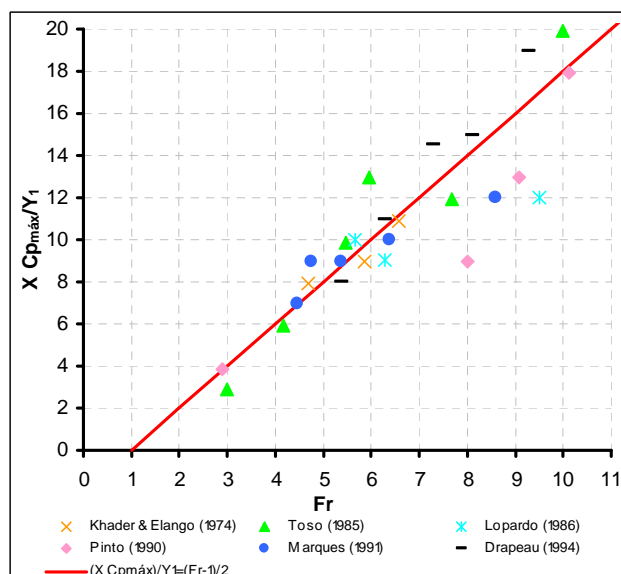


Figura 2.8: Posição (X/Y_1) relativa ao $Cp_{máx}$ em função do número de Froude (Fr_1) - adaptado de Drapeau (1994).

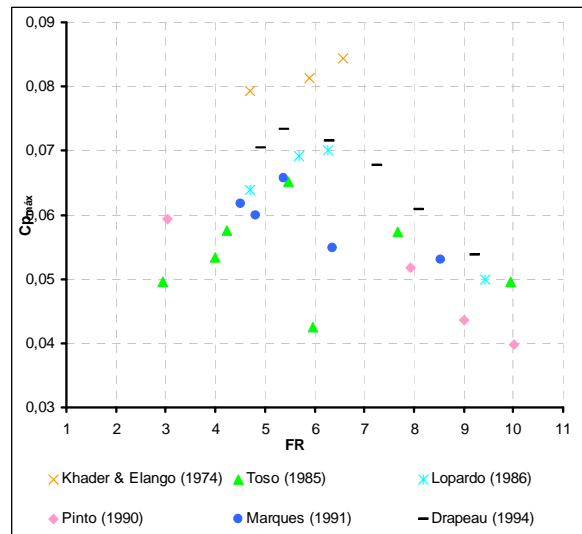


Figura 2.9: $Cp_{m\acute{a}x}$ em função do número de Froude (Fr_1) - adaptado de Drapeau (1994).

Pinheiro (1995) mediu as pressões no interior do ressalto hidráulico na soleira da bacia de dissipação com número de Froude variando de 6,0 a 10,0. Dentre suas conclusões, pode-se citar que as pressões junto ao fundo, ao longo do ressalto hidráulico, são inferiores à correspondente altura do escoamento médio, podendo ocorrer pressão negativa no fundo de até cerca de 70% do comprimento do ressalto hidráulico livre.

Marques *et al.* (1997) sugerem novas relações adimensionais para representar a pressão média e a flutuação de pressão (Equação 2.11 e Equação 2.12). Elas permitem agrupar resultados de diferentes escoamentos (diferentes números de Froude) e caracterizar os pontos de interesse no ressalto hidráulico, tais como o ponto de maior flutuação de pressão ($L_{\sigma_{max}}$), que se situa na posição adimensionalizada $X/(Y_2 - Y_1) \cong 1,75$, o ponto de descolamento (L_d), situado próximo à posição adimensionalizada $X/(Y_2 - Y_1) \cong 4$, o ponto do final do rolo (L_r), na posição $X/(Y_2 - Y_1) \cong 6$, e, finalmente, o ponto onde termina a influência do ressalto hidráulico (L_j), situado na posição $X/(Y_2 - Y_1) \cong 8$.

$$\frac{P_x - Y_l}{(Y_2 - Y_l)} = f\left(\frac{X}{Y_2 - Y_l}\right) \quad 2.11$$

$$\frac{\sigma_x \cdot Y_2}{H_t \cdot Y_1} = f\left(\frac{X}{Y_2 - Y_1}\right) \quad 2.12$$

Sendo:

$\frac{Y_1}{Y_2}$ = relação entre as alturas conjugadas;

$\frac{\sigma_x}{H_t}$ = relação entre a flutuação de pressão e a perda de carga.

O termo (σ_x/H_t) representa a contribuição localizada da perda de carga. O parâmetro (σ_x) quantifica a flutuação de pressão, sendo que a variação dessa grandeza está associada ao mecanismo de perda de carga no interior do ressalto, e (H_t) representa a perda de carga total atribuída ao ressalto. A relação entre as alturas conjugadas (Y_1/Y_2) representa o número de Froude (Fr_1) do ressalto através da equação de Bélanger. Através dessas considerações, Marques *et al.* (1998) puderam determinar a perda de energia ao longo do ressalto hidráulico livre, como apresentado anteriormente.

Marques *et al.* (1997), utilizando os dados de Endres (1990), de Marques (1995) e de Pinheiro (1995), apresentam a distribuição longitudinal da Pressão Média (P_x) e das flutuações de pressão ou desvio padrão (σ_x) para o ressalto hidráulico, em uma situação a jusante do vertedouro (Figura 2.10 e Figura 2.11).

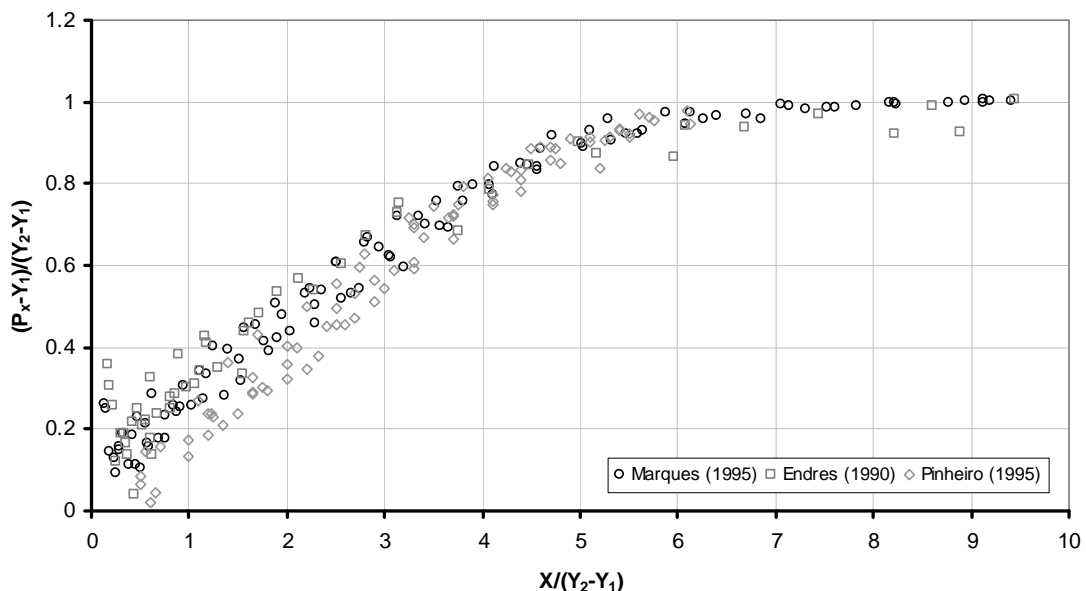


Figura 2.10: Pressão média adimensionalizada a partir da posição relativa do início do ressalto hidráulico e das alturas conjugadas junto ao fundo de bacia de dissipação (Marques *et al.*, (1997).

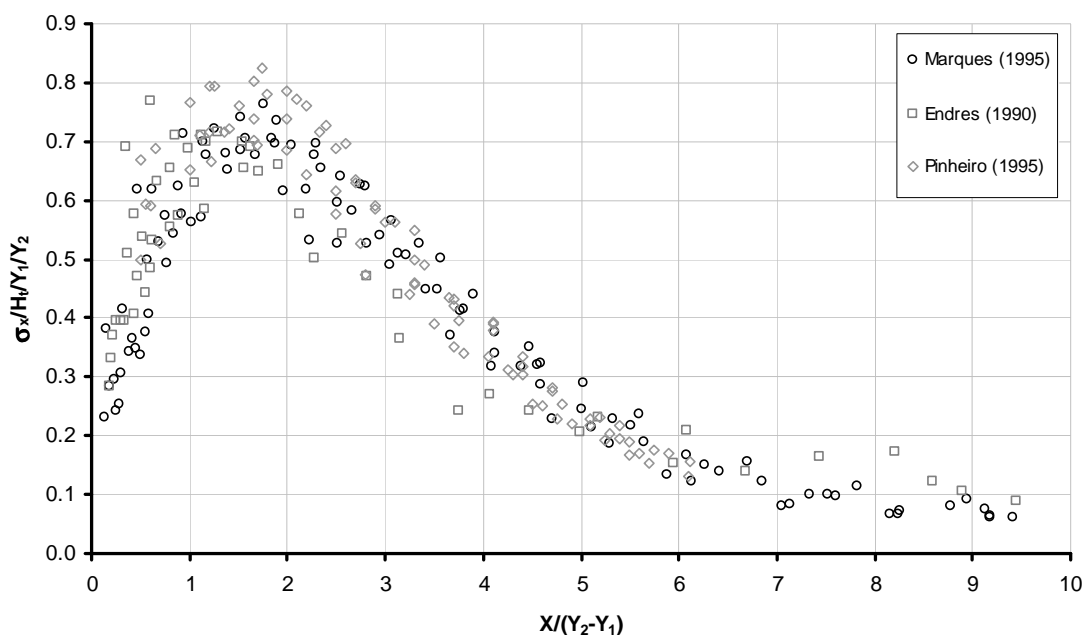


Figura 2.11: Desvio Padrão adimensionalizado a partir da posição relativa do início do ressalto hidráulico e das alturas conjugadas junto ao fundo de bacia de dissipação (Marques *et al.*, 1997).

Pinto *et al.* (1998) analisam o comportamento da flutuação de pressão em ressalto livres e afogados formados a jusante de vertedouros. Foram estudados ressalto hidráulicos com números de Froude entre 7,9 e 10,1, com níveis de submersão de 10% ($S^* = 0,10$), 30% ($S^* = 0,30$) e 50% ($S^* = 0,50$) em relação ao ressalto livre. Os dados de flutuação de pressão foram adimensionalizados segundo o coeficiente de flutuação de pressão. Os autores concluíram que para as regiões intermediárias, ao longo do comprimento, os maiores valores de C_p são atribuídos ao ressalto hidráulico livre. Para a região do início do ressalto, os maiores valores de C_p verificados correspondem à submersão de 10%, sendo que para o final do ressalto, os valores máximos correspondem às submersões de 30% e 50%. Com relação ao número de Froude, para as submersões de 10% e 30%, os valores máximos de C_p correspondem a $Fr_1 = 7,97$ (menor número de Froude ensaiado). Já para a submersão de 50% e na faixa intermediária do ressalto, os maiores valores de C_p ocorrem para $Fr_1 = 10,06$ (maior número de Froude ensaiado). Pinto *et al.* (1998) também concluíram que as frequências dominantes das flutuações de pressão apresentam a tendência de diminuição à medida que a submersão do ressalto hidráulico é aumentada.

Marques *et al.* (1999) sugerem a inclusão de um fator de submersão (S), conforme equação 2.13, possibilitando a uniformização dos dados de pressões no

fundo de bacias de dissipação, provenientes de protótipo ou de modelo, para ressalto livre ou submergido.

$$S = \frac{T_w}{Y_2} \quad 2.13$$

Sendo:

T_w = Lâmina d'água a jusante do ressalto hidráulico.

Pinheiro *et al.* (2003) estudaram as flutuações de força em áreas limitadas através dos valores de flutuação de pressão obtidos junto ao fundo de uma bacia de dissipação. Verificaram que a flutuação de pressão não é uniforme transversalmente no ressalto hidráulico, e que a distribuição das flutuações de pressão não segue uma lei normal, mas sim algo “muito semelhante” a uma distribuição normal (Gaussiana).

Teixeira (2003) apresenta ajustes para a pressão média (equação 2.14) e desvio padrão (equações 2.15 e 2.16) para o ressalto hidráulico livre a jusante de uma comporta utilizando os dados de Marques (1995).

Ajuste para a pressão média:

$$\Psi = -0,015 \cdot \Gamma^2 + 0,237 \cdot \Gamma + 0,07 \quad 2.14$$

Sendo:

$$\Psi = \frac{P_x - Y_1}{Y_2 - Y_1}$$

$$\Gamma = \frac{X}{(Y_2 - Y_1)}$$

Ajuste para o desvio padrão:

$$\Omega = -0,159 \cdot \Gamma^2 + 0,573 \cdot \Gamma + 0,19 \quad (\text{Ajuste A}) \quad 2.15$$

$$\text{Válida para } 0 \leq \frac{X}{(Y_2 - Y_1)} < 2,4$$

$$\Omega = 0,017 \cdot \Gamma^2 - 0,281 \cdot \Gamma + 1,229 \quad (\text{Ajuste B}) \quad 2.16$$

$$\text{Válida para } 2,4 \leq \frac{X}{(Y_2 - Y_1)} \leq 8,0$$

Sendo:

$$\Omega = \left(\frac{\sigma_x}{H_t} \right) \left(\frac{Y_2}{Y_1} \right)$$

A Figura 2.12 e a Figura 2.13 apresentam a distribuição longitudinal da pressão média e desvio padrão (Marques 1995) juntamente com os ajustes propostos.

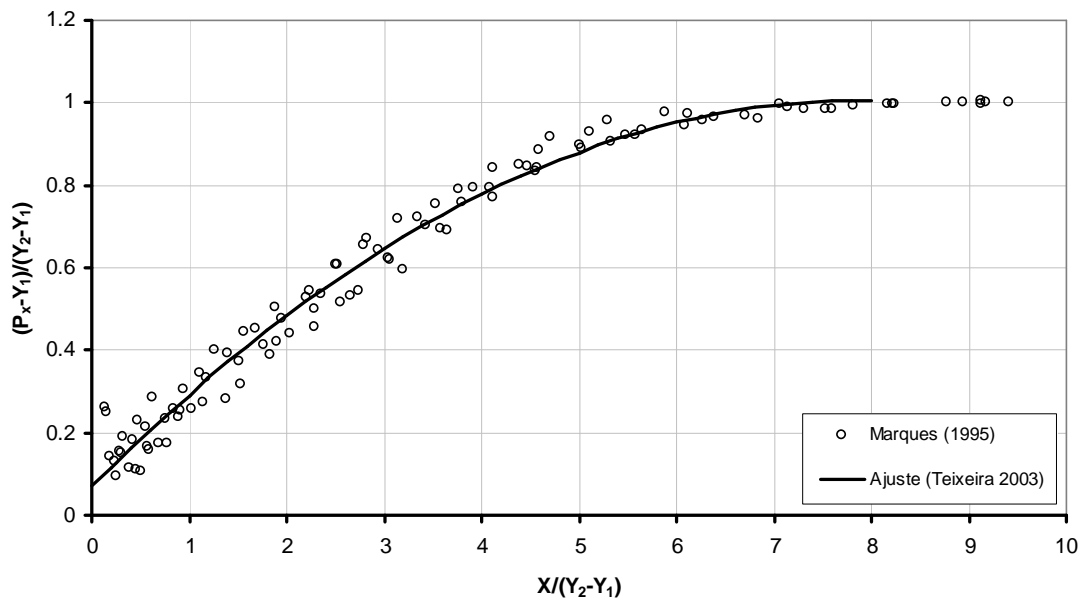


Figura 2.12: Distribuição longitudinal da pressão média para os dados de Marques (1995) e ajustes propostos por Teixeira (2003).

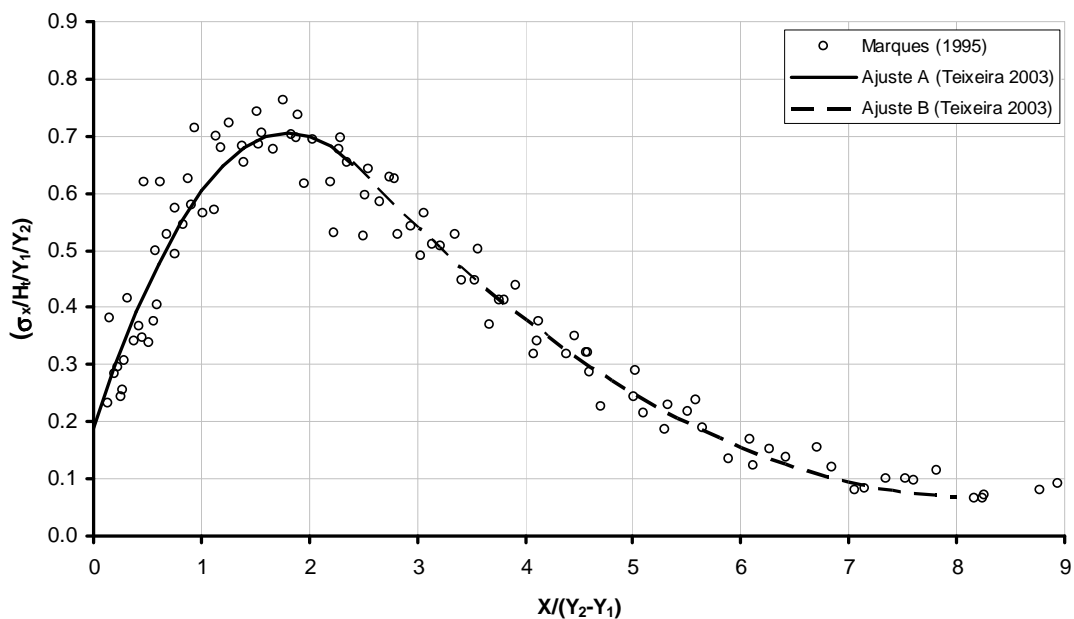


Figura 2.13: Distribuição longitudinal do desvio padrão da amostra de pressão para os dados de Marques (1995) e ajustes propostos por Teixeira (2003).

Teixeira (2003) e Teixeira *et al.* (2003b) propõem uma metodologia para a determinação dos valores extremos de pressão em bacias de dissipação por ressalto hidráulico através da determinação de um coeficiente estatístico de distribuição de probabilidade (N) e da utilização de expressões analíticas que representassem a flutuação de pressão (σ_x) e a pressão média (P_x) em um ressalto hidráulico formado a jusante de um vertedouro, baseado nos dados de Endres (1990) e Marques (1995). A pressão para uma determinada probabilidade de ocorrência ($P_{\%}$) pode ser determinada pela equação 2.17.

$$P_{\%} = P_x \pm N \cdot \sigma_x \quad 2.17$$

Sendo:

$P_{\%}$ = pressão com probabilidade de ser inferior ou igual a um determinado valor;

P_x = pressão média em um determinado ponto do ressalto hidráulico;

σ_x = desvio padrão da amostra de pressão em um determinado ponto do ressalto hidráulico e;

N = valor de probabilidade - função da distribuição estatística da amostra.

Marques *et al.* (2004a) aplicam a metodologia proposta por Teixeira (2003) para determinar as pressões extremas em um caso real de uma bacia de dissipação por ressalto hidráulico.

Marques *et al.* (2004c) apresentam a tendência do comportamento do coeficiente de flutuação de pressão e da posição de máxima flutuação de pressão para o ressalto hidráulico livre em função do número de Froude, ajustando expressões para o comportamento verificado (Figura 2.14 e Figura 2.15).

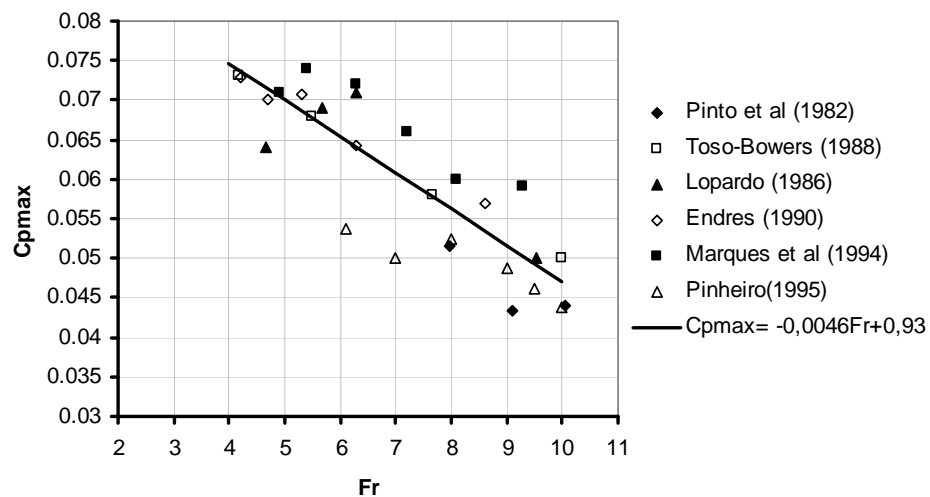


Figura 2.14: $C_{p_{m\acute{a}x}}$ em função do número de Froude (Fr_1) (Marques et al. (2004c).

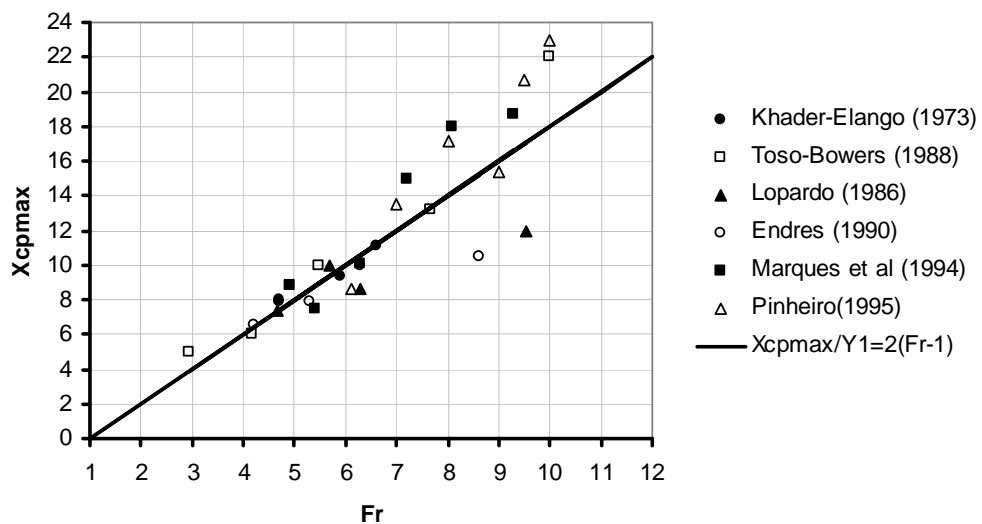


Figura 2.15: Posição (X/Y_1) relativa ao $C_{p_{m\acute{a}x}}$ em função do número de Froude (Fr_1) (Marques et al., 2004c).

Lopardo *et al.* (2004b) estudaram a flutuação em ressalto hidráulico submerso formado a jusante de uma comporta para números de Froude entre 3 e 6 e fatores de submersão (S^*) entre 0,1 e 1,1, ou seja, entre 1,1 e 2,1 para o fator de submersão proposto por Marques *et al.* (1997). Os autores avaliaram o comportamento do coeficiente de flutuação de pressão em função do número de Froude incidente e do fator de submersão (S^*), a distribuição longitudinal do coeficiente de assimetria e as semi-amplitudes extremas de pressão, $P < 0,1\%$ e $P < 99,9\%$. Os autores concluíram que, mantendo-se o fator de submersão constante, o coeficiente de flutuação de pressão (C_p) aumenta com a diminuição do

valor do Froude incidente para a região de montante do ressalto ($X/Y_1 < 10$), entretanto, na região de jusante do ressalto ($X/Y_1 > 30$), verifica-se o comportamento inverso, um aumento do valor de C_p em função do aumento do número de Froude. Esse comportamento pode ser visto na Figura 2.16. Para avaliar a influência do fator de submergência, os autores apresentaram o comportamento do coeficiente de flutuação de pressão para $Fr_1 = 3$, mantido constante. Verificou-se que o fator de submergência aumenta a intensidade da flutuação de pressão junto ao piso da bacia de dissipação para $X/Y_1 > 12$ (Figura 2.17). Os valores encontrados para o ressalto hidráulico livre apresentam uma diferença de 50% em relação à flutuação de pressão verificada para $S^* = 1,1$.

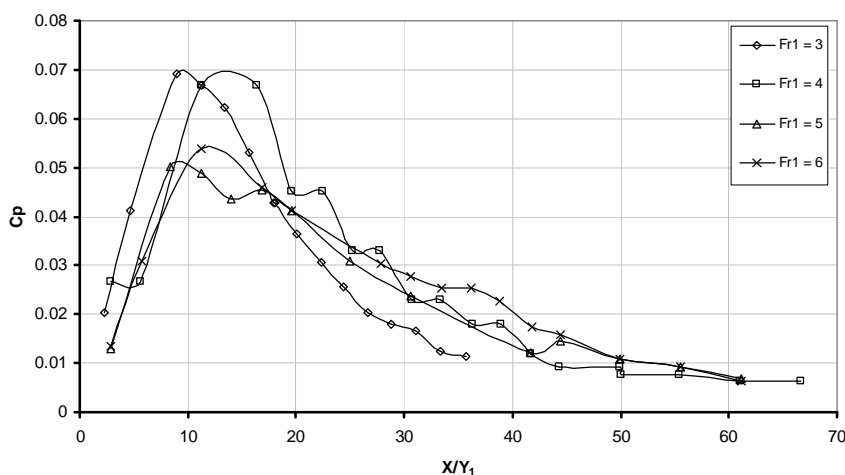


Figura 2.16: Variação do coeficiente de flutuação de pressão (C_p) em função do número de Froude para ressaltos hidráulicos submersos formados a jusante de uma comporta, $S^* = 0,3$ (Lopardo et al., (2004b)).

A região de montante do ressalto mostrou-se difícil de caracterizar um comportamento, no entanto, Lopardo et al. (2004b) que os ressaltos submersos apresentam maior intensidade turbulenta que os ressaltos livres. Dados experimentais de Long et al. (1991) demonstraram que os ressaltos submersos apresentam um campo de velocidades tridimensional, com formação de dois vórtices a jusante da comporta. Lopardo et al. (2004b) afirmam que tal aspecto contribui para o aumento da intensidade macroturbulenta e, conseqüentemente, da flutuação de pressão em ressaltos afogados. Segundo os autores, a avaliação do coeficiente de assimetria demonstrou que o ressalto hidráulico afogado apresenta uma distribuição que pode ser considerada mais próxima de uma distribuição Gaussiana em

comparação à verificada para o ressalto livre e o aumento da submersão tende a manter constante o valor do coeficiente de assimetria.

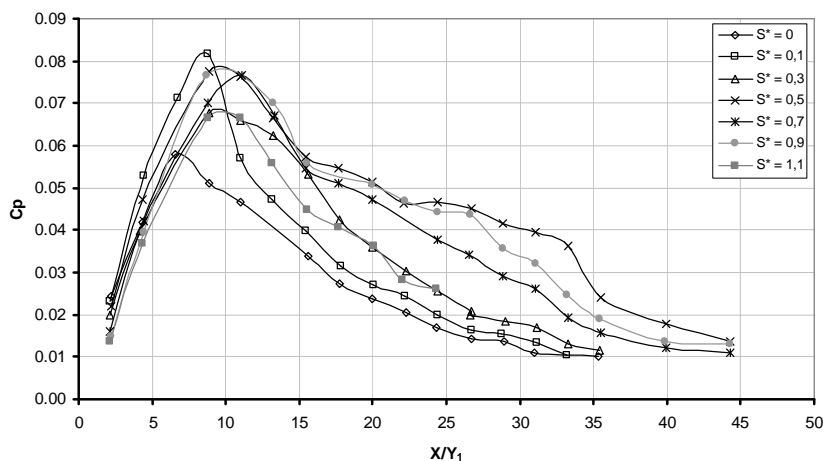


Figura 2.17: Variação do coeficiente de flutuação de pressão (C_p) em função do fator de submersão (S^*) para ressaltos hidráulicos formados a jusante de uma comporta, $Fr_1 = 3,0$ (Lopardo et al., 2004b).

Trierweiler et al. (2005) comparam os valores de Pressão Média (P_x) e Desvio Padrão (σ_x) entre o modelo e protótipo da UHE Porto Colômbia, permitindo a análise dos efeitos de escala de forma qualitativa.

Wiest (2008) apresenta a variação do coeficiente estatístico de distribuição de probabilidade (N) para ressaltos hidráulicos afogados, utilizando dados do modelo reduzido da UHE Porto Colômbia existente no LAHE/Furnas. O autor verificou que, para o caso estudado, o coeficiente (N) apresenta a tendência de se manter constante ao longo de todo o comprimento para ressaltos afogados, comportamento que não ocorre em ressaltos hidráulicos livres.

Trierweiler (2006) propôs uma metodologia que permitiu estimar os valores de pressão extrema associados a diferentes probabilidades de ocorrência através do estudo do campo de pressões em ressalto (livre e afogado) formado a jusante de uma comporta plana.

Mess (2008) analisou dados de modelos reduzidos do vertedouro de Porto Colômbia nas escalas 1:100 e 1:85 e caracterizou o campo de forças gerado pelo ressalto hidráulico. Então propôs metodologias de previsão dos esforços extremos que permitem dimensionar a estrutura que irá suportar os esforços de levantamento.

Wiest (2008), a partir de medições de pressão instantânea no modelo reduzido da UHE Porto Colômbia (escala geométrica 1:50), analisou o comportamento longitudinal da pressão média, do desvio padrão e do coeficiente de distribuição de probabilidade para escoamentos com diferentes graus de submergência (S). Utilizando a proposta de Teixeira (2003) para ressalto livre, o autor criou uma metodologia para estimar os valores de pressão para diferentes probabilidades de ocorrência para ressaltos a jusante de vertedouros, considerando os efeitos atribuídos pela submergência.

Teixeira (2008) faz seu trabalho baseado em ensaios feitos na mesma estrutura (vertedouro de da UHE Porto Colômbia) em três escalas geométricas diferentes 1:100, 1:50 e 1:32 e no protótipo da Usina. O autor fala sobre efeitos de escala verificados sobre as características de ressaltos hidráulicos tipo B. Suas conclusões registraram que existem efeitos de escala na pressão média, geralmente encontrados no início do ressalto e esse efeito pode ser associado à aeração e à influência do raio de curvatura do ressalto. O autor também cita que as flutuações de pressão apresentam um padrão semelhante para todas as escalas e protótipo, no trecho plano da bacia de dissipação. Ou seja, a flutuação de pressão independe da escala geométrica. Mais uma contribuição desse trabalho é quanto à escala geométrica a ser escolhida para o estudo. O autor recomenda que caso seja necessário representar as pressões médias com 1% de probabilidade de ocorrência, deve-se optar em construir um modelo de escala 1:60 ou menor. Já se for desejado representar as pressões médias com 99% de probabilidade de ocorrência, é necessária a construção de um modelo de escala bem menor que 1:20.

Dai Prá (2011) utiliza o modelo bidimensional do vertedouro com fator de escala 1:32; dentre outros objetivos, estudou-se a macroturbulência presente no ressalto hidráulico (tipos A e B). Aqui estão citadas somente as situações que o autor faz uso do ressalto com submergência (S) igual a 1, ou seja, ressalto livre (tipo A). A faixa de números de Froude analisada ficou compreendida entre 4,4 e 9,3.

O autor usa da metodologia de adimensionalização proposta por Marques *et al.* (1996) e confronta os dados de Endres (1990), Marques (1995) e Pinheiro (1995) com seus dados obtidos para valores de pressão média e flutuação de pressão do ressalto tipo livre. O autor também usa o coeficiente de flutuação de pressão (C_p) e compara seus resultados com obtidos por outros em ressaltos hidráulicos tipo A,

tanto a jusante de comportas como a jusante de vertedouros, verificando que os resultados apresentam um comportamento semelhante (Figura 2.18).

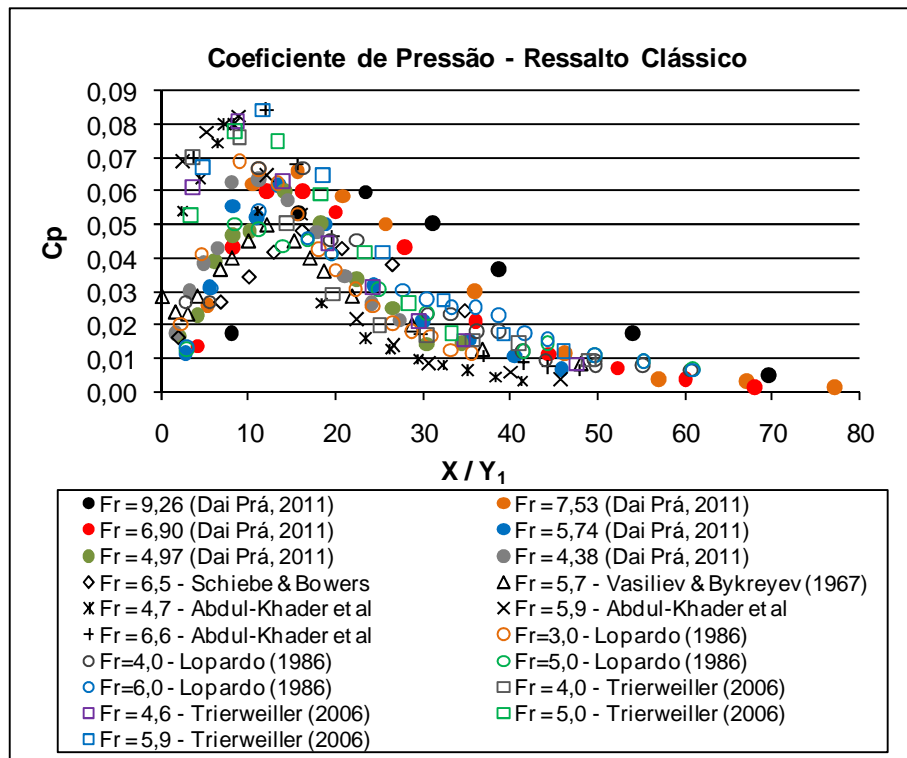


Figura 2.18: Coeficiente de flutuação de pressão (C_p) (Dai Prá, 2011).

Dai Prá (2011) verificou grande dispersão do coeficiente de flutuação de pressão (C_p) verificada entre as posições adimensionalizadas 10 e 20, justamente onde estão identificados os máximos coeficientes de pressão.

Poucos autores apresentam a variação do coeficiente de assimetria (A_d) das amostras de pressão, podendo-se citar Lopardo (1986), Marques (1995) e Dai Prá (2011). Este coeficiente é calculado pela equação 2.18.

$$A_d = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (P_i - P_x)^3}{n \cdot \sigma_x^3} \quad 2.18$$

Esses autores observaram (Figura 2.19) que o coeficiente de assimetria no início do ressalto é alto e que o valor vai diminuindo gradativamente até o final do rolo, onde o valor é de aproximadamente -0,6, para depois aumentar um valor em torno de 0 (zero). Esses autores também utilizaram os dados de Endres (1990) e Pinheiro (1995).

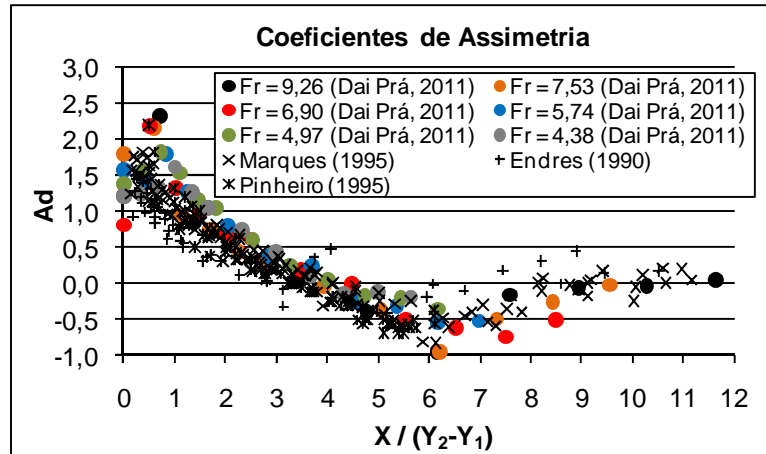


Figura 2.19: Coeficiente de assimetria (Dai Prá, 2011).

O mesmo acontece com o coeficiente de curtose (K) (equação 2.19) das amostras de pressão que foram apresentados por Marques (1995) e Dai Prá (2011).

$$k = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (P_i - P_x)^4}{n \cdot \sigma_x^4} \quad 2.19$$

Estes autores, para mostrar a tendência, também utilizaram os coeficientes de Curtose encontrados por Endres (1990) e Pinheiro (1995). Eles observaram (Figura 2.20) que o coeficiente de curtose decresce rapidamente para se estabilizar acima de 3 após a posição $6 \cdot X/(Y_2 - Y_1)$, que coincide com a posição do final do rolo.

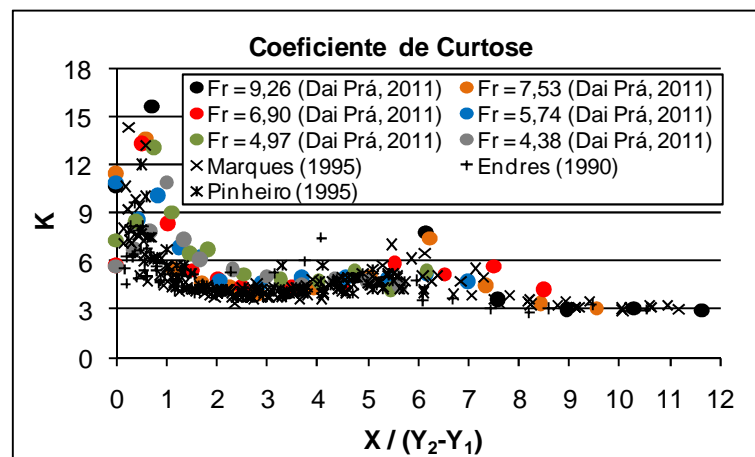


Figura 2.20: Coeficiente de curtose (Dai Prá, 2011).

Lopardo (2012), depois de 35 anos de pesquisa em modelagem física em hidráulica, publicou um trabalho em que relaciona a pressão instantânea na bacia de dissipação por ressalto hidráulico com a velocidade do escoamento. Com isto determinou-se o ponto de maior flutuação de pressão que também determina o local de separação da camada limite. O autor mostra a influência do efeito viscoso nas experiências de laboratório e mostra claramente que os dados apresentados até

aqui são independentes dos efeitos de escala do modelo. Nesse trabalho o autor usa um ADV (Acoustic Doppler Velocitymeter) para medições de velocidade no escoamento.

3 MATERIAL E MÉTODOS

A seguir serão apresentadas as informações relativas às instalações utilizadas nas campanhas de ensaios deste estudo.

3.1 Modelo de Detalhe do Vertedouro

O modelo experimental utilizado foi o modelo de detalhe do vertedouro da UHE Santo Antonio, construído em escala geométrica de 1:50, considerando a semelhança de Froude. A Tabela 3.1 resume as relações que a semelhança de Froude.

Tabela 3.1: Relações das escalas de Froude usadas neste trabalho.

Grandeza	Dimensão	Escala
Comprimento	[L]	λ
Tempo	[T]	$\lambda^{0,5}$
Velocidade	[LT ⁻¹]	$\lambda^{0,5}$
Vazão	[L ³ T ⁻²]	$\lambda^{2,5}$

As Figura 3.1 e Figura 3.2 mostram duas perspectivas do modelo usado neste estudo. O modelo representa um (1) vão e dois 3/4 de vão, representando um vão central (com 20,0 m de largura) e dois vãos com 75% de largura de um vão (15,0 m de largura) e dois pilares do vertedouro (espessura de 5,0 m), na escala de 1:50. A Tabela 3.2 resume as principais características do modelo.



Figura 3.1: Modelo de detalhe do vertedouro da UHE Santo Antonio - escala 1:50. (vista superior).



Figura 3.2: Modelo de detalhe do vertedouro da UHE Santo Antonio - escala 1:50. (vista lateral).

Tabela 3.2: Características do modelo reduzido do vertedouro do AHE Santo Antonio.

Característica	Dimensão	
	Protótipo (m)	Modelo (m)
Cota do 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 Vão Central	20	0,40
Largura de cada Vão Parcial	15	0,30
Largura dos Pilares	5	0,10
Largura Total	60	1,20

^(*) nível de referência no modelo.

O vão central do modelo de detalhe foi equipado com 4 transdutores de pressão, em seu eixo central. Sua disposição pode ser observada em detalhe nas Figura 3.3 e Figura 3.4 abaixo.

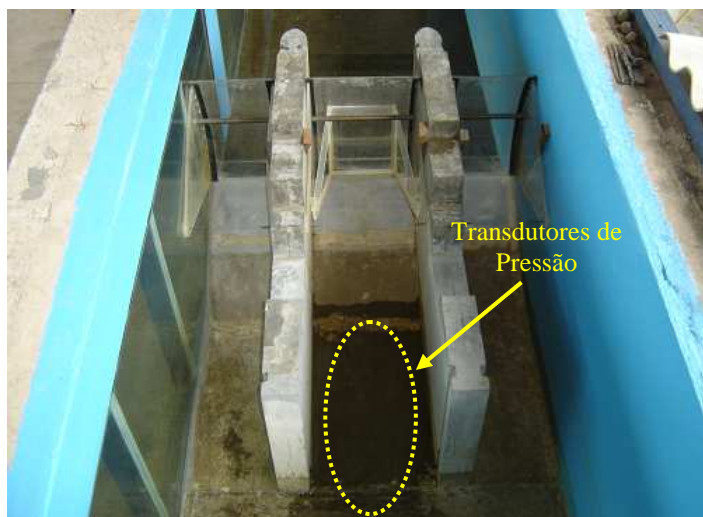


Figura 3.3: Disposição dos transdutores de pressão na bacia de dissipação do modelo do vertedouro.

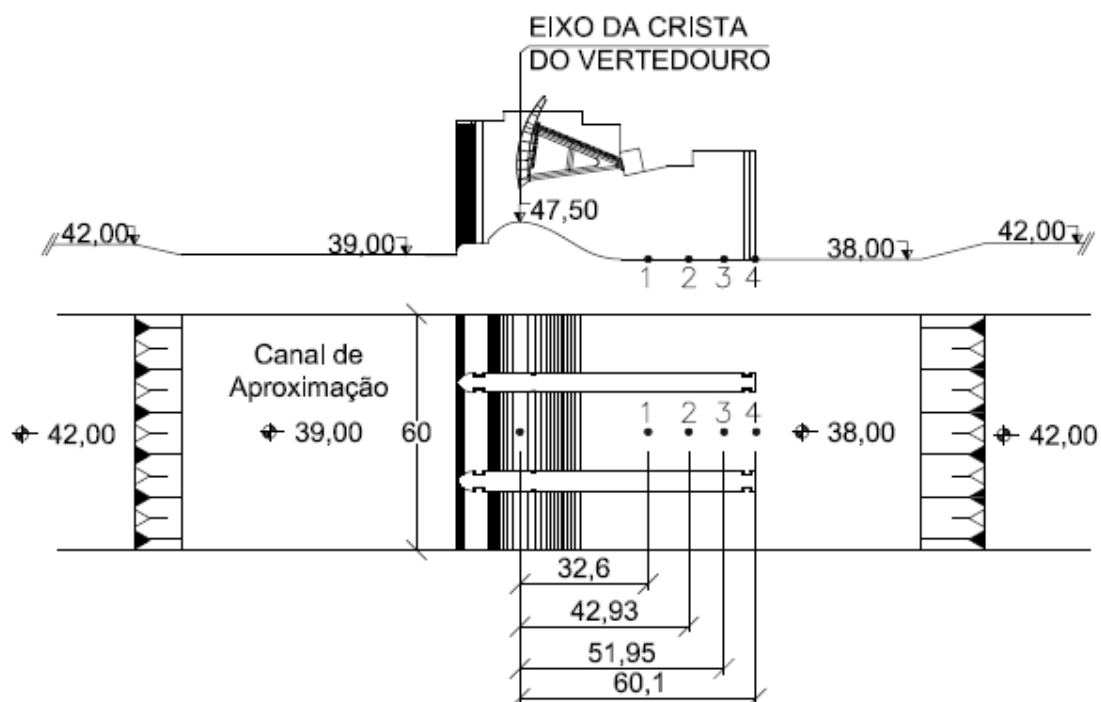


Figura 3.4: Disposição dos transdutores de pressão na bacia de dissipação do modelo do vertedouro. (Dimensões em escala de protótipo).

Por uma decisão do consórcio projetista da UHE Santo Antonio somente 4 transdutores de pressão foram instalados no modelo de detalhe do vertedouro. Esta medida foi tomada considerando que o restante da bacia de dissipação, na elevação 38,00, é constituído de um basalto amazônico com matriz rochosa bastante sólida. Assim sendo a instrumentação só foi instalada no trecho entre os pilares do vertedouro e com a bacia de dissipação revestida em concreto.

3.2 Canal Experimental

Para a realização deste estudo, foi utilizado um canal experimental onde foi instalado o modelo parcial do vertedouro da Usina de Santo Antonio. O canal experimental tem um comprimento total de 31,00m, 1,20m de largura e 1,00m de altura, dispondo de uma das paredes laterais de vidro, o que possibilita a observação do escoamento. Na extremidade de jusante, foi instalada uma comporta plana (Figura 3.5), regulável, que permite impor o nível desejado.



Figura 3.5: Comporta plana na extremidade de jusante do canal experimental.

Ainda na zona de alimentação, existe um sistema de tranquilização (Figura 3.6) constituído por duas fiadas de tijolo furado e tubos de PVC formando favos, para garantir a melhor condição de aproximação de água a estrutura do vertedouro.



Figura 3.6 Tranquilização na entrada do canal experimental.

Leituras de nível de água, tanto de montante e jusante, foram feitas, por ponta linimétrica com precisão de 0,1mm, no interior de poço de medição ligado ao canal por meio de tubo de PVC de diâmetro de 25,00mm. A Tabela 3.3 resume as principais características do canal experimental do vertedouro da UHE Santo Antônio e fornece uma comparação das grandezas encontradas no modelo e no protótipo.

Tabela 3.3: Características do canal experimental do vertedouro do AHE Santo Antonio

Característica	Dimensão	
	Protótipo (m)	Modelo (m)
Largura do Canal de Ensaio	60,0	1,20
Comprimento do Canal de Ensaio	1550,0	31,0
Cota da Bacia de Dissipação	38,0	-
Cota do Canal de Aproximação	39,0	-
Distância da Crista a Ponta Linimétrica de Montante	260,0	5,20
Distância da Crista a Ponta Linimétrica de Jusante	490,0	9,80

3.3 Alimentação

O modelo é alimentado por um circuito hidráulico ligado a um reservatório de nível constante, com capacidade de regulação de até 1900 l/s, que atende outros experimentos além deste. O reservatório de nível constante está elevado a aproximadamente 5 metros do nível do solo. A casa de bombas, que recalca a água do reservatório inferior para o reservatório de nível constante, tem capacidade de recalque de 2500 l/s. São seis conjuntos moto-bombas com potência de 50 cv cada um (Figura 3.7). Finalmente o modelo de detalhe do vertedouro é alimentado por dois tubos de ferro fundido em paralelo, com diâmetro de 18 polegadas, com aproximadamente 60,00 metros de comprimento. Cada tubo possui registros independentes e quando ligados ao circuito hidráulico, tem capacidade de transportar 450 l/s cada um. A vazão total corresponde a uma cheia com tempo de retorno igual a 10.000 anos do vertedouro, de 84.000 m³/s, ou 660 l/s na escala do modelo.



Figura 3.7: Casa de bombas do reservatório de nível constante e tubulação.

3.4 Medições de Vazão

As medições de vazão deste estudo são impostas através da abertura dos registros instalados nas tubulações de alimentação do modelo, diâmetro de 18 polegadas. Foram instalados dois medidores de vazão eletromagnéticos da marca EMERSON (Figura 3.8). Cabe aqui salientar que para este estudo as vazões foram todas impostas usando somente um tubo de alimentação, do lado direito do modelo, tendo em vista que a maior vazão imposta foi de 444 l/s.



Figura 3.8: Medidor de vazão usado neste estudo.

Para aumentar a confiabilidade dos dados de entrada do modelo, no caso vazão a ser imposta nos ensaios deste estudo, foi feita uma série de ensaios de comparação entre dois métodos de medição de vazão. O primeiro método é a medição eletromagnética feita através de medidor de vazão da EMERSON instalado na tubulação de alimentação. O segundo método é a medição ultrassônica feita através de um medidor móvel colocado externamente na tubulação de alimentação. O medidor ultrassônico usado foi o da marca POLYSONICIS e consiste em dois sensores que são colocados na parte externa ao tubo a uma distância conhecida, por um jogo de braçadeiras móveis. Uma vez instalado o medidor externo, deve-se informar ao sensor, o diâmetro da tubulação, o material que ela é feita e a espessura da parede interna. Aqui vale a pena lembrar que a tubulação é de ferro fundido, ou seja, a determinação exata da espessura da parede interna da tubulação é difícil, uma vez que a espessura da parede pode variar muito com a idade da tubulação e

do tempo de uso. Os resultados desta série de ensaios são apresentados na Tabela 3.4 abaixo.

Tabela 3.4: Comparação entre dois métodos de medição de vazão.

Ultrassônico	Eletromagnético	Diferença
(l/s)	(l/s)	(l/s)
465,8	463,4	2,4
399,0	396,4	2,6
360,4	352,0	8,4
253,6	254,4	0,8
204,2	205,0	0,8
154,2	156,8	2,6
113,4	114,6	1,2
85,6	83,6	2,0
52,6	52,4	0,2
22,4	19,0	3,4

Ao observar da Tabela 3.4, verifica-se que existe uma diferença entre os dois métodos de medição da vazão, a qual pode ser atribuída à espessura da parede interna da tubulação de alimentação de difícil determinação. Outro aspecto que deve ser levado em conta é a grande variabilidade de vazões que foram impostas, ou seja, as vazões foram desde 20 l/s até quase 470 l/s, a capacidade máxima do tubo de alimentação.

Assim sendo, pode-se concluir que o medidor de vazão eletromagnético fornece uma medida adequada de vazão para o presente estudo e que pequenas variações são possíveis neste tipo de medição.

3.5 Medições de Nível de Água

Para as medições de nível de água foram utilizadas réguas linimétricas com uma escala graduada de Vernier (Figura 3.9) - mesmo tipo de escala encontrada nos paquímetros - que permitem leituras com precisão de 0,1mm. Neste estudo foram usadas 3 réguas linimétricas, duas delas fixas em suportes, com o nível de água sendo lido em poços de medição ligados ao canal através de um tubo de PVC. Essas réguas estão situadas a 5,2m e 9,8m a montante e a jusante do eixo da crista do vertedouro, respectivamente.



Figura 3.9: Régua linimétrica e poço de medição usados neste estudo.

Ainda foi usada uma régua móvel, que através de um suporte pode determinar o nível de água em qualquer parte do modelo. Esta régua móvel foi usada para a determinação da altura conjugada rápida do ressalto hidráulico (Y_1). Cabe salientar que a Figura 3.10 tem somente caráter ilustrativo de como foram feitas as medições da altura conjugada rápida (Y_1). Não foram feitas medições de Y_1 nos vãos laterais deste modelo, uma vez que estes vãos têm sua extensão menor do que um vão do protótipo do vertedouro da UHE Santo Antonio e, desta forma, acarretariam em efeitos maiores de canal. Os transdutores de pressão estão instalados somente no vão central do modelo reduzido.

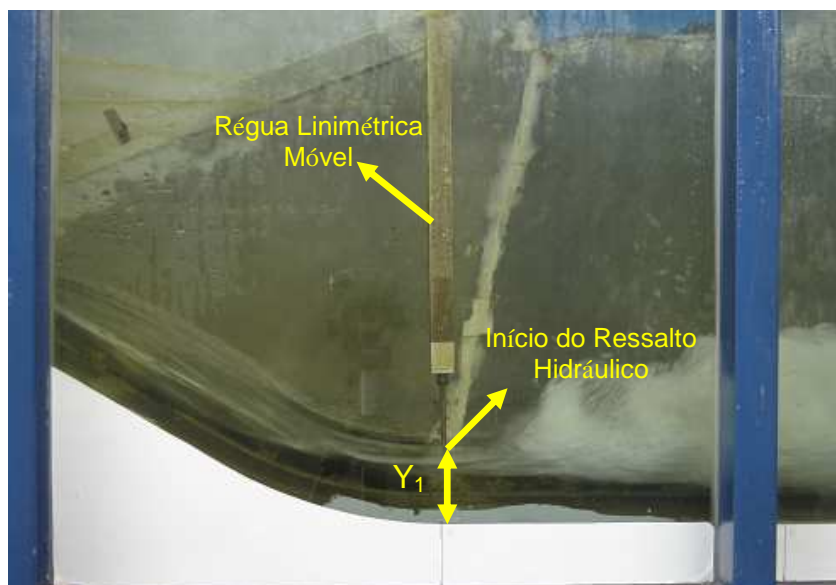


Figura 3.10: Régua linimétrica móvel de medição usada neste estudo.

3.6 Transdutores de Pressão

O modelo foi equipado com 4 transdutores de pressão (Figura 3.11) instalados na parte plana da bacia de dissipação EL: 38,00, que permitiram o registro da distribuição das pressões longitudinais resultantes do ressalto hidráulico.

Os transdutores de pressão utilizados são da marca SITRON, modelo CF-12DC, com faixa de trabalho de -100mbar a 200mbar, com precisão de 0,1% de fundo de escala.



Figura 3.11: Transdutores de pressão instalados no fundo da bacia de dissipação.

O sistema de aquisição de dados dos transdutores foi instalado em um microcomputador externo de padrões industriais. O sistema externo utilizado consiste em uma placa de aquisição de dados da marca LYNX Tecnologia, modelo AC2122.

O software usado é o AqDados 7, também da LYNX Tecnologia, através do qual foi possível coletar simultaneamente os sinais dos 4 transdutores de pressão, com taxa de aquisição configurável e armazenamento em disco durante a aquisição das amostras.

Neste aspecto também é interessante destacar que a instalação elétrica do sistema de aquisição de dados é independente do sistema de alimentação dos modelos. A instalação também recebeu o devido aterramento a fim de evitar ruídos na rede elétrica que possam interferir nas medidas dos transdutores de pressão.

3.6.1 Aferição de Transdutores

Os transdutores foram calibrados no próprio canal de medição, tendo sido impostos diferentes níveis estáticos (12) dentro do canal de maneira a permitir se

obter a curva de calibração dos transdutores e o zero (fundo da bacia sem a presença de água).

3.6.2 Tempo de Amostragem e Frequência de Aquisição de Dados

Lopardo (1986) sugere que o tempo mínimo de amostra seja de 1 minuto e Teixeira (2008) afirma que o tempo de amostragem depende do fenômeno que se quer observar no ressalto hidráulico. Levando-se em conta que o modelo reduzido em análise tem fator de escala igual a 1:50, optou-se por um tempo de amostragem igual a 10 minutos e uma frequência de aquisição de 100 Hz. Tal opção resultou em 60000 linhas de dados, o que é perfeitamente aceitável para uso do software Microsoft Excel 2007 para as futuras compilações de resultados e análises.

3.7 Aberturas Parciais de Comporta

O modelo de detalhe do vertedouro também foi equipado com suas respectivas comportas de setor, feitas em acrílico, nos 2,5 vãos que permitem a imposição de aberturas parciais. Para garantir a imposição correta de aberturas parciais entre si, foram confeccionados gabaritos de metal, conforme Figura 3.12.



Figura 3.12: Gabarito metálico para imposição de abertura parcial.

Esses gabaritos têm três dimensões principais especificadas pelo projeto, quais sejam:

- Distância em relação à crista;
- Distância em relação ao batente da comporta;
- Distância do eixo inferior da comporta ao perfil do vertedouro (Y_b).

A Figura 3.13 mostra um croqui para uma melhor visualização das medidas referidas anteriormente.

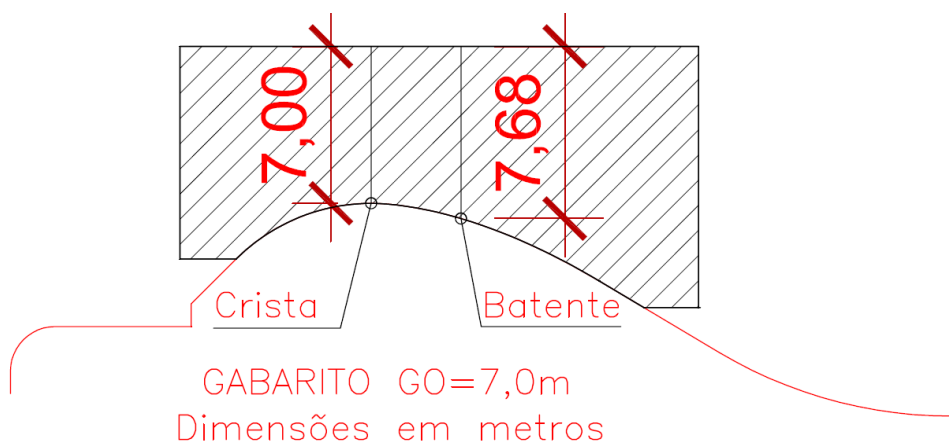


Figura 3.13. Croqui de gabarito para imposição de abertura parcial de comporta. Medidas de protótipo.

Para poder simplificar e identificar de forma mais simples, cada gabarito ou abertura foi nomeado com a distância perpendicular entre o perfil do vertedouro e a parte inferior da comporta. Na literatura técnica esta medida é conhecida como abertura da comporta ou G_0 , Figura 3.14 .

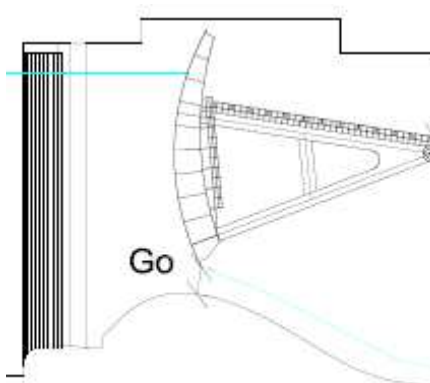


Figura 3.14. Distância entre o perfil do vertedouro e a parte inferior da comporta (G_0).

É interessante citar que para contemplar outras campanhas de ensaios, foram produzidos mais gabaritos de aberturas parciais, que atendem todas as situações do vertedouro da UHE Santo Antonio (Tabela 3.5). Nas aberturas (G_0) maiores que 13,5m, o vertedouro não terá mais controle de comporta, ou seja, trabalha com seu vão livre. Neste trabalho foram utilizadas as aberturas ou G_0 1,5 3,0, 4,5, 6,0, 7,5, 9,0 e o vão livre.

Tabela 3.5: Resumo das dimensões para confecção de gabaritos de abertura parcial.

Go		Yb		Batente	
Protótipo	Modelo	Protótipo	Modelo	Protótipo	Modelo
(m)	(cm)	(m)	(cm)	(m)	(cm)
1,00	2,00	0,58	1,15	1,257	2,51
1,50 ^(*)	3,00	1,17	2,34	1,848	3,70
2,00	4,00	1,74	3,48	2,42	4,84
2,50	5,00	2,30	4,60	2,98	5,96
3,00 ^(*)	6,00	2,85	5,70	3,53	7,06
3,50	7,00	3,39	6,78	4,07	8,14
4,00	8,00	3,92	7,84	4,6	9,20
4,50 ^(*)	9,00	4,44	8,88	5,12	10,24
5,00	10,00	4,96	9,92	5,64	11,28
5,50	11,00	5,48	10,96	6,16	12,32
6,00 ^(*)	12,00	5,99	11,98	6,67	13,34
6,50	13,00	6,49	12,98	7,17	14,34
7,00	14,00	7,00	14,00	7,68	15,36
7,50 ^(*)	15,00	7,50	15,00	8,68	17,36
8,00	16,00	8,05	16,10	9,68	19,36
8,50	17,00	8,50	17,00	10,68	21,36
9,00 ^(*)	18,00	9,00	18,00	11,68	23,36
9,50	19,00	9,50	19,00	12,68	25,36
10,00	20,00	10,00	20,00	13,68	27,36
10,50	21,00	10,50	21,00	14,68	29,36
11,00	22,00	11,00	22,00	15,68	31,36
11,50	23,00	11,50	23,00	16,68	33,36

Observação: as aberturas assinaladas com ^(*) foram utilizadas para a obtenção dos dados desta dissertação.

3.8 Características dos Ensaios

Neste próximo item são mostradas as condições dos ensaios realizados para a caracterização do fenômeno do ressalto hidráulico a jusante de um perfil vertedouro em uma bacia de dissipação de baixa queda e baixo número de Froude (Fr_1) na entrada do dissipador.

3.8.1 Escolha de Série de Vazões

Sabendo que um dos objetivos deste trabalho é a análise dos efeitos do ressalto com baixo número de Froude ($Fr_1 < 4,5$) na entrada da bacia de dissipação, na Tabela 3.6 é apresentado o intervalo dos valores de Froude ensaiados e também, para efeito de comparação, os intervalos utilizados por outros pesquisadores já citados no capítulo 2.

Desta maneira, o presente estudo optou por uma série de vazões que contemplem os números de Froude entre 1,70 e 7,73, pelos seguintes motivos:

- Comparar os dados levantados neste estudo com os dados de Endres (1990), Marques (1991), Pinheiro (1995) e Dai Prá (2011) para os quais que se dispõem das distribuições longitudinais de pressão, flutuações de pressão, coeficiente de assimetria, coeficiente de curtose e coeficiente estatístico para o ressalto hidráulico livre ou tipo A. Salienta-se que os dados deste estudo, com número de Froude maior que 4,38, servirão para validar os mesmos ao defrontá-los com os dados anteriormente citados.
- Somente os autores Lopardo (1986), Pinto (1990) e Mees (2008) apresentam resultados para Froude abaixo de 4,0, mesmo assim somente os dois primeiros autores disponibilizam seus dados do coeficiente de flutuação de pressão (C_p).

Procurou-se manter os níveis a montante o mais próximo possível dos apresentados na operação do vertedouro da UHE Santo Antonio, ou seja, na cota operacional na elevação 70,00. Somente a situação 1 (Tabela 3.7), que não possui o controle de comporta, ou seja vão livre, não pode manter essa condição.

Para se determinar os níveis de jusante dos ensaios deste trabalho, foi levada em conta a premissa de se manter o ressalto hidráulico com uma submergência igual a 1,0. Essa premissa obrigou a se operar as comportas do vertedouro com aberturas variáveis. Para se posicionar o ressalto com início na parte plana do vertedouro usou-se a comporta de jusante do final do canal experimental. Cabe salientar que os autores Endres (1990), Marques (1991), Pinheiro (1995) e Dai Prá (2011) utilizaram nos seus ensaios vertedouros livres sem o uso de comportas. A Tabela 3.7 resume as principais grandezas medidas e calculadas nas campanhas de ensaio deste estudo.

Tabela 3.7: Situações ensaiadas neste estudo: dados em escala de modelo.

Situação	Vazão	Fr_1	Y_1	Y_2	Go	Na Mont. ^(*)	Na Just. ^(*)	Δh
-	(l/s)	-	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
1	444	1,70	0,19	0,37	Livre	0,52	0,35	0,17
2	325	2,9	0,11	0,39	0,18	0,62	0,36	0,26
3	276	3,16	0,09	0,37	0,15	0,62	0,33	0,28
4	227	3,69	0,07	0,35	0,12	0,62	0,31	0,31
5	175	4,38	0,05	0,31	0,09	0,61	0,27	0,34
6	122	5,22	0,04	0,26	0,06	0,62	0,23	0,39
7	70	7,73	0,02	0,21	0,03	0,67	0,16	0,51

^(*) Os níveis de montante e jusante consideram a lâmina de água sob a bacia de dissipação na elevação 38,00m.

A apresenta em detalhe as grandezas detalhadas na Tabela 3.7.

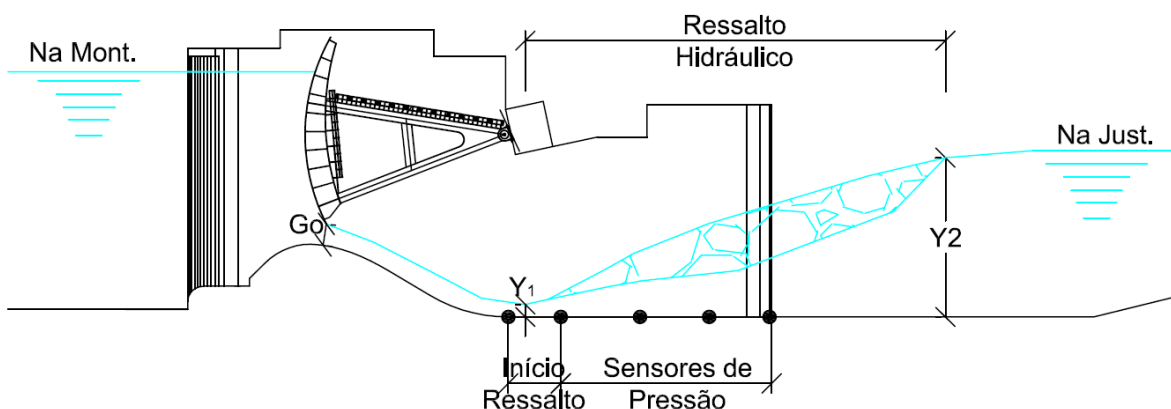


Figura 3.15: Principais grandezas dos ensaios realizados.

Os elementos da Tabela 3.7 foram determinados da seguinte forma:

- Vazão: imposta através do medidor de vazão
- Y_1 (Altura conjugada rápida do ressalto): medida com o uso de régua linimétrica móvel;
- Fr_1 (Número de Froude na entrada do dissipador): calculado através da equação 2.1;
- Y_2 (Altura conjugada lenta do ressalto): estimada com o uso da equação de Bélanger (equação 2.2);
- G_0 (Distância perpendicular entre o perfil do vertedouro e a parte inferior da comporta): imposta através de gabarito;
- NA Mont. e NA Just. (Níveis de água de montante e jusante do eixo do vertedouro (crista), respectivamente): medidos através de régua

linimétricas instaladas no canal de ensaios. Essas réguas estão situadas a 5,2m e 9,8m a montante e a jusante do eixo da crista do vertedouro, respectivamente; e

- Δh (Diferença entre níveis de água de montante e jusante): medida pelas réguas linimétricas.

Nas próximas páginas é apresentada uma seqüência de imagens de todas as situações realizadas neste estudo (Figura 3.16 a Figura 3.22).



Figura 3.16: Situação 1; Vazão: 444 l/s; Fr_1 : 1,70; Y_1 : 0,19m; Abertura Livre.



Figura 3.17: Situação 2; Vazão: 325 l/s; Fr_1 : 2,90; Y_1 : 0,11m; Abertura Go: 0,18m.



Figura 3.18: Situação 3; Vazão: 276 l/s; Fr_1 : 3,16; Y_1 : 0,09m; Abertura Go : 0,15m.



Figura 3.19: Situação 4; Vazão 227: l/s; Fr_1 : 3,69; Y_1 : 0,07m Abertura Go : 0,12m.



Figura 3.20: Situação 5; Vazão: 175 l/s; Fr_1 : 4,38; Y_1 : 0,05; Abertura Go : 0,09m.



Figura 3.21: Situação 6; Vazão: 122 l/s; Fr_1 : 5,22; Y_1 : 0,04m Abertura Go: 0,06m.



Figura 3.22: Situação 7; Vazão: 70 l/s; Fr_1 : 7,73; Y_1 : 0,02m Abertura Go: 0,03m.

3.8.2 Determinação de Alturas Conjugadas

Tento em vista facilitar a visualização das características de início do ressalto hidráulico, optou-se pela imposição do nível de jusante em uma posição em que a altura conjugada rápida Y_1 se localiza no início da bacia de dissipação. Desta forma o ressalto formado foi sempre do tipo livre ($S=1$). A altura conjugada rápida Y_1 foi medida através de uma escala linimétrica graduada móvel. O processo de medição de Y_1 através de ponta linimétrica móvel pode acarretar em erros de laboratório causados em função da grande agitação da superfície da lâmina de água no início do ressalto hidráulico. Também é necessário se ter atenção ao fato de que quanto menor a dimensão a ser medida, menores vazões, maiores números de Froude e maior a influência do erro.

A determinação da altura conjugada lenta (Y_2) foi feita através da equação de Bélanger, conforme Equação 2.2 (aqui novamente apresentada).

$$\frac{Y_2}{Y_1} = \frac{1}{2} \cdot \left[\sqrt{1 + 8 \cdot Fr_1^2} - 1 \right] \quad 2.2$$

Uma vez conhecidas as alturas conjugadas, é possível calcular a posição relativa de cada tomada de pressão (proposta por Marques *et al.* (1997)) para cada número de Froude (Tabela 3.8).

Tabela 3.8: Posições adimensionalizadas apresentadas neste trabalho.

Situação	Vazão (l/s)	Fr ₁	X/(Y ₂ -Y ₁)			
			T1	T2	T3	T4
1	444	1,70	0,05	1,19	2,18	3,05
2	325	2,90	0,12	0,84	1,47	2,02
3	276	3,16	0,21	0,96	1,62	2,19
4	227	3,69	0,18	0,94	1,6	2,18
5	175	4,38	0,22	1,02	1,72	2,33
6	122	5,22	0,26	1,18	1,98	2,68
7	70	7,73	0,36	1,44	2,37	3,19

Na Tabela 3.8, T1, T2, T3 e T4 são as distâncias dos transdutores de pressão ao início do ressalto hidráulico.

Para se determinar a posição longitudinal de início do ressalto hidráulico (X), foi utilizada uma escala ou régua metálica. O zero da escala foi colocado em uma marcação do eixo da crista situada sob o pilar do vertedouro. A partir desse zero foi medida a distância até a régua linimétrica móvel, posicionada no início do ressalto hidráulico. Com o resultado desta medida foram determinadas as posições adimensionais X/(Y₂-Y₁) de cada situação ensaiada. Lembrando que o ressalto foi sempre posicionado pela comporta de jusante do canal de ensaios para iniciar na parte plana da bacia de dissipação, elevação de 38,00m, e onde estão situados os 4 transdutores de pressão disponíveis.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS DE ENSAIO

Os dados experimentais aqui apresentados serão devidamente comparados com valores obtidos de outros autores a fim de validar este estudo e se fazer avaliações e observações a respeito do fenômeno do ressalto hidráulico em vertedouros de baixa queda e baixo valor de número de Froude.

Após terem sido realizados os ensaios para as condições da Tabela 3.7, efetuou-se uma análise das pressões médias, flutuações de pressão, coeficientes de flutuação de pressão (C_p), coeficientes de assimetria (A_d), coeficientes de curtose (K) e coeficientes de distribuição de probabilidade (N). Para poder simplificar as observações do leitor, os dados são separados por autor e, quando possível, pelo número de Froude, sempre com a mesma legenda. É importante lembrar que são inclusos os dados de pressões médias, desvio padrão, coeficiente de assimetria (A_d) e coeficiente de curtose (K) dos autores Pinheiro (1985), Endres (1990), Marques (1995) e Daí Pra (2011) depois de passarem pela metodologia de adimensionalização proposta por Marques *et al.* (1997). Os quatro autores, anteriormente citados estudaram os seguintes intervalos de número de Froude no início do ressalto hidráulico (Fr_1) indicados na Tabela 4.1.

*Tabela 4.1: Intervalo de Fr_1 ensaiado por autores que utilizaram a adimensionalização proposta por Marques *et al.* (1997) e inclusos neste estudo.*

Autores	Intervalo de Fr_1 Ensaídos
Endres (1990)	4,20 - 8,60
Marques (1995)	4,47 - 8,59
Pinheiro (1995)	6,10 - 10,00
Dai Prá (2011)	4,38 - 9,26

Os resultados do presente estudo com números de Froude iguais a 4,38, 5,22 e 7,73 têm sempre a mesma cor que os resultados de Dai Prá (2011) com números de Froude iguais a 4,38, 4,97 e 7,53, respectivamente, pois seus valores são bastante próximos, possibilitando desta forma uma melhor visualização.

4.1 Análise da Pressão Média Junto ao Fundo do Ressalto Hidráulico

O conjunto de todos os dados de pressões médias obtidas no modelo de detalhe do vertedouro da UHE Santo Antonio está apresentado na Tabela 3.7, adimensionalizados conforme o proposto por Marques *et al.* (1997). Na Figura 4.1, o eixo das abscissas refere-se à posição relativa ao início do ressalto hidráulico (X), adimensionalizada em função das alturas conjugadas. No eixo das ordenadas se constam os valores de pressão média (P_x), em metros de coluna de água, adimensionalizados em relação às alturas conjugadas (Y_1 e Y_2).

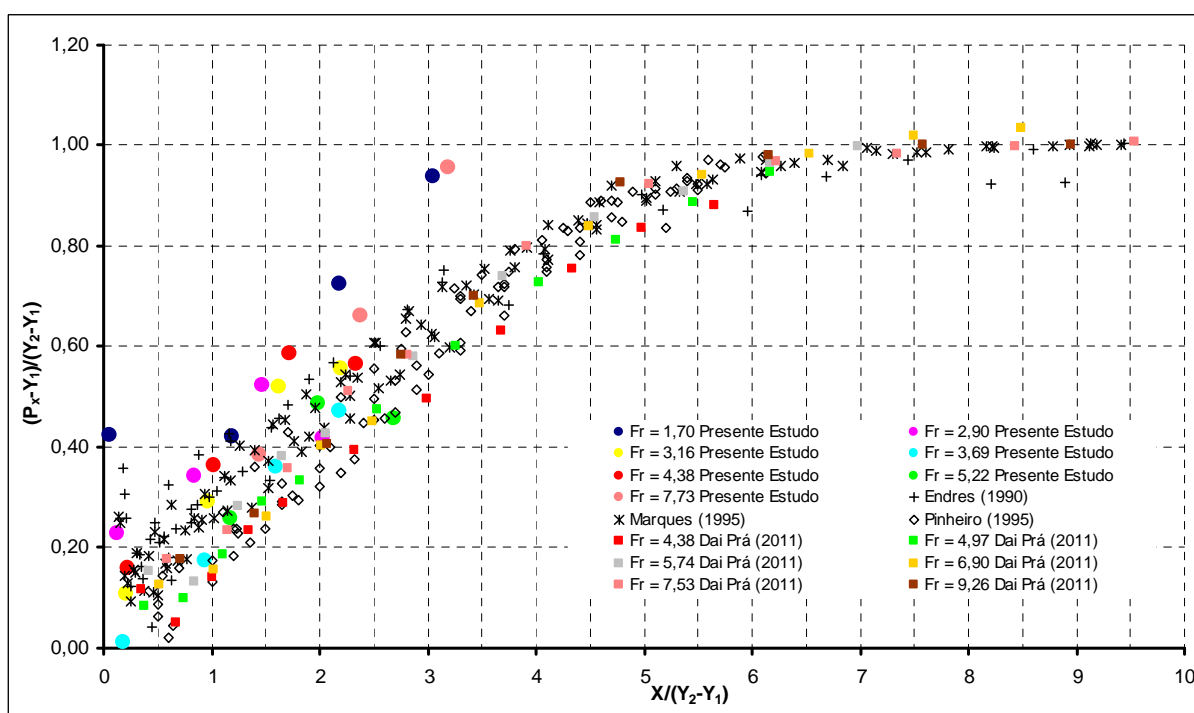


Figura 4.1: Pressões médias adimensionalizadas em comparação entre o presente estudo e resultados de outros autores.

Na Figura 4.1 observa-se que os dados do presente estudo seguem a tendência geral dos outros autores. Entretanto, se percebem que os Froudes deste trabalho tenderam a ficar na parte superior da dispersão dos dados, principalmente números os Froudes de 1,70 e 7,73.

Isso, aparentemente, não se deve a um efeito específico do pré-ressalto ($1,7 \leq Fr \leq 2,5$) e muito menos do ressalto estável ($4,5 \leq Fr \leq 9,0$). Julga-se que esse

efeito esteja mais ligado a determinação de Y_1 e de Y_2 e a identificação da posição do início do ressalto hidráulico.

Nas séries apresentadas, a oscilação na superfície da linha de água pode induzir erros de medição em Y_1 , principalmente para os maiores números Froude, que possuem um menor valor de Y_1 . Por consequência, este erro de medição se propaga para os valores de Y_2 calculados pela equação de Bélanger.

A curva de concordância entre o vertedouro, a parte plana da bacia de dissipação e a baixa altura do vertedouro pode ter um efeito mais significativo, principalmente para os menores, números de Froude que possuem maiores vazões e maiores valores de Y_1 .

Devem ser considerados os efeitos do alargamento do canal em função da existência de pilares no modelo (Figura 3.4) até o final do trecho instrumentado, que no caso do presente estudo provocam um alargamento de cerca de 20% na bacia, antes do término do ressalto. Isso pode vir a influenciar na determinação da altura conjugada lenta (Y_2). Nos casos de Endres (1990), Marques (1995), Pinheiro (1995), não há pilares e a largura do canal é constante.

As estruturas utilizadas por Endres (1990), Marques (1995), Pinheiro (1995) e Daí Pra (2011) não fazem o uso de comportas. No presente estudo foi necessária a utilização desse artifício para se garantir os números de Froude ensaiados (Tabela 3.7), pois sem essa condição não poderia obter os números Froude desejados.

Um efeito inerente e sempre presente em modelos físicos é a determinação da posição de início do ressalto de difícil fixação. Long *et al.* (1991) indicam que a amplitude da oscilação do início do ressalto, a jusante de comportas, cresce com o número de Froude e podem chegar a valores da ordem de 20% até 90% de Y_1 para números de Froude variando entre 4,0 e 9,0.

No modelo físico do presente estudo há uma rampa após a bacia de dissipação (Figura 3.4) que pode provocar uma submergência artificial. Os outros autores citados na Figura 4.1 não têm essa característica em seus modelos.

Ao se observar as figuras de 3.16 até 3.22, existe uma tendência do ressalto estar iniciando um pouco antes do início da bacia. Isso estaria indicando que o ressalto está levemente afogado. Neste caso, os valores de $X/(Y_2-Y_1)$ para esses números Froude deveriam aumentar o seu valor, desta forma os valores se aproximariam dos pontos dos demais autores.

Para o número de Froude de 3,69, aparentemente o ressalto está bem posicionado (Figura 3.19), e os valores estão situados no meio dos pontos dos demais autores. Essa situação valida mais uma vez os ensaios aqui apresentados.

Outro aspecto que deve ser destacado, é que devido à instalação experimental disponível, somente quatro tomadas de pressão puderam ser instaladas (Figura 4.2), e só foi possível fazer medições de pressão até a posição adimensional $X/(Y_2-Y_1) = 3,19$ para o número de Froude 7,73. Logo, não foi possível observar que as pressões médias adimensionalizadas tendem a ficar como uma reta paralela ao eixo horizontal a partir da posição $X/(Y_2-Y_1) = 6,0$ aproximadamente.



Figura 4.2: Situação 1; Vazão: 444 l/s; Fr_1 : 1,70; Y_1 : 0,19m; Abertura Livre; Lâmina de água sob os transdutores de pressão.

4.2 Flutuação de Pressão

Da mesma forma que os valores de pressão média foram adimensionalizados pela metodologia sugerida por Marques (1997), pode-se também usá-la para os valores de flutuação de pressão ou o desvio padrão da amostra. A Figura 4.3 ilustra os dados do presente estudo em comparação com outros autores anteriormente relacionados.

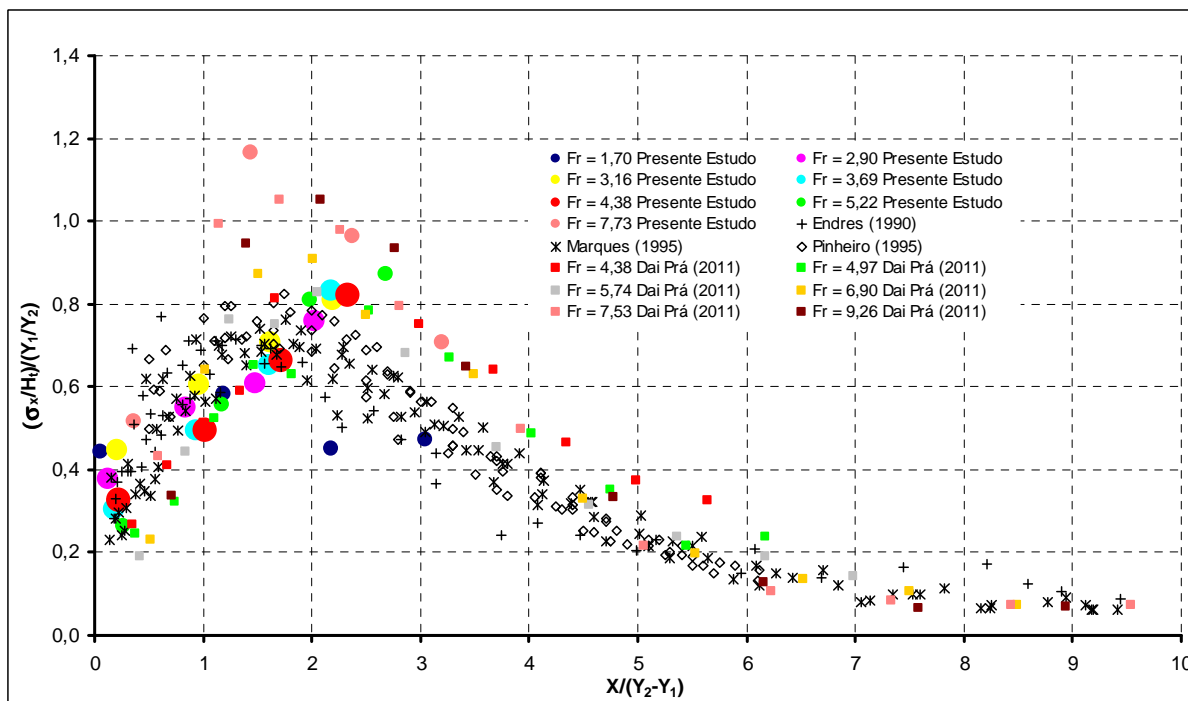


Figura 4.3: Flutuações de pressão adimensionalizadas em comparação entre o presente estudo e resultados de outros autores.

Observando a distribuição das flutuações de pressão na Figura 4.3, constata-se que os valores encontrados tendem a ter um comportamento semelhante aos dos outros autores para o ressalto livre ou tipo A. Entretanto, estes valores tenderam a ficar acima dos valores de Endres (1990), Marques (1995) e Pinheiro (1995), e acompanharam o desenvolvimento de Daí Prá (2011). Isto provavelmente está ocorrendo pelos mesmos motivos indicados na análise da pressão média (determinação de Y_1 e Y_2 , e posição do início do ressalto e influência da submergência).

Pode-se visualizar que a flutuação máxima de pressão só foi atingida na série apresentada no Froude 7,73 e que ela se situa em torno da posição $1,5 < X/(Y_2 - Y_1) < 2,0$ do eixo das abscissas, assim como os outros autores representaram.

Nesta série, o ramo ascendente e o ramo descendente da curva de flutuação de pressão podem ser claramente vistos. É também interessante salientar que os dados dos números de Froude aqisitados nesta pesquisa, 4,38, 5,22 e 7,73, têm um comportamento bem semelhante aos dados de Dai Prá (2011) para os números de Froude 4,38, 4,97 e 7,53, respectivamente.

Outra abordagem da flutuação de pressão bastante conhecida é a avaliação do coeficiente de pressão (C_p). Na Figura 4.4 são apresentados os dados do presente

(C_p) na faixa de 1,0 até 2,0 para o número de Froude, por este motivo, o número de Froude 1,70 do presente estudo não está aqui apresentado.

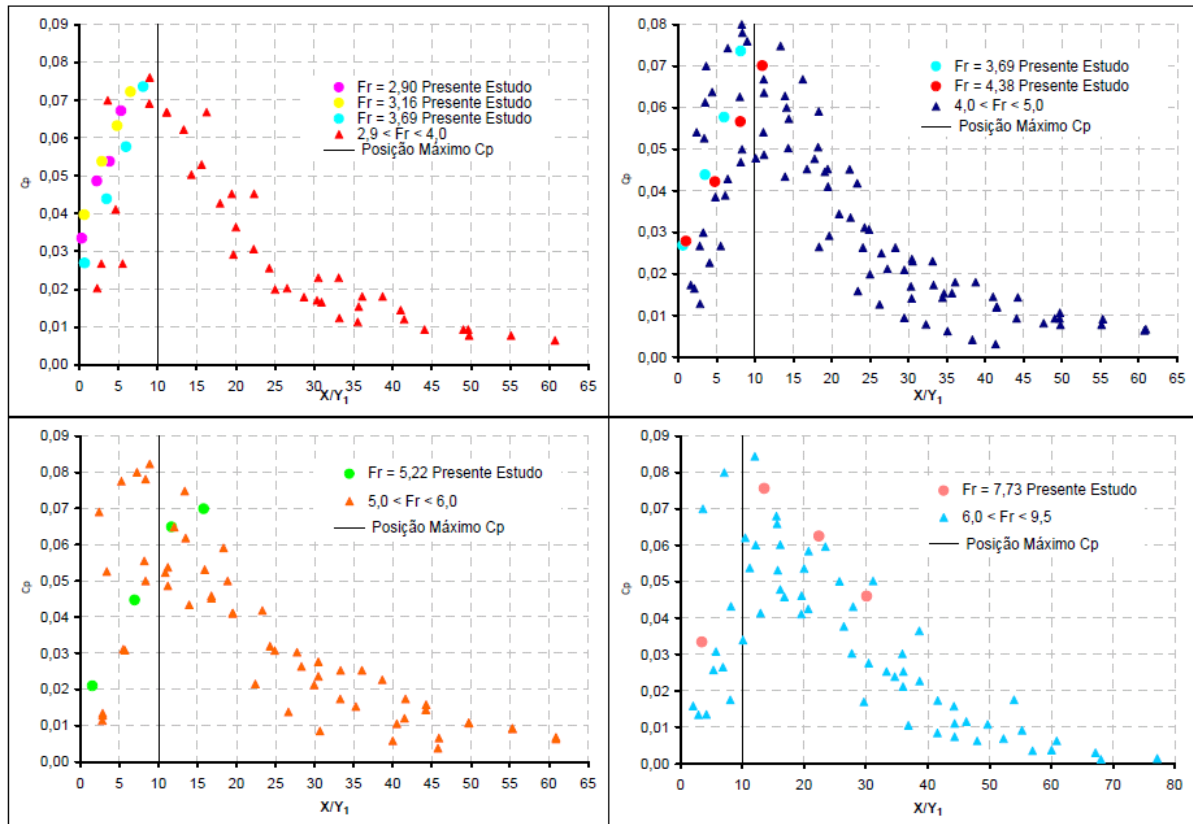


Figura 4.5: Comparativo do coeficiente de flutuação de pressão (C_p) por faixa de número de Froude unitária.

Observando o conjunto de gráficos da Figura 4.5, nota-se que o ponto de coeficiente de flutuação de pressão máximo pode ter sido atingido no entorno da posição adimensional (X/Y_1) = 10 na maioria dos casos deste estudo. Porém, só é possível ter certeza de que o C_p máximo foi alcançado para o número de Froude igual a 7,73, que apresenta um acréscimo e um decréscimo dos valores.

Com base na Figura 4.6 com $Fr_1 = 7,73$, conclui-se que o ressalto está bem mais desenvolvido e estável que os demais, ou seja, o rolo está completamente desenvolvido e o ressalto hidráulico provavelmente termina na posição indicada.



Figura 4.6: Situação 7; Vazão 70 l/s; $Fr_1: 7,73$; $Y_1: 0,02m$ Abertura $G_0: 0,03m$, comprimento sugerido do ressalto hidráulico.

A Figura 4.7 apresenta a comparação dos valores máximos do desvio padrão, adimensionalizado na forma do coeficiente de flutuação de pressão máxima ($C_{p_{máx}}$), apresentada por Drapeau (1994), e o presente estudo.

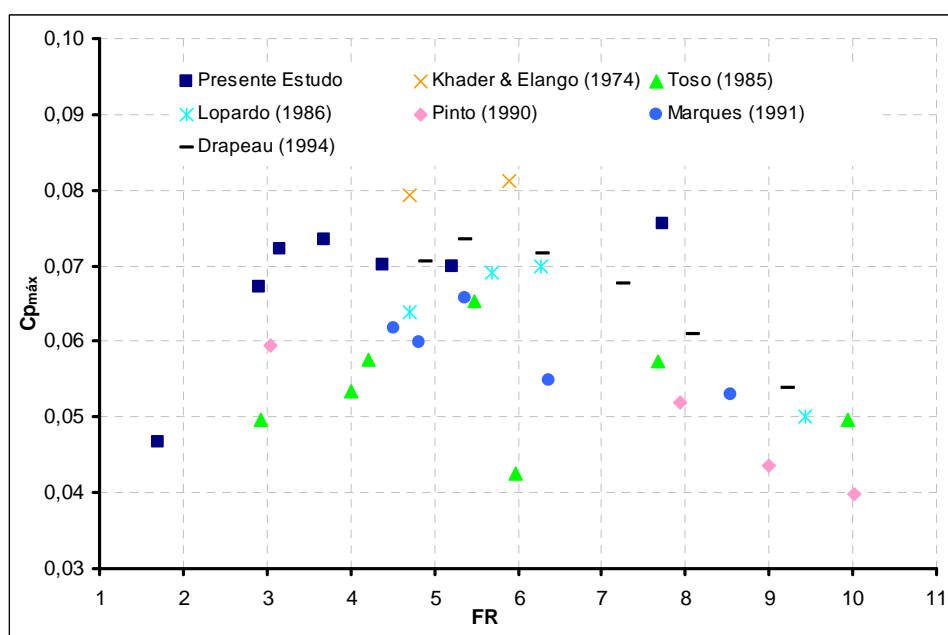


Figura 4.7: Coeficiente de flutuação de pressão ($C_{p_{máx}}$) em comparação com outros autores.

Observa-se nesta figura que a tendência do coeficiente de flutuação de pressão máxima ($C_{p_{máx}}$) é da ordem de 0,075 para valores de Froude entre 3,5 e 8,0 (Figura 4.7). para números de Froude menores que 3,5 e maiores que 8,0 há uma tendência dos valores de $C_{p_{máx}}$ diminuírem, conforme indicado na figura 4.8.

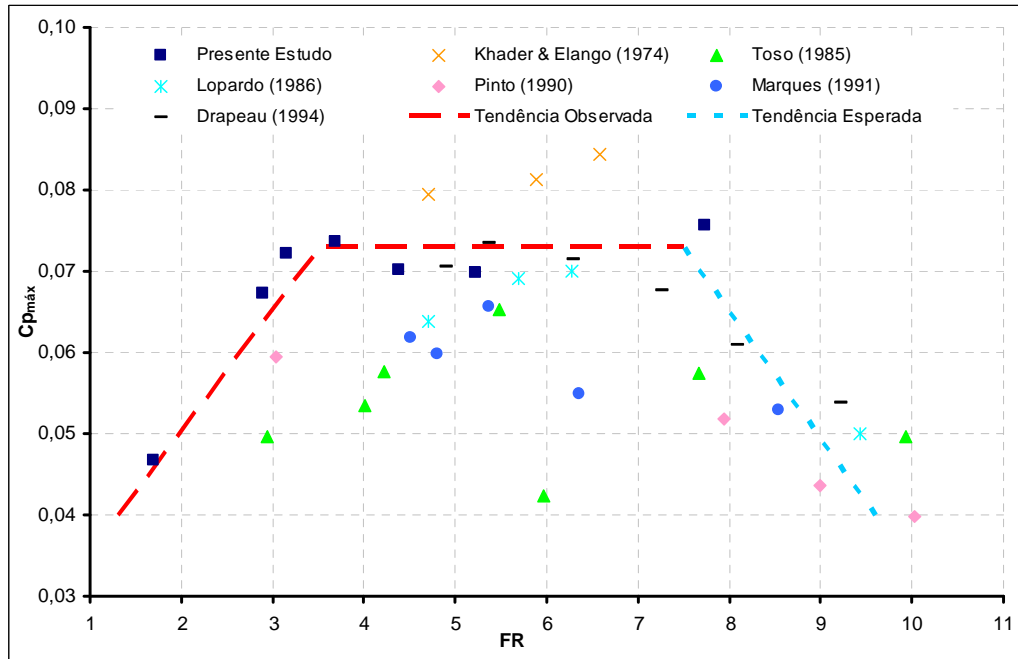


Figura 4.8: Coeficiente de flutuação de pressão ($C_{p_{máx}}$) tendências observada e esperada.

A posição de máxima flutuação de pressão em relação à profundidade conjugada rápida ($X_{C_{p_{máx}}}/Y_1$) em função do número de Froude é apresentada na Figura 4.9, adaptada do trabalho de Drapeau (1994). Os dados do presente estudo tendem a ficar na parte superior dos resultados dos outros autores.

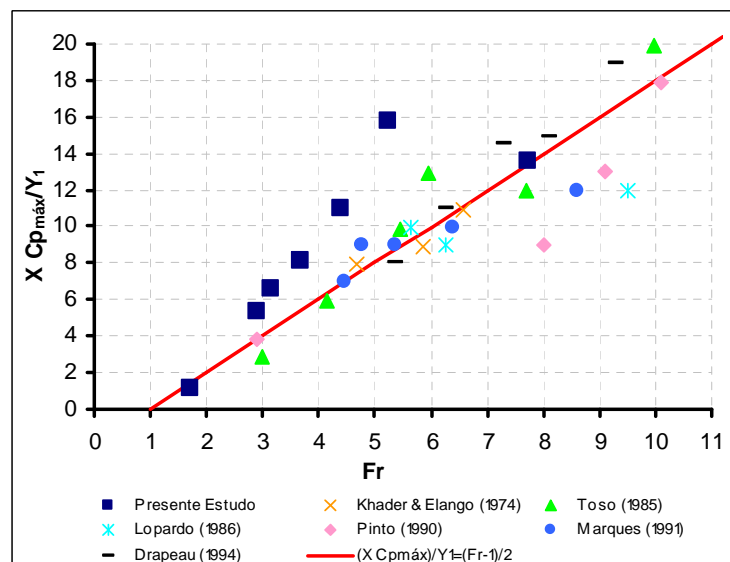


Figura 4.9: Comparação entre a posição da máxima flutuação de pressão adimensionalizada conforme o coeficiente de flutuação de pressão (C_p).

Após a comparação com os resultados de outros autores, pode-se concluir que a posição de máxima flutuação aumenta com o número de Froude, conforme a equação da reta sugerida por Drapeau (1994). As vazões ensaiadas neste estudo com os números de Froude iguais a 1,70 e 7,73 apresentam também uma tendência

de o valor de $X_{Cp_{m\acute{a}x}}/Y_1$ aumentar com o Froude. Entretanto, os valores estão na parte superior da dispersão dos resultados dos outros autores e isso provavelmente se deve aos mesmos motivos apresentados anteriormente (determinação de Y_1 e Y_2 , oscilação do ponto de início do ressalto, afogamento artificial existente).

4.3 Análise do Coeficiente de Assimetria (Ad)

A análise dos coeficientes de assimetrias (Ad) das amostras coletadas em cada tomada de pressão é importante para definir as zonas de separação do escoamento turbulento (Lopardo, 1987). Isso ocorre quando há uma mudança de sinal no coeficiente de assimetria. Para o estudo do coeficiente de assimetria (Ad), foram utilizados os dados medidos por Marques *et al.* (1995), Endres (1991) e Pinheiro (1995) e Dai Prá (2011).

Marques *et al.* (1997) apresentam os resultados de assimetria em função da posição relativa ao início do ressalto, adimensionalizada através das alturas conjugadas. Optou-se, então, por utilizar esse mesmo processo de adimensionalização para os resultados cedidos pelos demais pesquisadores, com o objetivo de visualizar a distribuição longitudinal de todos os valores. Na Figura 4.10, são apresentados os valores do coeficiente de assimetria (Ad) obtidos pelos diferentes autores e no presente estudo. Observa-se que os valores do coeficiente de assimetria apresentam uma mesma tendência de diminuir à medida que se afasta do início do ressalto. Os resultados do presente trabalho estão na parte inferior da dispersão dos valores. Este efeito pode ser atribuído ao pouco desenvolvimento do ressalto nestas posições e à baixa queda do vertedouro.

Segundo Marques *et al.* (1997), a explicação para os valores altos no início do ressalto é a decorrência da proximidade com o trecho curvo do vertedouro somado à influência do rolo formado nessa região.

Com base na Figura 4.10, verifica-se que os valores do coeficiente de assimetria (Ad) para os demais autores estão decrescentes até uma relação de $X/(Y_2-Y_1) = 6$ (final do rolo), para depois aumentarem até a posição $X/(Y_2-Y_1) = 8,0$ (final da influência do ressalto hidráulico), permanecendo próximo do valor zero após essa posição.

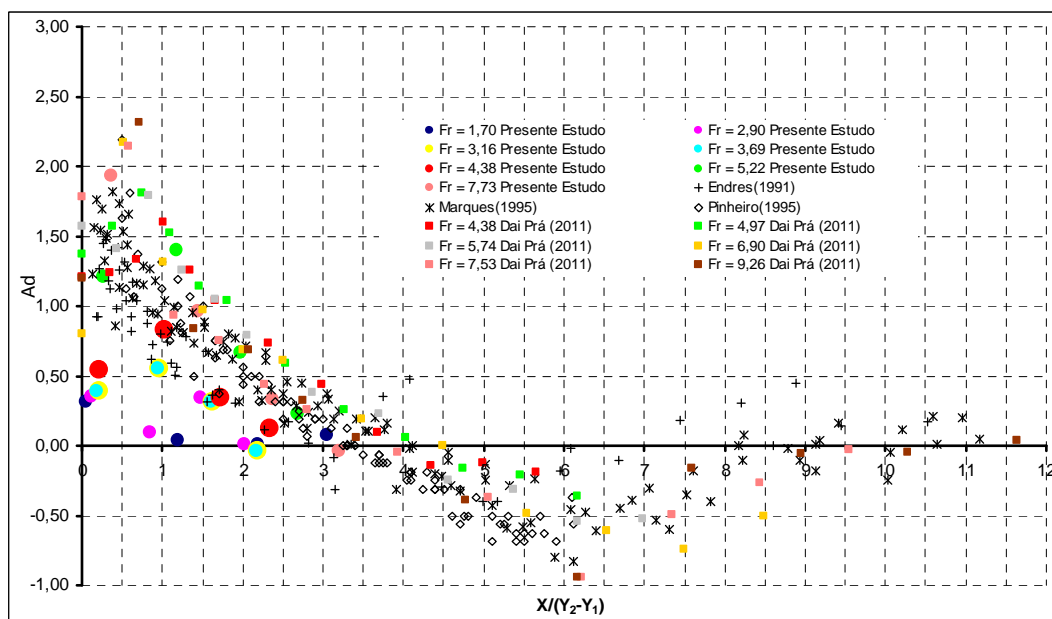


Figura 4.10: Coeficientes de assimetria (Ad) em comparação entre o presente estudo e os resultados de outros autores.

A mudança de sinal do coeficiente de assimetria (Ad), conforme Lopardo (1987) e Marques *et al.* (1997), corresponde ao ponto de descolamento onde a velocidade começa a apresentar uma componente vertical para cima. Só apresentaram valores de coeficiente de assimetria (Ad) negativos, os escoamentos deste estudo com números de Froude 3,16, 3,69 e 7,73, indicando que os sensores de pressão estão mais perto da região de descolamento $X/(Y_2 - Y_1) = 4$.

4.4 Análise da distribuição longitudinal do coeficiente de curtose (K)

O coeficiente de curtose (K) indica o grau de dispersão que caracteriza o "achatamento" da curva da função de distribuição. Valores menores que 3 indicam distribuições mais afuniladas (mais altas) e concentradas em torno do valor médio, quando comparadas com a distribuição normal. Caso forem observados valores superiores a 3, indicam que a função de distribuição de dados é mais achatada e os resultados estão menos concentrados em relação à média em comparação com uma distribuição do tipo normal.

A Figura 4.11 apresenta a distribuição longitudinal do coeficiente de curtose ao longo do ressalto hidráulico, comparando os valores medidos no ressalto formado a jusante do vertedouro da UHE Santo Antonio com aqueles de outros autores. Mais uma vez se utiliza a adimensionalização proposta por Marques *et al.* (1997) para posicionar as medições.

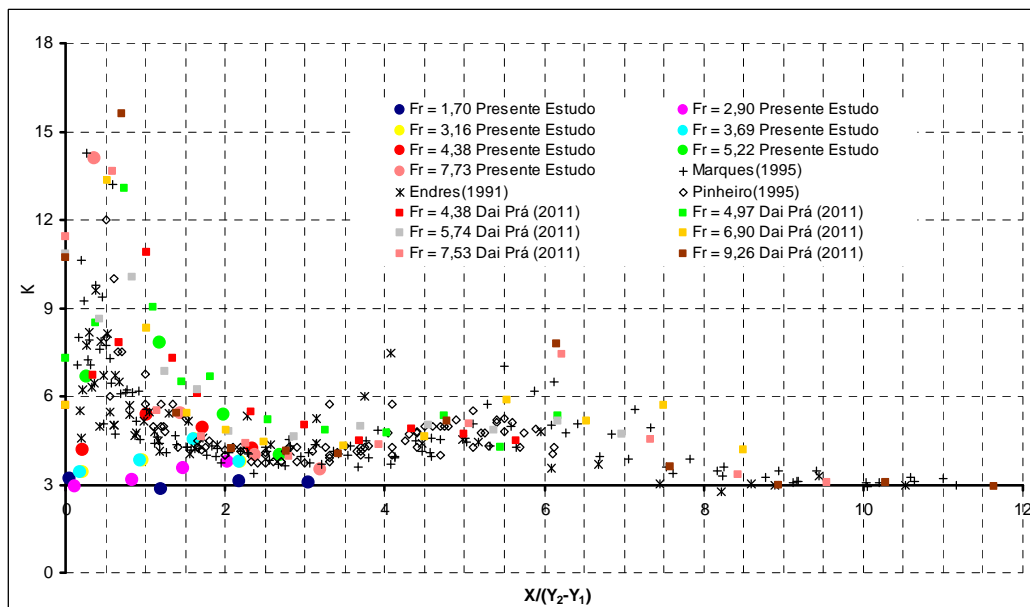


Figura 4.11: Coeficientes de curtose em comparação entre o presente estudo e os resultados de outros autores.

A parte inicial do ressalto, onde o coeficiente de curtose apresenta valores elevados, representa uma região de menor concentração dos valores em torno da média, evidenciando grande flutuação de pressão. Os valores do coeficiente de curtose tendem a se manter constantes entre $1 < X/(Y_2 - Y_1) < 4$, representando, segundo Marques *et al.* (1997), a região onde o escoamento está se desenvolvendo junto ao fundo. Já a partir da posição adimensionalizada $X/(Y_2 - Y_1) = 4$ até a posição $X/(Y_2 - Y_1) = 6$, o coeficiente de curtose volta a aumentar, sendo essa a região onde o escoamento tende a se descolar do fundo: não foi possível observar esse efeito pois só foram instalados sensores até a posição 4. Finalmente, vemos uma rápida aproximação aos valores de coeficiente de curtose 3 ($K=3$) para os números de Froude 1,70, 2,90, 3,16, 3,69 e 4,38, sugerindo o final da zona de influência do ressalto e da dissipação de energia. Para os outros valores de Froude (5,22 e 7,73) apresentados tem-se um comportamento bastante similar ao restante dos autores, validando, desta forma, mais uma vez os resultados deste trabalho.

Finalizando as análises do coeficiente de assimetria (item anterior) e do coeficiente de curtose. O leitor pode ver nas Figura 4.10 e Figura 4.11 que os dados apresentados do presente estudo tendem a ficar na parte inferior da dispersão de dados de outros autores, principalmente para os números de Froude menores que 4,0. Esse efeito pode ser creditado à relação entre a energia cinética e potencial estarem na mesma ordem de grandeza.

4.5 Coeficiente Estatístico (N)

Como apresentado por Teixeira *et al.* (2003b), a partir do conhecimento da pressão média, do desvio padrão e do coeficiente estatístico de distribuição de probabilidade (N) é possível estimar os valores de pressão para diferentes probabilidades de ocorrência através da equação 2.17 aqui rerepresentada.

$$P_{\%} = P_x \pm N \cdot \sigma_x \quad 2.17$$

Sendo:

$P_{\%}$ = pressão com probabilidade de ser inferior ou igual a um determinado valor;

P_x = pressão média em um determinado ponto do ressalto hidráulico;

σ_x = desvio padrão da amostra de pressão em um determinado ponto do ressalto hidráulico;

N = valor de probabilidade - função da distribuição estatística da amostra.

Pela análise do coeficiente de assimetria e curtose, sabe-se que a distribuição de pressão ao longo do ressalto hidráulico difere de uma distribuição normal.

Foram determinados os valores do coeficiente estatístico N para as probabilidades 0,1%, 1%, 5%, 10%, 50%, 90%, 95%, 99% e 99,9%. Segundo Lopardo (2003), as pressões extremas negativas ligadas às probabilidades 0,1% e 1% podem fornecer informações sobre o processo de cavitação em bacias de dissipação.

A Figura 4.12 apresenta a distribuição longitudinal do coeficiente de distribuição de probabilidades para os ressaltos hidráulicos estudados.

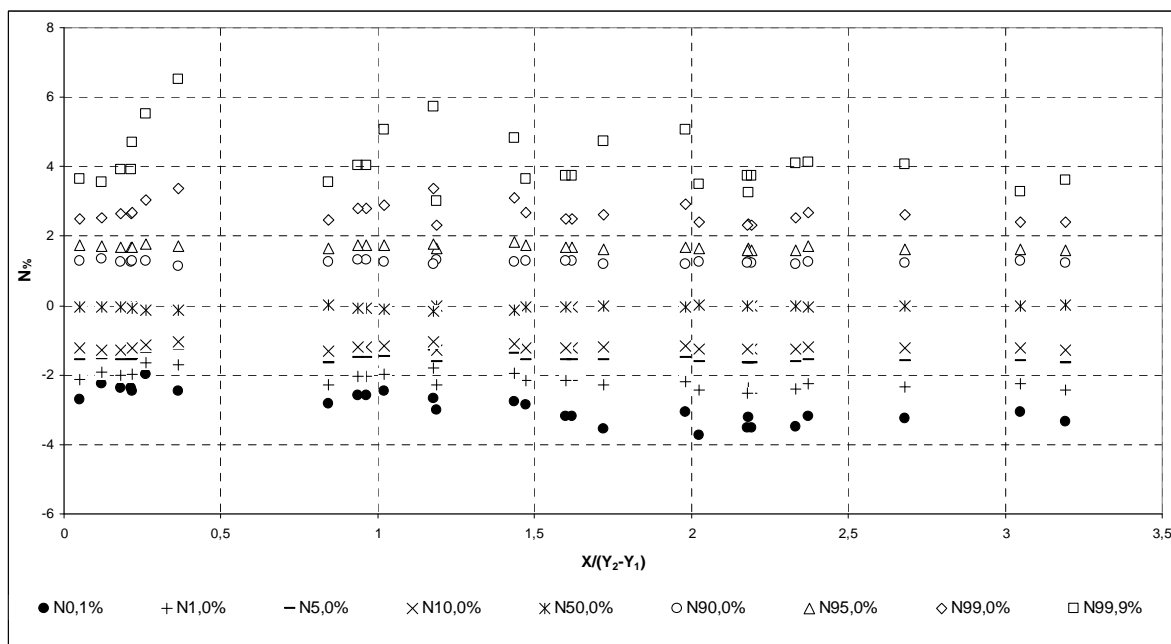


Figura 4.12: Distribuição longitudinal do coeficiente estatístico (N) em função da posição relativa ao início do ressalto hidráulico.

A partir da análise da Figura 4.12, pode-se verificar uma maior dispersão dos pontos nas probabilidades extremas, isto é, tanto nas pressões mínimas e máximas. Da mesma forma, verifica-se uma maior dispersão também nas posições iniciais do ressalto, as quais correspondem a efeitos da curva vertical de concordância do vertedouro com a estrutura de dissipação. Outra característica bastante visível refere-se à forma constante com que o coeficiente N desenvolve-se ao longo do ressalto, no caso principalmente das pressões de 10% a 90%.

Cabe salientar que para a probabilidade de 50% de ocorrência, o valor do coeficiente estatístico de distribuição deveria ser igual a zero, caso se esperasse uma distribuição normal de probabilidades. Nota-se que para essa probabilidade, o valor de “N” é bem próximo ao valor esperado.

Para avaliar a variabilidade do coeficiente estatístico N em ressaltos hidráulicos tipo A, pode-se fazer um confronto com os dados de Dai Prá (2011). Nas Figura 4.13 e Figura 4.14 são apresentados os coeficientes estatísticos com 0,1% e 1,0% de probabilidade de não excedência, respectivamente.

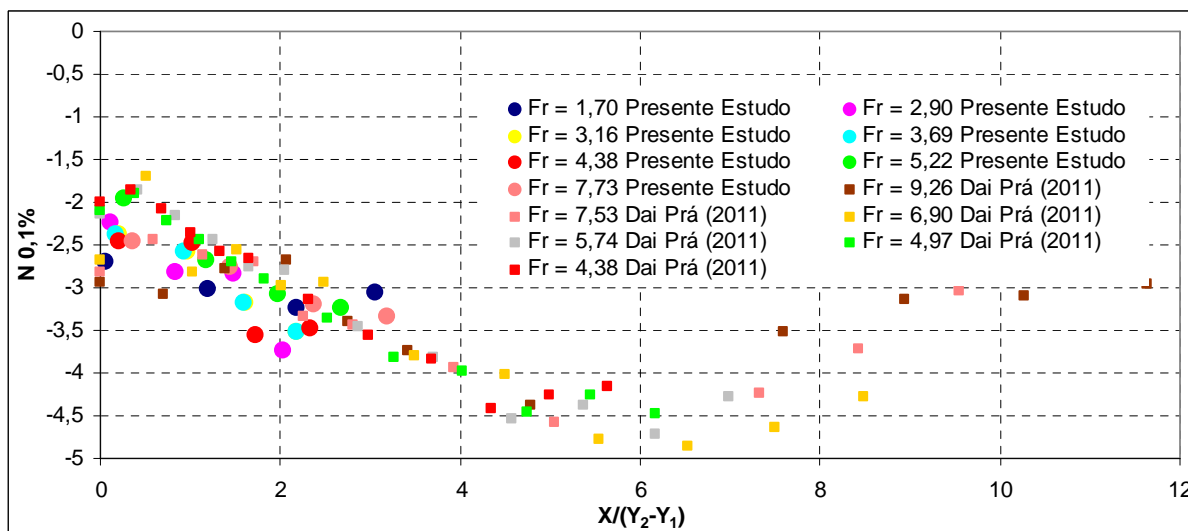


Figura 4.13: Coeficiente estatístico do ressalto hidráulico clássico (Tipo A): probabilidade de não excedência de 0,1%.

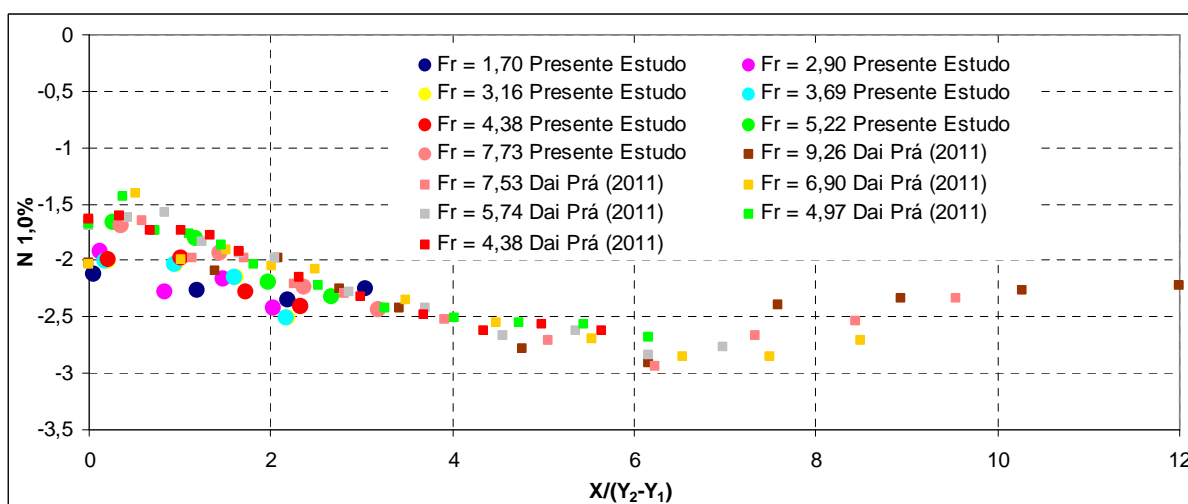


Figura 4.14: Coeficiente estatístico do ressalto hidráulico clássico (Tipo A): probabilidade de não excedência de 1,0%.

Ao observar as Figura 4.13 e Figura 4.14, vemos que os coeficientes estatísticos $N_{0,1\%}$ e $N_{1,0\%}$ seguem a mesma tendência de decrescer até a posição adimensional $X/(Y_2-Y_1) = 6,0$, onde finaliza o rolo do ressalto hidráulico. Observa-se que os valores encontrados no presente estudo atingiram a mesma tendência até a posição adimensional $X/(Y_2-Y_1) = 3,97$ se comparados com os de Dai Prá (2011).

5 Considerações Finais

Na revisão bibliográfica realizada durante a preparação desta dissertação, foi verificado que a maioria dos trabalhos na área de dissipação de energia por ressalto hidráulico relatam estudos sobre pressões médias e flutuações de pressão em dissipadores de energia com Froude maior que 4,5 na seção de montante do ressalto. São raros na literatura os trabalhos que apresentam número de Froude menor que 4,5. Entretanto, atualmente é de grande interesse dos engenheiros de obras hidráulicas o conhecimento dos valores das pressões, suas flutuações e os valores extremos que podem ocorrer ao longo do ressalto hidráulico, para poder dimensionar obras, com o objetivo de evitar problemas nas estruturas, tais como: fadiga, erosão, cavitação, sobreelevação da laje da bacia de dissipação, além de problemas de erosões a jusante do dissipador.

O objetivo principal desta pesquisa foi complementar a faixa de número de Froude para os estudos existentes, acrescentando alguns pontos na zona de baixo número de Froude ($Fr_1 \leq 4,5$). Assim procurou-se identificar o comportamento do ressalto hidráulico em relação à distribuição longitudinal de pressões junto ao fundo da bacia e indicar se as mesmas poderiam ser estimadas da mesma maneira que vinham sendo estudados os ressaltos com números de Froude mais altos, apresentado anteriormente por outros autores.

Os resultados apresentados neste trabalho mostraram-se bastante eficazes, acrescentando importantes informações para o dimensionamento desse tipo de estrutura de dissipação de energia hidráulica. Desse modo, mostrou-se que é possível utilizar a mesma metodologia para estimar as pressões que ocorrem no ressalto hidráulico para uma faixa de número de Froude entre 1,70 a 9,0, independentemente da classificação do tipo de ressalto. Esse fato pode ser comprovado através da análise das pressões médias, flutuações de pressão, dos coeficientes de assimetria (Ad) e de curtose (K) e dos parâmetros de distribuição de probabilidade ($N\%$) que, analisados de maneira adimensional, mostraram tendências bem definidas, independente do número de Froude.

Este estudo confirmou que a distribuição das pressões ao longo do ressalto hidráulico não segue a lei de distribuição normal, uma vez que esses coeficientes de assimetria (Ad) e de curtose (K) não correspondem a zero e a 3, respectivamente,

como já havia sido citado por Lopardo (1987), Marques *et al.* (1997) e Pinheiro *et al.* (2003). Pela análise da distribuição longitudinal desses coeficientes, foi possível observar que cada posição ou trecho do ressalto hidráulico apresenta um tipo diferente de distribuição de probabilidade. Os valores dos coeficientes de assimetria (A_d) e de curtose (K) seguem a tendência apresentada por Daí Prá (2011).

Com a determinação do coeficiente estatístico (N) para diferentes probabilidades de ocorrência, foi possível obter uma estimativa dos valores de pressão que podem ocorrer ao longo de uma bacia de dissipação por ressalto hidráulico.

Analisando os resultados obtidos com o emprego da metodologia, nota-se que as maiores variações são referentes à primeira tomada de pressão em cada vazão, que se situa muito próximo do ponto de tangência da bacia de dissipação com o perfil do vertedouro. Supõe-se que esse valor ainda esteja sob influência do raio de concordância. Além disso, a primeira tomada geralmente situa-se entre a posição adimensional $1,0 \leq X/(Y_2 - Y_1) \leq 3,0$, que corresponde à zona de maior flutuação de pressão, segundo Marques *et al.* (1997).

Como conclusão geral, pode-se sugerir que a estimativa da distribuição de pressões junto ao fundo seja feita considerando-se as tendências apresentadas por Dai Prá (2011).

6 Recomendações Para Trabalhos Posteriores

As recomendações aqui sugeridas visam orientar, colaborar e facilitar os futuros estudos relacionados à área de dissipação de energia hidráulica e são baseadas nas análises efetuadas no presente trabalho.

Portanto, sugere-se que quando da realização de outros ensaios com baixo números de Froude, sejam considerados os seguintes aspectos:

- Aumentar o número de tomadas de pressão, utilizando espaçamentos curtos na zona compreendida entre o início do ressalto e a posição relativa $X/(Y_2 - Y_1) \leq 4,0$.
- Utilizar outros métodos para as medições das alturas conjugadas, dos níveis de água a montante e jusante e da posição de início do ressalto hidráulico, tanto nos casos de ressalto livre ou ressalto afogado.
- Testar a metodologia sugerida por Wiest (2008) para localizar o ponto de início do ressalto.
- Utilizar modelos que mantenham a mesma seção do canal sem pilares e comportas para tornar condições mais semelhantes aos casos documentados por Endres (1990), Marques (1995), Pinheiro (1995) e Dai Prá (2011), e, por fim, poder confirmar se os efeitos dessas estruturas anteriormente citadas são os mesmo citados neste trabalho.
- Efetuar análises de frequência dominante e auto correlação cruzada.

7 Referências Bibliográficas

ABDUL-KHADER, M. H., ELANGO, K. Turbulent pressure field beneath a hydraulic jump. *Journal of Hydraulic Research*, vol. 12, n. 4, p. 469-489, 1974.

AKBARI, M. E., MITTAL, M. K. e PANDE, P. K. Pressure fluctuations on the floor of free and forced hydraulic jumps. In: *International Conference on the Hydraulic Modelling of Civil Engineering Structures*, p. 87-93, 1982.

BIDONE, G. Esperiences sur le remous et la propagation de ondes. *Reale Accademia delle Scienze di Torino, Turin*, p.21-121, 1820

BÉLANGER, J. B. Essai sur la solution numérique de quelques problèmes relatifs au mouvement permant dex eaux courantes. Paris, Carilian-Goeury, 1828 apud *Energy dissipators and hydraulic jump*, *Water Science and Technology Library*, Kluwer Academic Publishers, 1992.

BHUTTO, H. B. G; MIRANI, S. N. and CHANDIO, S. N. Characteristics of free hydraulic jump in rectangular channel. *Research Journal of Engineering and Technology*, Mehran University, vol. 8, n. 2, p.34-44, 1989.

DAI PRÁ M. Uma Abordagem para Determinação das Pressões Junto ao Fundo de Dissipadores por ressalto. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, . Orientador: Marcelo Giulian Marques. 2011.

DRAPEAU, J, Étude de la Fluctuation de Pression dans un Ressaut Hydraulique Libre en Aval d'un Évacufaceur de Crues, Uiversité Laval, Québec, 1994.

ELEVATORSKY, E.A. *Hydraulic energy dissipators*. New York: McGraw-Hill. 214 p, 1959.

ENDRES, L.A.M. Contribuição ao Desenvolvimento de um Sistema para Aquisição e Tratamento de Dados de Pressões Instantâneas em Laboratório. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 104 p, 1990.

FIOROTTO, V. and RINALDO, A. turbulent pressure fluctuations under hydraulic jumps. *Journal of Hydraulic Research*, vol. 30, n. 4, p. 499-520, 1992.

HAGER, W. H. Ressaut hydraulique du type B dans un canal à forte pente. *Journal of Hydraulic Research*, vol. 26, n. 5, p. 539-558, 1988.

HAGER, W.H. Energy dissipators and hydraulic jump, *Water Science and Technology Library*, Kluwer Academic Publishers, 1992.

HAGER, W. H. & BREMEN, R. Classical Hydraulic Jump: sequent depths, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 27, n. 5, 1989, pg. 565-585, 1989.

LEUTHEUSSER, H.J. e KARTHA, V.C. Effect of inflow condition on hidraulic jump. *Journal of Hydraulic Division, Proc. ASCE*, 1972 apud HAGER, W.H. *Energy Dissipators and Hydraulic Jump*, *Water Science and Technology Library*, Kluwer Academic Publishers, 1992.

LONG, D., RAJARATNAM, N. STEFFER, P. e SMY, P. Structure of flow in hydraulic jumps, *Journal of Hydraulic Research*, V29, No. 2, p.207-218, 1990.

LOPARDO, R. A., e SOLARI, H. G. Flutuaciones de Presión en la Base de Resalto Libre. In: IX CONGRESO LATINO AMERICANO DE HIDRÁULICA. Mérida, Venezuela, p. 69-78, 1980.

LOPARDO, R. A.; LIO, J. C. D. e VERNET, G. F. Physical modelling on cavitation tendency for macroturbulence of hydraulic jump. In: INTERNATIONAL

CONFERENCE ON THE HYDRAULIC MODELLING OF CIVIL ENGINEERING STRUCTURES. Coventry, England. BHRA Fluid Engineering, p.109-121, 1982.

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, 45 p., 1986.

LOPARDO, R. A. e HENNING, R. E. Efectos de las condiciones de ingreso al resalto sobre el campo de presiones instantâneas. In: XII Congresso Latinoamericano de Hidráulica, IAHR, São Paulo, Brasil, vol.1, p. 116-127, 1986 apud 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, 45 p., 1986.

LOPARDO, R. A. Cavitação em fluxos macroturbulentos, *Matematicae Notae*, UNR Editora, Rosário, Argentina, Año XLII, vol. 2, p. 19-40, 2003.

LOPARDO, R. A., FATTOR, C. A., CASADO, J. M., LOPARDO, M. C. Uma aproximación por turbulencia remanente de la longitud del Resalto Sumergido. In: XXI Congresso Latinoamericano de Hidráulica, 9 p., 2004.

LOPARDO, R. A., FATTOR, C. A., LOPARDO, M. C., CASADO, J. M. Instantaneous pressure field on a submerged jump stilling basins. *Hydraulics of Dams and River Structures*, editado por Farhad Yazdandoost & Jalal Attari, A. A. Balkema Publishers, London U.K. ISBN 90 5809 673, Part I, p. 133 – 138, 2004.

LOPARDO, R. A., Internal Flow Characteristics of Free Hydraulic Jump in Stilling Basins. an Experimental Description, 4th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures, 9-11 February 2012, Porto, Portugal, ISBN: 978-989-8509-01-7, 2012.

MARQUES, M. G., ENDRES, L. A. M., ALMEIDA, L. E. S. B. E REZENDE, B. S. Característica do campo de pressões instantâneas em bacias de dissipação planas a

jusante de descarregadores. In: V SIMPÓSIO LUSO BRASILEIRO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS E IX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. R.J., vol. 3, p.344-353, 1991.

MARQUES, M. G. Nouvelle Approche Pour le Dimensionnement des Dissipateurs à Auge. Tese (Doutorado) -: Faculte des sciences et génie de la Université Laval, Québec, Canadá, 221 p., 1995.

MARQUES, M. G., DRAPEAU, J. e VERRETTE, J. L. Flutuação de pressão em um ressalto hidráulico. In.: XVII Congresso Latino Americano de Hidráulica, Guayaquil, Equador, 1997.

MARQUES, M. G., OLLERMANN G., WEILLER C. e ENDRES L. A. M. Perda de carga no interior de um ressalto hidráulico a jusante de vertedouro. In: XVIII Congresso Latino Americano De Hidráulica, Oaxaca, México, 1998.

MARQUES, M. G., ALMEIDA, F. M. e ENDRES, L. A. M. Adimensionalização de pressões médias em bacias de dissipação por ressalto hidráulico, In: XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 1999.

MARQUES, M. G., ENDRES, L. A.; TEIXEIRA, E. D. E; TRIERWEILER, E. F. N. Previsão de pressões extremas junto ao fundo de uma bacia de dissipação por ressalto hidráulico - Estudo de caso, In: IV Simpósio sobre Pequenas e Médias Centrais Hidrelétricas, Recife/PE, 2004.

MARQUES, M. G., TRIERWEILER, E. F. N., ENDRES, L. A. E TEIXEIRA, E. D. Determinação analítica da linha de separação de escoamentos para o ressalto hidráulico, In: XXI Congresso Latinoamericano de Hidráulica. São Paulo/SP, 2004.

MARQUES, M. G., TEIXEIRA, E. D., MARTINEZ, C. B. ; GOMES, J. F. ; ENDRES, L. A. M. Análise de macroturbulência em estruturas de dissipação de energia através do estudo de variação de pressões e níveis, Revista Brasileira de Recursos Hídricos, vol. 9, n. 1, p. 127-153, 2004.

MEEES, A. A. A. Caracterização das solicitações hidrodinâmicas em Bacias de Dissipação por Ressalto Hidráulico com baixo número de Froude. 157 fls. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

OHTSU, I. e YASUDA, Y. Characteristics of supercritical flow below sluice gate, Journal Hydraulic Engineering, vol.120, n. 3, p.332-346, 1994.

PETERKA, A J. Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators. US Department Interior, Bureau of Reclamation, Engeneering Monograph 25, Denver, 1974.

PINHEIRO, A. A. N. Acções Hidrodinâmicas em Soleiras de Bacia de Dissipação de Energia por Ressalto Hidráulico. Tese (Doutorado) – Universidade Técnica de Lisboa. 353 p. 1995.

PINHEIRO, A. N., QUINTELA, A. C., RAMOS, C. M. Slab force fluctuations in hydraulic jump stilling basins, artigo não publicado, 2003.

PINTO, L. C. S., VASCONSELOS, J. E. e SEYSSEL, R. L. Análise Experimental da flutuação de pressão na base de um ressalto hidráulico livre e afogado. In: XIII Congresso Latinoamericano de Hidráulica, Havanna, Cuba, 13p, 1998.

PORTO, R. M. Hidráulica Básica. 2ª Ed, São Carlos/SP,EESC/USP, 1999.

RAJARATNAM, N. An experimental study of air entrainment characteristics of hydraulic jump. Journal Institution of Engineers (India) n. 42 p. 247-273, 1962 apud RAJARATNAM, N. Hydraulic Jump, Chap. In: Advances in Hydrosience. vol. 4, Chow V. T, (ED), Academic Press, New York and London, p. 218-219, 1967.

RAJARATNAM, N.. Submerged hydraulic jump. Journal of Hydraulic Division. vol. 91, n. 4, p. 71-96, 1965a.

RAJARATNAM, N. 1965b. The Hydraulic Jump as Wall Jet. Journal of Hydraulic Division. v. 91, n. 5, p. 107-132, 1965b.

RAJARATNAM, N. Hydraulic jump, Chap. In: Advances in Hydrosience. vol. 4, por Chow V. T, (ED), Academic Press, New York and London, p. 218-219, 1967.

TAMADA, K., Dissipadores de energia com baixo número de Froude. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1989.

TEIXEIRA, E. D., TRIERWEILER, E. F. N., ENDRES, L. A. M., MARQUES, M. G. Análise das flutuações de pressão junto ao fundo em bacias de dissipação por ressalto hidráulico. In: XXV Seminário de Grandes Barragens, 2003a.

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: XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2003b.

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

TEIXEIRA, E.D. Efeito de Escala na Previsão dos Valores Extremos de Pressão Junto ao Fundo em Bacias de Dissipação por Ressalto Hidráulico. Tese de Doutorado. Instituto de Pesquisas Hidráulica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 293p, 2008.

TOSO, J. W., BOWERS, C. E. Extreme pressures in hydraulic jump stilling basins. Journal of Hydraulic Engineering, vol 114, n. 8, p. 829-843, 1988.

TRIERWEILER, E. F. N., AMANTE, R. C. R., TEIXEIRA, E. D., MARQUES, M. G. Comparação das medições de pressão em bacias de dissipação por ressalto

hidráulico no protótipo e nos modelos reduzidos da UHE Porto Colômbia. In: XXVI Seminário Nacional de Grandes Barragens, 2005.

TRIERWEILER, E. F. N. Avaliação do Campo de Pressões em Ressalto Hidráulico formado à Jusante de uma Comporta com Diferentes Graus de Submergência. Dissertação de Mestrado. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 194p, 2006.

U.S. BUREAU OF RECLAMATION. Research studies on stilling basins, energy dissipators and associated appurtenances. Hydraulic Laboratory Report, no. HYD 399, 1955 apud CHOW, V.T. Open channel hydraulics, McGraw-Hill Book Co., Inc., p.393-438, 1959.

U.S. BUREAU OF RECLAMATION. Design of Small Channel Structures, 1987.

VASILIEV, D. F. & BUKREYEV, V. I. Statistical characteristics of pressure fluctuations in the region of hydraulic jump. In: XII CONGRESS OF THE IAHR. Ft. Collins, Colorado, vol. 2, n. 1, p. 1-8, 1967.

WIEST R. A. Flutuação de pressão em ressalto hidráulico. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008.