

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

**AVALIAÇÃO DO CAMPO DE PRESSÕES EM RESSALTO HIDRÁULICO  
FORMADO A JUSANTE DE UMA COMPORTA COM DIFERENTES GRAUS DE  
SUBMERGÊNCIA**

**ENGº CIVIL EDGAR FERNANDO TRIERWEILER NETO**

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 a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

**Orientador: Prof. Dr. Marcelo Giulian Marques**

Porto Alegre, junho de 2006

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 a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração:

Hidráulica

Professor Orientador:

---

Prof. Dr. Marcelo Giulian Marques

Professor Co-orientador:

---

Prof. Dr. Luiz Augusto Magalhães Endres

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. Raúl Antonio Lopardo (Universidad Nacional de La Plata )

---

Prof. Dra. Edith Beatriz Camaño Schettini (IPH/UFRGS)

---

Prof. Dr. Carlos Barreira Martinez (Escola de Engenharia/UFGM)

Data de Defesa: 23 de junho de 2006

*Aos meus pais: Edgar e Luci*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho:

Agradeço meu orientador, Marcelo Giulian Marques, pelos ensinamentos profissionais, amizade e confiança;

Ao professor Luiz Augusto Magalhães Endres pela valiosa colaboração, sempre com opiniões sensatas e didática exemplar;

A todos os amigos do Pavilhão Marítimo, em especial aos colegas Eder Daniel Teixeira, Rafael André Wiest, Maurício Daí Prá, Martin Romagnoli e Alexandre Augusto Mees Alves, pela ajuda indispensável e companheirismo;

À CAPES, por conceder bolsa de mestrado;

À Furnas Centrais Elétricas S.A., pelo apoio financeiro a pesquisa;

Aos meus pais, meu irmão e amigos, pela compreensão e amizade.

## RESUMO

O presente trabalho foi desenvolvido no Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul com o apoio de Furnas Centrais Elétricas S.A., fazendo parte do Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) intitulado “Análise da Macroturbulência em Dissipadores por Ressalto Hidráulico”.

O ressalto hidráulico é amplamente utilizado na dissipação de energia a jusante de obras hidráulicas, sendo o processo de dissipação associado à flutuação de velocidades, níveis e pressões. Devido aos danos causados às estruturas de dissipação de energia ao longo dos anos, em função de problemas atribuídos à fadiga, cavitação e ressonância, o entendimento do ressalto hidráulico como forma de dissipação de energia tem assumido papel importante. A caracterização do campo de pressões junto ao fundo de bacias de dissipação é de interesse prático para os projetistas de obras hidráulicas na busca de um dimensionamento eficiente e econômico.

O presente trabalho tem o objetivo de avaliar o campo de pressões em ressalto hidráulico formado a jusante de uma comporta, propondo uma metodologia que permita estimar os valores de pressões extremas associadas a diferentes probabilidades de ocorrência e graus de submergência.

Através das metodologias de adimensionalização utilizadas foi possível avaliar e quantificar os efeitos atribuídos à submergência sobre a distribuição longitudinal da pressão média, do desvio padrão e do coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades (N), permitindo a implementação de uma metodologia de previsão de pressões para o ressalto hidráulico submergido.

A metodologia proposta nesse trabalho se mostrou eficiente em suas previsões, apresentando, na maioria dos ensaios, diferenças relativas inferiores a 15% entre os valores verificados e os previstos pelo modelo para as probabilidades extremas referentes à posição de máxima flutuação de pressão.

## ABSTRACT

This present work was developed at the Postgraduate in Water and Environmental Engineering of the Hydraulic Research Institute of Federal University of Rio Grande do Sul State being undertaken in collaboration with Furnas Centrais Elétricas S.A., as part of a Research and Development (R&D) project entitled “Macroturbulence Analysis of Hydraulic Jump Stilling Basins”.

The hydraulic jump is widely used in energy dissipation downstream hydraulic works, being a process of dissipation associated to the fluctuations of velocity, water level and pressure. Due to the damage caused to energy dissipation structures through the years, by problems related to stress, cavitation and resonance, the understanding of the hydraulic jump as a form of dissipation has attained an important role. The characterization of the pressure fields in the bottom of stilling basins is of practical use to the designers of hydraulic works looking for efficient and economical dimensioning.

The purpose of this is to evaluate the pressure field in a hydraulic jump downstream a sluice gate, proposing a methodology that allows evaluating extremes pressure values associated with the occurrence of different probabilities and different levels of submergence.

Through the use of adimensionalisation methodologies it was possible to evaluate and quantify the effects attributed to the submergence on the longitudinal distribution of average pressure, standard deviation and the statistic coefficient of probability distribution (N), allowing the implementation of a pressure prediction methodology for the submerged hydraulic jump.

The methodology proposed in this work was efficient in its predictions, presenting, in most tests, relative differences inferior to 15% between real values and estimated values expected by the model to extreme probabilities referring to the position of maximum pressure fluctuation.

## SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>iii</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>v</b>
<b>SUMÁRIO</b> .....	<b>vi</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>viii</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS</b> .....	<b>xiv</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b> .....	<b>xv</b>
<b>SÍMBOLOS GREGOS</b> .....	<b>xviii</b>
<b>1 Introdução</b> .....	<b>1</b>
1.1 Relevância e justificativa .....	1
1.2 Objetivos .....	2
<b>2 Revisão Bibliográfica</b> .....	<b>4</b>
2.1 Alturas conjugadas do ressalto hidráulico .....	7
2.2 Formas do ressalto hidráulico segundo o número de Froude .....	11
2.3 Ressalto hidráulico formado a jusante de canais com mudança de declividade (vertedouro) .....	13
2.4 Ressalto hidráulico a jusante de comportas .....	14
2.5 Comprimento do ressalto e do rolo .....	15
2.5.1 Comprimento do ressalto hidráulico .....	16
2.5.2 Comprimento do rolo .....	21
2.6 Perfil da linha d'água no ressalto hidráulico .....	22
2.7 Dissipação de energia .....	25
2.8 Flutuação de pressão .....	28
2.9 Outros estudos relacionados ao ressalto hidráulico .....	43
2.9.1 Influência da utilização de condutos flexíveis em medições de pressão em ressalto hidráulico .....	43
2.9.2 Escoamento bifásico e aeração do ressalto hidráulico .....	43
2.9.3 Visualização do ressalto hidráulico .....	46
2.9.4 Medição e perfil de velocidades .....	47
<b>3 Instalação experimental e metodologia</b> .....	<b>49</b>
3.1 Instalação experimental .....	49
3.2 Metodologia experimental .....	51
3.2.1 Aspectos gerais .....	51
3.2.2 Medições de pressão .....	52
3.2.3 Medições de nível .....	53
3.2.4 Visualização do escoamento .....	55
3.2.5 Avaliação da influência da utilização de condutos flexíveis em medições de flutuação de pressão em ressalto hidráulico .....	55
3.2.6 Avaliação do efeito da submergência sobre o campo de pressões em um ressalto hidráulico formado a jusante de uma comporta .....	58
<b>4 Resultados</b> .....	<b>64</b>
4.1 Resultados do estudo sobre a influência da utilização de condutos flexíveis em medições de flutuação em ressalto hidráulico .....	64
4.2 Avaliação do perfil da superfície livre do ressalto hidráulico .....	69

4.3	Comparações entre o ressalto hidráulico livre a jusante de comporta e a jusante de vertedouro.....	73
4.3.1	Pressão média.....	73
4.3.2	Flutuação de pressão (desvio padrão da amostra de pressão).....	75
4.3.3	Coefficiente de Assimetria.....	82
4.3.4	Coefficiente de Curtose.....	84
4.4	Influência da submergência sobre a distribuição de pressões junto ao fundo em ressalto hidráulico a jusante de comporta.....	85
4.4.1	Pressão média.....	86
4.4.2	Flutuação de pressão (desvio padrão das amostras de pressão).....	94
4.4.3	Coefficiente de Assimetria.....	102
4.4.4	Coefficiente de Curtose.....	104
4.4.5	Espectro de energia das flutuações de pressão.....	106
4.4.6	Coefficiente estatístico de distribuição de probabilidades (N) para o ressalto hidráulico submergido a jusante de um comporta.....	108
4.5	Previsão de valores de pressão para diferentes probabilidades de ocorrência e graus de submergência.....	115
4.6	Aplicação da metodologia de previsão de pressões para o ressalto hidráulico submergido.....	122
<b>5</b>	<b>Conclusões.....</b>	<b>129</b>
5.1	Influência da utilização de condutos flexíveis em medições de flutuação de pressão em ressalto hidráulico.....	129
5.2	Comparações entre o ressalto hidráulico livre a jusante de comporta e a jusante de vertedouro.....	130
5.3	Influência da submergência sobre a distribuição de pressões junto ao fundo em ressalto hidráulico a jusante de comporta.....	131
5.4	Previsão de valores de pressão para diferentes probabilidades de ocorrência e graus de submergência.....	132
<b>6</b>	<b>Recomendações.....</b>	<b>134</b>
<b>7</b>	<b>Referências Bibliográficas.....</b>	<b>136</b>
<b>8</b>	<b>ANEXO I.....</b>	<b>146</b>
8.1	Influência de utilização de condutos flexíveis em medições de flutuação pressão em ressalto hidráulico.....	146
8.1.1	Comparações entre sinais coletados com diferentes comprimentos de conduto.....	147
8.1.2	Pressão média e desvio padrão.....	150
8.1.3	Valores extremos de pressão.....	154
8.1.4	Função de densidade de probabilidade e coeficientes de assimetria e curtose.....	157
8.1.5	Espectro de Energia (densidade espectral das flutuações de pressão).....	163
<b>9</b>	<b>ANEXO II.....</b>	<b>171</b>
9.1	Diferenças relativas entre o modelo proposto e os valores verificados experimentalmente.....	171

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1– Ressalto Hidráulico formado a jusante de uma comporta (presente estudo).....	4
Figura 2.2 – À esquerda, desenho de Leonardo Da Vinci sobre a dissipação de energia em uma queda. Reti (1974). À direita, desenho de Leonardo Da Vinci sobre “ondas de forma cilíndricas” em uma sarjeta. Reti (1974). .....	5
Figura 2.3 – Ressaltos hidráulicos formados a jusante de uma comporta (a) e a jusante de um vertedouro (b). .....	7
Figura 2.4- Formas do ressalto hidráulico em função do número de Froude na seção de entrada ( $Fr_1$ ) conforme apresentado em Peterka (1974).....	12
Figura 2.5 –Classificação do Ressalto Hidráulico formado a jusante de um vertedouro (Hager, 1988).....	13
Figura 2.6 – Ressalto submerso formado a jusante de uma comporta (Fonte: Gomes, 2000) .....	14
Figura 2.7 – Ressalto Hidráulico a Jusante de Comporta ( $Y_1$ = altura conjugada rápida, $Y_2$ = altura conjugada lenta, $Y_3$ = lâmina mínima entre a comporta e o final do ressalto, $L_r$ = comprimento do rolo, $L_j$ = comprimento do ressalto livre e $L_{sj}$ = comprimento do ressalto afogado). .....	16
Figura 2.8 – Comprimento do ressalto hidráulico proposto pelo U.S.B.R.(1955), Fonte:Porto (1999) .....	18
Figura 2.9 – Comprimento do ressalto( $L_j$ ) e do rolo( $L_r$ ) apresentadas por Rajaratnam (1967). .....	19
Figura 2.10 – Comprimento do ressalto submerso, Lopardo et al (2004a) .....	20
Figura 2.11 – Freqüências características da oscilação de nível a jusante do ressalto, Mok (2004). .....	25
Figura 2.12 - Esquema das alturas conjugadas relacionadas com a perda de energia, Elevatorski (1959).....	25
Figura 2.13 - Eficiência do ressalto hidráulico de acordo com o número de Froude. Fonte: Peterka (1974). .....	26
Figura 2.14- Porcentagem média de energia dissipada ao longo do ressalto conforme apresentado em Marques et al. (1998). .....	28
Figura 2.15- Flutuação de pressão adimensionalizada em relação à distância de início do ressalto (X) e a altura conjugada na rápida ( $Y_1$ ) - Abdul-Khader et al (1974).....	31
Figura 2.16 - Flutuação de pressão adimensionalizada em relação à distância de início do ressalto (X) e a altura conjugada rápida ( $Y_1$ ) - Lopardo (1986). .....	32
Figura 2.17- – Flutuação de pressão adimensionalizada em relação à distância de início do ressalto (X) e a altura conjugada na entrada do ressalto hidráulico ( $Y_1$ ) - Endres (1990). .....	34
Figura 2.18 - 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). .....	36
Figura 2.19 - 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). .....	36
Figura 2.20 – Distribuição longitudinal da pressão media para os dados de Marques (1995) e ajuste proposto por Teixeira (2003). .....	38
Figura 2.21 – Distribuição longitudinal do desvio padrão da amostra de pressão para os dados de Marques (1995) e ajustes proposto por Teixeira (2003).....	39
Figura 2.22 – $C_p$ máx em função do número de Froude ( $Fr_1$ ), Marques et al (2004c). .....	40
Figura 2.23 – Posição( $X/Y_1$ ) relativa ao $C_p$ máx em função do número de Froude ( $Fr_1$ ), Marques et al (2004c).....	40

Figura 2.24 – 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). .....	41
Figura 2.25 – 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, $Fr_1 = 3$ , Lopardo et al (2004b). .....	42
Figura 2.26 - Esquema da entrada e saída de ar em um ressalto hidráulico (Fonte: Gomes, 2000). .....	44
Figura 3.1 - (a) Vista frontal da comporta e (b) vista lateral da comporta. ....	49
Figura 3.2 – Representação esquemática do canal de ensaios e do sistema de alimentação. ..	50
Figura 3.3 – (a) Medidor eletromagnético de vazão e (b) inversor de frequência. ....	51
Figura 3.4 – Posicionamento das tomadas de pressão junto ao fundo do canal (vista lateral). ..	53
Figura 3.5 – Posicionamento esquemático das tomadas de pressão junto ao fundo do canal (planta). .....	53
Figura 3.6 – Posições de medições de nível por ponta linimétrica (planta baixa). ....	54
Figura 3.7 – (a) Dispositivos de medição e controle de níveis e (b) sistema luminoso de apoio para a medição de níveis. ....	54
Figura 3.8 – Proposta de iluminação do canal, Gomes (2000). .....	55
Figura 3.9 – Sistema adaptador junto a tomada de pressão. ....	57
Figura 3.10 – Sistema adaptador junto ao transdutor de pressão. ....	57
Figura 3.11 – Perda de carga do ressalto hidráulico. ....	60
Figura 3.12 – Metodologia de determinação de pressões com diferentes graus de submergência. ....	63
Figura 4.1 - Variação do desvio padrão em função do comprimento do conduto de nylon para três posições ao longo do ressalto hidráulico, $Fr_1 = 5,0$ e diâmetro interno 2,0 mm. ....	66
Figura 4.2 – Pressões extremas em função do comprimento do conduto de nylon, .....	66
Figura 4.3 – Espectro de energia dos experimentos com condutos de PVC de 7,9 mm de diâmetro e espessura de 1,5 mm, $X/(Y_2 - Y_1)$ entre 1,43 e 1,47, $Fr_1$ entre 5,11 e 5,23. ....	68
Figura 4.4 – Perfil da linha d'água adimensionalizado sem o fator de submergência. ....	70
Figura 4.5 - Comparação entre o ressalto hidráulico com $S = 1,0$ , $S = 1,2$ e $S = 1,4$ para $Fr = 4,55$ (presente estudo). .....	70
Figura 4.6 - Perfil da linha d'água adimensionalizado com inclusão do fator de submergência ( $S = T_w/Y_2$ ). .....	71
Figura 4.7 – Comparação entre o comprimento do ressalto hidráulico submergidos. ....	72
Figura 4.8 – Comparação entre os dados medidos para superfície livre do ressalto hidráulico livre e expressões de outros autores. ....	72
Figura 4.9 - Verificação das alturas conjugadas do ressalto hidráulico livre em comparação com as expressões de Bélanger (1828) e de Hager e Bremen (1989). .....	73
Figura 4.10 – Comparação entre as pressões médias em ressalto hidráulico livre formado a jusante de vertedouro e a jusante de comporta. ....	74
Figura 4.11 – Comparação entre os resultados deste estudo e o ajuste proposto por Teixeira (2003) para o ressalto hidráulico livre a jusante de vertedouro. ....	75
Figura 4.12 – Comparação entre a flutuação de pressão entre ressalto hidráulico formado a jusante de uma comporta e a jusante de vertedouro. ....	77
Figura 4.13 - Perfil longitudinal do canal de ensaios e posição das tomadas de pressão. Endres (1990). ....	78
Figura 4.14 - Perfil longitudinal do canal de ensaios e posição das tomadas de pressão. Marques (1995). .....	78
Figura 4.15 - Perfil longitudinal do canal de ensaios utilizado por Pinheiro (1995). ....	79
Figura 4.16 – Ajustes propostos para a flutuação de pressão para um ressalto hidráulico livre formado a jusante de uma comporta e comparação com os dados de Marques 1995 (ressalto a jusante de vertedouro). .....	81

Figura 4.17 – Comparação entre a máxima flutuação de pressão adimensionalizada conforme o coeficiente de flutuação de pressão ( $C_p$ ) entre o ressalto hidráulico livre formado a jusante de comporta (presente estudo) e o formado a jusante de vertedouro (demais autores). .....	81
Figura 4.18 – Comparação entre a posição a máxima flutuação de pressão ( $C_{p\text{máx}}$ ) entre o ressalto hidráulico livre formado a jusante de comporta (presente estudo) e o formado a jusante de vertedouro (demais autores). .....	82
Figura 4.19 - Distribuição do coeficiente de assimetria, comparação entre ressalto hidráulico formado a jusante de comporta e a jusante de vertedouro.....	84
Figura 4.20 - Distribuição do coeficiente de curtose, comparação entre ressalto hidráulico formado a jusante de comporta e a jusante de vertedouro.....	85
Figura 4.21 – Pressões médias adimensionalizada em função dos parâmetros hidráulicos do escoamento, comparação entre o presente estudos e resultados de outros autores.....	87
Figura 4.22– Pressões médias adimensionalizadas com a inclusão do fator de submergência ( $S=T_w/Y_2$ ), comparação entre o presente estudo e resultados de outros autores.....	87
Figura 4.23 – Comparação entre a pressão média e nível d’água ao longo do ressalto.....	88
Figura 4.24 – Valores verificados para $\Psi_c$ e ajuste sugerido a submergências distintas. ....	89
Figura 4.25 – Diferenças relativas da pressão média entre o ressalto hidráulico submerso e o ressalto hidráulico livre em função da posição longitudinal adimensionalizada.....	91
Figura 4.26 – Valores propostos para o coeficiente $a_1$ .....	92
Figura 4.27 – Valores propostos para o coeficiente $b_1$ . ....	93
Figura 4.28 – Comparação entre as diferenças relativas de pressão média entre o ressalto hidráulico livre e submerso e os ajustes potenciais propostos. ....	93
Figura 4.29 – Desvio padrão das amostras de pressão adimensionalizado em função dos parâmetros hidráulicos do escoamento, comparação entre este estudo e os resultados de outros autores. ....	94
Figura 4.30 – Desvio padrão das amostras adimensionalizados com a inclusão do fator de submergência ( $S=T_w/Y_2$ ), comparação com os resultados de outros autores. ....	95
Figura 4.31 – Valores do coeficiente de flutuação de pressão para diversas submergências e $Fr_1=4,55$ . ....	96
Figura 4.32 – Valores do coeficiente de flutuação de pressão para diversos números de Froude com submergência $S = 1,19$ . ....	97
Figura 4.33 – Comparação da flutuação de pressão adimensionalizada na forma do coeficiente de flutuação de pressão ( $C_p$ ) do presente estudo com os dados apresentados por Lopardo et al (2004a) e Lopardo et al (2004b). ....	97
Figura 4.34 - Diferenças relativas do desvio padrão entre o ressalto hidráulico submerso e o ressalto hidráulico livre em função da posição longitudinal adimensionalizada.....	99
Figura 4.35 - Valores propostos para o coeficiente $a_2$ . ....	100
Figura 4.36 - Valores propostos para o coeficiente $b_2$ . ....	101
Figura 4.37 - Comparação entre as diferenças relativas do desvio padrão entre o ressalto hidráulico livre e submerso e os ajustes potenciais propostos. ....	101
Figura 4.38 – Distribuição longitudinal do coeficiente de assimetria para diferentes níveis de submergência, comparação entre o presente estudo e os resultados de Endres (1990), Marques (1995) e Pinheiro (1995). ....	103
Figura 4.39 – Distribuição longitudinal do coeficiente de assimetria para diferentes níveis de submergência, $Fr_1 = 4,55$ . ....	103
Figura 4.40 - Distribuição longitudinal do coeficiente de assimetria para diferentes número de Froude e fator de submergência $S = 1,19$ . ....	104
Figura 4.41 - Distribuição longitudinal do coeficiente de curtose para diferentes níveis de submergência, comparação entre o presente estudo e os resultados de Endres (1990), Marques (1995) e Pinheiro (1995). ....	105

Figura 4.42 - Distribuição longitudinal do coeficiente de curtose para diferentes níveis de submergência, $Fr_1 = 4,55$ .....	105
Figura 4.43 - Distribuição longitudinal do coeficiente de curtose para diferentes números de Froude e para uma submergência, $S = 1,20$ .....	106
Figura 4.44 – Função de densidade espectral da flutuações de pressão da primeira tomada de pressão (transdutor T1), $X/(Y_2-Y_1)=0,91$ para o ressalto hidráulico livre e $X/(Y_2-Y_1)=1,33$ para os ressaltos submergidos, $Fr_1=3,97$ . ....	107
Figura 4.45 - Função de densidade espectral da flutuações de pressão da quinta tomada de pressão (transdutor T6), $X/(Y_2-Y_1)=6,25$ para o ressalto hidráulico livre e $X/(Y_2-Y_1)=6,68$ para os ressaltos submergidos, $Fr_1 = 3,97$ .....	108
Figura 4.46 – Distribuição longitudinal do coeficiente estatístico (N) em função da posição relativa ao início do ressalto hidráulico.....	109
Figura 4.47 – Ajuste proposto para a distribuição do coeficiente estatístico N para a probabilidade de 0,1%.....	110
Figura 4.48 - Ajuste proposto para a distribuição do coeficiente estatístico N para a probabilidade de 1%.....	111
Figura 4.49 - Ajuste proposto para a distribuição do coeficiente estatístico N para a probabilidade de 5%.....	111
Figura 4.50 - Ajuste proposto para a distribuição do coeficiente estatístico N para a probabilidade de 95%.....	112
Figura 4.51 - Ajuste proposto para a distribuição do coeficiente estatístico N para a probabilidade de 99%.....	112
Figura 4.52 - Ajuste proposto para a distribuição do coeficiente estatístico N para a probabilidade de 99,9%.....	113
Figura 4.53 – Coeficiente <b>a</b> da equação utilizada para a determinação do valor do coeficiente estatístico de distribuição de probabilidade (N).....	114
Figura 4.54 – Coeficiente <b>b</b> da equação utilizada para a determinação do valor do coeficiente estatístico de distribuição de probabilidade (N).....	114
Figura 4.55 – Coeficiente <b>c</b> da equação utilizada para a determinação do valor do coeficiente estatístico de distribuição de probabilidade (N).....	115
Figura 4.56 – Ajustes para a pressão média adimensionalizada para diferentes submergências. ....	118
Figura 4.57 – Ajustes para o desvio padrão adimensionalizado para diferentes submergências. ....	119
Figura 4.58 – Diferenças verificadas para a pressão média com submergência $S = 1,1$ . ....	120
Figura 4.59 - Diferenças verificadas para a pressão média com submergência $S = 1,2$ . ....	120
Figura 4.60 - Diferenças verificadas para a pressão média com submergência $S = 1,3$ . ....	120
Figura 4.61 - Diferenças verificadas para a pressão média com submergência $S = 1,4$ . ....	121
Figura 4.62 - Diferenças verificadas para o desvio padrão com submergência $S = 1,1$ . ....	121
Figura 4.63 - Diferenças verificadas para o desvio padrão com submergência $S = 1,2$ . ....	121
Figura 4.64 - Diferenças verificadas para o desvio padrão com submergência $S = 1,3$ . ....	122
Figura 4.65 - Diferenças verificadas para o desvio padrão com submergência $S = 1,4$ . ....	122
Figura 4.66 – Comparação entre os ajustes propostos para as pressões com probabilidades de 0,1% e 99,9% e os dados experimentais verificados para o ressalto hidráulico com $Fr_1 = 4,55$ e $S = 1,30$ . ....	124
Figura 4.67 – Comparação entre os ajustes propostos para as pressões com probabilidades de 1% e 99% e os dados experimentais verificados para o ressalto hidráulico com $Fr_1 = 4,55$ e $S = 1,30$ . ....	125
Figura 4.68 – Comparação entre os ajustes propostos para as pressões com probabilidades de 5% e 95% e os dados experimentais verificados para o ressalto hidráulico com $Fr_1 = 4,55$ e $S = 1,30$ . ....	125

Figura 4.69 – Comparação entre os ajustes propostos para as pressões com probabilidades de 10% e 90% e os dados experimentais verificados para o ressalto hidráulico com $Fr_1 = 4,55$ e $S = 1,30$ .	126
Figura 8.1 – Comparação entre os sinais coletados com condutos de PVC com 4,8 mm de diâmetro, com 1,5 mm de espessura de parede e comprimentos de 5 cm e 200 cm, $X/(Y_2-Y_1)=1,49$ e $Fr_1 = 5,1$ .	148
Figura 8.2 – Comparação entre os sinais coletados com condutos de PVC com 6,4 mm de diâmetro, com 1,5 mm de espessura de parede e comprimentos de 5 cm e 200 cm, $X/(Y_2-Y_1)=1,35$ e $Fr_1 = 5,1$ .	148
Figura 8.3 – Comparação entre os sinais coletados com condutos de PVC com 7,9 mm de diâmetro, com 1,5 mm de espessura de parede e comprimentos de 5 cm e 200 cm, $X/(Y_2-Y_1)=1,43$ e $Fr_1 = 5,2$ .	149
Figura 8.4 – Comparação entre os sinais coletados com condutos de nylon com 2,0 mm de diâmetro e comprimentos de 5 cm e 200 cm, $X/(Y_2-Y_1)=1,50$ e $Fr_1 = 5,0$ .	149
Figura 8.5 – Variação da pressão média e do desvio padrão em função do comprimento do conduto de PVC com diâmetro interno de 4,8 mm, espessura de parede igual a 1,5 mm, $Fr_1 = 5,1$ e $X/(Y_2-Y_1)=1,49$ .	151
Figura 8.6 – Variação da pressão média e do desvio padrão em função do comprimento do conduto de PVC com diâmetro interno de 7,9 mm, espessura de parede igual a 1,5 mm, $Fr_1$ entre 5,1 e 5,2 e $X/(Y_2-Y_1)=1,43$ .	151
Figura 8.7 - Variação da pressão média em função do comprimento do conduto de nylon para três posições ao longo do ressalto hidráulico, $Fr_1 = 5,0$ .	153
Figura 8.8 - Variação do desvio padrão em função do comprimento do conduto de nylon para três posições ao longo do ressalto hidráulico, $Fr_1 = 5,0$ .	154
Figura 8.9 – Pressões extremas em função do comprimento de conduto de PVC, 4,8 mm de diâmetro e espessura de 1,5 mm, $X/(Y_2-Y_1)=1,49$ e $Fr_1 = 5,1$ .	155
Figura 8.10 – Pressões extremas em função do comprimento de conduto de PVC, 6,4 mm de diâmetro e espessura de 1,0 mm, $X/(Y_2-Y_1)=1,50$ e $Fr_1$ entre 5,0 e 5,1.	155
Figura 8.11 – Pressões extremas em função do comprimento de conduto de PVC, 7,9 mm de diâmetro e espessura de 1,5mm, $X/(Y_2-Y_1)=1,43$ e $Fr_1$ entre 5,1 e 5,2.	155
Figura 8.12 – Pressões extremas em função do diâmetro do conduto de PVC com espessura de parede igual a 1,5 mm, $Fr_1$ entre 5,0 e 5,2.	156
Figura 8.13 – Pressões extremas em função do comprimento do conduto de nylon.	157
Figura 8.14 – Histogramas de frequência referente as medições efetuadas com condutos de PVC, diâmetro de 4,8 mm, $X/(Y_2-Y_1)=1,49$ , $Fr_1 = 5,1$ .	159
Figura 8.15 - Histogramas de frequência referente as medições efetuadas com condutos de nylon, diâmetro de 2,0 mm, $X/(Y_2-Y_1)$ entre 1,46 e 1,50, $Fr_1 = 5,0$ .	159
Figura 8.16 – Coeficiente de assimetria dos ensaios realizados com a utilização de condutos de nylon, diâmetro de 2,0 mm, $Fr_1 = 5,0$ .	160
Figura 8.17 - Coeficiente de curtose dos ensaios realizados com a utilização de condutos de nylon, diâmetro de 2,0 mm, $Fr_1 = 5,0$ .	160
Figura 8.18 – Coeficiente de assimetria em função do comprimento dos condutos de nylon, $Fr_1 = 5,0$ .	161
Figura 8.19 - Coeficiente de curtose em função do comprimento dos condutos de nylon, $Fr_1 = 5,0$ .	163
Figura 8.20 – Variação do número de Strouhal em função do comprimento dos condutos de PVC, $Fr_1$ entre 5,0 e 5,20 e $X/(Y_2-Y_1)$ entre 1,34 e 1,53.	165
Figura 8.21 - Variação do número de Strouhal em função do comprimento do conduto de nylon, $Fr_1 = 5,0$ e $X/(Y_2-Y_1)$ entre 1,46 e 1,53.	165
Figura 8.22 – Espectro de energia dos experimentos com condutos de PVC de 4,8 mm de diâmetro e espessura de 1,5 mm, $X/(Y_2-Y_1)=1,49$ , $Fr_1 = 5,11$ .	166

- Figura 8.23 – Espectro de energia dos experimentos com condutos de PVC de 6,4 mm de diâmetro e espessura de 1,5 mm,  $X/(Y_2 - Y_1)$  entre 1,34 e 1,53,  $Fr_1$  entre 5,02 e 5,12.. 167
- Figura 8.24 – Espectro de energia dos experimentos com condutos de PVC de 7,9 mm de diâmetro e espessura de 1,5 mm,  $X/(Y_2 - Y_1)$  entre 1,43 e 1,47,  $Fr_1$  entre 5,11 e 5,23.. 167
- Figura 8.25 – Espectro de energia dos experimentos com condutos de PVC de 7,9 mm de diâmetro e espessura de 1,5 mm  $X/(Y_2 - Y_1)$  entre 1,46 e 1,50,  $Fr_1$  entre 4,97 e 4,99... 168
- Figura 8.26 – Avaliação do efeito do diâmetro interno sobre o espectro de energia para condutos com 5 cm de comprimento, medições referentes à segunda tomada de pressão,  $X/(Y_2 - Y_1)$  entre 1,35 e 1,49,  $Fr_1$  entre 5,08 e 5,23..... 169
- Figura 8.27 – Avaliação do efeito do diâmetro interno sobre o espectro de energia para condutos com 10 cm de comprimento, medições referentes à segunda tomada de pressão,  $X/(Y_2 - Y_1)$  entre 1,43 e 1,53,  $Fr_1$  entre 5,02 e 5,16..... 169
- Figura 8.28 - Avaliação do efeito do diâmetro interno sobre o espectro de energia para condutos com 25 cm de comprimento, medições referentes à segunda tomada de pressão,  $X/(Y_2 - Y_1)$  entre 1,43 e 1,52,  $Fr_1$  entre 5,11 e 5,15. .... 170
- Figura 8.29 - Avaliação do efeito da espessura do conduto sobre o espectro de energia para condutos com 10 cm de comprimento, medições referentes à segunda tomada de pressão,  $X/(Y_2 - Y_1)$  entre 1,50 e 1,523,  $Fr_1 = 5,02$ ..... 170

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1– Relação entre as alturas conjugadas para canal retangular com fundo plano. ....	8
Tabela 2.2 - Fórmulas sugeridas para o comprimento do ressalto hidráulico livre.....	17
Tabela 2.3 - Fórmulas sugeridas para o comprimento do rolo em um canal com fundo horizontal. ....	21
Tabela 2.4 - Fórmulas sugeridas para perda de carga no ressalto formado em um canal horizontal. ....	27
Tabela 3.1 – Relação e posicionamento dos transdutores de pressão utilizados.....	52
Tabela 3.2 – Especificações técnicas de condutos de PVC (PVC-Cristal). ....	56
Tabela 3.3– Resumo das condições de Ensaio. ....	58
Tabela 3.4 – Condições de ensaio para o estudo da influência do fator de submergência. ....	59
Tabela 4.1 – Recomendações de diâmetros e comprimentos de condutos para estudos de pressões extremas em medições de flutuação de pressão em ressalto hidráulico.....	67
Tabela 4.2 – Recomendações de comprimentos de condutos para estudos de espectro de frequência em medições de flutuação de pressão em ressalto hidráulico .....	68
Tabela 4.3 – Pressão adimensional no trecho de montante dos ressaltos submergidos.....	88
Tabela 4.4 – Coeficientes da curva de ajuste potencial para as diferenças relativas da pressão média entre o ressalto hidráulico livre e submergido.....	91
Tabela 4.5 - Coeficientes do ajuste linear das diferenças relativas do desvio padrão entre o ressalto hidráulico livre e submergido .....	100
Tabela 4.6 – Coeficientes dos polinômios de ajuste para o coeficiente estatístico de distribuição de probabilidade (N). ....	113
Tabela 4.7 – Coeficiente de determinação dos ajuste apresentados para a pressão média e desvio padrão para diferentes submergências do ressalto hidráulico.....	119
Tabela 4.8 – Diferenças relativas entre as semi-amplitudes de pressão para o ressalto hidráulico com $Fr_1 = 4,55$ e $S = 1,3$ . ....	127
Tabela 8.1– Condições de Ensaio. ....	146
Tabela 8.2 – Recomendações de comprimentos de condutos para estudos de espectro de frequência em medições de flutuação de pressão em ressalto hidráulico .....	168
Tabela 9.1 – Diferenças relativas verificadas entre o modelo proposto e os valores verificados experimentalmente para $Fr_1 = 3,97$ . ....	171
Tabela 9.2 – Diferenças relativas verificadas entre o modelo proposto e os valores verificados experimentalmente para $Fr_1 = 4,55$ . ....	172
Tabela 9.3 – Diferenças relativas verificadas entre o modelo proposto e os valores verificados experimentalmente para $Fr_1 = 5,01$ . ....	173
Tabela 9.4 – Diferenças relativas verificadas entre o modelo proposto e os valores verificados experimentalmente para $Fr_1 = 5,88$ . ....	173

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$	Abertura vertical da comporta [L]
$a, b, c$	Coefficientes de ajuste para a expressão que descreve a distribuição longitudinal do coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades (N)
$a_0, a_n$ e $b_n$	Coefficientes da série de Fourier
$A_1$ e $A_2$	Coefficientes de ajuste para a expressão adimensional que descreve a lâmina d'água porposta por Rajaratnam (1962)
$a_1$ e $b_1$	Coefficientes de ajuste da expressão que descreve as diferenças relativas entre as pressões médias adimensionalizadas entre o ressalto hidráulico livre e o ressalto hidráulico submergido
$a_2$ e $b_2$	Coefficientes de ajuste da expressão que descreve as diferenças relativas entre os desvios padrões adimensionalizados entre o ressalto hidráulico livre e o ressalto hidráulico submergido
$A_d$	Coefficiente de assimetria
$b$	Largura do canal [L]
$c$	Celeridade da onda de gravidade [ $LT^{-1}$ ]
$C_p$	Coefficiente adimensional de flutuação de pressão
$C_{p\text{ máx}}$	Valor máximo do coeficiente de flutuação de pressão
$\Delta H$	Variação de energia entre seções do escoamento [L]
$\Delta P$	Amplitude média da flutuação de pressão [ $ML^{-2}$ ]
$\Delta P_{\%C}$	Amplitude relacionada a uma certa probabilidade para os valores previstos pelo modelo proposto
$\Delta P_{\%O}$	Amplitude relacionada a uma certa probabilidade para os valores experimentais
$DPIV$	<i>"Digital Particle Imaging Velocimeter"</i>
$e$	Espessura da parede dos condutos [L]
$E_1$	Energia da seção de início do ressalto hidráulico [L]
$E_2$	Energia na seção final do ressalto hidráulico [L]
$f$	Frequência [ $T^{-1}$ ]
$F$	Função de diferentes variáveis
$Fr_1$	Número de Froude na seção inicial do ressalto hidráulico
$FURNAS$	Furnas Centrais Elétricas S.A.
$fv$	Frequência de formação de vórtices [ $T^{-1}$ ]
$g$	Aceleração gravitacional [ $LT^{-2}$ ]

$h_s$	Diferença entre a lâmina d'água a jusante do ressalto hidráulico e a lâmina d'água mínima entre a comporta e o final do ressalto
$H_t$	Perda de energia total no ressalto hidráulico [L]
$k$	Coefficiente de curtose
$L$	Comprimento de uma onda estacionária [L]
$L_a$	Comprimento característico de aeração do ressalto hidráulico [L]
<i>LAHE</i>	Laboratório de Hidráulica Experimental e Recursos Hídricos de FURNAS
$L_d$	Posição de descolamento do escoamento [L]
$L_{omáx}$	Posição de máxima flutuação de pressão [L]
<i>LDA</i>	" <i>Laser Doppler Anemometry</i> "
$L_j$	Comprimento do ressalto hidráulico livre [L]
$L_r$	Comprimento do rolo [L]
$L_{sj}$	Comprimento do ressalto hidráulico submergido [L]
$N$	Coefficiente estatístico de distribuição de probabilidades
$N_j$	Nível de jusante [L]
$N_m$	Nível de montante [L]
$P\%$	Pressão com diferentes probabilidades de ocorrência [L]
$P_{\%C}$	Pressão relacionada a uma certa probabilidade de ser menor a um determinado valor de pressão prevista pelo modelo proposto [L]
$P_{\%O}$	Pressão relacionada a uma certa probabilidade de ser menor a um determinado valor de pressão observada experimentalmente [L]
$P_i$	Pressão instantânea [L]
$P_L$	Pressão média referente ao ressalto hidráulico submergido [L]
$P_S$	Pressão média referente ao ressalto hidráulico livre [L]
<i>PVC</i>	Policloreto de vinila
$P_X$	Pressão média em uma determinada posição X do ressalto hidráulico [L]
$P_{XC}$	Pressão média calculada pelo modelo proposto [L]
$q$	Vazão específica [ $L^2T^{-1}$ ]
$R^2$	Coefficiente de determinação
$Re_1$	Número de Reynolds na seção inicial do ressalto hidráulico
$S$	Fator de submergência proposto por Marques et al (1999)
$S^*$	Fator de submergência proposto por Rajaratnam (1965a)
$S_f$	Força cisalhante adimensional
$S_t$	Número de Strouhal
$t$	Tempo [T]

$T_a$	Tempo de aquisição [T]
$T_w$	Lamina 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 [ $LT^{-1}$ ]
$VHS$	" <i>Video Home System</i> "
$X$	Distância horizontal a partir do início do ressalto hidráulico [L]
$x, y, z$	Coordenadas do ponto de medição [L]
$X_{Cpmáx}$	Posição longitudinal adimensionalizada do máximo valor do coeficiente de flutuação de pressão
$Y_1$	Altura conjugada rápida do ressalto hidráulico [L]
$Y_2$	Altura conjugada lenta do ressalto hidráulico [L]
$Y_3$	Lâmina d'água mínima entre a comporta e o final do ressalto hidráulico [L]
$Y_4$	Lâmina d'água imediatamente após a comporta [L]
$Z(X)$	Função que representa a equação da superfície livre do ressalto hidráulico [L]
$Z_x$	Lâmina d'água em uma posição $X$ no interior do ressalto hidráulico [L]

## SÍMBOLOS GREGOS

$\beta$	Capacidade de bombeamento de ar do ressalto hidráulico
$\beta_m$	Capacidade máxima de bombeamento de ar do ressalto hidráulico
$\beta_w$	Largura de banda [ $T^{-1}$ ]
$X$	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 submerso e do ressalto hidráulico livre
$\Delta\Psi_S$	Diferença relativa entre as pressões adimensionalizadas do ressalto hidráulico submerso e do ressalto hidráulico livre
$\Phi$	Lâmina d'água adimensionalizada
$\Gamma$	Distância longitudinal a partir do início do ressalto adimensionalizada em função das diferenças das alturas conjugadas
$\gamma$	Peso específico [ $ML^{-2}T^{-2}$ ]
$\eta\%$	Eficiência de dissipação de energia
$\lambda_{freq}$	Relação de escala de frequências
$\lambda_L$	Relação de escala geométrica
$\lambda_t$	Relação de escala temporal
$\lambda_v$	Relação de escala de velocidades
$\nu$	Viscosidade cinemática da água [ $L^2T^{-1}$ ]
$\rho$	Massa específica da água [ $ML^{-3}$ ]
$\sigma_L$	Desvio padrão referente ao ressalto hidráulico livre
$\sigma_S$	Desvio padrão referente ao ressalto hidráulico submerso
$\sigma_X$	Desvio padrão da amostra de pressão em uma determinada posição X do ressalto hidráulico[L]
$\omega$	Relação entre a altura conjugada rápida e a largura do canal
$\Omega$	Desvio padrão adimensionalizado em função dos parâmetros hidráulicos do escoamento para o ressalto hidráulico livre
$\Omega_S$	Desvio padrão adimensionalizado em função dos parâmetros hidráulicos do escoamento para o ressalto hidráulico submerso
$\Psi$	Pressão média adimensionalizada em função dos parâmetros hidráulicos do escoamento para o ressalto hidráulico livre

$\Psi_C$	Pressão média adimensionalizada próxima a comporta
$\Psi_S$	Pressão média adimensionalizada em função dos parâmetros hidráulicos do escoamento para o ressalto hidráulico submerso

## ***1 INTRODUÇÃO***

O ressalto hidráulico é um dos fenômenos mais interessantes no campo da engenharia hidráulica. Trata-se de uma transição do escoamento supercrítico para o escoamento subcrítico em canais abertos. Essa transição é acompanhada por um incremento rápido da altura de lâmina de água, com a formação de turbilhonamento que incorpora ar atmosférico. O ressalto hidráulico é uma das formas mais usuais de dissipação de energia do escoamento em canais e a ocorrência das flutuações de pressões macroturbulentas é uma das principais características que influenciam a dissipação de energia em seu interior.

O ressalto hidráulico tem sido utilizado com diferentes propósitos, tais como: dissipar energia cinética a jusante de estruturas hidráulicas (comportas e vertedouros), promover aeração de escoamentos em instalações de abastecimento de água e misturar produtos químicos em meios fluidos, entre outros.

A jusante de estruturas de dissipação de energia o ressalto hidráulico pode se desenvolver de forma livre ou afogada (submersa) apresentando características distintas quanto à distribuição longitudinal da flutuação de pressão.

Apesar da grande quantidade de trabalhos escritos sobre o ressalto hidráulico desde os tempos de Leonardo da Vinci e principalmente após Bidone, e de existir um consenso sobre as suas características externas, as características internas ainda não são totalmente conhecidas, podendo variar em função das condições de contorno:

- a) Ressalto hidráulico a jusante de comporta;
- b) Ressalto hidráulico a jusante de vertedouro;
- c) Grau de submergência;
- d) Geometria da bacia de dissipação.

A situação crítica em relação aos esforços sobre a bacia de dissipação é a do ressalto hidráulico se desenvolvendo de forma livre, no entanto, é mais usual o seu desenvolvimento afogado (submerso). Desta maneira torna-se interessante avaliar o seu comportamento em função desta condição de contorno.

### ***1.1 Relevância e justificativa***

A dissipação de energia em um ressalto hidráulico está sempre associada a severas flutuações de pressão, de velocidades e de níveis de água que atuam sobre o piso, paredes, blocos e pilares existentes em bacias de dissipação.

A busca do entendimento do ressalto hidráulico como forma de dissipação de energia tem assumido um papel importante devido aos danos causados em estruturas de dissipação relatados ao longo dos anos, ocasionados pelos efeitos macroturbulentos do escoamento. Este fato tem levado os pesquisadores a tentar desvendar o mecanismo externo e interno do ressalto hidráulico associados à dissipação de energia, de maneira a orientar o dimensionamento de estruturas de dissipação.

O conhecimento das características internas e externas do ressalto hidráulico, tais como, superfície da linha de água, distribuição de pressões médias, das flutuações de pressão, dos valores com diferentes probabilidades de ocorrência, velocidades do escoamento e grau de aeração são importantes para otimizar o dimensionamento de dissipadores de energia, permitindo que o dimensionamento hidráulico e estrutural seja realizado de maneira segura e econômica.

## **1.2 Objetivos**

Dentro dessa ótica, o presente trabalho tem o objetivo de propor uma metodologia de previsão valores de pressão com diferentes probabilidades de ocorrência através da avaliação do campo de pressões em um ressalto hidráulico formado a jusante de uma comporta de fundo com diferentes graus de submersão e, desta forma, contribuir para o conhecimento do processo de dissipação de energia e possibilitar a otimização de estruturas de dissipação de energia, principalmente a jusante de descargas de fundo.

Para atingir esse objetivo, será necessário o desenvolvimento das seguintes etapas:

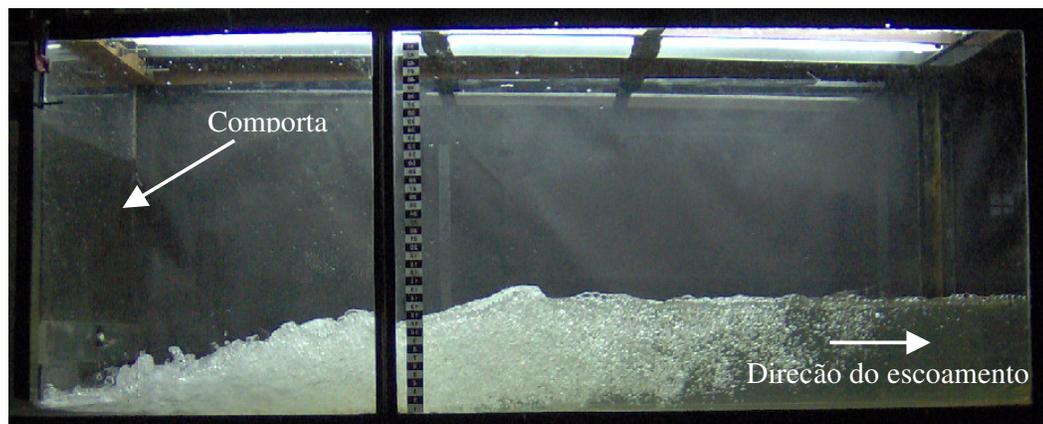
- Estudar a influência da utilização de condutos flexíveis entre a tomada de pressão e transdutor sobre as medições de flutuação de pressão, devido às características dos ensaios previstos;
- Medição de características inerentes ao fenômeno, tais como a distribuição longitudinal do nível d'água, e das pressões instantâneas junto ao fundo do canal.
- Análise estatística das grandezas medidas em função do grau de submersão: verificação das tendências dos valores médios das pressões, dos níveis, do desvio padrão, do coeficiente de assimetria, coeficiente de curtose, do coeficiente estatístico de distribuição de probabilidade, dos valores extremos de pressão com diferentes probabilidades de ocorrência (0,1%, 1%, 5%, 10%, 90%, 95%, 99%, 99,9%) e análise do espectro de frequências;

- Comparação das medições efetuadas ao longo do ressalto hidráulico a jusante de uma comporta com os dados provenientes de ensaios realizados a jusante de um vertedouro;

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O ressalto hidráulico é um fenômeno rapidamente variado, correspondendo à transição de um regime supercrítico a um regime subcrítico que ocorre em escoamentos à superfície livre. Essa mudança de regime é acompanhada de grande oscilação na superfície d'água com propagação de ondas para jusante. É caracterizado por uma elevação brusca no nível d'água e a formação de um rolo que incorpora ar atmosférico (escoamento bifásico). O ressalto hidráulico transforma parte da energia cinética em energia potencial através da perda de energia provocada pela turbulência no escoamento. Trata-se de um escoamento altamente turbulento com componentes dinâmicas de velocidade e pressão significativas.

As intensas flutuações de pressão e de velocidade verificadas no interior do ressalto hidráulico possuem um papel decisivo no processo de dissipação da energia. Essas flutuações podem causar danos à estrutura de dissipação por problemas ligados à fadiga, cavitação, ressonância, sobrepensões e subpressões, além de provocar erosões no leito do rio a jusante da bacia de dissipação. A Figura 2.1 mostra um ressalto hidráulico formado a jusante de uma comporta.



*Figura 2.1– Ressalto Hidráulico formado a jusante de uma comporta (presente estudo).*

Embora, tenha sido primeiramente descrito por Leonardo da Vinci no século XVI, (Figura 2.2), somente no início do século XIX foram apresentados os primeiros trabalhos teóricos e experimentais realizados por Bidone (1820). Este primeiro trabalho teve seu interesse direcionado principalmente à determinação das alturas conjugadas e comprimento do ressalto.

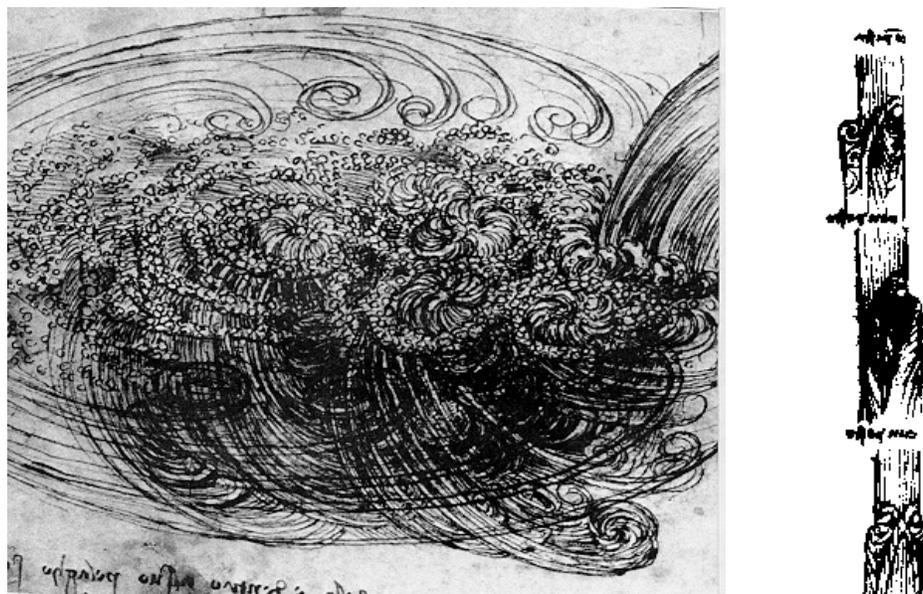


Figura 2.2 – À esquerda, desenho de Leonardo Da Vinci sobre a dissipação de energia em uma queda. Reti (1974). À direita, desenho de Leonardo Da Vinci sobre “ondas de forma cilíndricas” em uma sarjeta. Reti (1974).

A determinação exata das alturas conjugadas foi realizada por Bélanger (1828) através da equação de conservação de quantidade de movimento. Em seguida, estudos teóricos e experimentais foram conduzidos principalmente por pesquisadores franceses, Bresse (1860), Bazin e Darcy (1865) e Boussinesq (1877) apud Hager (1992).

O primeiro estudo sistemático do ressalto hidráulico foi conduzido por Sanfranz (1929), propondo uma equação para o comprimento do rolo e atribuindo a dissipação de energia ao movimento de rotação na zona do rolo.

Significantes contribuições foram dadas por Barkhemetteff (1932) e Rouse (1934) apud Hager (1992), que introduziu o conceito de números adimensionais, onde o número de Froude ( $Fr$ ) é de particular relevância.

O estudo das características turbulentas do interior do ressalto hidráulico teve seu início em meados do século XX, com a utilização de instrumentos que possibilitavam a aquisição de dados com uma frequência elevada. Desde então, começaram os estudos das características estatísticas da dissipação de energia.

Entre o final dos anos 1950 e início dos anos 1960, importantes contribuições vieram dos estudos de Rouse et al. (1959), Schröder (1963) apud Hager (1992) e Rajaratnam (1965a, 1965b). Estes estudos se concentraram na determinação do campo de velocidades e nas características turbulentas do ressalto hidráulico.

Um dos primeiros trabalhos que mediram as flutuações de pressões junto ao fundo do canal foi realizado por Elder (1961). O pesquisador concluiu que o número de Froude é

fundamental para a análise das flutuações de pressões e constatou que as frequências predominantes das flutuações de pressão nos fenômenos hidráulicos são baixas.

Rajaratnam (1967) revisou as principais publicações da época, com particular interesse nas características do campo de velocidades do escoamento.

Nos anos 1970, iniciou-se um novo período de estudos do ressalto hidráulico, envolvendo métodos de observações sofisticados baseados na anemometria a filme quente (Resch, 1970 apud Hager 1992) e anemometria por efeito Doppler (*Laser Doppler Anemometry*, Long et al 1990).

Estudos mais recentes buscam a compreensão dos processos turbulentos associados à dissipação de energia (Marques et al, 1998), aos esforços sobre as estruturas (Pinheiro 1995 e 2003) e à aeração do escoamento (Chanson e Brattberg, 2000), tendo como passo inicial a completa caracterização do fenômeno.

O ressalto hidráulico pode se desenvolver a jusante de vertedouros ou a jusante de comportas e, segundo Resch e Leutheusser (1974) apud Hager (1992), apresentam condições distintas de desenvolvimento de camada limite. A condição da camada limite a montante do ressalto depende da distância entre a estrutura e o início do ressalto, podendo encontrar-se desenvolvida ou não. Essa condição acarreta pequenas diferenças nos cálculos das alturas conjugadas e comprimento do ressalto, mas não interferem no dimensionamento de estruturas de dissipação de energia (Gomes, 2000).

A jusante destas estruturas o ressalto hidráulico pode se desenvolver de forma livre ou submersa (afogado), conforme pode ser visto na Figura 2.3. O ressalto hidráulico submerso se desenvolve à medida que a lâmina d'água a jusante ( $T_w$ ) torna-se maior que a lâmina d'água referente ao ressalto livre ( $Y_2$ ). A lâmina d'água avança sobre o ressalto, submergindo-o. O fato de a comporta limitar o deslocamento do ressalto para montante é uma das principais diferenças que ocorrem no ressalto hidráulico submerso para as duas estruturas (a jusante de comporta e vertedouro).

Existe ampla bibliografia que contempla a situação de ressalto hidráulico livre, entretanto, para a situação de ressalto submerso esta se mostra mais escassa. O presente trabalho apresentará, na medida do possível, nos itens da *Revisão Bibliográfica*, estudos que contemplem as duas situações, com o objetivo de facilitar a comparação entre as duas condições. Buscou-se na *Revisão Bibliográfica* uma completa caracterização do ressalto hidráulico, não se restringindo apenas aos estudos sobre flutuações de pressão, uma vez que existe grande dependência entre o campo de pressões e outras grandezas do escoamento.

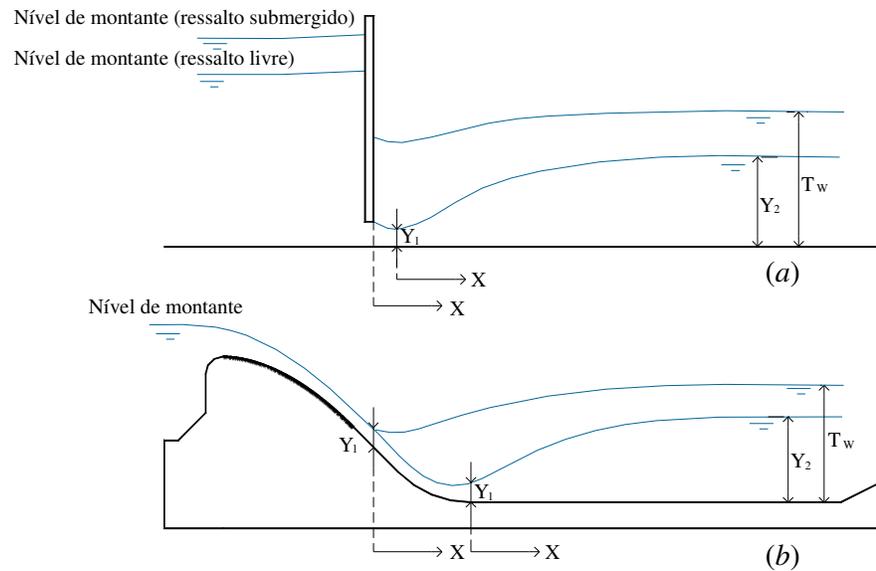


Figura 2.3 – Ressaltos hidráulicos formados a jusante de uma comporta (a) e a jusante de um vertedouro (b).

### 2.1 Alturas conjugadas do ressalto hidráulico

O ressalto hidráulico é caracterizado por suas alturas conjugadas. As alturas conjugadas são as respectivas lâminas d'água na sua seção mais a montante, chamada de altura conjugada rápida ou na entrada do ressalto ( $Y_1$ ), e na seção mais a jusante, chamada de altura conjugada lenta ( $Y_2$ ). O conhecimento das alturas conjugadas é de grande importância para caracterização da forma e do tipo de ressalto, bem como parâmetro para análise de outras grandezas inerentes ao fenômeno.

A primeira determinação das alturas conjugadas para o ressalto hidráulico em um canal retangular foi apresentada por Bélanger (1828) através da equação da conservação da quantidade de movimento dada por:

$$\frac{1}{2} \rho g b Y_1^2 + \rho Q V_1 = \frac{1}{2} \rho g b Y_2^2 + \rho Q V_2 \quad 2.1$$

onde:

$\rho$  = massa específica da água;

$g$  = aceleração gravitacional;

$b$  = largura do canal;

$Q$  = vazão;

$V_1$  = velocidade média do escoamento na seção de início do ressalto hidráulico;

$V_2$  = velocidade média do escoamento na seção final do ressalto hidráulico.

Bélanger considerou as seguintes hipóteses: distribuição de pressão hidrostática, distribuição de velocidades uniforme, seção transversal retangular, fundo do canal horizontal, escoamento permanente e incompressível e foram desprezados os efeitos viscosos. Assim, pode-se representar a relação entre as alturas conjugadas por:

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

onde:

$Y_1$  = altura conjugada rápida (entrada do ressalto);

$Y_2$  = altura conjugada lenta (saída do ressalto) e;

$Fr_1$  = número de Froude na seção de entrada do ressalto hidráulico,  $Fr = \frac{V_1}{gY_1}$ .

Diversos outros autores apresentam formulações sobre as alturas conjugadas. Aqui será apresentado um resumo, de caráter histórico, das principais equações. A Tabela 2.1 apresenta algumas das equações sugeridas para a relação das alturas conjugadas para canais de fundo plano, apresentadas nos trabalhos de Elevatorski (1959), Bhutto (1989) e Teixeira (2003). Certas formulações baseiam-se em estudos experimentais, considerando, entre outros parâmetros, a rugosidade do canal, efeito viscoso e tensão de cisalhamento.

*Tabela 2.1– Relação entre as alturas conjugadas para canal retangular com fundo plano.*

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	$Y_2 = \frac{(V_1)^2}{2g} \pm \left[ \left( \frac{(V_1)^2 Y_1}{g} \right) \left( \frac{(V_1)^2}{2g} \right)^2 \right]^{1/2}$

Autor	Ano	Equação
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 e Kartha	1972	$Fr_1^2 = \frac{\frac{Y_2}{Y_1} \left[ \left( \frac{Y_2^2}{Y_1^2} \right) - 1 \right]}{2,06 \left[ \left( \frac{Y_2}{Y_1} \right) - 1 \right] - 0,0244 \left( \frac{Y_2}{Y_1} \right)^2}$
Merriman	1984	$Y_2 = \pm \left( \frac{Y_1(V_1)^2}{g} \right)^{1/2}$
Hager e 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 e Yasuda	1994	$\left( \frac{Y_2}{Y_1} \right)^3 - \{ 2Fr_1^2 + 1 - S_f \} \left( \frac{Y_2}{Y_1} \right) + 2Fr_1^2 = 0$ $S_f = 0,12 (Fr_1 - 1)^2$

Fonte: Elevatorski (1959), Bhutto et al (1989) e Teixeira (2003).

Hager e Bremen (1989) apresentam uma equação para a relação entre as alturas conjugadas na qual consideram os efeitos viscosos junto aos contornos sólidos do canal:

$$Y^* = Y_0 \left[ 1 - 3,25\omega e^{(Fr_1/7)} (\log Re_1)^{-3} \right]$$

2.3

Sendo que:

$$Y_0 = \frac{Y_2}{Y_1} \left[ 1 - 0,7 (\log Re_1)^{-2,5} e^{-Fr_1/8} \right]$$

Sendo:

$$\omega = \frac{Y_1}{b};$$

$$Re_1 = \frac{V_1 Y_1}{\nu} = \text{número de Reynolds para a seção de entrada do ressalto hidráulico.}$$

onde:

$Y_1$  = é a profundidade inicial do escoamento (altura conjugada rápida do ressalto);

$b$  = largura do canal

$V_1$  = velocidade na seção de início do ressalto e;

$\nu$  = coeficiente de viscosidade cinemático do fluido.

A Equação 2.3 indica que relação das alturas conjugadas depende não apenas do número de Froude, mas também das características viscosas do escoamento e da largura relativa do canal. Nota-se que o efeito viscoso sobre a relação das alturas conjugadas se torna significativo para valores menores do número de Reynolds. Esse tipo de problema pode aparecer em estudos realizados em modelo reduzido.

Ohtsu e Yasuda (1994), analisando um ressalto hidráulico com as mesmas características, também consideraram a importância da tensão de cisalhamento junto ao perímetro molhado do canal em um escoamento potencial a jusante de uma comporta, propondo a seguinte formulação:

$$\left( \frac{Y_2}{Y_1} \right)^3 - \{ 2Fr_1^2 + 1 - S_f \} \left( \frac{Y_2}{Y_1} \right) + 2Fr_1^2 = 0 \quad 2.4$$

onde:

$$S_f = 0,12 (Fr_1 - 1)^2$$

$S_f$  é a força de cisalhamento no fundo do canal, válida somente para números de Froude entre 3 e 10.

## 2.2 Formas do ressalto hidráulico segundo o número de Froude

Escoamentos à superfície livre são governados principalmente por esforços de origem gravitacional, assim, as características do ressalto hidráulico de uma forma geral são condicionadas ao número de Froude ( $Fr$ ) que representa a relação entre os esforços inerciais e gravitacionais (Equação 2.5):

$$Fr = \frac{V}{c} \quad 2.5$$

Onde:

$V$  é a velocidade média do escoamento em uma dada seção do escoamento e;

$c$  é a celeridade da onda de gravidade.

Escoamentos onde  $Fr < 1$  são ditos subcríticos e por sua vez escoamentos com  $Fr > 1$  caracterizam escoamentos supercríticos. O número de Froude utilizado para caracterizar o ressalto hidráulico é determinado na seção de entrada do ressalto hidráulico, e é chamado de Froude na entrada do ressalto ( $Fr_1$ ).

O número de Froude na entrada de um ressalto hidráulico ( $Fr_1$ ) é sempre superior à unidade, escoamento supercrítico, e o número de Froude correspondente à seção de saída do ressalto sempre é inferior à unidade, escoamento subcrítico, caracterizando a mudança de regime.

Peterka (1974) sugere a classificação dos tipos de ressalto de acordo com o número de Froude. A Figura 2.4 apresenta a classificação sugerida por Peterka (1974).

Para valores do número de Froude entre 1,0 e 1,7, ocorre uma pequena diferença nas alturas conjugadas, ocorrendo uma pequena oscilação na superfície, semelhantes a uma onda estacionária. A transição entre o regime rápido (torrencial) e o regime lento (fluvial) ocorre de modo gradual e as perdas de carga são essencialmente devidas aos efeitos viscosos junto à parede e ao fundo.

Segundo a classificação sugerida por Peterka (1974), desenvolve-se um “pré-ressalto”, também chamado de “ressalto fraco” por outros autores, quando o número de Froude na seção de entrada tem valores entre 1,7 e 2,5. O pré-ressalto caracteriza-se por uma série de pequenos rolos que se desenvolvem na superfície. A energia dissipada é menor do que 20% da energia de entrada.

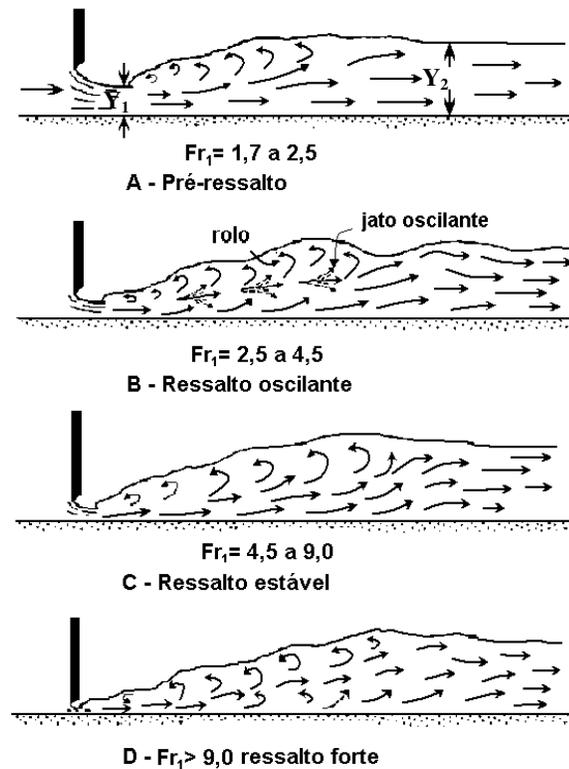


Figura 2.4- Formas do ressalto hidráulico em função do número de Froude na seção de entrada ( $Fr_1$ ) conforme apresentado em Peterka (1974).

Para valores de número de Froude variando entre 2,5 a 4,5, o ressalto hidráulico tem um contorno nítido, 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”. O ressalto oscilante tem a capacidade de dissipar cerca de 30% a 45% da energia do escoamento. Segundo Porto (1999) o ressalto oscilante apresenta a tendência de se deslocar para jusante, não guardando posição junto à fonte geradora.

Na faixa de número de Froude entre 4,5 a 9,0, desenvolve-se o “ressalto estável”, apresentando características externas estáveis. A energia total dissipada está entre 45% e 70% da energia do escoamento na entrada do ressalto. O ressalto estável também é conhecido por “ressalto ordinário”, cobrindo o domínio dos ressaltos hidráulicos utilizados como dissipadores de energia em obras hidráulicas, Porto (1999).

Conforme Peterka (1974), para valores do número de Froude acima de 9,0, o ressalto hidráulico apresenta uma grande energia cinética a ser dissipada, esta forma é conhecida como “ressalto forte”. Neste caso, o ressalto hidráulico apresenta uma intensa formação de vórtices, emulsão de ar, agitação da superfície e jatos de alta turbulência que se propagam para jusante por uma longa distância. A perda de energia é alta e pode alcançar

85% da energia de entrada. Segundo Porto (1999), não deve ser utilizado nas construções hidráulicas (bacias de dissipação) devido a efeitos colaterais sobre a estrutura de dissipação, como processos abrasivos ou mesmo cavitação.

### 2.3 *Ressalto hidráulico formado a jusante de canais com mudança de declividade (vertedouro)*

O ressalto hidráulico formado a jusante de canais com mudança de declividade é classificado de acordo com o seu grau de afogamento e sua posição em relação à estrutura de vertimento e bacia de dissipação. A Figura 2.5 apresenta a classificação do ressalto hidráulico formado a jusante de canais com mudança de declividade ou vertedouros.

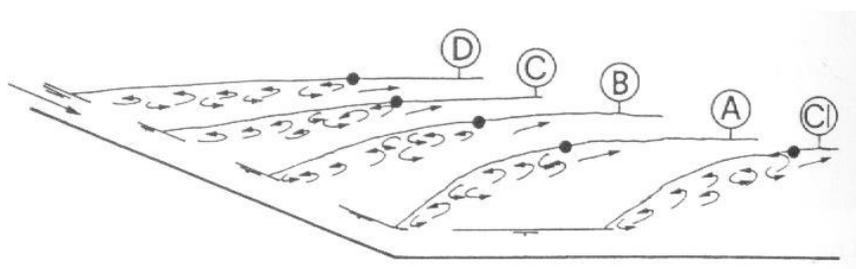


Figura 2.5 –Classificação do Ressalto Hidráulico formado a jusante de um vertedouro (Hager, 1988)

O ressalto do tipo A (*A-jump*) forma-se quando a altura conjugada lenta ( $Y_2$ ) calculada pela equação de Bélanger é igual à lâmina d'água ( $T_w$ ) sobre a bacia de dissipação, sendo que o ressalto formado encontra-se inteiramente no canal horizontal à jusante do vertedouro e inicia-se logo após a mudança de declividade do canal.

O ressalto hidráulico do tipo CI (*CI-jump*) é 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 ( $T_w$ ) ser inferior à altura conjugada lenta correspondente ao ressalto do tipo A.

À medida que se incrementa a altura da lâmina d'água à jusante, de maneira que  $T_w$  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 o ressalto encontra-se parte na estrutura de dissipação, mas tendo seu início no paramento do vertedouro;

Ressalto do tipo C (*C-jump*), quando o final do ressalto 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.

#### 2.4 Ressalto hidráulico a jusante de comportas

A diferença entre o ressalto a jusante de uma comporta e a jusante de um vertedouro é a condição de desenvolvimento da camada limite a montante do ressalto, propiciando características turbulentas diferentes (Resch e Leutheusser, 1974). Podem se formar ressaltos hidráulicos livres e submergidos a jusante de comportas.

O ressalto submerso a jusante de uma comporta pode ser considerado como uma condição intermediária entre dois fenômenos hidráulicos bem conhecidos com diferentes características físicas: ressalto hidráulico livre e a difusão de um jato turbulento em um meio semi-infinito (Lopardo et al 2004b).

O ressalto hidráulico submerso se forma à medida que o nível de água a jusante ( $T_w$ ) torna-se maior que a altura conjugada lenta para um ressalto livre ( $Y_2$ ). A Figura 2.6 apresenta um desenho esquemático de um ressalto hidráulico submerso formado a jusante de uma comporta.

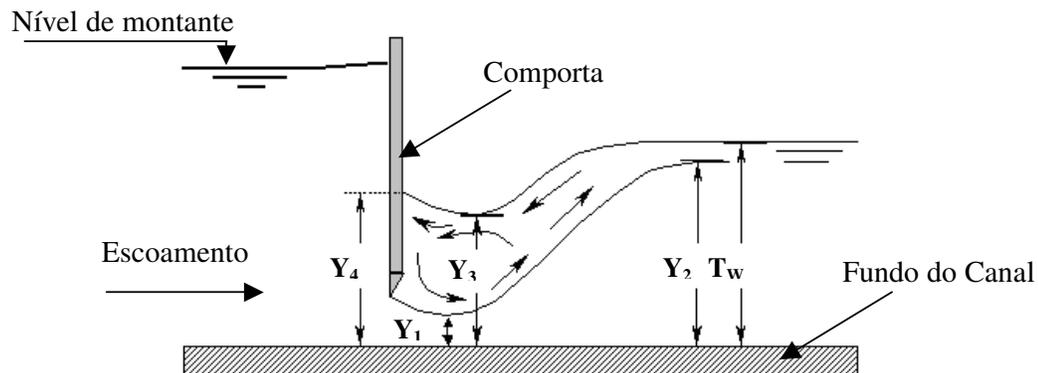


Figura 2.6 – Ressalto submerso formado a jusante de uma comporta (Fonte: Gomes, 2000)

Os parâmetros apresentados na figura anterior são: altura conjugada rápida para o ressalto hidráulico livre ( $Y_1$ ), altura conjugada lenta para o ressalto hidráulico livre ( $Y_2$ ), lâmina mínima entre a comporta e o final do ressalto hidráulico ( $Y_3$ ), lâmina d'água imediatamente após a comporta ( $Y_4$ ) e lâmina d'água imediatamente a jusante do ressalto ( $T_w$ ). Segundo Rajaratnam (1965a), para  $Fr_1 > 2$  e  $S^* > 0$ , as expressões a seguir apresentam a relação entre os parâmetros determinados.

$$\frac{Y_4}{Y_1} = \sqrt{2} Fr_1 [S(2 + S^*)]^{1/2} \quad 2.6$$

$$\frac{Y_3}{Y_1} = 1 + (S^* + 0,2) Fr_1^{1,28} \quad 2.7$$

Rajaratnam (1965a) definiu “S\*” como o fator de submergência expresso por:

$$S^* = \frac{T_w - Y_2}{Y_2} \quad 2.8$$

A definição de S\* difere da definição do fator de submergência proposta por Marques et al (1997):

$$S = \frac{T_w}{Y_2} \quad 2.9$$

Sauma Haddad et al (1992) apud Lopardo et al (2004a), através da análise macroscópica do ressalto hidráulico apresenta a seguinte expressão entre a altura conjugada rápida para o ressalto hidráulico livre (Y<sub>1</sub>) e altura mínima entre a comporta e o final do ressalto hidráulico (Y<sub>3</sub>):

$$\frac{Y_3}{Y_1} = \left\{ (1 + S^*)^2 \left( \frac{Y_2}{Y_1} \right)^2 - 2 Fr_1^2 \left[ 1 - \left( \left( \frac{Y_2}{Y_1} \right) (1 + S^*) \right)^{-1} \right] \right\}^{1/2} \quad 2.10$$

sendo  $\frac{Y_2}{Y_1}$  a relação entre as alturas conjugas expressa por Bélanger.

## 2.5 Comprimento do ressalto e do rolo

Não existe um consenso no que diz respeito à determinação do comprimento do ressalto nem a zona do rolo, muitas vezes consideradas coincidentes. A Figura 2.7 apresenta um ressalto hidráulico a jusante de uma comporta representando o comprimento do ressalto livre (L<sub>j</sub>), comprimento do ressalto afogado (L<sub>s<sub>j</sub></sub>) e o comprimento do rolo (L<sub>r</sub>). A determinação do comprimento do rolo e do ressalto hidráulico é diretamente utilizada no dimensionamento de bacias de dissipação. Alguns autores consideram a posição de início do ressalto hidráulico

submerso a seção imediatamente a jusante da comporta, como Rajaratnam (1967). Outros, como Lopardo et al (2004a), consideram o início do ressalto submerso a seção de contração do escoamento.

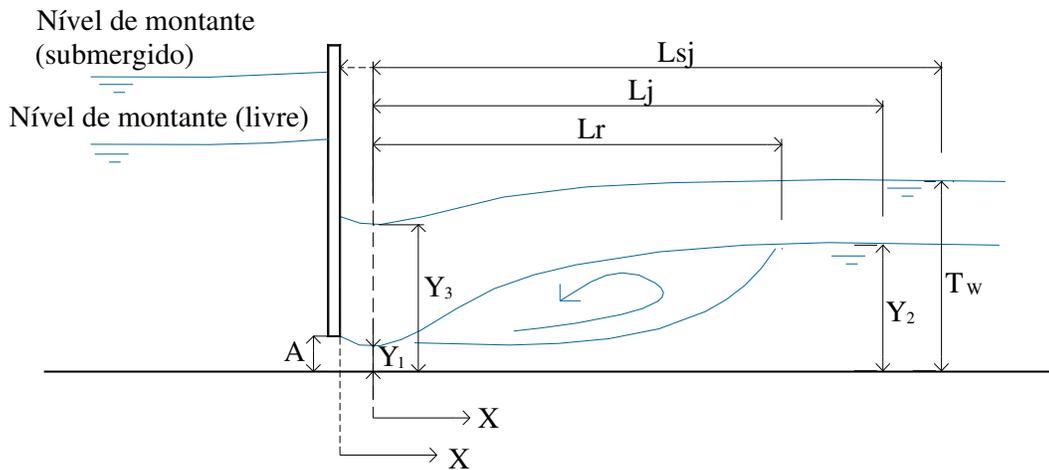


Figura 2.7 – Ressalto Hidráulico a Jusante de Comporta ( $Y_1$  = altura conjugada rápida,  $Y_2$  = altura conjugada lenta,  $Y_3$  = lâmina mínima entre a comporta e o final do ressalto,  $L_r$  = comprimento do rolo,  $L_j$  = comprimento do ressalto livre e  $L_{sj}$  = comprimento do ressalto afogado).

Neste trabalho será considerada posição do início do ressalto hidráulico submerso a seção imediatamente a jusante da comporta conforme apresentado por Rajaratnam (1967).

A seguir serão apresentados os critérios mais usuais para a determinação desses parâmetros.

### 2.5.1 Comprimento do ressalto hidráulico

Desde o início do século XX, vários pesquisadores vêm estudando o ressalto hidráulico e propondo equações para estimar o seu comprimento ( $L_j$ ). Este parâmetro é definido de diferentes maneiras não existindo um consenso na bibliografia. Os principais critérios usualmente adotados são:

- Local onde não há grande variação de níveis (Elevatorski 1959);
- Local onde o ressalto apresenta linha d'água igual à altura conjugada lenta (Rajaratnam 1967);
- Local onde terminam as perturbações causadas pelo ressalto (Marques et al 1997 e Lopardo et al 2004a).

A Tabela 2.2 mostra as equações sugeridas por diferentes autores para determinação do comprimento do ressalto hidráulico livre ( $L_j$ ).

Tabela 2.2 - Fórmulas sugeridas para o comprimento do ressalto hidráulico livre

Autor	Data	Equação
Riegel, Beebe	1917	$L_j \cong 5 \cdot (Y_2 - Y_1)$
Knapp	1932	$L_j = \left[ \left( \frac{62,5 \cdot Y_1}{H_1} \right) + 11,3 \right] \cdot \left[ \frac{(V_1 - V_2)^2}{2 \cdot g} - \left( \frac{H_1}{H_2} \right) \right]$ <p>onde <math>H = Y + \frac{V^2}{2g}</math></p>
Woycicki	1934	$L_j = (Y_2 - Y_1) \cdot \left( 8 - \frac{0,05 \cdot Y_2}{Y_1} \right)$
Smetana	1934	$L_j \cong 6 \cdot (Y_2 - Y_1)$
Chertoussov	1935	$L_j = 10,3 \cdot Y_1 \cdot (Fr_1 - 1)^{0,81}$
Aravin	1935	$L_j = 5,4 \cdot (Y_2 - Y_1)$
Bakhmeteff-Matzke	1936	$L_j = 5 \cdot (Y_2 - Y_1)$
Ludin	1936	$L_j = \frac{Y_2}{\left[ 0,22 - 0,17 \cdot \frac{V_c}{V_1} \right]}$
Kinney	1941	$L_j = 6,02 \cdot (Y_2 - Y_1)$
Posey	1941	$L_j = 4,5 - 7 \cdot (Y_2 - Y_1)$
Wu	1949	$L_j = 10(Y_2 - Y_1) \cdot Fr_1^{-0,16}$
Peterka	1958	$L_j = 6,1Y_2, 4,5 \leq Fr_1 \leq 9$
Elevatorski	1959	$L_j = 6,9(Y_2 - Y_1)$
Silverster	1964	$L_j = 9,75Y_1 (Fr_1 - 1)^{1,01}$
Marques et al	1997	$L_j = 8,5(Y_2 - Y_1)$
Teixeira	2003	$L_j = 8(Y_2 - Y_1)$

Fonte: Elevatorski (1959), Bhutto et al (1989), Marques et al (1997) e Teixeira (2003).

Dentre as fórmulas sugeridas para determinação do comprimento do ressalto hidráulico, as equações mais utilizadas são as de Smetana (1934), Peterka (1958) e Elevatorski (1959). Segundo Gomes (2000) o tamanho do ressalto hidráulico pode apresentar uma oscilação de até  $0,35 \cdot (Y_2 - Y_1)$  na sua posição, devido às características macroturbulentas.

O U.S. Bureau of Reclamation (1955) apud Chow (1959) apresentou uma proposta para a determinação do comprimento do ressalto hidráulico (Figura 2.8). A proposta do U.S.B.R. (1955) abrange uma grande faixa de número de Froude e indica uma tendência à diminuição do comprimento adimensionalizado do ressalto a partir do número de Froude = 9. Também se verifica uma tendência do comprimento do ressalto permanecer constante quando o ressalto formado é do tipo estável na faixa de número de Froude de 6 a 9.

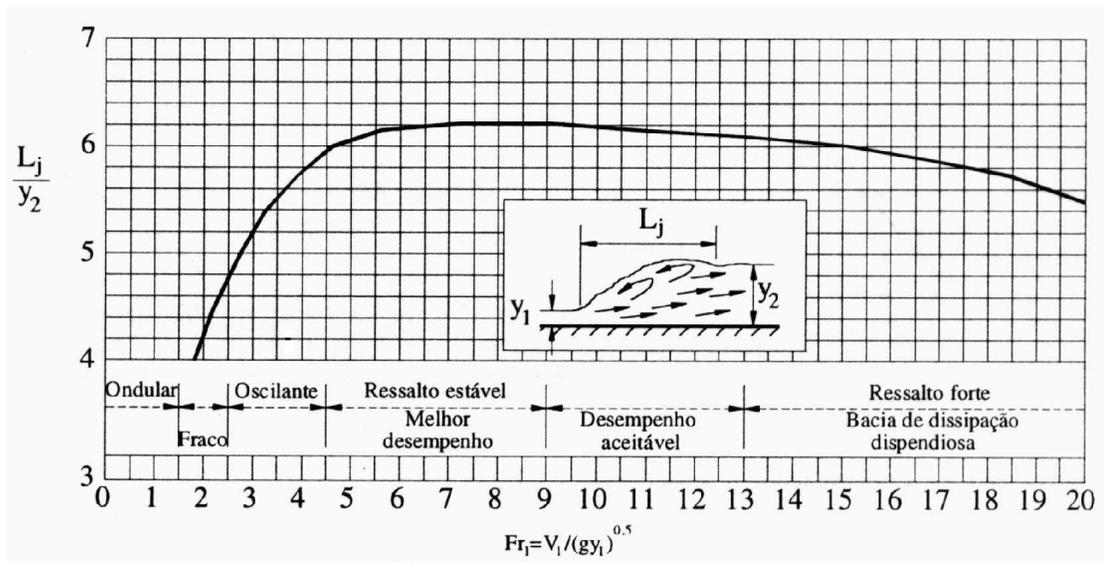


Figura 2.8 – Comprimento do ressalto hidráulico proposto pelo U.S.B.R.(1955), Fonte:Porto (1999)

Rajaratnam (1967) apresentou o comprimento do ressalto hidráulico ( $L_j$ ) e do rolo ( $L_r$ ) em função do número de Froude (Figura 2.9). Entretanto, Rajaratnam não verificou diminuição do comprimento adimensionalizado do ressalto a partir do número de Froude = 9 como verificado na proposta do USBR.

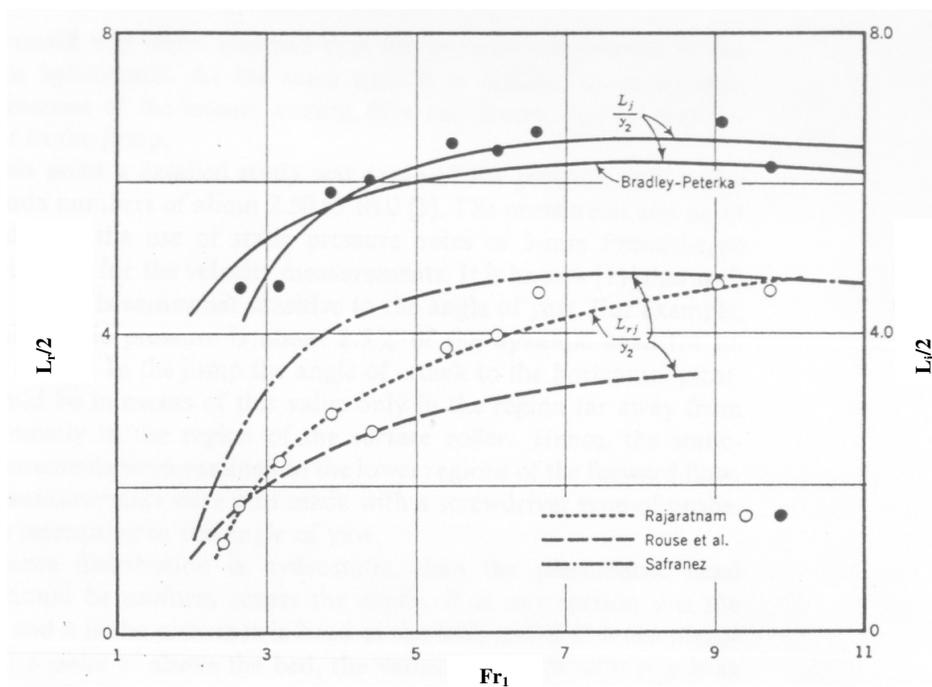


Figura 2.9 – Comprimento do ressalto ( $L_j$ ) e do rolo ( $L_r$ ) apresentadas por Rajaratnam (1967).

No caso do ressalto hidráulico submerso, segundo Lopardo et al (2004a) e Lopardo et al (2004b), a variável macroscópica mais controversa em relação ao desenho de bacias de dissipação é o seu comprimento ( $L_{sj}$ ), que depende do critério que definem as seções de início e final do ressalto.

Rajaratnam (1967) expressa o comprimento do ressalto submerso através da seguinte expressão empírica:

$$\frac{L_{sj}}{Y_2} = 6,1 + 4,9S^* \quad 2.11$$

Entretanto, essa expressão não satisfaz a condição de contorno para o ressalto livre ( $S^* = 0$ ).

Macroscopicamente é possível considerar o comprimento do ressalto hidráulico submerso como a distância entre a seção da “vena contracta” a jusante da comporta à seção onde a superfície livre pode ser considerada horizontal, Lopardo et al (2004a) e (2004b). Foi demonstrado experimentalmente por Sauma Haddad et al(1992) apud Lopardo et al (2004a) que a seção de montante do ressalto submerso pode ser localizada a uma distância 1,5 vezes a abertura da comporta.

Lopardo et al (2004a) afirmam que essa definição do comprimento do ressalto submerso não cobre todo o fenômeno macroturbulento, podendo ser adotada como uma primeira e boa aproximação, compatível com uma consideração do escoamento em termos médios.

Dados experimentais permitem determinar uma relação entre o parâmetro adimensional  $L_{sj}/(T_w - Y_3)$  como uma função do coeficiente de submergência ( $S^*$ ), Figura 2.10. A escolha desse novo parâmetro adimensional deve-se à pouca dependência de seu denominador em relação ao número de Froude incidente ( $Fr_1$ ), definido como  $h_s = (T_w - Y_3)$ . Através de regressão linear determinou-se a seguinte expressão:

$$\frac{L_{sj}}{h_s} = 6 + 41,2S^* \quad 2.12$$

que apresenta um coeficiente de correlação  $R = 0,93$ , sendo que, a expressão de Rajaratnam (1967) apresenta somente  $R = 0,48$ .

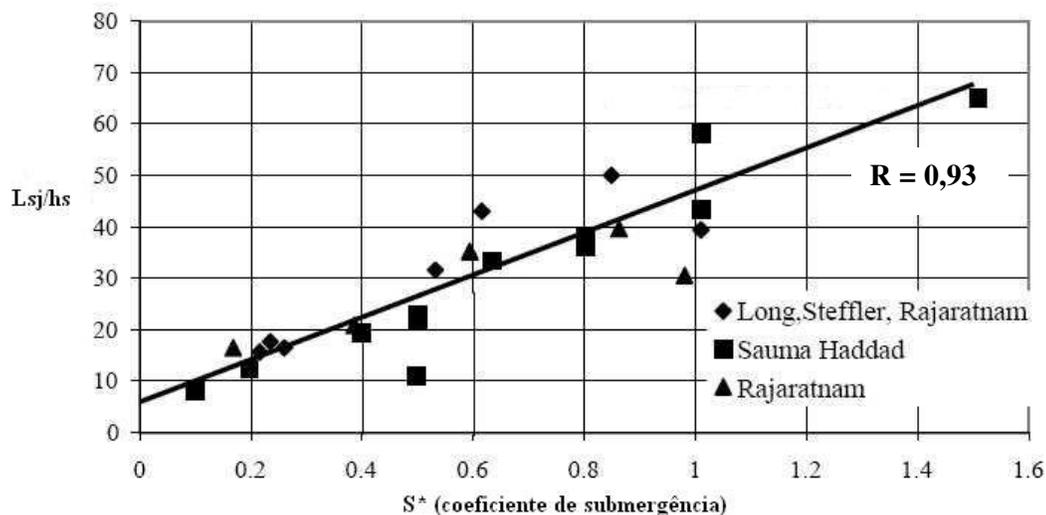


Figura 2.10 – Comprimento do ressalto submerso, Lopardo et al (2004a)

Lopardo et al (2004a) sugerem uma metodologia para a determinação do comprimento de um ressalto submerso, propondo definir um “comprimento de turbulência”, o qual caracteriza-se como a distância ao longo do ressalto no qual a flutuação de pressão passa a corresponder à flutuação de um escoamento a superfície livre. O autor apresenta para comparações entre os comprimentos de ressaltos submersos através da análise

macroscópica proposta pela Equação 2.11 e o comprimento calculado a partir a análise da flutuação de pressão, utilizando com fator delimitador do ressalto hidráulico o coeficiente de flutuação de pressão  $C_p = 0,02$ . Lopardo et al (2004a) concluem, para o número de Froude = 5, que o comprimento do ressalto hidráulico aumenta em função da submergência e que a análise macroscópica leva à determinação de comprimento de ressaltos maiores, tendo as duas metodologia apresentado diferenças crescentes em função do aumento da submergência.

### 2.5.2 Comprimento do rolo

Apesar de ter visualização mais fácil, também não há um consenso sobre a determinação do comprimento do rolo ( $L_r$ ). Segundo Rajaratnam (1965b), confirmado posteriormente por Peterka (1974) e Lopardo (1986), o local do fim do rolo coincide com o local onde a altura de água alcança 95 % da altura conjugada na saída do ressalto ( $Y_2$ ). Já Marques et al (1997) fixaram o comprimento do rolo como sendo o local onde o coeficiente de assimetria ( $A_d$ ) da amostra da pressão “instantânea” encontra seu valor mínimo (negativo), indicando que o escoamento atingiu a superfície.

A Tabela 2.3 apresenta as equações que calculam o comprimento do rolo sugeridas por diferentes pesquisadores.

Tabela 2.3 - Fórmulas sugeridas para o comprimento do rolo em um canal com fundo horizontal.

Autor	Data	Equação
Safranez	1929	$\left(\frac{L_r}{Y_1}\right) = 6 \cdot Fr_1$
Pietrkowski	1932	$\left(\frac{L_r}{Y_1}\right) = 5,9 \cdot Fr_1$
Einwachter	1933	$L_r = \left(15,2 - \frac{0,24 \cdot Y_2}{Y_1}\right) \left\{ \left(\frac{Y_2}{Y_1} - 1 - V_1 \cdot \left(\frac{Y_2}{Y_1} - 1\right)\right) \right\}$
Douma	1942	$L_r = 3 \cdot Y_2$
Peterka	1957	$L_r = 4,5 \cdot Y_2, \quad (4,5 \leq Fr_1 \leq 9)$
Newmham	1973	$L_r = 6,73 \cdot (Fr_1 - 1)$

Autor	Data	Equação
Sarma e Newnham	1973	$\frac{L_j}{L_r} = 1,3$
Busch	1981	$L_r = \alpha \cdot R^{*\beta} \cdot Fr_1^\gamma \cdot \omega^\delta \cdot \ln(Y^\alpha)$ $\alpha = 1,285; \beta = 0,0683; \gamma = 1,1017;$ $\delta = 0,1605; Y^\alpha = Y_2/Y_1$ (Bélanger) $\omega = Y_1/b; b = \text{largura do canal.}$
Hager et al	1989	$L_r = -12 + 100.th(Fr_1/12,5)$
Marques et al	1997	$L_r = 6,0 \cdot (Y_2 - Y_1)$

Fonte: Elevatorski (1959), Hager et al (1990), Bhutto et al (1989), Marques (1995) e Teixeira(2003).

Segundo Gomes (2000) o comprimento do rolo pode apresentar uma oscilação na sua posição de aproximadamente  $0,50 \cdot (Y_2 - Y_1)$ , devido às características macroturbulentas.

## 2.6 Perfil da linha d'água no ressalto hidráulico

A determinação do perfil da linha d' água no ressalto hidráulico é importante para o correto dimensionamento das alturas dos muros laterais de uma bacia de dissipação, para isso, deve-se levar em conta a maior elevação de água no ressalto além de uma folga extra (borda livre), usualmente entre 10% da altura conjugada lenta e maior ou igual a 1,0 m (USBR 1987).

Bakhmeteff e Matzke (1936) determinaram o perfil da linha de água do ressalto livre em um canal com fundo horizontal mostrando que este varia com o número de Froude. Os dados experimentais dos autores ajustam-se, segundo Hager (1992), à seguinte expressão:

$$\Phi = 1,5th(\chi)$$

2.13

sendo:

$$\Phi = \frac{Z_x - Y_1}{Y_2 - Y_1};$$

$$\chi = \frac{X}{L_r}$$

onde:

$Y_1$  = altura conjugada rápida;

$Y_2$  = altura conjugada lenta;  
 $X$  = distância horizontal a partir do início do ressalto;  
 $Z_X$  = profundidade do escoamento a uma distância  $X$ ;  
 $th$  = tangente hiperbólica; e  
 $L_r$  = comprimento da zona do rolo.

Rajaratnam (1962) apud Rajaratnam (1967), apresentou uma relação adimensional para o perfil do ressalto hidráulico livre dada por:

$$\frac{Z_X - Y_1}{Y_2} = A_1 \left( \frac{X}{Y_2} \right) + A_2 \left( \frac{X}{Y_2} \right)^2 \quad 2.14$$

Onde:

$A_1$  e  $A_2$  são coeficientes que dependem do número de Froude.

Sauma Haddad et al (1992) consideram que a superfície livre (perfil da linha d'água) no ressalto hidráulico pode ser representada por uma serie de Fourier e que a sua derivada primeira é uma função contínua, o que assegura a convergência da série.

$$Z(X) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[ a_n \cos \left( n\pi \frac{X}{L} \right) + b_n \operatorname{sen} \left( n\pi \frac{X}{L} \right) \right] \quad 2.15$$

Onde:

$Z(X)$  = função que representa a equação da superfície livre do ressalto hidráulico;

$X$  = coordenada longitudinal medida a partir do inicio do ressalto;

$L$  = comprimento da onda estacionária;

$n$  = variável na série ( $n = 1, 2, 3, \dots$ );

$a_0, a_n, b_n$  = coeficientes da série de Fourier.

Considerando que a superfície livre no ressalto hidráulico pode ser interpretada como sendo  $\frac{1}{4}$  de uma onda simples estacionária com comprimento de onda igual a  $2L$ , o que implica desprezar o aporte de todas as amplitudes das ondas que diferenciam da fundamental. Fazendo uso das condições de contorno: a) para  $X = 0, Z_X = Y_1$  b) para  $X = L_r, Z_X = Y_2$  e considerando  $L = 2L_j$  os autores apresentam a seguinte equação para a superfície livre do ressalto:

$$\frac{Z_x}{Y_1} = \left[ 1 + (Y^* - 1) \operatorname{sen} \left( \frac{\pi X}{2L_j} \right) \right] \quad 2.16$$

onde:

$Z_x$  = espessura da lâmina d' água;

$Y^*$  = relação das alturas conjugadas apresentada por Bélanger (1828);

$L_j$  = comprimento do ressalto hidráulico dado por Smetana (1934).

Fragoso e Aldape (2004) analisaram o perfil da linha d' água em um ressalto hidráulico e constataram diferenças significativas entre o perfil da região central do ressalto e das regiões próximas às paredes do canal, evidenciando o efeito causado pela presença do contorno sólido.

Mok (2004) propôs a existência de uma relação entre a formação de vórtices na região do rolo e a flutuação da superfície livre à jusante do ressalto. Mok (2004) efetuou medições da flutuação da superfície livre a jusante do ressalto hidráulico através de uma sonda resistiva imersa no canal e mostrou para valores de número de Froude ( $Fr_1$ ) > 1,5 que a frequência de formação de vórtices ( $f_v$ ) pode ser dada por:

$$f_v = \frac{V_1}{2L_r} \quad 2.17$$

Mok (2004) coletou as variações da superfície livre a uma frequência de 50 Hz e determinou as frequências características das oscilações de nível à jusante do ressalto. Essas frequências, adimensionalizadas na forma do número de Strouhal e comparadas com a expressão teórica (Equação 2.16) em função do número de Froude do escoamento ( $Fr_1$ ), são apresentadas na Figura 2.11.

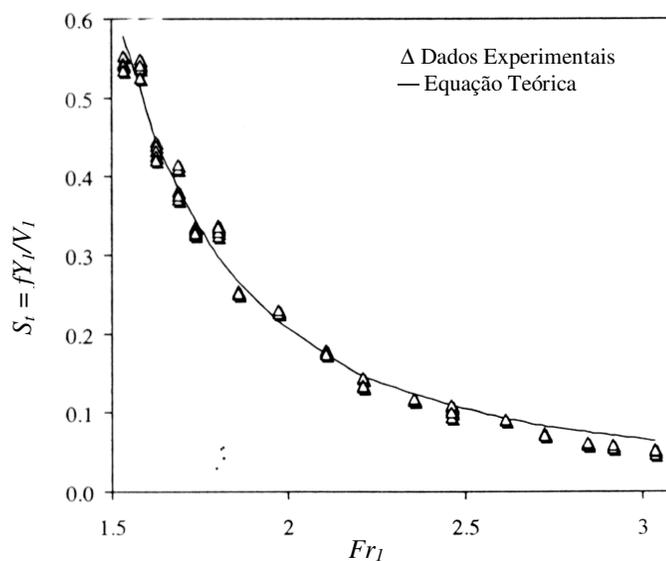


Figura 2.11 – Frequências características da oscilação de nível a jusante do ressalto, Mok (2004).

## 2.7 Dissipação de energia

A perda de energia ( $\Delta H$ ) no ressalto hidráulico pode ser determinada a partir da diferença de energia entre as seções imediatamente anterior ( $E_1$ ) e posterior ( $E_2$ ) do ressalto hidráulico como pode ser visto na Figura 2.12.

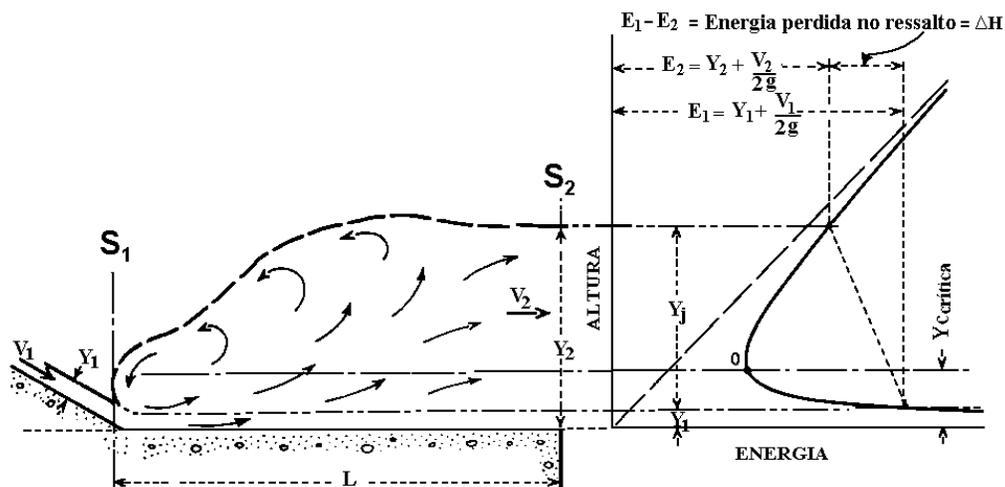


Figura 2.12 - Esquema das alturas conjugadas relacionadas com a perda de energia, Elevatorski (1959).

Os parâmetros apresentados na figura anterior são: seção de entrada do ressalto hidráulico ( $S_1$ ); seção de saída do ressalto hidráulico ( $S_2$ ); alturas conjugadas do ressalto

hidráulico ( $Y_1$  e  $Y_2$ ); velocidade média na entrada do ressalto hidráulico ( $V_1$ ) e velocidade média na saída do ressalto hidráulico ( $V_2$ ).

No caso de um canal com seção constante e fundo horizontal podemos determinar a perda de energia da seguinte forma:

$$\Delta H = E_1 - E_2 = \left( Y_1 + \frac{V_1^2}{2g} \right) - \left( Y_2 + \frac{V_2^2}{2g} \right) \quad 2.18$$

Realizando as devidas substituições e simplificações, determinamos a perda de energia no ressalto hidráulico por:

$$\Delta H = \frac{1}{4} \frac{(Y_2 - Y_1)^3}{(Y_1 \cdot Y_2)} \quad 2.19$$

Bakhmetef e Matzke (1936) apresentaram a seguinte equação, representando a eficiência da dissipação de energia ( $\eta = \Delta H/E_1$ ):

$$\eta = \frac{\Delta H}{E_1} = 1 - \frac{E_2}{E_1} \quad 2.20$$

Peterka (1974) mostrou que essa eficiência da dissipação de energia no ressalto é diretamente proporcional ao número de Froude, entretanto, à medida que o número de Froude aumenta, o ganho de eficiência diminui (Figura 2.13).

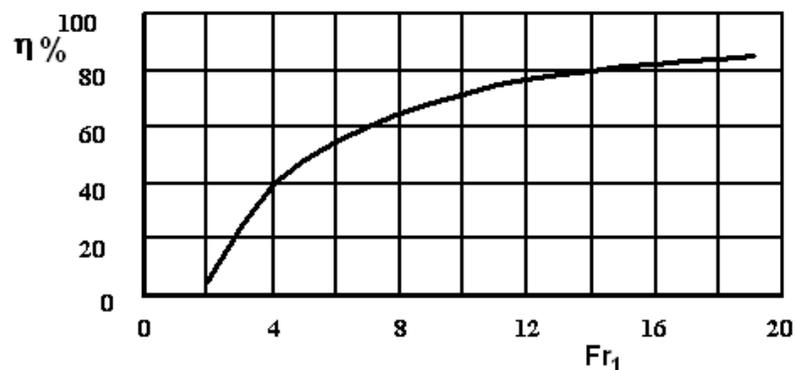


Figura 2.13 - Eficiência do ressalto hidráulico de acordo com o número de Froude.

Fonte: Peterka (1974).

Diversos pesquisadores determinaram equações que representassem a perda de energia no ressalto hidráulico formado em um canal horizontal a partir de equações que relacionassem as alturas conjugadas e o número de Froude. A

Tabela 2.4 apresenta alguns exemplos.

*Tabela 2.4 - Fórmulas sugeridas para perda de carga no ressalto formado em um canal horizontal.*

<b>Autor</b>	<b>Data</b>	<b>Equação</b>
Silvester	1964	$\frac{\Delta H}{E_1} = \frac{2 - 2 \cdot \frac{Y_2}{Y_1} + Fr_1 \left[ \left( \frac{Y_2}{Y_1} \right) - 1 \right]^2}{2 + Fr_1^2}$ <p><math>Y_1</math> e <math>Y_2</math> obtidos pela equação de Bélanger.</p>
Chow	1959	$\frac{\Delta H}{E_1} = \frac{8 \cdot Fr_1^4 + 20 \cdot Fr_1^2 - (8 \cdot Fr_1^2 + 1)^{0.5} - 1}{8 \cdot Fr_1^2 (2 + 2 \cdot Fr_1^2)}$
Elevatorski	1957	$\Delta H = \frac{12,5 \cdot \left( \sqrt{1 + 8 \cdot \lambda_1^2} - 3 \right)^3}{(2 + \lambda_1) \cdot \left( \sqrt{1 + 8 \cdot \lambda_1} - 1 \right)}, \text{ onde } \lambda_1 = Fr_1^2$

Fonte: Elevatorski (1959), Bhutto et al (1989) e Teixeira (2003).

Marques et al (1998), associando a distribuição longitudinal da flutuação de pressão junto ao fundo do canal à perda de energia, apresentaram um gráfico de dissipação de energia ao longo do ressalto formado a jusante de um vertedouro, para situação de ressalto livre. Esse tipo de informação é importante para o correto dimensionamento de bacias de dissipação por ressalto hidráulico. Marques et al (1998) efetuaram a integração da região inferior aos dados experimentais de flutuação de pressão (desvio padrão da amostra de pressão) considerando que a energia total perdida no ressalto hidráulico seria igual à área total calculada, e assim pode-se determinar a curva que representa a porcentagem da energia dissipada em um ressalto hidráulico livre (Figura 2.14). Os autores mostram que junto ao final do rolo,  $X/(Y_2 - Y_1) = 6$ , cerca de 95% do potencial total de dissipação de energia do ressalto hidráulico é atingido.

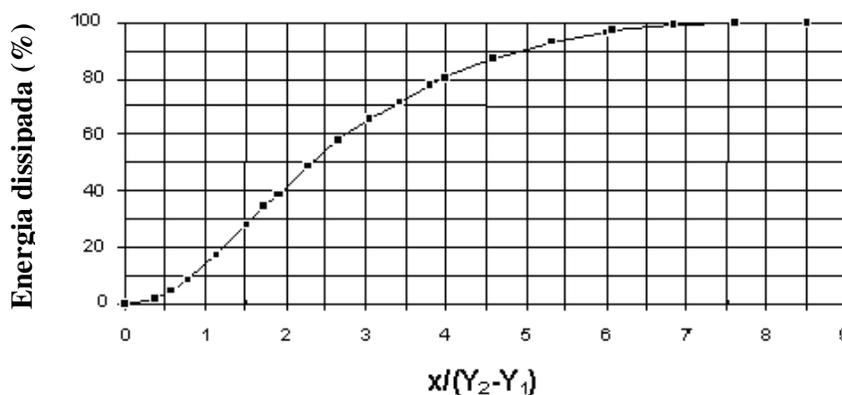


Figura 2.14- Porcentagem média de energia dissipada ao longo do ressalto conforme apresentado em Marques et al. (1998).

## 2.8 Flutuação de pressão

Bacias de dissipação por ressalto hidráulico são as formas mais comuns de dissipadores de energia em estruturas hidráulicas. A estrutura de dissipação de energia tem como objetivo 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 das pressões 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 e 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 sistemas de aquisição de dados em “tempo real”, a análise de dissipadores de energia era feita apenas de forma qualitativa, testes em fundo móvel, por exemplo, e através de valores médios de grandezas como pressão e velocidades. Atualmente, a análise de medidas “instantâneas” de pressão e/ou velocidades proporciona economia de tempo e maior confiabilidade aos projetos de estruturas de dissipação de energia.

O conhecimento das flutuações de pressão no ressalto hidráulico, mesmo em casos de laboratório, sendo em modelos reduzidos ou não, pode fornecer informações importantes para o projeto de estruturas reais bem como para a compreensão do processo de dissipação de energia.

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 a seguir apresenta a flutuação de pressão ( $\Delta P$ ) em função dos parâmetros acima mencionados.

$$\Delta P = F(t; x; y; z; H_t; V_1; Y_1; V_2; Y_2; L_j; \nu; \rho; g; T_w) \quad 2.21$$

onde:

$\Delta P$  = 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;

$\nu$  = coeficiente de viscosidade cinemático da água;

$\rho$  = massa específica da água e;

$T_w$  = altura da lâmina d' água imediatamente à 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 de continuidade para fluido incompressível e largura unitária do canal, dada por:

$$q = Y_1 V_1 = Y_2 V_2 \quad 2.22$$

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 da seguinte forma:

$$\Delta P = F\left(x, H_t, Y_1, Y_2, L_j, \nu, \rho, g\right) \quad 2.23$$

Através da análise dimensional, é possível apresentar a expressão sob outras formas, por exemplo:

$$\frac{\Delta P}{\gamma Y_2} = F\left(\frac{x}{L_j}, \frac{L_j}{H_t}, Fr_1, Re_1, \frac{Y_1}{Y_2}\right) \quad 2.24$$

onde:

$$Fr_1 = \frac{V_1}{\sqrt{gY_1}}$$

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

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

$$\Delta P = \left( \frac{1}{T_a} \sum_0^{T_a} (P_i - P_x)^2 \cdot dt \right)^{1/2} \quad 2.25$$

onde:

$T_a$  = tempo de aquisição dos dados.

Já as frequências associadas a medições de flutuação de pressão podem ser apresentadas como funções das seguintes variáveis:

$$f = F(x, V_1, Y_1, \nu, \rho, g) \quad 2.26$$

resultando, para ações viscosas desprezíveis, o número adimensional de Strouhal:

$$S_t = \frac{fV_1}{Y_1} = F(x/Y_1, Fr_1) \quad 2.27$$

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.

Abdul -Khader et al (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 apresentada a seguir:

$$C_p = \frac{\sigma_x}{\frac{V^2}{2g}} \quad 2.28$$

Onde  $\sigma_x$  representa o desvio padrão da amostra de pressões instantâneas.

Sendo que:

$$C_p = F\left(\frac{x}{Y_1}, Fr_1\right) \quad 2.29$$

Khader e 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 Bykreyev (1967) como pode ser visto na Figura 2.15. Verifica-se que o coeficiente de flutuação de pressão apresenta valores máximos próximos ao início do ressalto hidráulico.

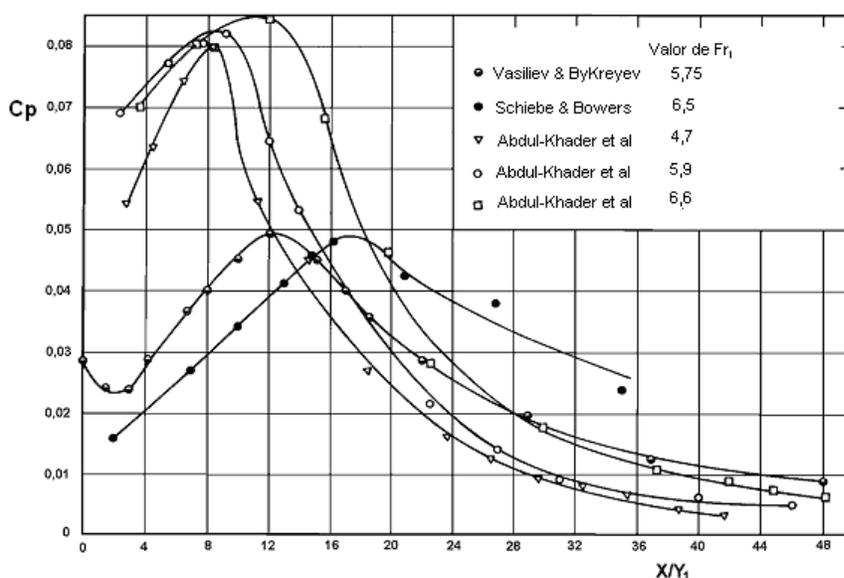


Figura 2.15- Flutuação de pressão adimensionalizada em relação à distância de início do ressalto ( $X$ ) e a altura conjugada na rápida ( $Y_1$ ) - Abdul-Khader et al (1974).

Lopardo e 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 (segundo expressão de Smetana). 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 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 2.16. Lopardo (1986) 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  $\geq 60$  s;
- d) frequência de aquisição entre 50 e 100 Hz e;
- e) comprimento máximo da mangueira entre a tomada de pressão e o sensor = 55 cm para condutos com diâmetros internos de até 5mm.

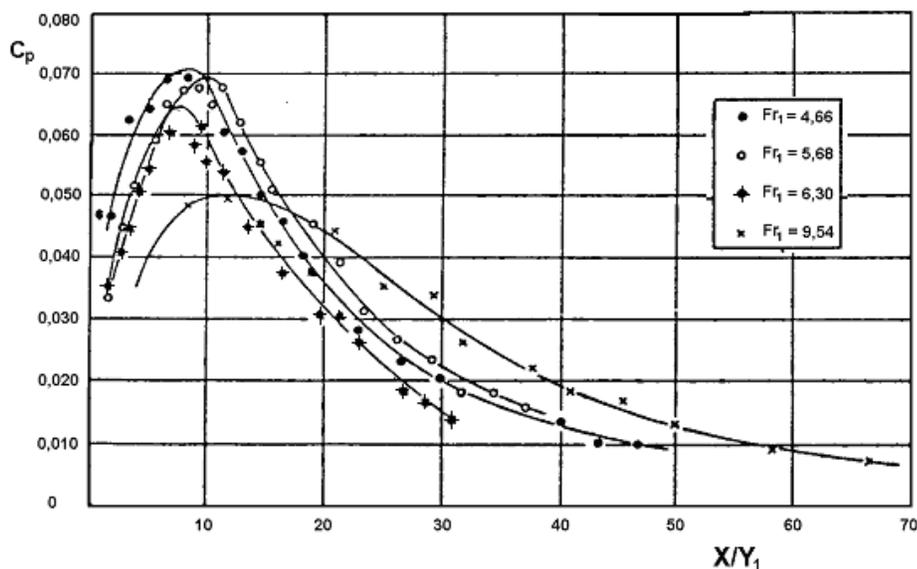


Figura 2.16 - Flutuação de pressão adimensionalizada em relação à distância de início do ressalto ( $X$ ) e a altura conjugada rápida ( $Y_1$ ) - Lopardo (1986).

Verifica-se na Figura 2.16 que o coeficiente de flutuação de pressão atinge seu valor máximo ( $C_p = 0,070$ ) para o 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 e Solari (1980) para ressaltos formados a jusante de um comporta de fundo.

Na publicação de Lopardo (1986) também são apresentadas 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 e Henning (1986) apud Lopardo (1986) estudaram a influência das condições de entrada do ressalto hidráulico. Desenvolveram um estudo com ressaltos formados a jusante de comporta e a jusante de 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 de comporta e para valores de números de Froude ( $Fr_1$ ) próximos a 6,5 no caso de ressaltos formados a jusante de 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 de comporta apresentou valores negativos de assimetria somente junto ao seu final, aproximadamente a 75% de seu comprimento, sendo que o ressalto a jusante de 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 de vertedouro com curva de concordância e a 75% do comprimento do ressalto formado a jusante de comporta. Este resultado parece confirmar que existe mudança da estrutura macroturbulenta do ressalto hidráulico junto às posições mencionadas

Toso e Bowers (1988) estudaram influência do ângulo da entrada do vertedouro ( $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  e  $45^\circ$ ) sobre a distribuição da flutuação de pressão do ressalto hidráulico para valores do número de Froude ( $Fr_1$ ) variando entre 2,94 e 10. Os autores analisaram a flutuação de pressão no ressalto hidráulico utilizando parâmetros estatísticos como a média, desvio padrão e coeficientes de assimetria e curtose. Os autores mostraram 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). Concluíram de a flutuação de pressão, bem como os valores extremos de pressão, sofrem influência do ângulo do paramento do vertedouro e do número de Froude do escoamento. Entre outros resultados dos estudos podemos 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 2.17) possuem a mesma tendência que os de Lopardo (1986), mostrando que as recomendações de Lopardo (1986) 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), mostrou que o conhecimento das condições de entrada é muito importante para comparar resultados entre autores diferentes.

Fiorotto e 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.

Pinheiro (1995) mediu as pressões no interior do ressalto hidráulico na soleira da bacia de dissipação com número de Froude variando de 6 a 10. Entre uma de suas conclusões podemos 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.

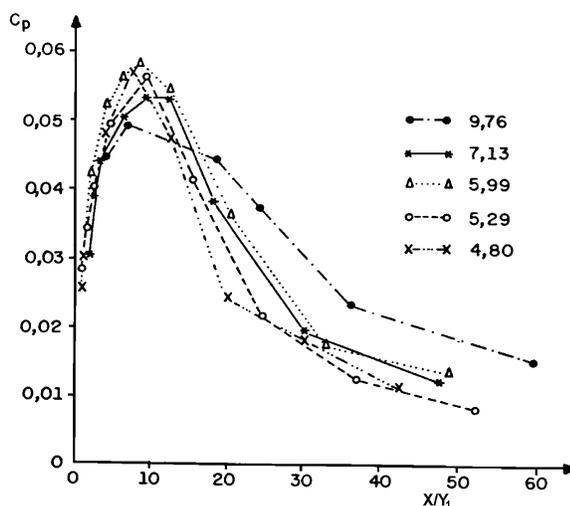


Figura 2.17- – Flutuação de pressão adimensionalizada em relação à distância de início do ressalto ( $X$ ) e a altura conjugada na entrada do ressalto hidráulico ( $Y_1$ ) - Endres (1990).

Marques et al (1997) sugerem novas relações adimensionais para representar a pressão média e a flutuação de pressão (Equação 2.30 e Equação 2.31). 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 situa-se 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  $X/(Y_2 - Y_1) \cong 8$ .

$$\frac{P_x - Y_l}{(Y_2 - Y_1)} = f\left(\frac{X}{Y_2 - Y_1}\right) \quad 2.30$$

$$\frac{\sigma_x \cdot Y_2}{H_t \cdot Y_1} = f\left(\frac{X}{Y_2 - Y_1}\right) \quad 2.31$$

onde:

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

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

O termo  $(\sigma_x / H_t)$  representa a contribuição localizada da perda de carga. O parâmetro  $(\sigma_x)$  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 no item sobre *Dissipação de Energia*.

Marques et al (1997) utilizando os dados de Endres (1990), de Marques (1995) e de Pinheiro (1995) apresentam em seu trabalho a distribuição longitudinal da Pressão Média ( $P_x$ ) e do Desvio Padrão ( $\sigma_x$ ) das flutuações de pressão para o ressalto hidráulico, em uma situação a jusante de vertedouro (Figura 2.18 e Figura 2.19).

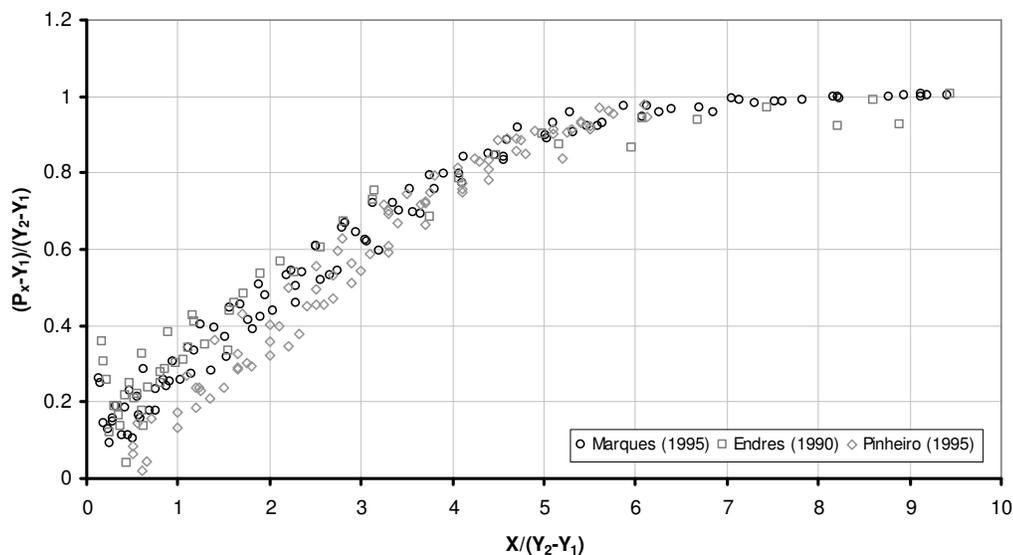


Figura 2.18 - Pressão média adimensionalizada a partir da posição relativa do início do ressalto hidráulico e das alturas conjugadas junto ao fundo de bacia de dissipação, Marques et al (1997).

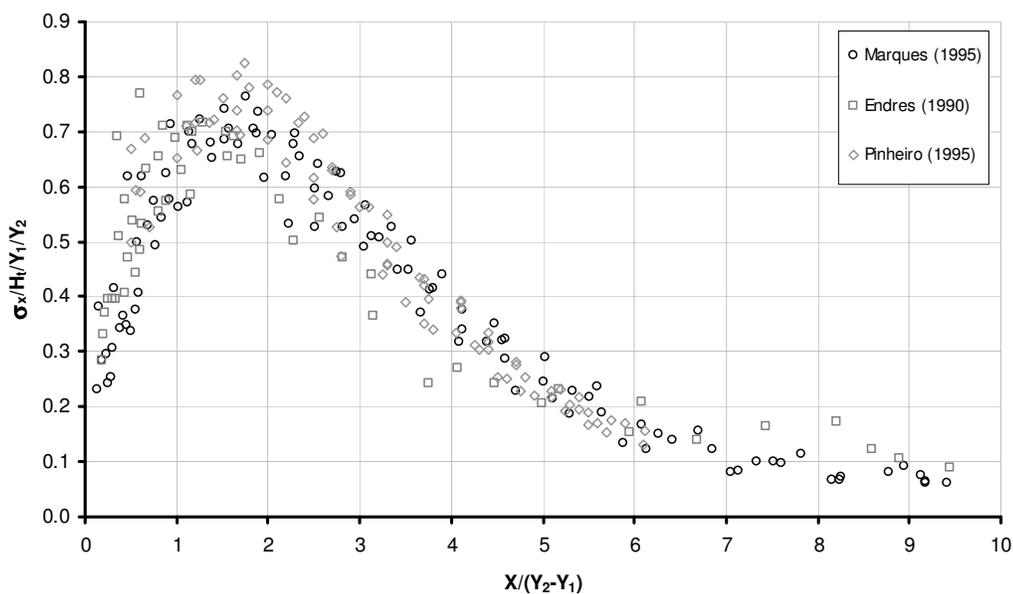


Figura 2.19 - Desvio Padrão adimensionalizado a partir da posição relativa do início do ressalto hidráulico e das alturas conjugadas junto ao fundo de bacia de dissipação, Marques et al (1997).

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 submergência de 10%, sendo que para o final do ressalto os valores máximos correspondem às submergências de 30% e 50%. Com relação ao número de Froude, para as submergências de 10% e 30% os valores máximos de  $C_p$  correspondem a  $Fr_1 = 7,97$  (menor número de Froude ensaiado). Já para a submergência 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 submergência do ressalto hidráulico é aumentada.

Marques et al (1999) sugerem a inclusão de um fator de submergência ( $S$ ) possibilitando a uniformização dos dados de pressões no fundo de bacias de dissipação, provenientes de protótipo ou de modelo, para ressalto livre ou submergido. O fator de submergência proposto por Marques et al (1999) é dado por:

$$S = \frac{T_w}{Y_2} \quad 2.32$$

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 e desvio padrão para o ressalto hidráulico livre a jusante de uma comporta utilizando os dados de Marques (1995), apresentados nas equações a seguir.

Ajuste para a pressão média:

$$\Psi = -0,015 \cdot \Gamma^2 + 0,237 \cdot \Gamma + 0,07 \quad 2.33$$

onde:

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

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

Ajuste para o desvio padrão:

$$\Omega = -0,159 \cdot \Gamma^2 + 0,573 \cdot \Gamma + 0,19 \quad (\text{Ajuste A}) \quad 2.34$$

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

$$\Omega = 0,017 \cdot \Gamma^2 - 0,281 \cdot \Gamma + 1,229 \quad (\text{Ajuste B}) \quad 2.35$$

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

onde:

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

A Figura 2.20 e a Figura 2.21 apresentam a distribuição longitudinal da pressão média e desvio padrão (Marques 1995) juntamente com os ajuste propostos.

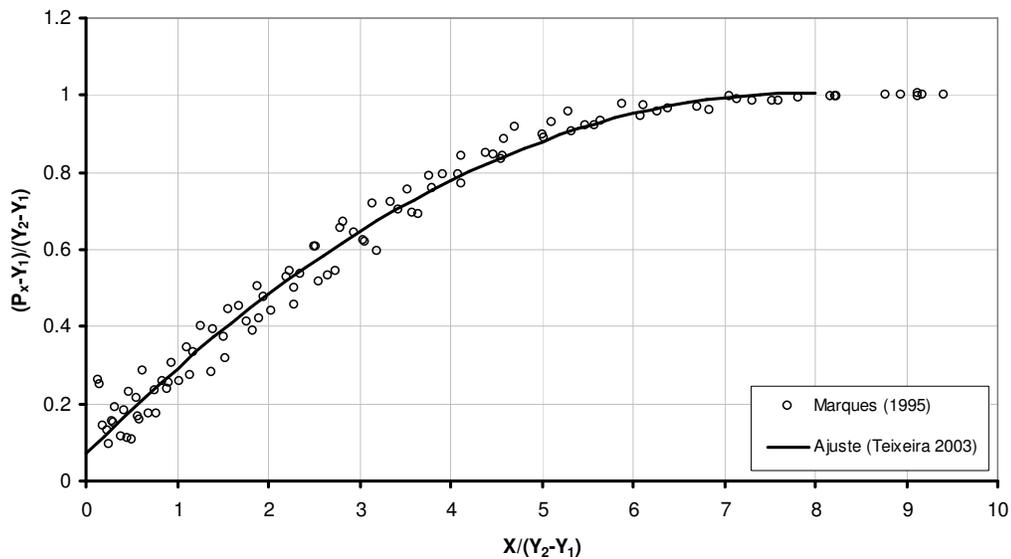


Figura 2.20 – Distribuição longitudinal da pressão média para os dados de Marques (1995) e ajuste proposto por Teixeira (2003).

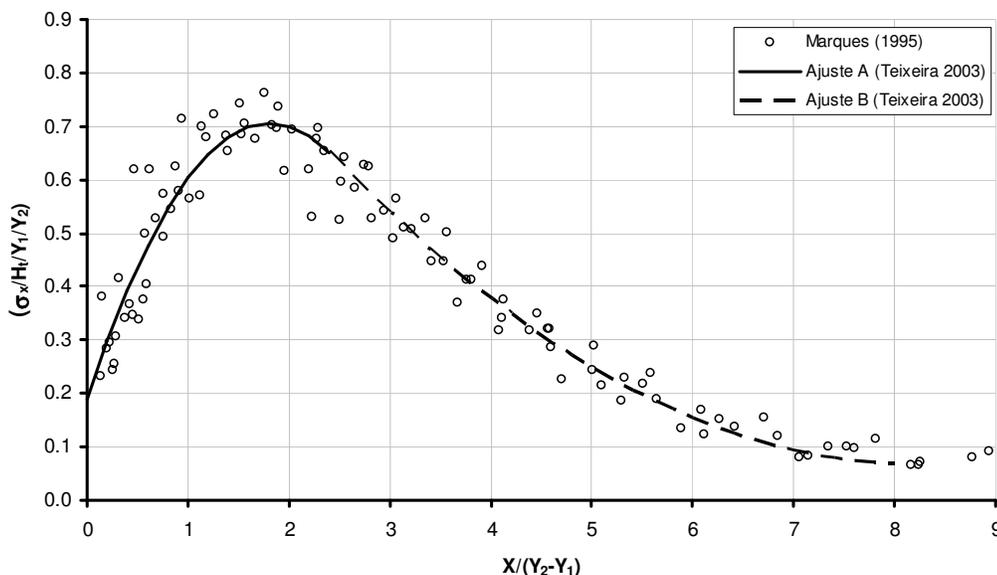


Figura 2.21 – Distribuição longitudinal do desvio padrão da amostra de pressão para os dados de Marques (1995) e ajustes proposto por Teixeira (2003).

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 ( $\sigma_x$ ) 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 expressão a seguir:

$$P_{\%} = P_x \pm N \cdot \sigma_x \quad 2.36$$

Marques et al (2004a) aplica 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 2.22 e Figura 2.23).

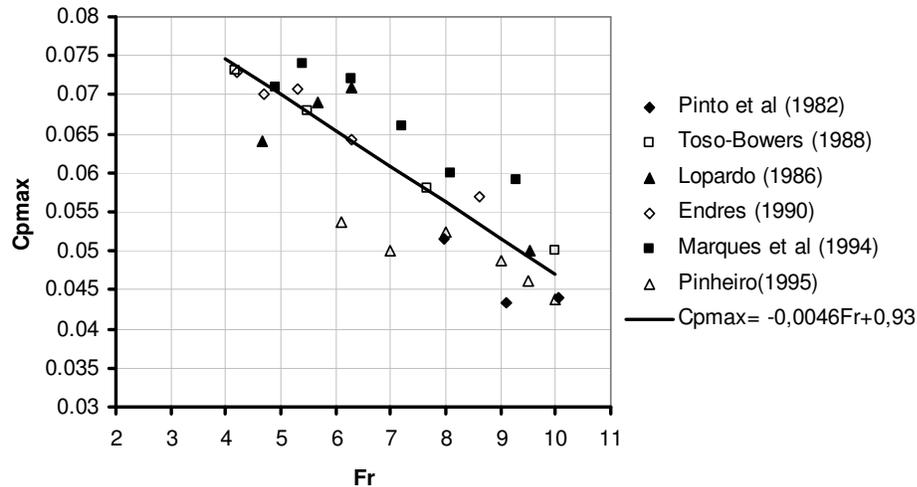


Figura 2.22 –  $C_p$  máx em função do número de Froude ( $Fr_1$ ), Marques et al (2004c).

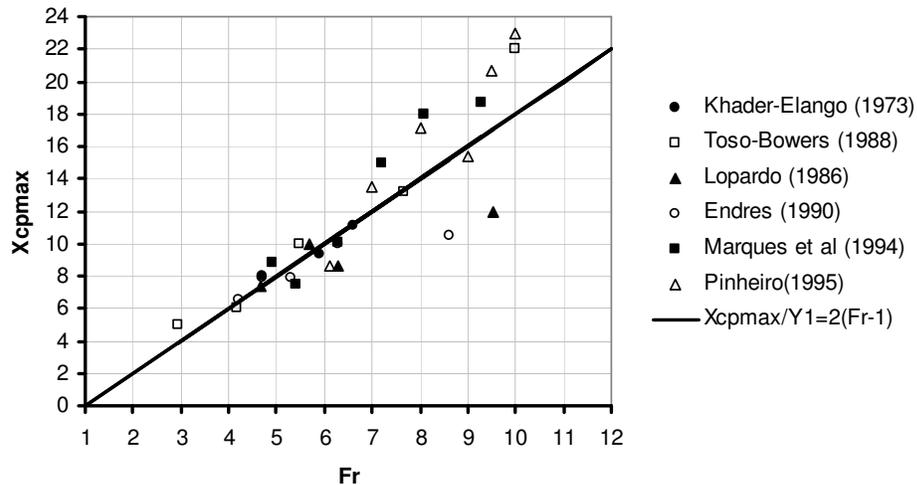


Figura 2.23 – Posição( $X/Y_1$ ) relativa ao  $C_p$  máx em função do número de Froude ( $Fr_1$ ), Marques et al (2004c).

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 submergência ( $S^*$ ) entre 0,1 e 1,1, ou seja, entre 1,1 e 2,1 para o fator de submergência 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 submergência ( $S^*$ ), a distribuição longitudinal do coeficiente de assimetria e as semi-amplitudes extremas de pressão,  $P < 0,1\%$  e  $P < 99,9\%$ . Os autores concluíram, mantendo-se o fator de submergência constante, que 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 número de Froude. Esse comportamento pode ser visto na Figura 2.24. 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 a  $X/Y_1 > 12$  (Figura 2.25). Os valores encontrados para o ressalto hidráulico livre apresentam uma diferença de 50% em relação à flutuação de pressão verificada para  $S^* = 1,1$ .

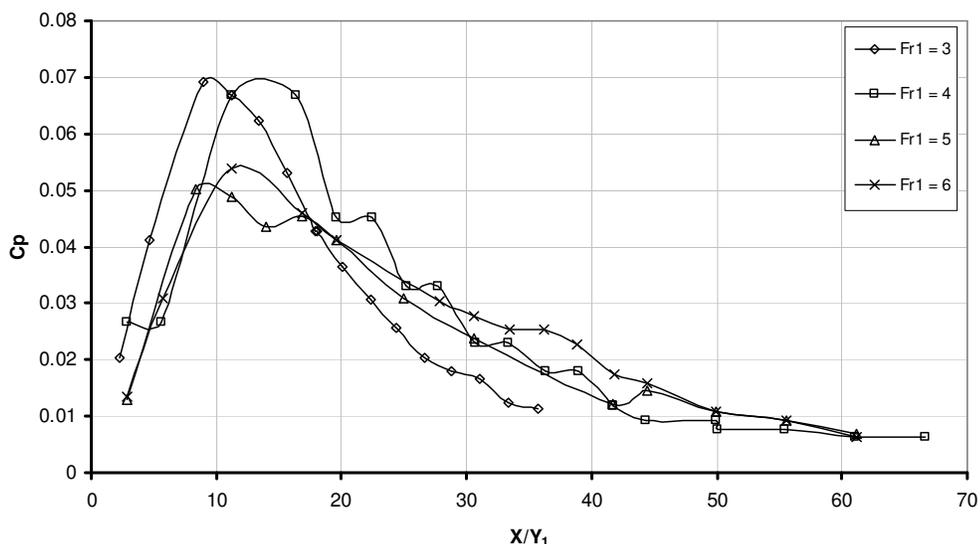


Figura 2.24 – Variação do coeficiente de flutuação de pressão ( $C_p$ ) em função do número de Froude para ressaltos hidráulicos submersos formados a jusante de uma comporta,  $S^* = 0,3$ , Lopardo et al (2004b).

A região de montante do ressalto mostrou-se difícil de caracterizar um comportamento, no entanto, os autores acreditam que os ressaltos submersos apresentam maior intensidade turbulenta que os ressaltos livres. Dados experimentais de Long et al (1990) demonstraram que os ressaltos submersos apresentam um campo de velocidades tridimensional, com formação de dois vórtices a jusante da comporta. Lopardo et al (2004b) afirma 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, o aumento da submersão tende a manter constante o valor do coeficiente de assimetria.

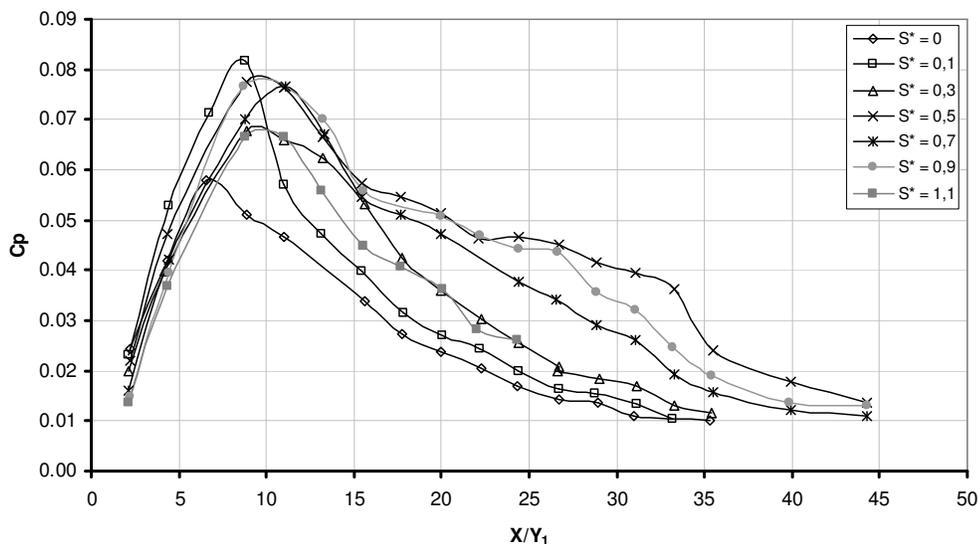


Figura 2.25 – Variação do coeficiente de flutuação de pressão ( $C_p$ ) em função do fator de submersão ( $S^*$ ) para ressaltos hidráulicos formados a jusante de uma comporta,  $Fr_1 = 3$ , Lopardo et al (2004b).

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

Wiest et al (2005) apresentam 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. Os autores verificaram que para o caso estudado o coeficiente ( $N$ ) apresenta a tendência de se manter constante ao longo de todo comprimento para ressaltos afogados, comportamento que não ocorre em ressaltos hidráulicos livres.

## **2.9 Outros estudos relacionados ao ressalto hidráulico**

### **2.9.1 Influência da utilização de condutos flexíveis em medições de pressão em ressalto hidráulico**

Freqüentemente não é possível a instalação de transdutores de pressão junto ao contorno sólido das estruturas investigadas, sendo assim, se faz necessária à utilização de condutos unindo-os à tomada de pressão.

Existem dúvidas em relação à influência da utilização de condutos entre as tomadas de pressão e os aparelhos de medição, principalmente no que se refere aos materiais utilizados, diâmetro e o comprimento total do conduto. Comprimentos exagerados dos condutos utilizados entre as tomadas de pressão e os transdutores podem ter efeitos “amortecedores” ou “amplificadores” sobre os valores reais das grandezas referentes à flutuação de pressão. Akbari (1982), por exemplo, comenta que os valores de flutuação de pressão começam a ser afetados de forma significativa para comprimentos de mangueiras próximos a 1,0 m. O autor adotou em seu estudo um comprimento de mangueira da ordem de 0,50 m. Lopardo (1986) estudou a influência do comprimento, diâmetro e materiais utilizados na conexão entre a tomada de pressão e os sensores. Através da análise do espectro de energia, das frequências características do fenômeno e dos valores extremos relacionados a uma probabilidade de ocorrência, propôs que sejam utilizados condutos com comprimentos inferiores a 0,55 m para condutos com diâmetro interno de até 5 mm. Segundo Lopardo (1986), os resultados experimentais demonstraram que, para pressões máximas inferiores a um metro de coluna d'água, os condutos plásticos com 5 mm de diâmetro interno e 7 mm de diâmetro externo apresentam resposta idêntica às conexões com condutos absolutamente rígidos. Entretanto, o próprio autor concorda que há necessidade de maior verificação dessas afirmações. Trierweiler et al (2005b) estudaram a influência de condutos flexíveis em medições de pressão em ressalto hidráulico, verificando a influência sobre o espectro de energia devido ao comprimento e ao diâmetro dos condutos utilizados.

### **2.9.2 Escoamento bifásico e aeração do ressalto hidráulico**

O ressalto hidráulico é um fenômeno caracterizado por escoamento bifásico, altamente aerado (Figura 2.26). Pode-se notar que o ar é absorvido em parte devido à quebra de ondas na superfície do ressalto. Com isso há formação de bolhas que, puxadas para as regiões do fundo, voltam à superfície devido às forças de empuxo e convecção forçada. Esta primeira descrição do escoamento bifásico foi apresentada por Schröder (1963) apud Hager (1992).

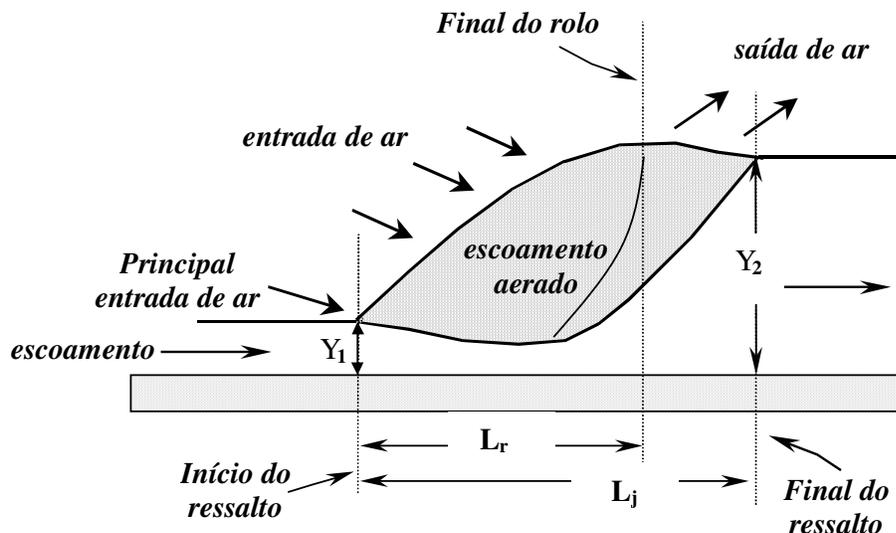


Figura 2.26 - Esquema da entrada e saída de ar em um ressalto hidráulico

( Fonte: Gomes, 2000).

Rajaratnam (1962) apud Rajaratnam (1967) observou que a concentração de ar, dada como a relação entre o volume de ar e o volume da mistura ar-água, diminui em direção ao fundo do canal e na direção do final do ressalto. O autor verificou que o comprimento característico de aeração no ressalto hidráulico ( $L_a$ ), onde a concentração média de ar se reduz praticamente a zero, é geralmente maior que o comprimento do rolo ( $L_r$ ).

Em complemento às suas observações Rajaratnam (1962), apresentou uma relação entre a vazão de ar e a vazão de água, denominando-a como capacidade de bombeamento de ar ( $\beta$ ), sendo  $\beta_m$  o seu máximo valor, dado pela Equação 2.37.

$$\beta_m = 0,018(Fr_1 - 1)^{1,245} \quad 2.37$$

Cabe salientar que o estudo da aeração do ressalto hidráulico deve contemplar as diferenças entre as condições de escoamento totalmente desenvolvido e escoamento parcialmente desenvolvido. Considera-se escoamento desenvolvido quando a camada limite apresenta-se totalmente desenvolvida, já escoamentos parcialmente desenvolvidos apresentam, segundo Leutheusser e Kartha (1972) apud Hager (1992) no caso o ressalto hidráulico, uma distância entre o seu início e a comporta menor que 200 vezes a abertura da mesma. Verifica-se que, para as duas situações, diferenças no diâmetro das bolhas. Resch e Leutheusser (1974) apud Hager (1992) concluíram que ressaltos com condições de

escoamentos totalmente desenvolvidas possuem maior capacidade de reter ar que os com condições de escoamento parcialmente desenvolvidas.

McCorquodale e Khalifa (1983) apresentam expressões que descrevem a quantidade média de ar ao longo do ressalto hidráulico e afirmam que as dimensões das bolhas de ar presentes em um ressalto hidráulico não seguem a similaridade de Froude.

Chanson (1995a, 1995b) estudou a entrada de ar em condições de escoamento parcialmente desenvolvido e concluiu que a concentração de ar exibe uma distribuição Gaussiana e com a máxima concentração de ar apresentando um decaimento exponencial. Chanson (1995a) utilizou, além de uma sonda detectora de bolhas, uma câmera de alta velocidade para investigar a estrutura do escoamento bifásico.

Marques et al. (1997) mostraram que o ressalto hidráulico apresenta uma zona de bolhas após o rolo, liberadas pelo mesmo, as quais exercem influência no campo de pressões nas soleiras de bacias de dissipação.

Mossa e Tolve (1998) desenvolveram uma técnica de visualização de escoamentos que permite examinar as estruturas do escoamento e estimar a aeração do ressalto hidráulico. Mossa e Tolve (1998), analisando a dinâmica do rolo, determinaram que a região de maior concentração de ar no ressalto situa-se entre 20 e 30 % do comprimento do ressalto.

Chanson e Brattberg (2000) estudaram a concentração de ar, a velocidade média do escoamento ar-água e frequência de passagem das bolhas de ar no interior do ressalto hidráulico em condições de escoamento parcialmente desenvolvido e apresentam os perfis longitudinais desses parâmetros.

Waniewski et al (2001) utilizaram um anemômetro de efeito Doppler para medir os perfis de velocidade e a distribuição de tamanhos de bolhas de ar à jusante de um ressalto hidráulico. Os autores verificaram que o deslocamento (migração) das bolhas de ar é controlado por efeitos de empuxo e pela turbulência. A magnitude relativa desses efeitos sobre a distribuição das bolhas de ar depende fortemente do tamanho da bolha e da energia do escoamento a montante. Os efeitos devido à turbulência são preponderantes em bolhas menores, já as forças de empuxo são relativamente mais expressivas sobre o movimento das bolhas de tamanho maior.

Marques et al (2004b), através do conhecimento do comportamento médio da superfície livre e das pressões médias junto ao fundo, propõem uma metodologia para estimar a região de separação entre o escoamento aerado e o escoamento não aerado no interior do ressalto hidráulico.

### 2.9.3 Visualização do ressalto hidráulico

As técnicas de visualização permitem analisar diversas características do ressalto hidráulico de uma maneira não intrusiva, evitando assim a perturbação do escoamento causada por dispositivos usuais de mensuração.

Long et al (1991) estudaram o ressalto hidráulico à jusante de uma comporta com a utilização de uma câmera de alta velocidade (2000 quadros por segundo). Analisando imagens de ressaltos hidráulicos com números de Froude entre 4 e 9, os autores concluíram que a superfície da região do rolo é constituída por diversos vórtices, cujo tamanho cresce em direção a jusante. Utilizando baixas velocidades de captura de imagens Long et al (1991) puderam caracterizar as macro-estruturas do ressalto, concluindo que as dimensões verticais dos turbilhões aproximam-se da altura no perfil médio da linha d'água.

Hornung et al (1995) apud Gomes (2000) desenvolveram uma metodologia de visualização do escoamento sob o aspecto da geração e análise da vorticidade. Os pesquisadores utilizaram um DPIV (*Digital Particle Imaging Velocimeter*), fazendo uso de traçadores que auxiliavam na determinação dos campos de velocidade. A metodologia apresentava limitações devido à dificuldade da determinação das velocidades no escoamento bifásico na região do rolo principalmente.

Mossa e Tolve (1998) apresentam uma metodologia de análise da concentração de ar no ressalto hidráulico a jusante de comporta através do processamento de imagens, com ensaios de ressaltos hidráulicos na faixa de números de Froude entre 6 e 8. Através das imagens obtidas, os pesquisadores estabeleceram a evolução da concentração de ar no interior do ressalto.

Gomes (2000) propôs uma metodologia de visualização do ressalto hidráulico, baseado nos estudos de Brown e Rishko (1971) e Hoyt e Sellin (1989), supondo o ressalto como uma camada de mistura com estruturas coerentes e relação entre a densidade do ar e da água conhecida. O autor utilizou uma câmera marca Panasonic VHS, que grava imagens em uma taxa de aquisição de 30 quadros por segundo. Após digitalização e análise das imagens geradas, o pesquisador relata a possibilidade de verificação de grandezas como o comprimento do rolo e do ressalto, o perfil do rolo e do ressalto, assim como sua variação, a dimensão das ondas que se propagam para jusante, a dimensão e a trajetória dos turbilhões e ainda o mecanismo de entrada de ar e o acoplamento e crescimento dos turbilhões.

### 2.9.4 Medição e perfil de velocidades

A primeira medição de velocidades no ressalto hidráulico foi efetuada por Bakhmeteff e Matzke (1936). Entretanto, somente a partir dos estudos de Rouse et al. (1959) e Schröder (1963) apud Hager (1992), e Rajaratnam (1965b) foi possível analisar o perfil de velocidades do ressalto hidráulico.

Rouse et al. (1959) realizaram medidas de velocidade no interior do ressalto em um túnel de ar utilizando um anemômetro a filme quente. O túnel de ar foi construído com uma forma geométrica que simulava o perfil de linha de água, originando assim as mesmas macrocaracterísticas do ressalto. Os autores observaram que a flutuação dos valores medidos de velocidade em regime turbulento é pequena no início do ressalto, aumentando até a posição entre  $1 \leq X/Y_2 \leq 2$ , voltando a diminuir até o final do ressalto.

Rajaratnam (1965b) realizou uma intensa investigação da distribuição da velocidade média em ressalto hidráulico formado a jusante de uma comporta plana. O autor avaliou ressaltos com números de Froude de 2,68 a 9,78. As medições de velocidades foram feitas utilizando-se um tubo de Pitot, sendo que estas medições foram efetuadas na região de escoamento não aerado (*region of forward flow*). O estudo concluiu que o ressalto hidráulico pode ser comparado a um jato de parede (*wall jet*).

Long et al (1990) mediram velocidades em ressalto hidráulico submergido a jusante de comporta utilizando anemometria a laser (*Laser Doppler Anemometri – LDA*) e concluíram que o ressalto hidráulico submergido apresenta um campo de velocidades fortemente tridimensional. Verificaram que a velocidade máxima do perfil horizontal de velocidades apresenta valores 30% a 50% inferiores aos verificados junto às paredes. Esse comportamento pode ser atribuído à existência de um par de vórtices de eixo vertical, formados a jusante da comporta, que geram fluxo no sentido contrário ao do escoamento principal junto ao eixo longitudinal do canal. Os autores verificaram diminuição de descarga junto ao centro do canal.

No estudo de Wu e Rajaratnam (1994) o ressalto hidráulico e o jato de parede são apresentados como situações limites, e onde o ressalto afogado caracteriza uma transição entre as duas situações.

Chanson e Brattberg (2000) mediram a distribuição de velocidades no ressalto hidráulico utilizando um tubo de Pitot na região não aerada do escoamento e utilizaram uma sonda condutiva de ponta dupla (*dual-tip conductive probe*) na região aerada. Os autores verificaram grande dispersão e baixa correlação nos dados medidos na região aerada devido à grande instabilidade na região do rolo.

Mossa (1999) verificou que a variação da componente vertical da velocidade a jusante do rolo em um ressalto livre apresenta o mesmo pico no espectro de frequência que o espectro das oscilações da superfície livre. Segundo Mossa (1999), o processo de geração de vórtices apresenta relação direta com a flutuação da posição longitudinal do ressalto.

### 3 INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL E METODOLOGIA

#### 3.1 Instalação experimental

O estudo experimental desenvolveu-se em um canal de suspenso com paredes de vidro possuindo 0,45 m de largura e 0,55 m de profundidade. O canal possui aproximadamente 4 m de comprimento e fundo horizontal. Os ressaltos hidráulicos foram formados a jusante de uma comporta plana de acrílico com abertura vertical e escoamento pela parte inferior (Figura 3.1). A comporta possui 10 mm de espessura e ponta terminal em aresta viva retangular. O canal, imediatamente a jusante da comporta, possui fundo em acrílico, possibilitando a instalação de tomadas de pressão. Foram instalados transdutores de pressão ao longo do eixo longitudinal central do canal, conforme descrito no Item 3.2.2 *Medições de pressão*.

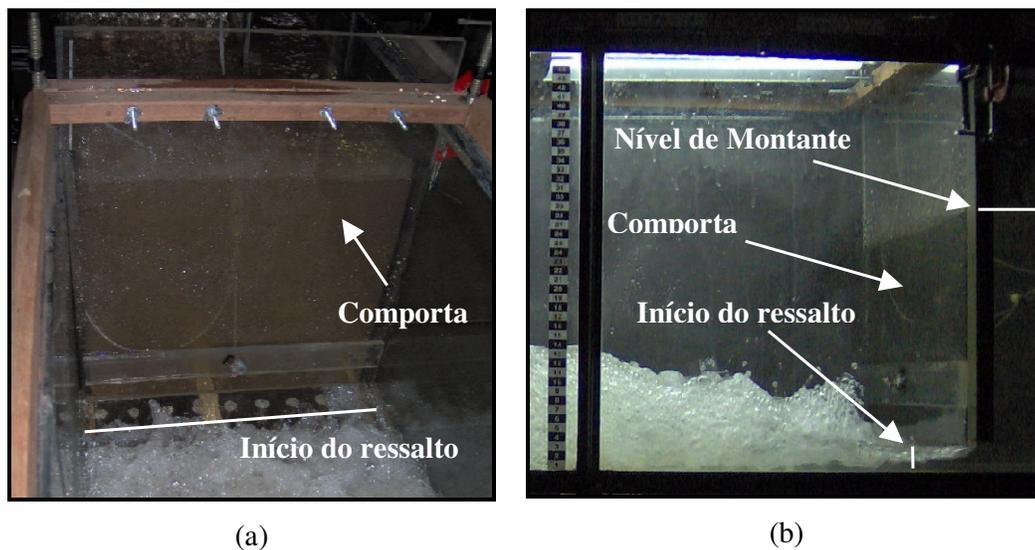


Figura 3.1 - (a) Vista frontal da comporta e (b) vista lateral da comporta.

O sistema de alimentação do canal era composto por dois reservatórios metálicos de com volume de, aproximadamente, 8 m<sup>3</sup>, de onde a água era recalçada através de um conjunto moto-bomba de 25 cv através de tubulações de PVC. A Figura 3.2 apresenta um esquema em planta do canal de ensaios e do sistema alimentador.

A medição de vazão foi feita através de medidores eletromagnéticos de vazão instalados na tubulação de recalque (Figura 3.3 a). Os medidores de vazão possuem erro de 0,23% do fundo de escala.

O conjunto motor bomba era controlado através de um inversor de frequência, onde se pode especificar a rotação do motor de acordo com a vazão necessária (Figura 3.3 b).

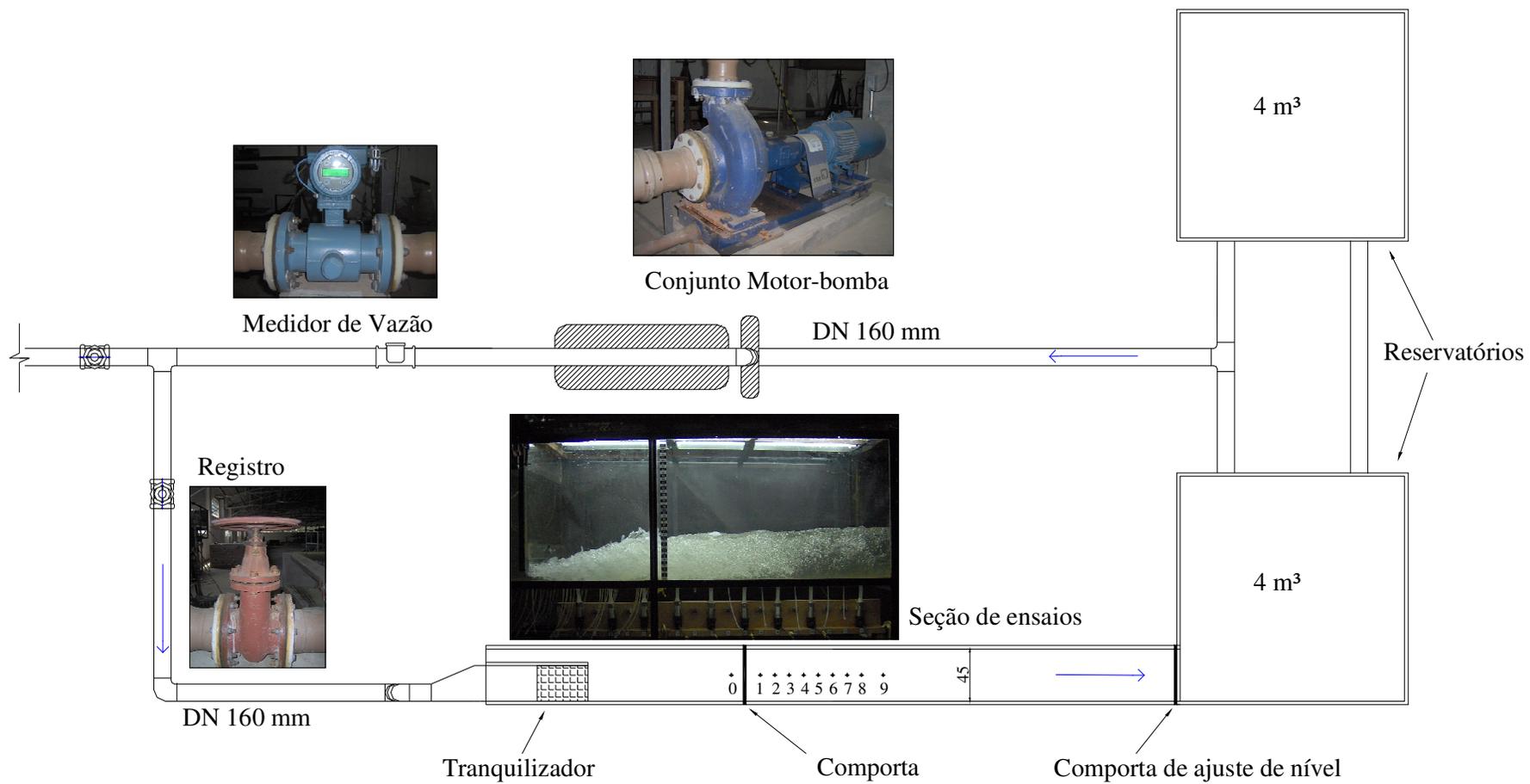


Figura 3.2 – Representação esquemática do canal de ensaios e do sistema de alimentação.

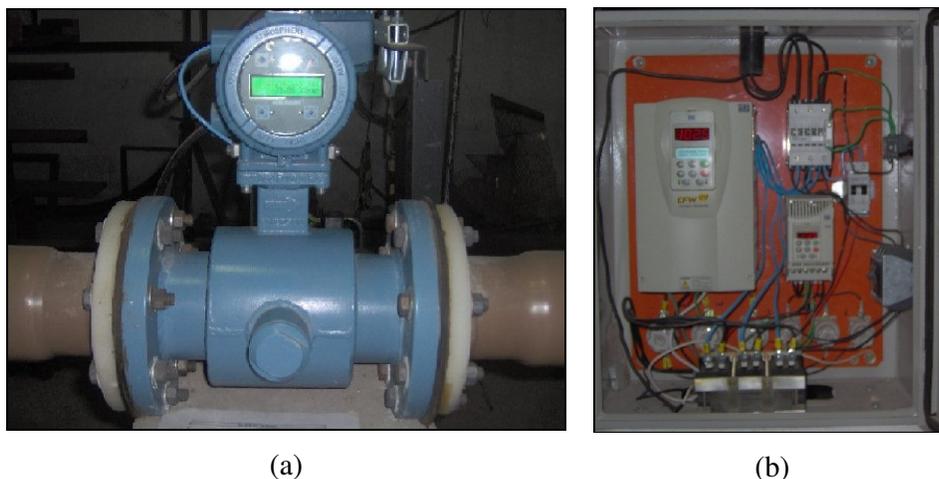


Figura 3.3 – (a) Medidor eletromagnético de vazão e (b) inversor de frequência.

A estrada dá água no canal era feita de forma assimétrica, entretanto não se observou assimetria no escoamento a montante da comporta e nem junto a posição de início do ressalto, como pode ser verificado na Figura 3.1 (a), desta forma considerou-se que a alimentação do canal não produziria a formação de um ressalto com escoamento assimétrico a jusante da comporta.

A jusante do canal havia uma comporta plana do tipo gaveta com altura regulável para ajuste de níveis. Após o final do canal, o escoamento retornava aos reservatórios.

## 3.2 Metodologia experimental

### 3.2.1 Aspectos gerais

O presente trabalho tem como objetivo a análise das características do campo de pressões do ressalto hidráulico a jusante de uma comporta para diversos graus de submersão. Para a caracterização do escoamento se faz necessário a mensuração de grandezas inerentes ao fenômeno, no caso, pressões e níveis.

No que diz respeito aos ensaios realizados, esta pesquisa foi dividida em duas etapas. A primeira etapa constituiu no estudo da influência da utilização de condutos flexíveis em medições de pressão em ressalto hidráulico e a segunda etapa trata da avaliação da submersão sobre o campo de pressões em um ressalto hidráulico formado a jusante de uma comporta. A primeira etapa tem como objetivo principal fornecer subsídios para as análises efetuadas na segunda etapa desse trabalho.

### 3.2.2 Medições de pressão

#### 3.2.2.1 Considerações gerais

Os transdutores de pressão utilizados são da marca Hytronic, modelo TM25, com faixa de trabalho de 2 psi (1,40 m.c.a) e com erro na medida de 3,5 mm de coluna de água (0,25% do fundo de escala). Foram utilizados 5 transdutores com faixa entre -1,0 a 1,0 psi (-0,70 m.c.a a 0,70 m.c.a) nas tomadas de pressão 1 a 4 e na posição 9, e 5 transdutores de -0,5 a 1,5 psi (-0,35 m.c.a a 0,70 m.c.a) nas tomadas 0 e 5 a 8. A Figura 3.4 e a Figura 3.5 apresentam o posicionamento dos transdutores ao longo do canal. A primeira tomada foi posicionada a 12,5 cm da comporta, essa distância foi mantida constante entre tomadas consecutivas, exceto entre as duas últimas tomadas de pressão, onde a distância era de 18,75 cm. Os transdutores foram instalados o mais próximo possível ao contorno do fundo do canal ao longo do eixo longitudinal, utilizando-se um conduto flexível de nylon entre a tomada de pressão e o sensor, com diâmetro interno de 2 mm e comprimento de 2 cm. A Tabela 3.1 apresenta as posições das tomadas de pressão, o código do transdutor utilizado e a sua faixa de utilização. O transdutor localizado na posição zero foi utilizado para medir a carga hidráulica a montante da comporta.

Todos os transdutores foram submetidos a um processo de calibração estática, relacionando medições de tensão a medições de pressão em coluna d'água ( $P/\gamma$ ).

*Tabela 3.1 – Relação e posicionamento dos transdutores de pressão utilizados.*

<b>Posição</b>	<b>Código do Transdutor</b>	<b>Distância da comporta (cm)</b>	<b>Faixa de Utilização (m.c.a.)</b>
0	T0	-12,50	-0,35 a 1,05
1	T1	12,50	-0,70 a 0,70
2	T2	25,00	-0,70 a 0,70
3	T4	37,50	-0,70 a 0,70
4	T5	50,00	-0,70 a 0,70
5	T6	62,50	-0,35 a 1,05
6	T7	75,00	-0,35 a 1,05
7	T8	87,50	-0,35 a 1,05
8	T10	100,00	-0,35 a 1,05
9	T12	118,75	-0,70 a 0,70

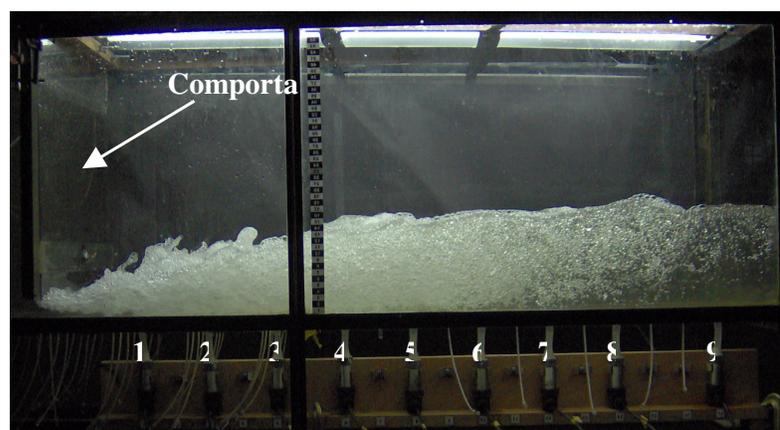


Figura 3.4 – Posicionamento das tomadas de pressão junto ao fundo do canal (vista lateral).

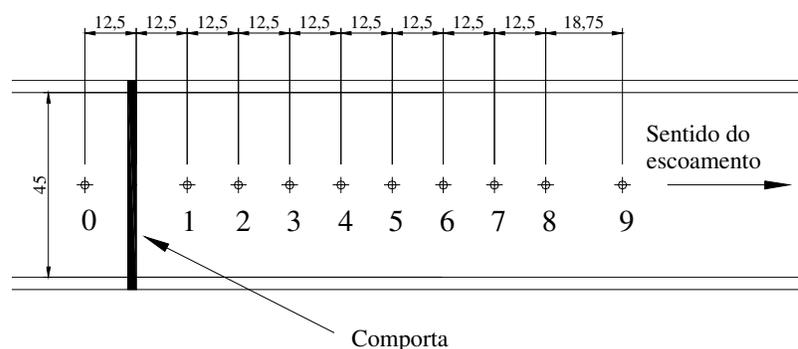


Figura 3.5 – Posicionamento esquemático das tomadas de pressão junto ao fundo do canal (planta).

A placa de aquisição de dados utilizada é da marca LYNX, modelo CAD12/32, possui uma resolução de 12 bits e 32 canais de entrada, ligada a um micro computador. Utilizou-se uma frequência de aquisição de dados de 100 Hz com duração das amostras de 15 minutos. Todo o sistema de aquisição foi alimentado com baterias a fim de evitar interferências causadas pela rede elétrica

### 3.2.3 Medições de nível

As medições de nível foram efetuadas a partir de uma ponta linimétrica instalada em um “carrinho” móvel posicionado sobre o canal. As medições de nível foram efetuadas na posição de início do ressalto (medição da altura conjugada rápida  $Y_1$ ), sobre todas as tomadas de pressão e em outras posições julgadas necessárias em cada ensaio para um melhor detalhamento da superfície livre. (Figura 3.6). O objetivo da medição de níveis é avaliar o comportamento médio da superfície livre do ressalto hidráulico e permitir a determinação do

grau de submersão nos diversos ensaios. A jusante do ressalto hidráulico foi instalada uma ponta linimétrica fixa que auxiliava no controle de níveis.

É muito difícil determinar o perfil médio da superfície livre do ressalto devido à grande agitação do escoamento. Diante dessa dificuldade foi instalado junto à ponta linimétrica um dispositivo composto por uma bateria e uma pequena lâmpada. Um dos pólos da bateria era colocado em contato com a água e o outro ligado à ponta linimétrica, o contato da ponta linimétrica com a superfície da água fechava o circuito elétrico, fazendo com que a lâmpada acendesse. Sempre se procurou manter os mesmos critérios de medição, determinado como a situação onde a lâmpada permanecesse acesa 50% do tempo. A Figura 3.7 apresenta os dispositivos de medição e controle de níveis.

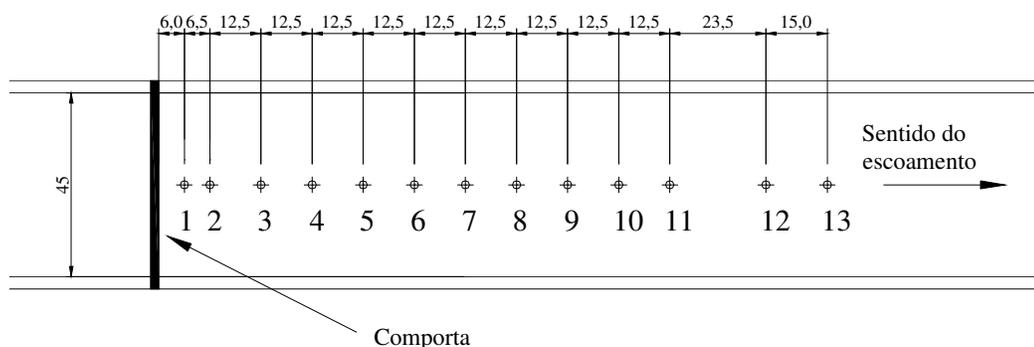
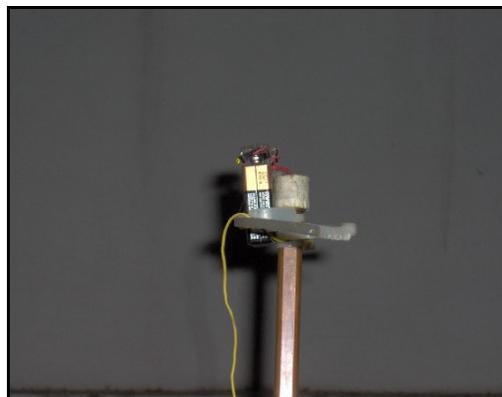


Figura 3.6 – Posições de medições de nível por ponta linimétrica (planta baixa).



(a)



(b)

Figura 3.7 – (a) Dispositivos de medição e controle de níveis e (b) sistema luminoso de apoio para a medição de níveis.

### 3.2.4 *Visualização do escoamento*

Apesar da visualização de escoamento não se tratar de um dos objetivos deste trabalho, procurou-se registrar através de vídeo e fotografias os ensaios realizados. O objetivo da visualização do escoamento é permitir a determinação de diversas características sem a necessidade de dispositivos de medição intrusivos. No caso em questão, foram utilizadas fotografias para avaliar a evolução do comportamento do escoamento à medida que se modificavam as condições de submergência, auxiliando a interpretação das medições de pressão média e linha d'água.

As imagens adquiridas através da câmera de vídeo e/ou fotografia têm o intuito de criar um banco de imagens para estudos futuros.

Neste estudo, foram utilizadas uma câmera fotográfica digital HP Photosmart M407 com resolução de 4,1MP e uma câmera de vídeo SONY modelo DCR-TRV 330.

Foram testadas algumas configurações de iluminação, mostrando-se mais adequada a iluminação superior, conforme verificado por Gomes (2000). Foram utilizados dois pares de lâmpadas fluorescentes de 40W posicionadas sobre o canal.



*Figura 3.8 – Proposta de iluminação do canal, Gomes (2000).*

### 3.2.5 *Avaliação da influência da utilização de condutos flexíveis em medições de flutuação de pressão em ressalto hidráulico.*

Para avaliar a efeito da utilização de condutos flexíveis em medições de pressão em ressalto hidráulico foi investigada a influência de diferentes materiais, diâmetros e comprimentos de conduto. Os comprimentos analisados foram de 2, 5, 10, 25, 50, 100, 150 e 200 cm. Os condutos estudados são produzidos em nylon e PVC (comercialmente conhecido com mangueira cristal ou PVC-Cristal). Os condutos estudados possuem diâmetro interno de 2 mm para o conduto de nylon e 4,8 mm (3/16”), 6,4 mm (1/4”) e 7,9 mm (5/16”) para os condutos de PVC. Os condutos de PVC com diâmetro interno de 4,8 e 7,9 mm possuíam

paredes de 1,5 mm, já para os condutos com diâmetro de 6,4 mm foram estudadas três espessuras de parede (e): 1,0 mm, 1,5 mm e 2,0 mm. A Tabela 3.2 apresenta algumas especificações técnicas dos condutos de PVC. Infelizmente não se conseguiu tais informações junto aos fabricantes dos condutos de nylon.

*Tabela 3.2 – Especificações técnicas de condutos de PVC (PVC-Cristal).*

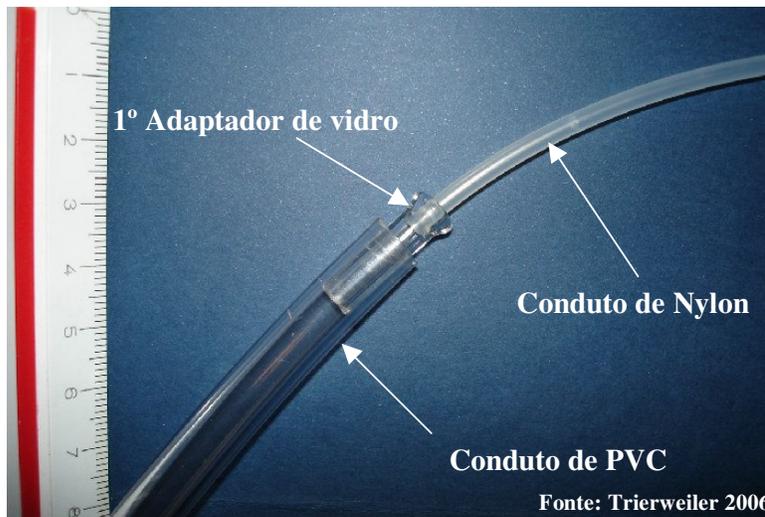
<b>Propriedades</b>	<b>PVC Cristal</b>	<b>Método de Teste</b>
Dureza (Shore A15s)	85,00 ± 2	ASTM D 2240
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	1,27 ± 0,02	ASTM D 792
Tensão de Ruptura (kgf/mm <sup>2</sup> )	1,50 (mínimo)	ASTM D 638
Alongamento (%)	250,00 (mínimo)	ASTM D 638

(Fonte: Representantes Tigre, 2005)

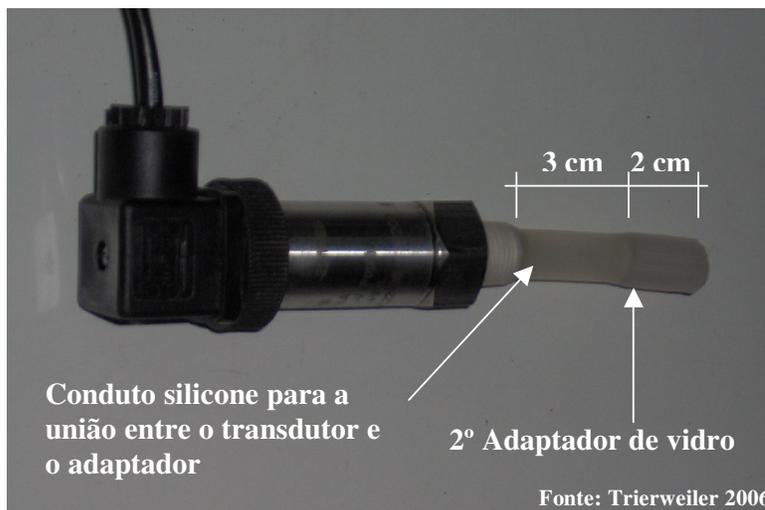
Para avaliar essa influência foram escolhidas 3 tomadas de pressão longitudinalmente ao ressalto hidráulico. Posteriormente, visando um melhor detalhamento, foram feitas medições em 4 tomadas (posições 1 a 4 representadas na Figura 3.4 e Figura 3.5). As tomadas de pressão junto ao fundo possuem 2 mm de diâmetro e foram posicionadas no eixo central longitudinal do canal de forma a abranger as posições de maior flutuação de pressão (desvio padrão) no ressalto hidráulico que, segundo Marques et al (1997), situam-se em torno da posição adimensionalizada  $X/(Y_2 - Y_1) = 1,75$ .

Devido à diferença de diâmetro entre o conduto de PVC e a tomada de pressão, confeccionada com um tubo de nylon, foi necessária a utilização de um adaptador de vidro que permitisse sua união (Figura 3.9). Este adaptador foi mantido com um comprimento de 2 cm, padrão para todos os ensaios efetuados. Possuía diâmetro interno que permitia a união à tomada de pressão (3,6 mm) e dimensões externas compatíveis com os diferentes diâmetros internos dos condutos de PVC. Em medições com condutos de nylon um segundo adaptador se fazia necessário para unir os condutos estudados ao sensor de pressão, sendo o primeiro adaptador descartado e o conduto de nylon instalado diretamente na tomada de pressão. Para este segundo adaptador foi utilizado um conector de vidro com 2 cm de comprimento que permitia a união do conduto ao transdutor de pressão (Figura 3.10). Esse segundo adaptador possui diâmetro interno compatível com o diâmetro externo do conduto de nylon (3,6 mm), permitindo uma união satisfatória e evitando fugas de água. Nas medições efetuadas com condutos de PVC o segundo adaptador não era utilizado, o conduto de PVC era inserido 2 cm dentro de um conduto de silicone que permitia a união ao transdutor, evitando fugas de água.

Não foram avaliadas influências do uso destes adaptadores, bem como do conduto de união. A Tabela 3.3 apresenta as condições dos ensaios realizados. Foi mantida uma abertura de comporta de 3,5 cm durante todos os ensaios para avaliação da utilização de condutos flexíveis, ensaiando-se escoamentos com número de Froude ( $Fr_1$ ) em torno de 5,0.



*Figura 3.9 – Sistema adaptador junto a tomada de pressão.*



*Figura 3.10 – Sistema adaptador junto ao transdutor de pressão.*

Tabela 3.3– Resumo das condições de Ensaio.

Material	Diâmetro Interno (mm)	Comprimento (cm)	Espessura da Parede (mm)	Froude	Reynolds	Y <sub>1</sub> (cm)	Y <sub>2</sub> (cm)
PVC	4,8	5 a 200	1,5	5,1	6.10 <sup>4</sup>	2,47	16,3
PVC	6,4	5 a 200	1,0	5,0	6.10 <sup>4</sup>	2,51	16,2
			1,5	5,1	6.10 <sup>4</sup>	2,43	16,3
			2,0	5,0	6.10 <sup>4</sup>	2,51	16,2
PVC	7,9	5 a 200	1,5	5,2	6.10 <sup>4</sup>	2,42	16,4
Nylon	2,0	2 a 200	0,8	5,0	6.10 <sup>4</sup>	2,51	16,2

Obs: os valores dos números de Froude e Reynolds e das alturas conjugadas (Y<sub>1</sub> e Y<sub>2</sub>) são valores médios de 7 a 12 ensaios realizados para cada tipo de tubulação, a tabela completa das condições dos 60 ensaios realizados se encontra no ANEXO I

Os ensaios foram normalmente executados em seqüência, isto é, sem interromper ou modificar o escoamento no canal. Inicialmente era feito o posicionamento do ressalto, em função da abertura da comporta e das condições de contorno (vazão, nível de jusante e de montante), após executava-se a aquisição de dados com uma freqüência de 100 Hz e uma duração de 15 minutos. A seqüência de ensaio era iniciada com o maior comprimento de conduto. Ao final do primeiro ensaio de cada seqüência, se diminuía o comprimento de conduto sem interromper o escoamento no canal e sem deslocar o transdutor de pressão de sua posição inicial, mediam-se as condições de ensaio novamente e executava-se o novo ensaio. Em algumas situações houve necessidade de mudança de posição dos transdutores devido a limitações da instalação experimental, os condutos de comprimento pequeno exigiam a mudança de posição do transdutor para a execução do ensaio. A execução de ensaios em seqüência era feita para condutos de mesmo diâmetro e espessura de parede. Sempre se iniciava outra seqüência de ensaio à medida que se mudava o diâmetro ou espessura do conduto.

### 3.2.6 Avaliação do efeito da submergência sobre o campo de pressões em um ressalto hidráulico formado a jusante de uma comporta.

Para a avaliação do efeito da submergência sobre o campo de pressões foi proposta uma série de ensaios para quatro valores do número de Froude com diferentes condições de submergência. Relembrando, define-se fator ou coeficiente de submergência (S) como a relação entre a lâmina d'água a jusante do ressalto (T<sub>w</sub>) imediatamente após o final do ressalto e a lâmina referente à altura conjugada lenta do ressalto livre (Y<sub>2</sub>) correspondente ao mesmo número de Froude e vazão.

Nesta etapa foram medidas pressões instantâneas e determinados os perfis da superfície livre conforme apresentado nos itens 3.2.2 Medições de pressão e 3.2.3 Medições de nível. A Tabela 3.4 apresenta as condições dos ensaios realizados. Foram medidas pressões nas posições apresentadas pela Figura 3.4 e Figura 3.5.

Os ensaios foram conduzidos em seqüências de mesma vazão, isto é, iniciou-se com o ressalto hidráulico livre e após efetuarem-se as medições necessárias, elevou-se o nível de jusante ( $T_w$ ) para que fosse imposto o fator de submergência ( $S$ ) desejado e assim sucessivamente. Os ensaios foram realizados até a máxima submergência possível, de acordo com as características do canal, abertura da comporta e vazão. Limitou-se como valor máximo  $S = 1,40$ , de acordo com as características da instalação experimental. Para que houvesse certa diferenciação visual entre diferentes submergências, limitou-se o valor mínimo de  $\Delta S = 0,10$ , sendo este o “passo mínimo” desejado entre submergências sucessivas. Atribui-se o número de Froude calculado para o ressalto hidráulico livre para a seqüência de vazões.

Para que se possam comparar os resultados com os de outros pesquisadores utilizou-se a metodologia de adimensionalização proposta por Marques et al (1997), utilizando os seguintes parâmetros hidráulicos:

$Y_1$  = Altura conjugada rápida;

$Y_2$  = Altura conjugada lenta;

$H_t$  = Perda de energia no ressalto hidráulico dada pela diferença entre energias de jusante e montante.

*Tabela 3.4 – Condições de ensaio para o estudo da influência do fator de submergência.*

Vazão (m <sup>3</sup> /s)	Froude	Reynolds	S	Abertura Comporta (cm)	Y <sub>1</sub> (cm)*	T <sub>w</sub> (cm)**
0,020	3,97	4,4.10 <sup>4</sup>	1,00	3,50	2,34	11,70
			1,11			12,95
			1,19			13,91
			1,28			15,03
			1,38			16,80
0,024	4,55	5,3.10 <sup>4</sup>	1,00		2,41	14,10
			1,10			15,30
			1,19			16,80
			1,31			18,30
			1,40			19,60
0,028	5,01	6,2.10 <sup>4</sup>	1,00		2,51	16,51
			1,00			16,51
			1,09			18,03
			1,19			19,66

Vazão (m³/s)	Froude	Reynolds	S	Abertura Comporta (cm)	Y <sub>1</sub> (cm)*	T <sub>w</sub> (cm)**
0,020	5,88	4,5.10 <sup>4</sup>	1,00	2,50	1,81	13,80
			1,09			15,13
			1,18			16,36
			1,27			17,57

Observações:

\*As alturas conjugadas rápidas (Y<sub>1</sub>) correspondem à altura conjugada medida para o ressalto hidráulico livre;

\*\* T<sub>w</sub> corresponde à altura conjugada lenta (Y<sub>2</sub>) do ressalto hidráulico no caso de S = 1,0 (ressalto hidráulico livre).

A perda de carga na comporta não foi considerada. A determinação das energias foi feita para as seções a montante da comporta, onde foi instalado um transdutor de pressão para a medição da carga hidráulica (posição zero), e a jusante do ressalto hidráulico, conforme Figura 3.11. Essa situação leva a valores de H<sub>t</sub> um pouco maiores que os reais, fazendo com que o desvio padrão adimensionalizado (Ω ou Ω<sub>s</sub>) apresente valores levemente subestimados. A expressão a seguir representa a perda de carga no ressalto hidráulico:

$$H_t = \left( N_m + \frac{V_m^2}{2g} \right) - \left( N_j + \frac{V_j^2}{2g} \right) \quad 3.1$$

onde:

N<sub>m</sub> = nível a montante da comporta ou carga hidráulica;

V<sub>m</sub> = velocidade do escoamento a montante da comporta;

V<sub>j</sub> = velocidade do escoamento na seção de jusante do ressalto hidráulico;

N<sub>j</sub> = nível de jusante.

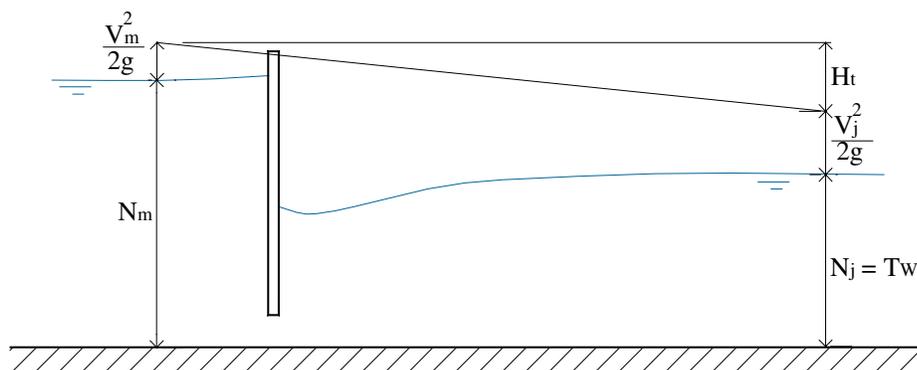


Figura 3.11 – Perda de carga do ressalto hidráulico.

Na adimensionalização dos resultados provenientes de ressalto hidráulico submerso serão utilizados os fatores de submersão (S), seguindo recomendação de Marques (1999), e as alturas conjugadas referentes ao ressalto livre. A utilização dos parâmetros do ressalto livre se mostra interessante, já que foram mantidas as mesmas vazões durante a seqüência de ensaios para um mesmo número de Froude.

Para a avaliação do efeito da submersão sobre a flutuação de pressão serão apresentados os efeitos dessa variável sobre pressão média, desvio padrão, coeficiente de assimetria, coeficiente de curtose, espectro de energia, coeficiente estatístico de distribuição de probabilidade (N) e sobre a interdependência dos valores de pressão entre tomadas consecutivas.

O erro padrão da estimativa das ordenadas espectrais foi de 5,33%, avaliado segundo a expressão abaixo, (Bendat e Piersol 2000).

$$\varepsilon_r = \sqrt{\frac{1}{\beta_w T}} \quad 3.2$$

A largura da banda ( $\beta_w$ ) utilizada foi de 0,391 Hz e o tempo de aquisição da amostra ( $T$ ) de 900 segundos.

### ***3.2.6.1 Metodologia de previsão de valores de pressão para diferentes probabilidades de ocorrência e fatores de submersão.***

A análise do comportamento da distribuição longitudinal da pressão média, do desvio padrão e do coeficiente de distribuição de probabilidade (N) em ressalto hidráulico livres e submersos permite criar uma metodologia para estimar os valores de pressão para diferentes probabilidades ocorrência e graus de submersão.

A metodologia para a determinação das pressões para diferentes probabilidades de ocorrência e graus de submersão segue, em linhas gerais, a proposta de Teixeira (2003), baseada em expressões de ajuste para a pressão média e o desvio padrão e no conhecimento do coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades (N) ao longo do ressalto hidráulico através da expressão abaixo.

$$P_{\%} = P_x \pm N \cdot \sigma_x \quad 3.3$$

onde:

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

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

$\sigma_x$  = desvio padrão da amostra de pressão em um determinado ponto do ressalto hidráulico.

Teixeira (2003) propôs tal metodologia utilizando ajustes aos dados de pressão média e desvio padrão para o ressalto hidráulico livre. No presente trabalho serão propostos ajustes de forma a quantificar a influência da submergência sobre os parâmetros ajustados (pressão média e desvio padrão). Serão propostos ajustes considerando o comportamento do ressalto hidráulico livre e expressões a ele atribuídas, somando-se os efeitos atribuídos ao afogamento do ressalto, propondo assim, expressões da seguinte forma (Figura 3.12):

Ajuste para a pressão média

$$\Psi_s = (1 + \Delta\Psi_s)\Psi \quad 3.4$$

Ajuste para o desvio padrão

$$\Omega_s = (1 + \Delta\Omega_s)\Omega \quad 3.5$$

onde:

$\Psi_s$  = expressão de ajuste para a pressão média adimensionalizada para o ressalto hidráulico submergido;

$\Psi$  = expressão de ajuste para a pressão média adimensionalizada para o ressalto hidráulico livre

$\Delta\Psi_s$  = diferença relativa entre as pressões adimensionalizadas do ressalto hidráulico submergido e do ressalto hidráulico livre;

$\Omega_s$  = expressão de ajuste para o desvio padrão adimensionalizado da amostra para o ressalto hidráulico submergido;

$\Omega$  = expressão de ajuste para o desvio padrão adimensionalizado da amostra para o ressalto hidráulico livre;

$\Delta\Omega_s$  = diferença relativa entre o desvio padrão adimensionalizado do ressalto hidráulico submergido e do ressalto hidráulico livre;

sendo:

$$\Psi = \frac{P_x - Y_1}{Y_2 - Y_1} = f\left(\frac{X}{Y_2 - Y_1}\right)$$

$$\Psi_s = \left(\frac{P_x - Y_1}{Y_2 - Y_1}\right)\left(\frac{Y_2}{T_w}\right) = f\left(\frac{X}{Y_2 - Y_1}\right)$$

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

$$\Omega_s = \left(\frac{\sigma_x}{H_t}\right)\left(\frac{Y_2}{Y_1}\right)\left(\frac{Y_2}{T_w}\right) = f\left(\frac{X}{Y_2 - Y_1}\right)$$

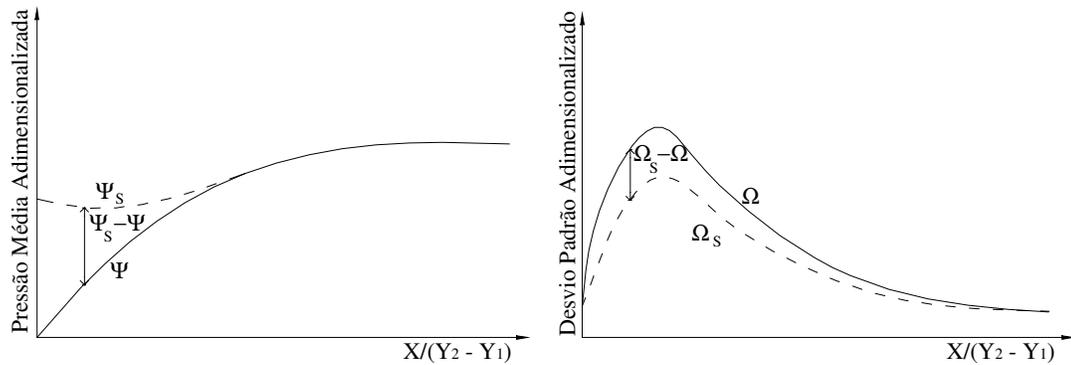


Figura 3.12 – Metodologia de determinação de pressões com diferentes graus de submersão.

## **4 RESULTADOS**

O presente capítulo apresentará os resultados dos ensaios realizados neste trabalho de maneira a possibilitar as avaliações propostas nos *Objetivos* :

- Avaliar o campo de pressões em um ressalto hidráulico formado a jusante de um comporta de fundo para diferentes níveis de submersão;
- Propor uma metodologia para estimar pressões para diferentes probabilidades de ocorrência e graus de submersão.

Como forma de organizar e facilitar a análise deste capítulo os resultados serão apresentados em diferentes subitens, sendo estes:

- Resumo sobre os resultados do estudo sobre a influência da utilização de condutos flexíveis em medições de flutuação em ressalto hidráulico para a escolha do comprimento máximo a ser adotado;
- Avaliação do perfil da superfície livre do ressalto hidráulico;
- Comparação da flutuação de pressão entre o ressalto hidráulico livre a jusante de comporta e de vertedouro;
- Influência da submersão sobre a distribuição de pressões junto ao fundo em um ressalto hidráulico a jusante de comporta.
- Previsão de pressões para diferentes probabilidades de ocorrência e graus de submersão.

### ***4.1 Resultados do estudo sobre a influência da utilização de condutos flexíveis em medições de flutuação em ressalto hidráulico***

Como já mencionada no capítulo *Instalação Experimental e Metodologia*, a análise da influência da utilização de condutos flexíveis em medições de pressão em ressalto hidráulico caracteriza-se como a primeira etapa na avaliação do campo de pressões médias e extremas, objetivo deste trabalho. Desta forma, será apresentado no presente capítulo um resumo dos resultados verificados. Uma avaliação mais completa pode ser apreciada no ANEXO I, onde são apresentadas, de forma mais ampla, as avaliações feitas e os resultados obtidos nesta etapa da pesquisa. A situação ideal de instalação de se sensores em medições de flutuação de pressão em ressalto hidráulico é dispor os transdutores faceando os contornos sólidos da

estrutura, possibilitando medição de valores reais de flutuação de pressão. Entretanto, devido as características das instalações experimentais essa situação muitas vezes não pode ser implementada, desta forma, a utilização de condutos unindo a tomada de pressão ao sensor se faz necessária.

Verificou-se através dos ensaios realizados com condutos de PVC e nylon, nos diâmetros e espessuras anteriormente mencionadas (*Instalação Experimental e Metodologia*), que o comprimento do conduto influencia os resultados obtidos em medições de pressão em ressalto hidráulico, conforme observado por Lopardo (1986).

Entretanto, tal influência apresenta-se de maneira distinta dependendo da grandeza avaliada. De maneira geral, pode-se dizer que os valores de pressão média, assimetria e curtose não sofrem influência significativa devido ao comprimento e ao diâmetro interno dos condutos, apresentado valores praticamente constantes em função do comprimento do conduto, levando se em conta os erros devidos, principalmente, à sensibilidade do transdutor ( $\pm 3,5$  mm), variação natural da amostra e variação da posição de início do ressalto hidráulico.

Contrariamente, quando se analisa o desvio padrão e os valores extremos de pressão, podem ser verificadas influências significativas sobre os resultados em função do comprimento e do diâmetro do conduto utilizado. Essas diferenças se manifestaram quando da utilização de condutos de nylon, verificando-se claramente o efeito devido ao diâmetro do conduto. A Figura 4.1 e a Figura 4.2 apresentam respectivamente o desvio padrão da amostra de pressão e os valores extremos de pressão obtidos para um ressalto hidráulico com número de Froude ( $Fr_1$ ) igual 5,0. O desvio padrão da amostra tende a apresentar valores menores, para todas tomadas de pressão avaliadas no ensaio, à medida que se aumenta o comprimento do conduto de nylon utilizado. Nota-se que esta influência é mais marcada para condutos com comprimento superior a 25 cm.

Foi constatado um comportamento semelhante para as semi-amplitudes de pressão para probabilidades extremas (1%, 5%, 10%, 90%, 95% e 99%), onde nota-se que o módulo dessas amplitudes tende a diminuir com o aumento do comprimento do conduto, caracterizando perda de informação sobre pressões extremas, conforme a Figura 4.2. Nesta Figura são apresentados os valores encontrados em duas amostras diferentes para uma mesma condição de ensaio, sendo assim, uma idéia da dispersão dos resultados pode ser avaliada. Verifica-se que essa dispersão aumenta para as pressões mais extremas confirmando um comportamento já esperado. Verifica-se para comprimentos inferiores a 25 cm que os valores de pressões extremas aparentemente não apresentam variação devida ao comprimento do conduto.

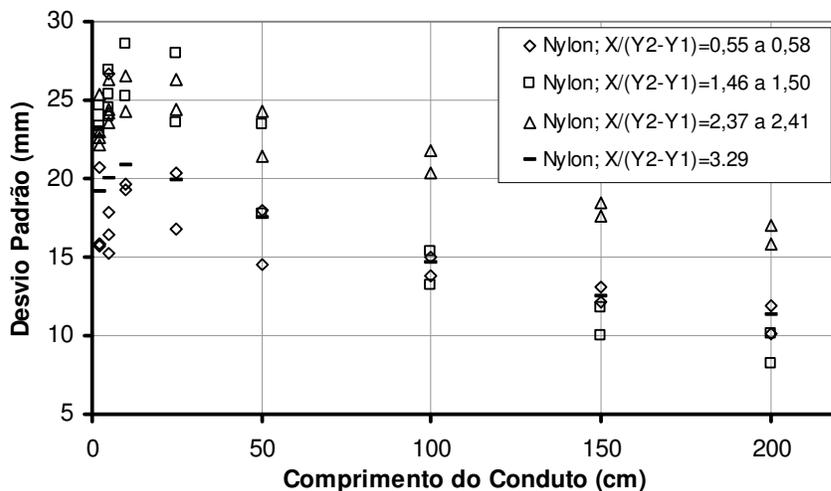


Figura 4.1 - Variação do desvio padrão em função do comprimento do conduto de nylon para três posições ao longo do ressalto hidráulico,  $Fr_1 = 5,0$  e diâmetro interno 2,0 mm.

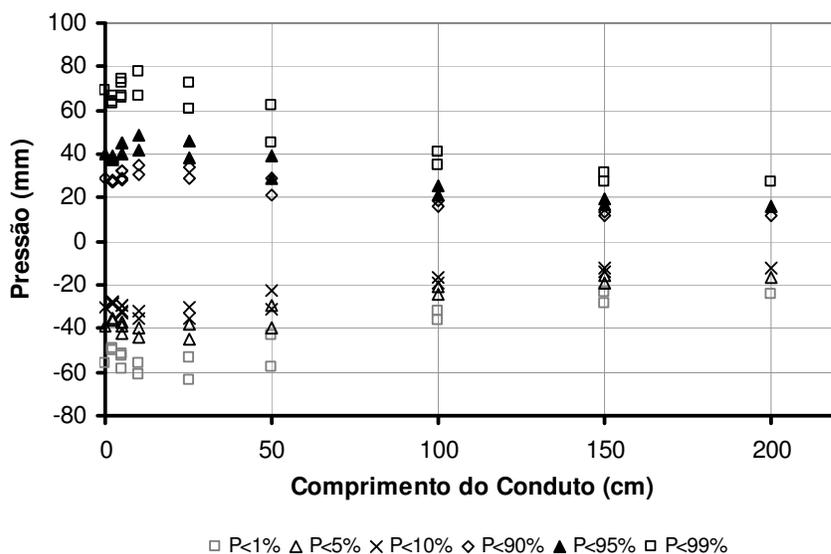


Figura 4.2 – Pressões extremas em função do comprimento do conduto de nylon, diâmetro interno 2,0 mm,  $X/(Y_2-Y_1)=1,50$ ,  $Fr_1 = 5,0$ .

Em função do exposto acima, recomenda-se para o estudo do comportamento da flutuação de pressão e dos valores extremos de pressão em ressalto hidráulico, com condições semelhantes às aqui ensaiadas, utilizar comprimentos inferiores a 25 cm em instalações experimentais que fazem uso de condutos de nylon de diâmetro igual ou inferior a 2 mm. A Tabela 4.1 apresenta recomendações de diâmetros internos e comprimentos de condutos a serem utilizados em medições de flutuação de pressão quando se deseja estudar o comportamento do desvio padrão e das pressões extremas.

*Tabela 4.1 – Recomendações de diâmetros e comprimentos de condutos para estudos de pressões extremas em medições de flutuação de pressão em ressalto hidráulico*

<b>Material</b>	<b>Diâmetro (mm)</b>	<b>Comprimento Recomendado (cm)</b>
Nylon	2	$\leq 25$
PVC	4,8	$\leq 200$
	6,4	
	7,8	

Quando são avaliadas essas mesmas grandezas em ensaios realizados com condutos de PVC estes comportamentos não são verificados, independentemente do diâmetro, comprimento ou espessura de parede do conduto.

Cabe salientar que os condutos de PVC apresentam diâmetros bem superiores (4,8 mm, 6,4 mm e 7,9 mm) aos condutos de nylon (2,0 mm). Assim, pode-se dizer que os efeitos verificados acima estão relacionados diretamente a utilização de condutos com pequenos diâmetros.

Seguindo a análise proposta no capítulo *Instalação Experimental e Metodologia* avaliou-se a influência da utilização de condutos flexíveis através da análise da densidade espectral das flutuações de pressão (espectro de energia). Pelos resultados obtidos pode-se afirmar para o estudo realizado, utilizando-se instalação e metodologias apresentadas, que o comprimento dos condutos distorce a forma do espectro de energia. Os condutos maiores apresentam os valores de pico do espectro junto a pressões menores quando comparados com condutos de comprimento inferior. A Figura 4.3 ilustra esse efeito para ensaios realizados com condutos de PVC com diâmetro interno de 7,9 mm.

Nota-se, pela análise da figura a seguir, que os espectros referentes aos diferentes comprimentos utilizados apresentam boa concordância para as menores frequências, mas à medida que se aumentam os valores de frequência verifica-se que as ordenadas do espectro se afastam uma das outras. Tal comportamento foi verificado para todos os condutos ensaiados. Desta forma, optou-se por criar recomendações sobre a utilização de condutos em função das faixas de frequência que se deseja avaliar para aquisições de pressão em ressalto hidráulico, Tabela 4.2. A Tabela 4.2 considera que, enquanto os valores das ordenadas espectrais se mantêm próximos, a aquisição de dados pode-ser feita com os comprimentos de condutos estudados, à medida que o espectro de um dos comprimentos de conduto se afasta dos demais esse se torna o comprimento máximo, para a faixa de frequência em que ocorreu o afastamento, recomendado na coleta de dados para o estudo da densidade espectral das flutuações de pressão. Nota-se avaliando a figura a seguir, na faixa de frequência de 5 Hz, que o espectro do conduto com 100 cm de comprimento e diâmetro interno 7,9 mm se afasta dos

demais, este passa a ser o comprimento máximo recomendado para a faixa de frequência citada.

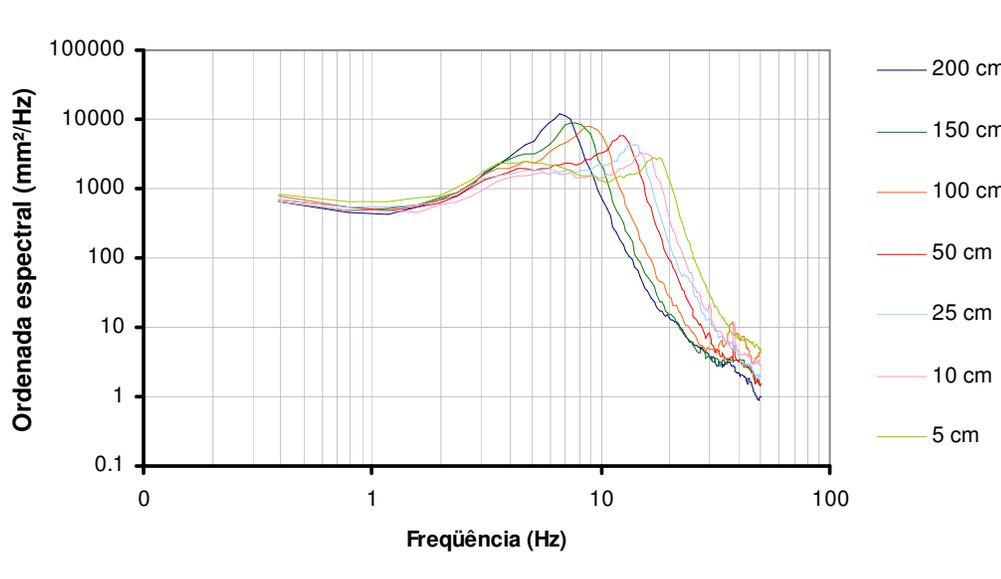


Figura 4.3 – Espectro de energia dos experimentos com condutos de PVC de 7,9 mm de diâmetro e espessura de 1,5 mm,  $X/(Y_2 - Y_1)$  entre 1,43 e 1,47,  $Fr_1$  entre 5,11 e 5,23.

Tabela 4.2 – Recomendações de comprimentos de condutos para estudos de espectro de frequência em medições de flutuação de pressão em ressalto hidráulico

Frequência de Interesse	Material	Diâmetro (mm)	Comprimento Recomendado (cm)
$\leq 1$ Hz	PVC	4,8 a 7,9	$\leq 200$
	Nylon	$\leq 2$	$\leq 200$
$\leq 5$ Hz	PVC	7,9	$\leq 100$
	PVC	4,8 a 6,4	$\leq 50$
	Nylon	$\leq 2$	$\leq 10$
$\leq 10$ Hz	PVC	6,4 a 7,9	$\leq 25$
	PVC	4,8	$\leq 10$
	Nylon	$\leq 2$	Sem condutos
$>10$ Hz	PVC	4,8 a 7,9	$\leq 5$
	Nylon	$\leq 2$	Sem condutos

Através das análises feitas para os diferentes condutos optou-se por utilizar o menor conduto de nylon possível, com um comprimento que permitisse instalar o transdutor de pressão junto ao fundo canal. Esse comprimento é de 2 cm, desta forma a influência devido ao conduto sobre os valores de pressão, desvio padrão, pressões extremas e frequências se torna desprezível. Optou-se por esse conduto, pois seu diâmetro interno é compatível com o da tomada de pressão, podendo-se assim dispensar o uso do adaptador para a transição de

diâmetros. Além disso, os condutos de PVC se mostraram de difícil manuseio, apresentando dificuldades na retirada de possíveis bolhas de ar de seu interior e junto aos adaptadores.

Em todos os ensaios, através de análise visual, foi verificada a possibilidade de existência de bolhas de ar no conduto e no adaptador, caso existissem, eram retiradas.

#### **4.2 Avaliação do perfil da superfície livre do ressalto hidráulico**

O conhecimento do perfil longitudinal da superfície livre do ressalto hidráulico (perfil da linha d'água) é importante para a determinação da altura dos muros laterais à bacia de dissipação. Muitos autores afirmam que a superfície livre pode ser bem representada pelos valores de pressão média medida junto ao fundo do canal. A Figura 4.4 apresenta a medições de lâmina d'água ao longo do ressalto hidráulico ( $Z_x$ ) adimensionalizadas segundo o proposto por Marques et al (1997) para as pressões médias.

$$\Phi = \frac{Z_x - Y_1}{Y_2 - Y_1} \quad 4.1$$

onde:

$\Phi$  = lâmina d'água adimensionalizada.

Pode-se verificar na Figura 4.4 que os dados referentes aos ressaltos submergidos ( $S > 1,0$ ) se encontram afastados do comportamento verificado para o ressalto livre ( $S = 0$ ). Esse comportamento é considerado normal, uma vez que a lâmina d'água a jusante no caso de um ressalto hidráulico submergido é superior à altura conjugada lenta ( $Y_2$ ) fazendo com que ocorra o deslocamento do ressalto em direção à comporta, submergindo-o e causando mudança na superfície livre do escoamento.

A Figura 4.5 apresenta uma seqüência de fotos do ressalto hidráulico com número de Froude igual a 4,55 para  $S = 1,0$ ,  $S = 1,2$  e  $S = 1,4$ . Essa seqüência de fotos justifica a afirmação da sentença anterior. Pode-se ver mudança de forma do ressalto hidráulico à medida que a submergência aumenta, nota-se que a superfície livre tende a se tornar paralela ao fundo junto ao início do ressalto.

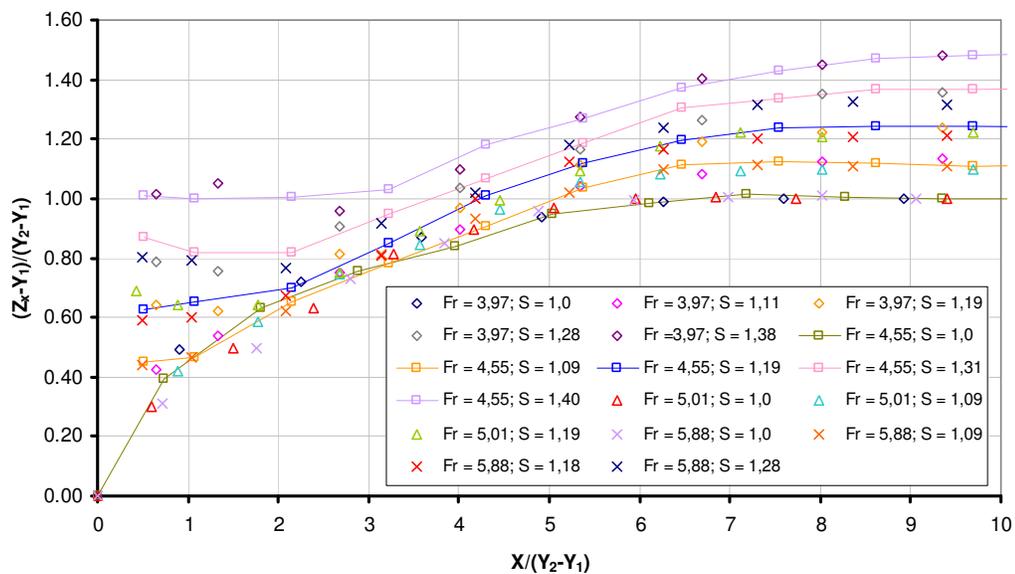


Figura 4.4 – Perfil da linha d'água adimensionalizado sem o fator de submergência.

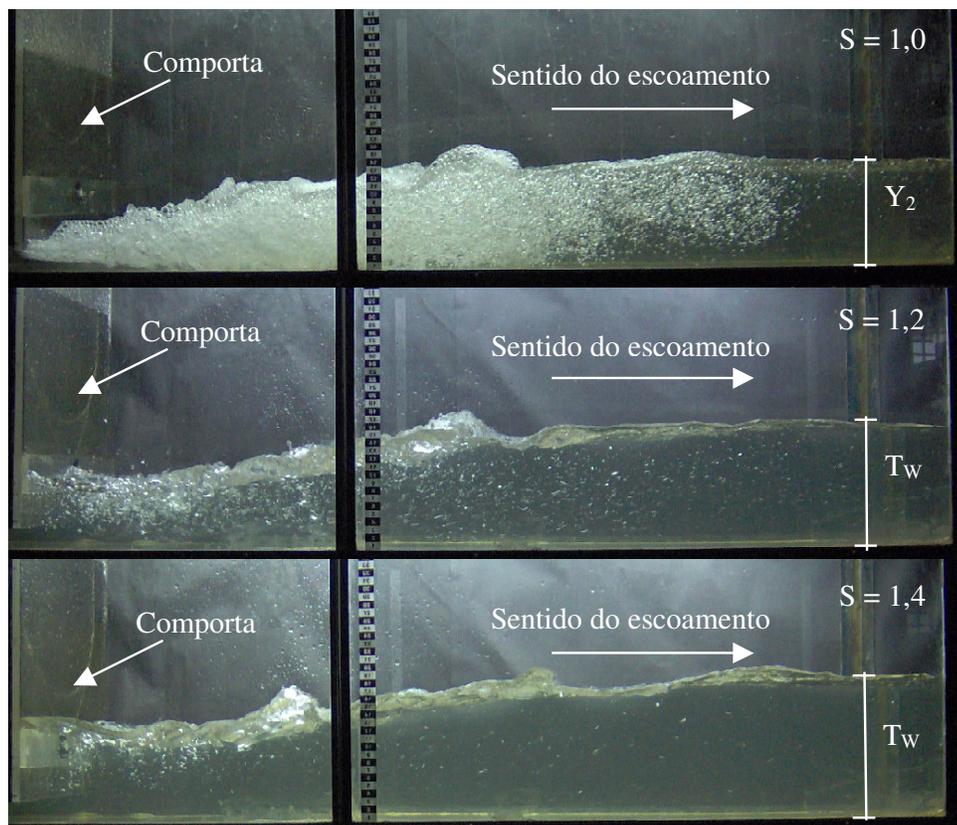


Figura 4.5 - Comparação entre o ressalto hidráulico com  $S = 1,0$ ,  $S = 1,2$  e  $S = 1,4$  para  $Fr = 4,55$  (presente estudo).

Pelo que foi verificado na Figura 4.4 nota-se a necessidade de inclusão do fator de submergência ( $S$ ), proposto por Marques et al (1999) com o objetivo de agrupar os resultados

dos valores de lâmina d'água dos ressaltos hidráulicos submergidos. A Figura 4.6 apresenta a adimensionalização conforme proposto por Marques et al (1999).

Nota-se claramente que a inclusão do fator de submergência ( $S = T_w/Y_2$ ) agrupa os resultados de ressaltos livres e submergidos. Para as posições mais a montante do ressalto hidráulico, verifica-se que os valores referentes aos ressaltos hidráulicos submergidos se encontram afastados dos valores verificados para o caso do escoamento livre. Os valores começam a se afastar em diferentes posições de acordo com o grau de submergência, assumindo valores praticamente constantes entre essas posições e a comporta,  $X/(Y_2 - Y_1) = 0$ .

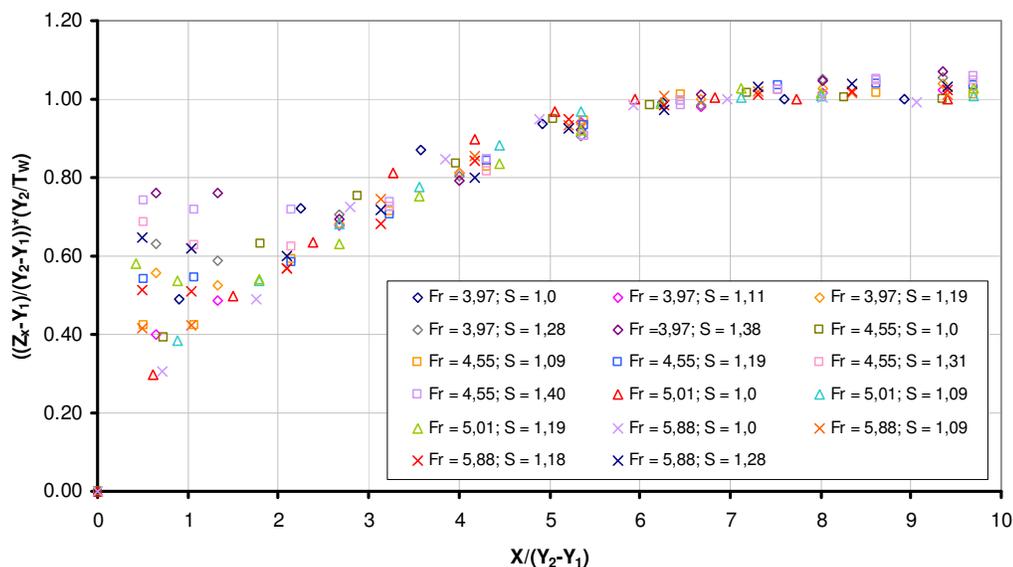


Figura 4.6 - Perfil da linha d'água adimensionalizado com inclusão do fator de submergência ( $S = T_w/Y_2$ )

Outra conclusão que se pode retirar da Figura 4.6 é que a partir da posição  $X/(Y_2 - Y_1) = 8$  a superfície livre praticamente não apresenta variação longitudinal, evidenciando o final do ressalto hidráulico.

A Figura 4.7 apresenta a comparação entre os valores de comprimento do ressalto hidráulico encontrados neste trabalho comparados com os apresentados por Lopardo et al (2004a). Verifica-se que existe uma boa concordância dentro da faixa de submergências avaliadas neste estudo, necessitando de estudos com submergências maiores para confirmar a tendência verificada.

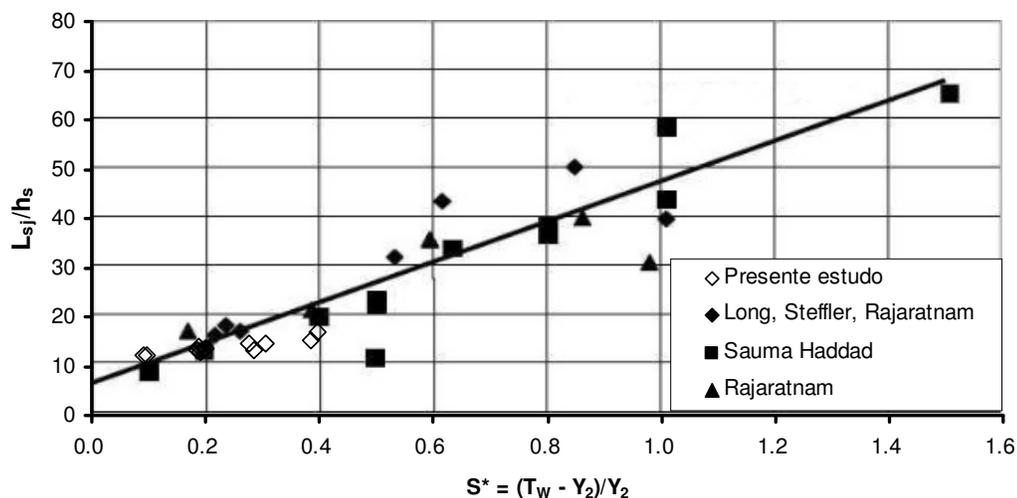


Figura 4.7 – Comparação entre o comprimento do ressalto hidráulico submergidos.

Com o objetivo de avaliar a qualidade das medições a Figura 4.8 apresenta uma comparação entre os valores medidos e expressões apresentadas na bibliografia para a superfície livre de um ressalto hidráulico livre. Pode-se dizer que os resultados apresentam boa concordância com as expressões propostas por Hager (1992) e por Sauma Haddad (1992), levando se em conta a grande dificuldade de medição da superfície livre através de ponta linimétrica devido a grande agitação do escoamento principalmente na região mais a montante do ressalto hidráulico.

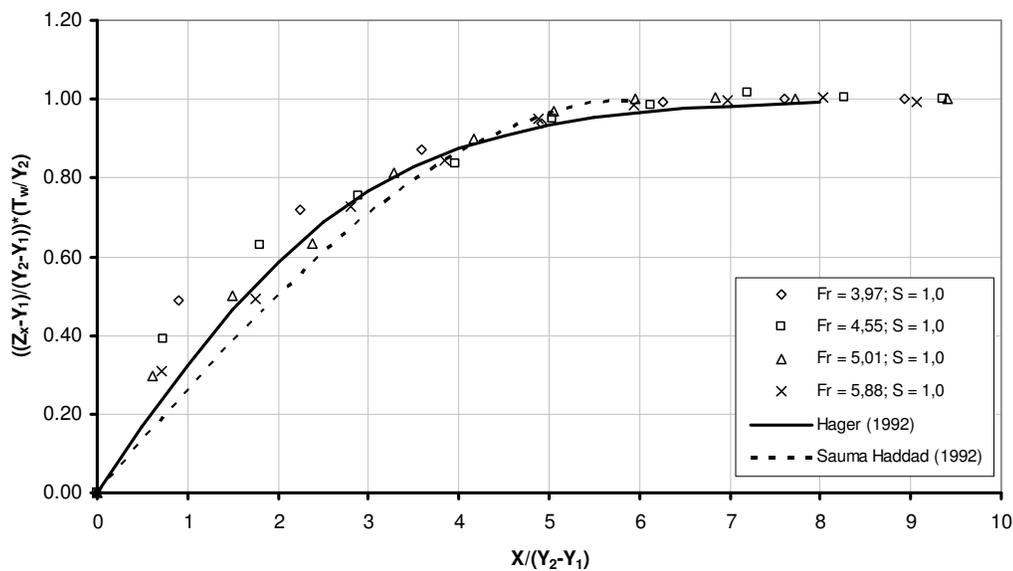


Figura 4.8 – Comparação entre os dados medidos para superfície livre do ressalto hidráulico livre e expressões de outros autores.

### 4.3 Comparações entre o ressalto hidráulico livre a jusante de comporta e a jusante de vertedouro

Os ensaios, como descritos no capítulo *Metodologia*, foram executados em seqüência de acordo com a vazão, sendo atribuído para a mesma seqüência de ensaios o número de Froude do ressalto hidráulico livre correspondente. A Figura 4.9 verifica a validade das alturas conjugadas dos ensaios realizados, comparando-as com os valores obtidos pela expressão de Bélanger (1828) e Hager e Bremen (1989). Verificou-se que os valores medidos apresentam a tendência de se posicionar abaixo dos valores relacionados à equação de Bélanger, este comportamento pode ser considerado normal, uma vez que a equação não leva em consideração perdas de carga devido ao efeito viscoso. O presente estudo apresenta melhor concordância com a equação de Hager e Bremen (1989), que considera os efeitos viscosos.

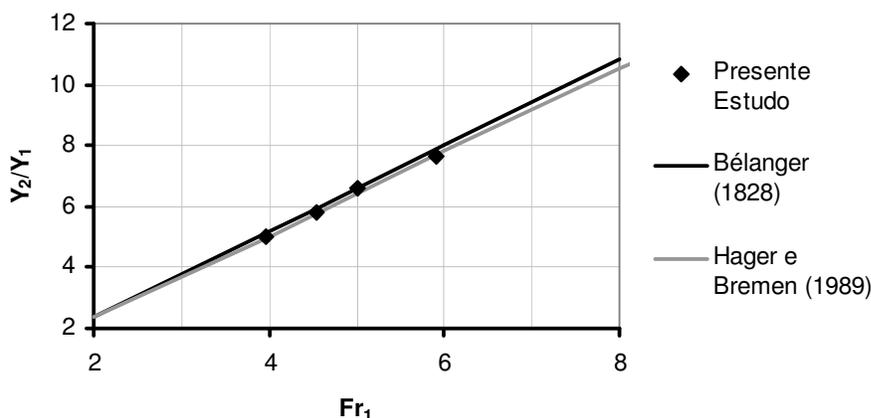


Figura 4.9 - Verificação das alturas conjugadas do ressalto hidráulico livre em comparação com as expressões de Bélanger (1828) e de Hager e Bremen (1989).

Para os ensaios realizados com o ressalto hidráulico se desenvolvendo de forma livre serão avaliadas as distribuições longitudinais da pressão média, do desvio padrão, do coeficiente de assimetria e do coeficiente de curtose, comparando-os com resultados encontrados por Lopardo (1986), Endres (1990), Pinheiro (1995) e Marques (1995) para o ressalto hidráulico a jusante de um vertedouro em laboratório.

#### 4.3.1 Pressão média

A determinação da distribuição das pressões médias é a primeira etapa necessária para a caracterização do campo de pressões que ocorre junto ao fundo em um ressalto hidráulico. Sua determinação é importante para que o engenheiro hidráulico tenha conhecimento da

magnitude dos esforços atuantes. Entretanto, é de primordial importância que, além do conhecimento dos valores médios, o projetista tenha conhecimento de esforços extremos. Dentro dessa perspectiva, a determinação das pressões médias torna-se o primeiro passo para previsão de pressões extremas, conforme Teixeira (2003). A maioria das publicações apresenta apenas análises referentes à flutuação de pressão, no entanto, seria mais interessante a apresentação dessa informação juntamente com a distribuição de pressões médias, pois além de caracterizar o comportamento médio do escoamento forneceria informações importantes sobre solicitações extremas.

A Figura 4.10 apresenta a distribuição longitudinal da pressão média, adimensionalizada segundo a proposta de Marques et al (1997), comparada com os resultados de outros autores. Os resultados de Endres (1990), Pinheiro (1995) e Marques (1995) são referentes a ressaltos hidráulicos livres formados a jusante de vertedouros. Esse tipo de comparação, entre diferentes condições de ingresso, a jusante de comporta e vertedouro, tem como objetivo validar a metodologia de adimensionalização para a situação estudada além de verificar a qualidade dos dados obtidos neste estudo.

Verifica-se que os resultados apresentam uma distribuição longitudinal muito semelhante à encontrada por Endres (1990), Pinheiro (1995) e Marques (1995), evidenciando o mesmo comportamento para diferentes condições de ingresso. Nota-se que a partir da posição adimensionalizada  $X/(Y_2 - Y_1) = 8$  que os valores de pressão mantêm-se praticamente constantes, caracterizando o final do ressalto hidráulico.

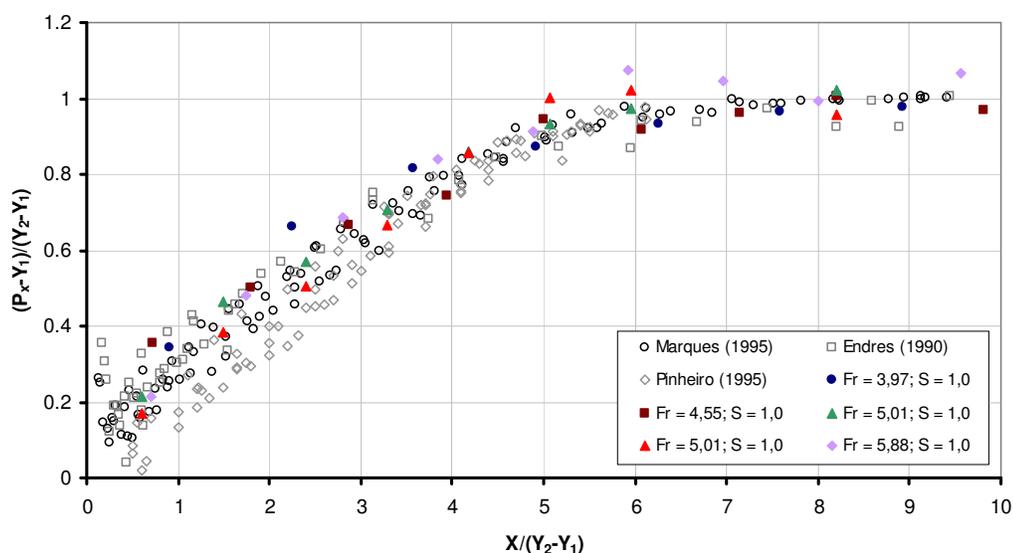


Figura 4.10 – Comparação entre as pressões médias em ressalto hidráulico livre formado a jusante de vertedouro e a jusante de comporta.

Verificou-se que os dados referentes ao presente estudo se ajustam bem à expressão proposta por Teixeira (2003) baseado nos dados de Marques (1995), apresentando um coeficiente de determinação  $R^2 = 0,96$ . A equação a seguir apresenta o ajuste proposto e a Figura 4.11 apresenta a comparação dos dados com essa expressão

$$\Psi = -0,015 \cdot \Gamma^2 + 0,237 \cdot \Gamma + 0,07 \quad 4.2$$

onde:

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

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

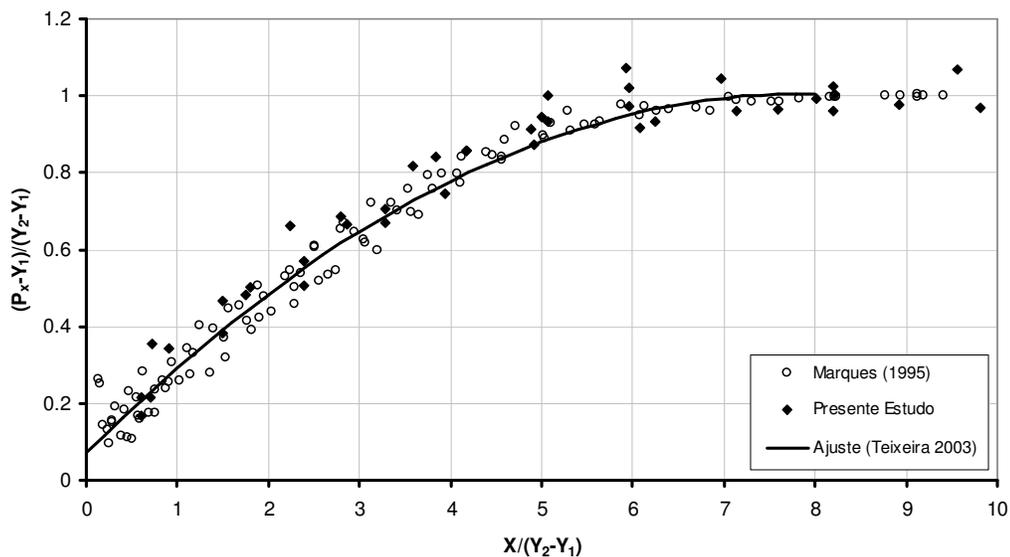


Figura 4.11 – Comparação entre os resultados deste estudo e o ajuste proposto por Teixeira (2003) para o ressalto hidráulico livre a jusante de vertedouro.

#### 4.3.2 Flutuação de pressão (desvio padrão da amostra de pressão)

Outra etapa importante para a determinação dos esforços aos quais as bacias de dissipação podem estar sujeitas é o conhecimento dos valores relacionados à flutuação de pressão no interior do ressalto hidráulico. O conhecimento do desvio padrão da amostra de pressão agrega informação sobre a magnitude das pressões existentes, principalmente em conjunto com o conhecimento das pressões médias. A metodologia proposta por

Teixeira (2003) e Teixeira et al (2003a) utiliza informações sobre o desvio padrão para determinar valores extremos de pressão.

Segundo a metodologia de adimensionalização do desvio padrão proposta por Marques et al (1997), a adoção de um coeficiente de perda de carga localizado baseado em um parâmetro adimensional da flutuação de pressão ( $\sigma_x/H_t$ ) em função da posição relativa do início do ressalto permite que os valores de flutuação de pressão ( $\sigma_x$ ) sejam agrupados em uma nuvem de pontos à qual pode-se atribuir uma expressão que resume o comportamento.

A Equação 4.3 apresenta a relação utilizada para adimensionalizar os valores de flutuação de pressão em função da posição relativa do início do ressalto,  $X/(Y_2-Y_1)$ .

$$\frac{\sigma_x}{H_t} \cdot \frac{Y_1}{Y_2} = f\left(\frac{X}{Y_2 - Y_1}\right) \quad 4.3$$

$$\sigma_x = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (P_i - P_x)^2}{n} \quad 4.4$$

Onde:

$\sigma_x$  = valor médio da flutuação de pressão (desvio padrão da amostra) em m.c.a;

$H_t$  = perda de carga total no ressalto hidráulico em m.c.a;

$Y_1$  e  $Y_2$  = alturas conjugadas do ressalto hidráulico em metros;

$P_x$  = pressão média em m.c.a;

$P_i$  = pressão "instantânea" em m.c.a;

$n$  = tamanho da amostra.

Segundo Marques et al (1998) o termo ( $\sigma_x/H_t$ ) representa a contribuição localizada da perda de carga e o parâmetro ( $\sigma_x$ ) quantifica a flutuação de pressão, 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, como descrito no capítulo sobre *Flutuação de Pressão* apresentado na *Revisão Bibliográfica*. Verificou-se que a flutuação de pressão, adimensionalizada segundo Marques et al (1997), medida em um ressalto hidráulico formado a jusante de uma comporta apresenta valores pouco superiores aos verificados nos ressaltos formados a jusante de vertedouro, principalmente no que se refere às posições antes do final do rolo,  $X/(Y_2-Y_1) < 6$ . A

distribuição longitudinal da flutuação de pressão é apresentada na Figura 4.12. A diferença observada entre os valores de flutuação de pressão entre este estudo e os resultados obtidos por Endres (1990), Pinheiro (1995) e Marques (1995), talvez não deva ser atribuída somente às condições de ingresso do ressalto hidráulico (comporta ou vertedouro), mas também aos diferentes aspectos construtivos do canal, à influência da utilização de condutos flexíveis unindo as tomadas de pressão e o transdutor, ao emprego de diferentes equipamentos e técnicas de medição e a outras características que possam resultar influências significativas. Marques (1995) utilizou condutos com 50 cm de comprimento, enquanto Endres (1990) utilizou condutos de 200 cm. Ambos utilizaram condutos de PVC com diâmetro interno igual a 1/4" (6,35 mm) e um vertedouro de geometria idêntica com declividade de 1:0,75. Verifica-se que os dados de Endres (1990) apresentam valores pouquíssimo inferiores a Marques (1995). Já Pinheiro (1995), dispôs os sensores faceando o fundo do canal e seus resultados apresentam valores pouco superiores a de Marques (1995) e Endres (1990). Cabe salientar que a estrutura do vertedouro utilizada por Pinheiro (1995) é diferente das estruturas dos outros autores mencionados, apresentando um perfil  $y = (1/12)x^2$  e sem um trecho de concordância com a bacia de dissipação. As Figura 4.13 a Figura 4.15 apresentam os perfis longitudinais das estruturas do vertedouros ensaiados pelos autores acima citados.

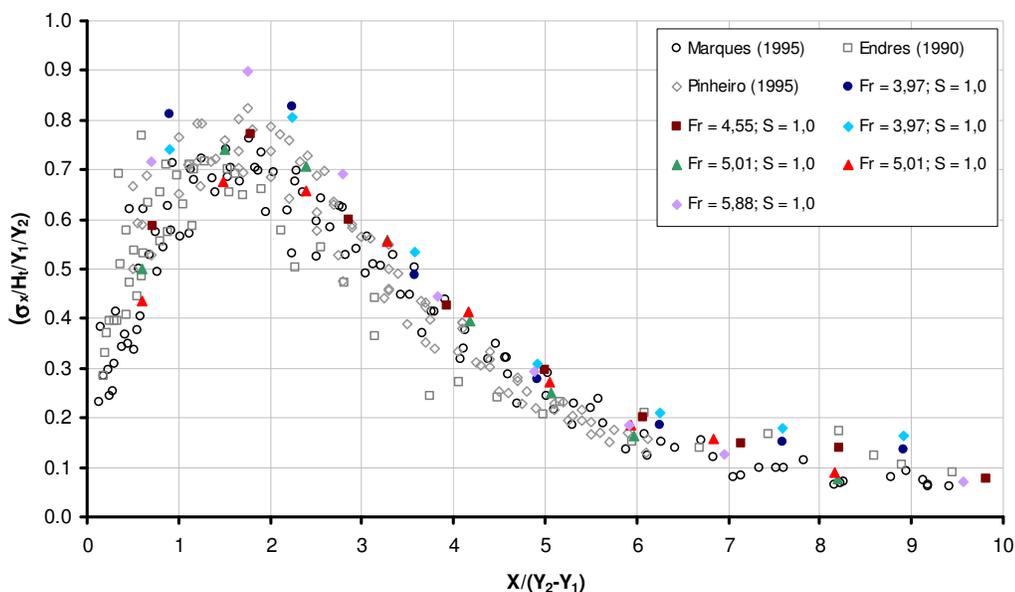


Figura 4.12 – Comparação entre a flutuação de pressão entre ressalto hidráulico formado a jusante de uma comporta e a jusante de vertedouro.

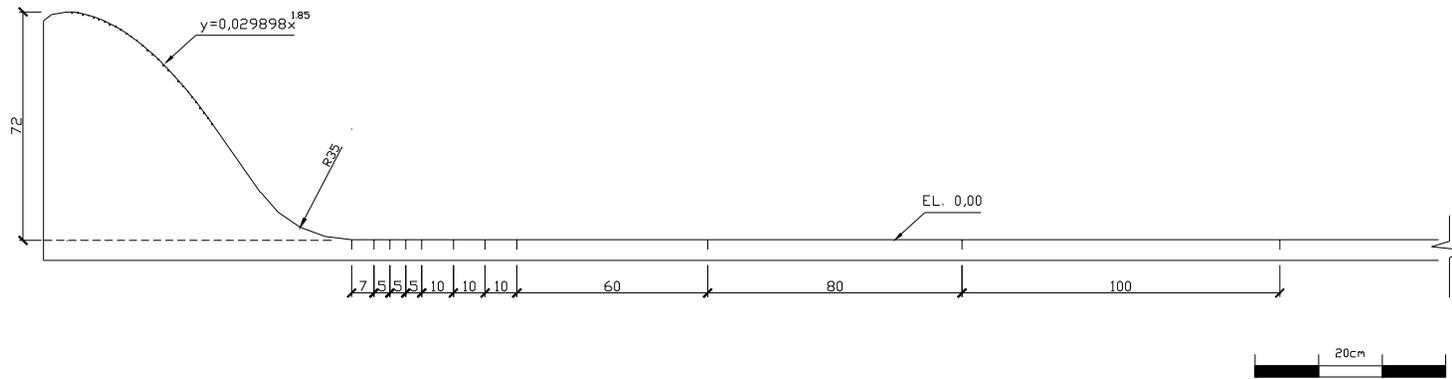


Figura 4.13 - Perfil longitudinal do canal de ensaios e posição das tomadas de pressão. Endres (1990).

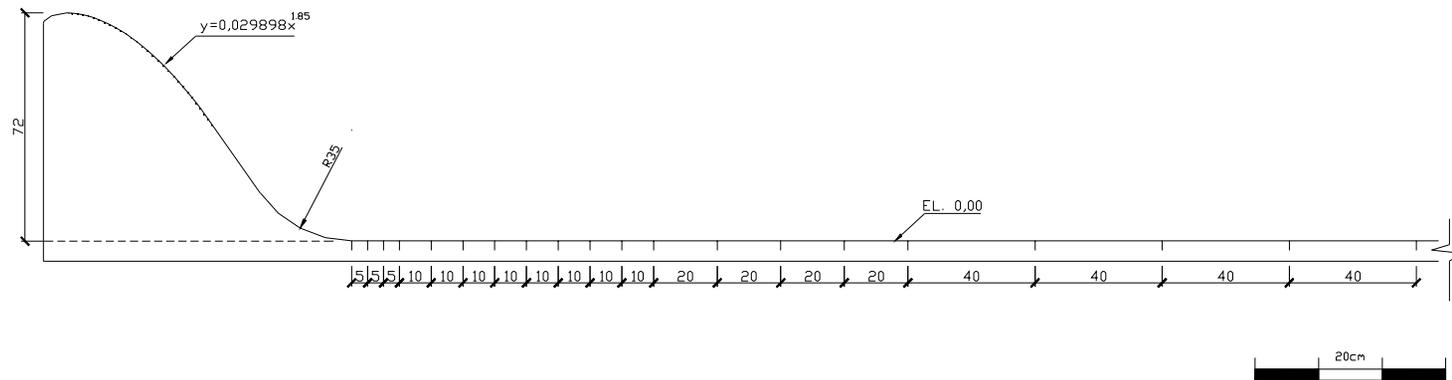


Figura 4.14 - Perfil longitudinal do canal de ensaios e posição das tomadas de pressão. Marques (1995).

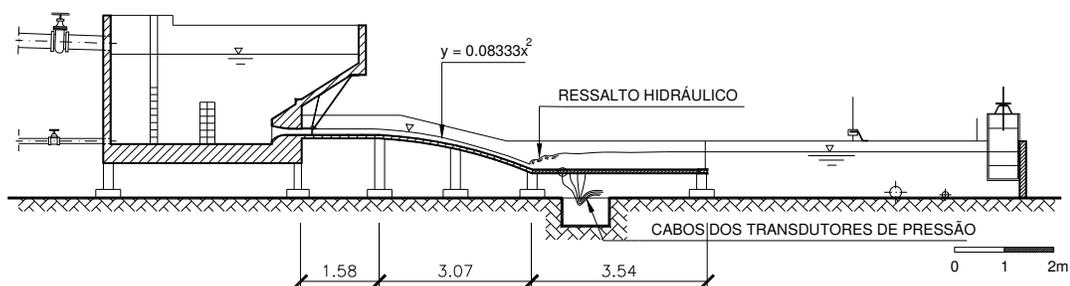


Figura 4.15 - Perfil longitudinal do canal de ensaios utilizado por Pinheiro (1995).

O importante é salientar que, para as duas situações confrontadas, o valor da flutuação de pressão aumenta rapidamente até a posição adimensionalizada  $X/(Y_2 - Y_1) = 1,75$ , atingindo seu máximo em ambas situações, para depois diminuir com um gradiente cerca de 3 vezes menor até a posição  $X/(Y_2 - Y_1) = 6$ . Observa-se a partir dessa posição uma mudança gradual de inclinação (tendência dos dados) até a distância adimensionalizada  $X/(Y_2 - Y_1)$  entre 8 e 8,5, onde o valor da flutuação passa a ser praticamente constante. Essa posição refere-se ao final do ressalto hidráulico e da dissipação de energia. Dessa forma, o que se pode concluir é que o comportamento geral da flutuação de pressão ao longo do ressalto se mantém semelhante para as duas condições de formação, a jusante de vertedouro e de comporta.

Teixeira (2003), utilizando os resultados de Marques (1995), apresentou duas expressões para representar o comportamento da flutuação de pressão em um ressalto hidráulico formado a jusante de um vertedouro. Como foram verificadas diferenças de magnitude na comparação da flutuação de pressão entre o ressalto hidráulico formado a jusante de comporta e a jusante de vertedouro, foi proposta uma nova expressão para a condição de ressalto hidráulico formado a jusante de comporta. Na busca desse ajuste, a solução que se mostrou melhor alternativa foi a utilização de dois polinômios de segundo grau. Essa solução é semelhante à proposta por Teixeira (2003). As equações a seguir apresentam o ajuste proposto para descrever o comportamento médio da flutuação de pressão a jusante de uma comporta.

Ajuste A:

$$\Omega = -0,2166 \cdot \Gamma^2 + 0,7404 \cdot \Gamma + 0,185 \quad 4.5$$

válido para  $0 \leq \frac{X}{(Y_2 - Y_1)} < 2,4$  e apresenta um coeficiente de determinação  $R^2 = 0,56$ .

Ajuste B:

$$\Omega = 0,0187 \cdot \Gamma^2 + 0,2998 \cdot \Gamma + 1,3235 \quad 4.6$$

válido para  $2,4 \leq \frac{X}{(Y_2 - Y_1)} \leq 8,0$  e apresenta um coeficiente de determinação  $R^2 = 0,98$ .

onde :

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

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

A Figura 4.16 apresenta o ajuste das expressões propostas aos dados experimentais comparado com os dados de Marques (1995). Pode-se verificar para o ressalto hidráulico a jusante de comporta valores até 20% maiores que os obtidos a jusante de vertedouro junto a posição de maior flutuação, conforme já relatado por Lopardo (1986) em uma comparação de resultados provenientes de ensaios a jusante de vertedouros com os dados de Lopardo e Solari (1980), para o ressalto hidráulico formado a jusante de comporta.

A Figura 4.17 apresenta a comparação dos valores máximos do desvio padrão, adimensionalizado na forma do coeficiente de flutuação de pressão ( $C_p$ ), entre ressalto hidráulicos formados a jusante de vertedouro, apresentada por Marques et al (2004c), e o presente estudo. Verifica-se nesta figura que o ressalto hidráulico a jusante de comporta apresenta valores 15% a 20% superiores à tendência média dos resultados de outros autores.

A Figura 4.18 apresenta a posição de máxima flutuação de pressão para o presente estudo, comparando com dados de outros autores, apresentada por Marques et al (2004c), para ressalto formados a jusante de vertedouro, podendo-se concluir que a posição de máxima flutuação de pressão tende a ser a mesma para as duas situações em função do número de Froude incidente.

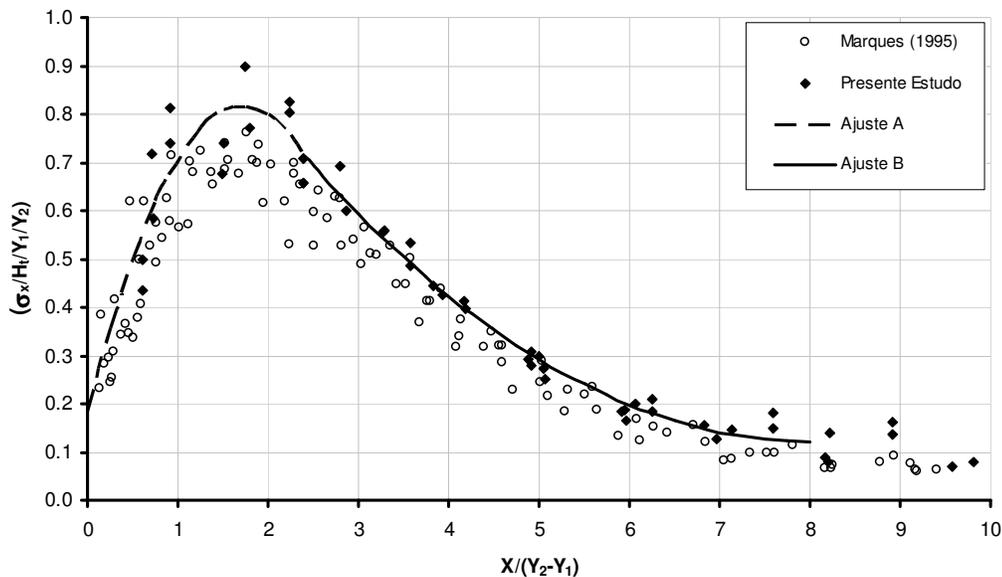


Figura 4.16 – Ajustes propostos para a flutuação de pressão para um ressalto hidráulico livre formado a jusante de uma comporta e comparação com os dados de Marques 1995 (ressalto a jusante de vertedouro).

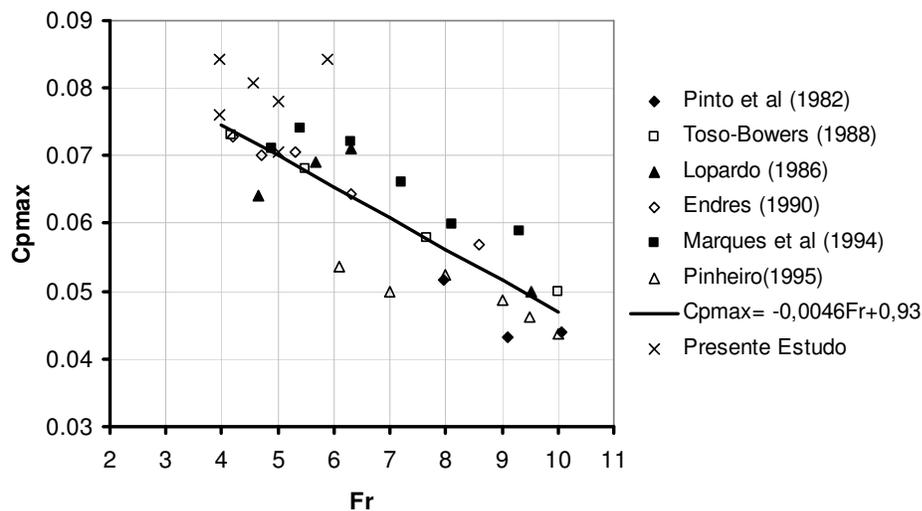


Figura 4.17 – Comparação entre a máxima flutuação de pressão adimensionalizada conforme o coeficiente de flutuação de pressão ( $C_p$ ) entre o ressalto hidráulico livre formado a jusante de comporta (presente estudo) e o formado a jusante de vertedouro (demais autores).

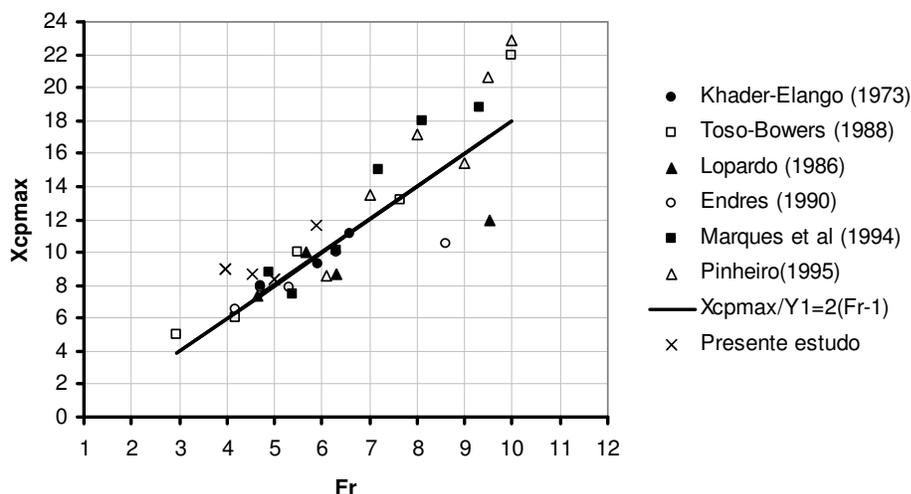


Figura 4.18 – Comparação entre a posição a máxima flutuação de pressão ( $C_{pmax}$ ) entre o ressalto hidráulico livre formado a jusante de comporta (presente estudo) e o formado a jusante de vertedouro (demais autores).

A utilização de expressões que sintetizem o comportamento da flutuação de pressão, bem como da pressão média é interessante no desenvolvimento de metodologias de determinação de solicitações atuantes em bacias de dissipação por ressalto hidráulico.

#### 4.3.3 Coeficiente de Assimetria

Lopardo (1986) comenta que a análise do coeficiente de assimetria ( $A_d$ ) da função de densidade de probabilidade das amostras das tomadas de pressão pode informar sobre zonas de separação do escoamento. Um coeficiente de assimetria positivo indica a existência, na amostra, de uma maior concentração de valores muito superiores à média, deslocando a função de densidade de probabilidade para valores superiores à média. Da mesma maneira, um valor de assimetria negativo indica a existência de valores muito inferiores aos demais, deslocando a função de densidade de probabilidade para valores inferiores à média. O valor de assimetria igual a zero pode caracterizar uma distribuição normal. Valores negativos de assimetria em amostras de pressão estão associados, normalmente, a regiões de descolamento do escoamento do fundo do canal e ocorrência de pressões negativas significativas, deslocando a função de densidade de probabilidade para a esquerda. O coeficiente de assimetria é dado pela equação a seguir. A Figura 4.19 apresenta distribuição do coeficiente de assimetria ao longo do ressalto hidráulico para a situação de escoamento livre (sem afogamento).

$$A_d = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (P_i - P_x)^3}{n \cdot \sigma_x^3} \quad 4.7$$

Verifica-se que a distribuição longitudinal do coeficiente de assimetria apresenta as mesmas características tanto para um ressalto hidráulico livre formado a jusante de comporta como para um ressalto livre formado a jusante de vertedouro. Também pode-se verificar que as distribuições de pressão ao longo do ressalto hidráulico, no que diz respeito a este parâmetro, tende a diferir de uma distribuição Normal, uma vez que o coeficiente de assimetria difere do valor nulo. Sendo assim, a previsão de valores atribuídos a uma certa probabilidade de ocorrência não seria corretamente determinada quando consideramos uma distribuição de pressão do tipo Normal para a distribuição de pressões no ressalto hidráulico.

Evidencia-se, através de análise da Figura 4.19, a presença de valores extremos bem mais elevados que os valores médios da amostra, caracterizado por um coeficiente de assimetria positivo na região inicial do ressalto hidráulico. Julga-se que esse comportamento pode ser atribuído, no caso de ressaltos formados a jusante de vertedouro, à influência da força centrífuga devido à mudança de direção do escoamento na região de concordância entre o vertedouro e a bacia de dissipação (raio de concordância). No caso de ressaltos formados a jusante de comportas a mesma hipótese pode ser feita, já que, as linhas de corrente apresentam grande curvatura devido à mudança rápida de direção do escoamento na região de passagem sob a abertura da comporta, entre a parte de montante e jusante (início do ressalto hidráulico).

À medida que o escoamento se desloca para jusante, a energia cinética é transformada em energia potencial, sendo assim, o escoamento é forçado a descolar do fundo. Ocorre uma diminuição do coeficiente de assimetria, que passa de valores positivos a negativos junto à posição  $X/(Y_2 - Y_1) = 4$ , evidenciando uma região de início de separação do escoamento, onde a velocidade começa a apresentar uma componente vertical mais importante. O coeficiente de assimetria apresenta seu valor mínimo junto à posição  $X/(Y_2 - Y_1) = 6$ , caracterizando uma região de forte componente vertical do vetor velocidade, representando o final do rolo. A determinação da posição de final do rolo é importante no processo de dimensionamento de bacias de dissipação, pois segundo Marques et al (1998), em estudos a jusante de vertedouros, trata-se da região onde o ressalto hidráulico atingiu 95% do seu potencial de dissipação de energia, restando cerca de somente 5% da energia inicial para ser dissipada a jusante dessa posição.

Finalmente, junto à posição  $X/(Y_2 - Y_1) = 8$  a  $8,5$ , o escoamento torna-se praticamente paralelo ao fundo caracterizando o final da influência do ressalto hidráulico e, conseqüentemente, da dissipação de energia. Nessa região é verificado o valor do coeficiente de assimetria em torno de zero.

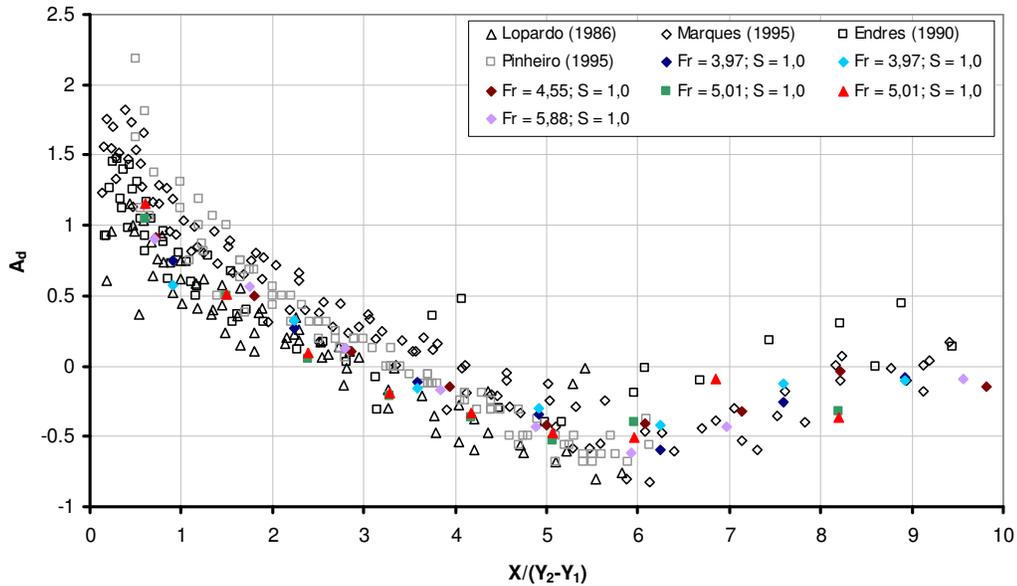


Figura 4.19 - Distribuição do coeficiente de assimetria, comparação entre ressalto hidráulico formado a jusante de comporta e a jusante de vertedouro.

#### 4.3.4 Coeficiente de Curtose

O coeficiente de curtose ( $k$ ) é uma medida de dispersão que caracteriza o "achatamento" da curva da função de distribuição de probabilidade. Valores inferiores a 3 indicam distribuições mais afuniladas (mais altas) e concentradas em torno do valor médio, quando comparadas com a distribuição Normal. Em oposição, valores superiores a três indicam que a função de distribuição de dados é mais achatada e estão menos concentrados em relação à média em comparação com uma distribuição do tipo Normal. O coeficiente de curtose é dado pela Equação 4.8. A Figura 4.20 apresenta distribuição longitudinal do coeficiente de curtose ao longo do ressalto hidráulico, comparando os valores medidos no ressalto formado a jusante de comporta com os medidos no ressalto formado a jusante de vertedouro.

$$k = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (P_i - P_X)^4}{n \cdot \sigma_X^4}$$

4.8

A distribuição do coeficiente de curtose confirma as interpretações dos resultados da análise do coeficiente de assimetria e flutuação de pressão.

A parte inicial do ressalto, onde o coeficiente de curtose apresenta valores elevados, representa uma região de menor concentração dos dados 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 esta a região onde o escoamento tende a descolar do fundo. Finalmente, junto à faixa de posição  $X/(Y_2 - Y_1) = 8$  a  $8,5$  o valor do coeficiente de curtose diminui gradativamente até o valor atribuído a uma distribuição Normal ( $k = 3$ ), mantendo-se praticamente constante, sugerindo o final da zona de influência do ressalto e da dissipação de energia.

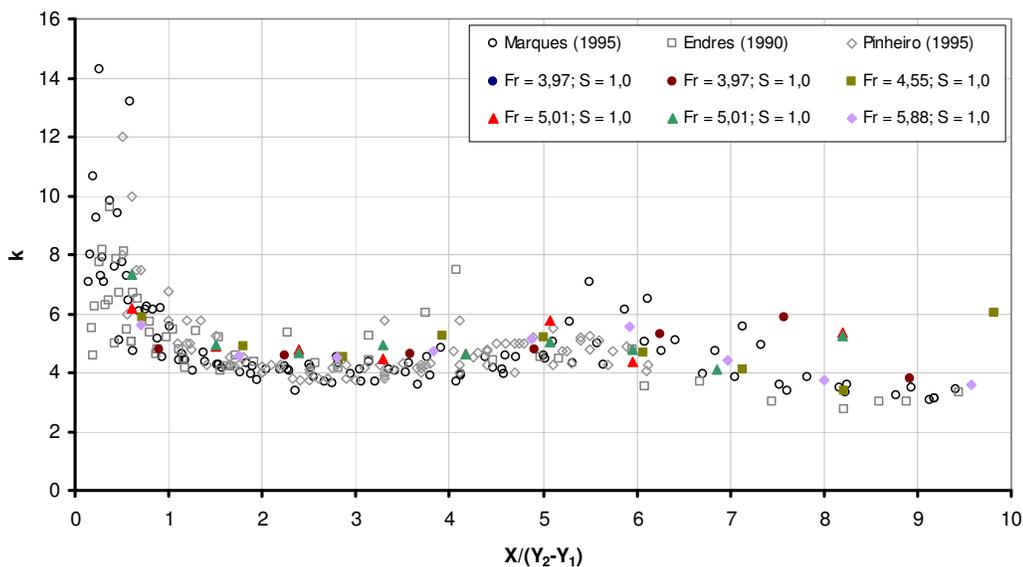


Figura 4.20 - Distribuição do coeficiente de curtose, comparação entre ressalto hidráulico formado a jusante de comporta e a jusante de vertedouro.

#### 4.4 Influência da submergência sobre a distribuição de pressões junto ao fundo em ressalto hidráulico a jusante de comporta

O fator ou coeficiente de submergência ( $S$ ) é definido como a da relação entre a lâmina d'água a jusante imediatamente após o final do ressalto ( $T_w$ ) e a lâmina referente à altura conjugada lenta do ressalto hidráulico livre ( $Y_2$ ) correspondente. Para a avaliação do efeito da submergência sobre a flutuação de pressão serão apresentados os efeitos dessa variável sobre

pressão média, desvio padrão, coeficiente de assimetria, coeficiente de curtose e a densidade espectral das flutuações de pressão.

#### **4.4.1 Pressão média**

De forma análoga à apresentada na comparação entre ressalto hidráulico livre a jusante de comporta e a jusante de vertedouro, será aqui apresentada a distribuição longitudinal das pressões média para diversas submergências. As pressões médias calculadas para todas as situações estudadas são apresentadas na Figura 4.21, adimensionalizadas conforme o proposto por Marques et al (1997). Os resultados do presente estudo são comparados com os resultados obtidos por Endres (1990), Pinheiro (1995) e Marques (1995) em ressaltos hidráulicos livres formados a jusante de vertedouros.

O presente estudo apresenta tanto ressaltos hidráulicos livres como submergidos. Para facilitar a leitura dos dados junto às Figuras que serão apresentadas, as legendas apresentarão sempre o coeficiente de submergência ( $S$ ) e o número de Froude ( $Fr$ ) do ensaio realizado.

Analisando-se a Figura 4.21, verifica-se que a maioria dos ensaios realizados com fatores de submergência  $S > 1$  se posicionam afastados da tendência encontrada pelos outros autores ( $S = 1,0$ ). À medida que se aumenta o fator de submergência ( $S$ ) os dados se mostram mais distantes da tendência esperada. Este afastamento é justificado uma vez que a lâmina d'água a jusante do ressalto hidráulico ( $T_w$ ) é maior que lâmina referente ao escoamento livre em regime lento ( $Y_2$ ). Assim, é verificada a necessidade da inclusão do fator de submergência na adimensionalização de pressões médias em ressalto hidráulico submergido.

A inclusão de um fator de submergência adimensional ( $S$ ), como proposto por Marques et al (1999) permite maior uniformização dos resultados, agrupando os resultados de ressalto hidráulico livre e submergido. Apresentando os dados adimensionalizados, utilizando-se do fator de submergência ( $S$ ), verificamos uma melhor concordância entre os resultados aqui verificados e os dados de Endres (1990), Pinheiro (1995) e Marques (1995), Figura 4.22. Pode-se dizer, analisando a pressão média, para todas as submergências estudadas, que a partir da posição adimensionalizada  $X/(Y_2 - Y_1) = 8$  os valores de pressão apresentam a tendência de se manterem constantes, evidenciando o final do ressalto hidráulico. Essa afirmação está de acordo com o verificado por Teixeira (2003) e Marques et al (1997).

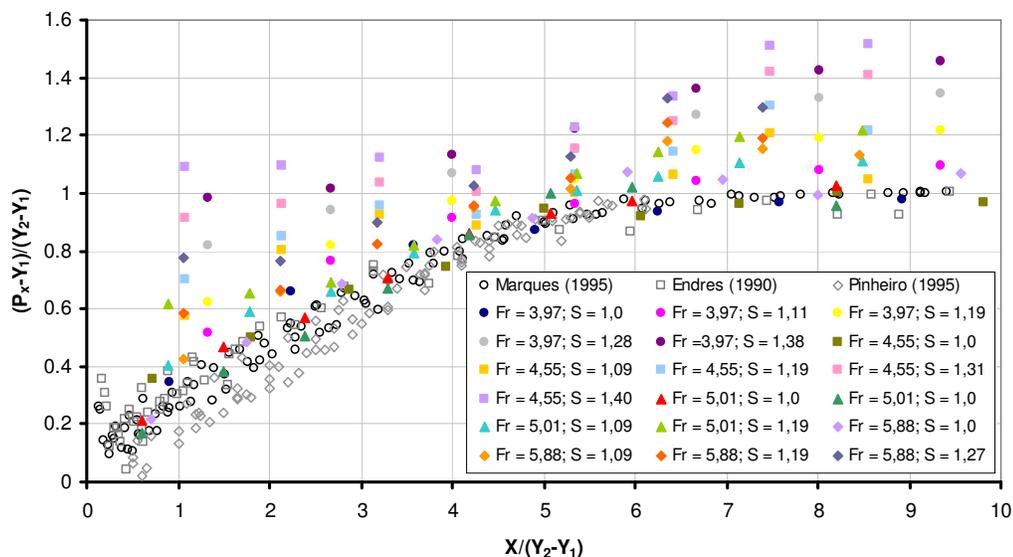


Figura 4.21 – Pressões médias adimensionalizada em função dos parâmetros hidráulicos do escoamento, comparação entre o presente estudos e resultados de outros autores.

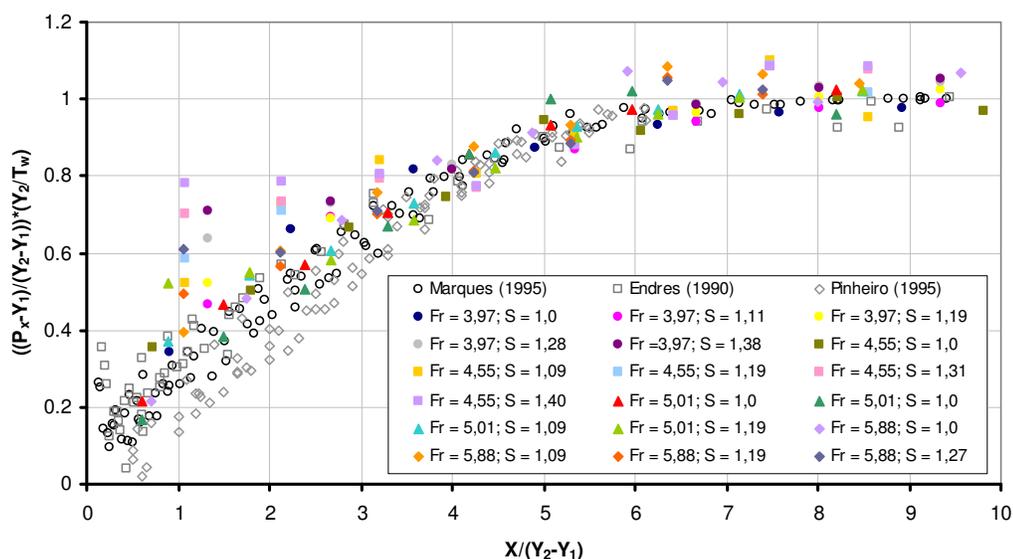


Figura 4.22– Pressões médias adimensionalizadas com a inclusão do fator de submergência ( $S=T_w/Y_2$ ), comparação entre o presente estudo e resultados de outros autores.

Verifica-se para as posições mais a montante do ressalto, especialmente antes da posição adimensionalizada  $X/(Y_2 - Y_1) = 4$ , que os valores de pressão média adimensionalizada para os ressaltos submergidos são superiores aos encontrados para o ressalto hidráulico livre e tendem a apresentar valores de pressão praticamente constantes nas proximidades da comporta de acordo com a submergência. A mudança de forma do ressalto devido ao aumento nível de

justante justifica esse comportamento. Buscou-se caracterizar esses valores constantes de pressão de acordo com o grau de submergência. Utilizou-se a distribuição longitudinal do perfil da linha d'água como uma forma de auxílio, uma vez que a sua distribuição apresentou boa concordância com os valores de pressão correspondentes (Figura 4.23)

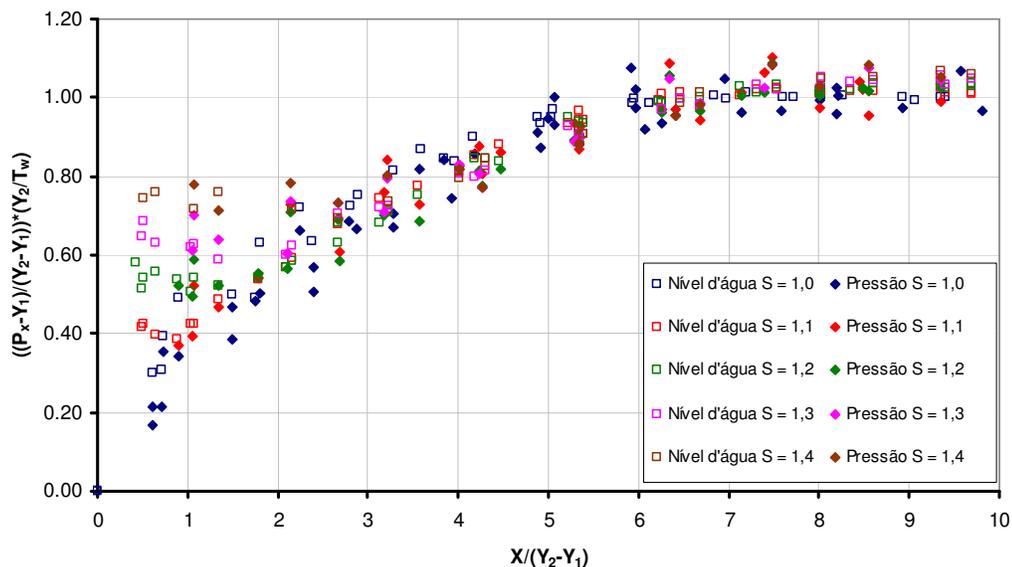


Figura 4.23 – Comparação entre a pressão média e nível d'água ao longo do ressalto.

As pressões determinadas para região de montante, consideradas como as pressões junto ao piso nas proximidades da comporta para os ressaltos hidráulicos submergidos são apresentadas na tabela abaixo, em valores aproximados, retirados a partir dos gráficos anteriormente apresentados.

Tabela 4.3 – Pressão adimensional no trecho de montante dos ressaltos submergidos.

Fator de submergência (S)	Pressão adimensional no trecho de montante ( $\Psi_c$ )
1,1	0,35
1,2	0,53
1,3	0,64
1,4	0,73

A Figura 4.24 apresenta os valores verificados de  $\Psi_c$  para diferentes coeficientes de submergência (S) e um ajuste sugerido para submergências distintas. Na busca desse ajuste

foi considerada a necessidade de atender a condição de limite para  $\Psi_C$ , isto é,  $\Psi_C = 1$  para grande valores de S, o que representaria o valor de  $\Psi_C$  igual ao da altura conjugada lenta do ressalto hidráulico. O ajuste proposto intercepta o eixo das abscissas no valor 0,07. Este é o valor da pressão média adimensional de um ressalto hidráulico livre calculado para a posição  $X/(Y_2 - Y_1) = 0$  através do ajuste apresentado pela Equação 4.18.

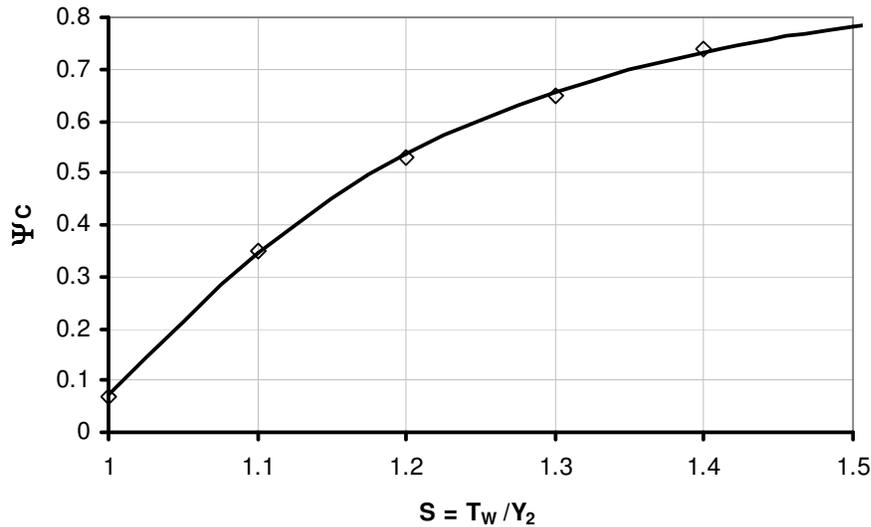


Figura 4.24 – Valores verificados para  $\Psi_C$  e ajuste sugerido a submergências distintas.

A avaliação da diferença entre as pressões médias do ressalto hidráulico submergido em relação a ressalto livre permite que se possa determinar os valores de pressão para diferentes graus de submergência através de expressões atribuídas ao ressalto livre. Procurou-se determinar a diferença entre os valores de pressão média do ressalto submergido em relação a ressalto livre através da seguinte expressão:

$$\Delta\Psi_s = \frac{\left(\frac{P_s - Y_1}{Y_2 - Y_1}\right)\left(\frac{Y_2}{T_w}\right) - \left(\frac{P_L - Y_1}{Y_2 - Y_1}\right)}{\left(\frac{P_L - Y_1}{Y_2 - Y_1}\right)} \quad 4.9$$

onde:

$\Delta\Psi_s$  = diferença relativa entre os valores da pressão média do ressalto hidráulico submergido e do ressalto hidráulico livre;

$P_s$  = pressão média verificada para o ressalto hidráulico submergido;

$P_L$  = pressão média verificada para o ressalto hidráulico livre.

No entanto, o ressalto livre e o ressalto submerso não apresentam seus inícios sobre uma mesma posição do canal, não permitindo a determinação das diferenças relativas ponto a ponto. O ressalto hidráulico livre apresenta sua seção inicial algo em torno de 4 a 5 cm a jusante da comporta, próximo à posição onde se localiza a *vena contracta* do escoamento, já a posição início do ressalto hidráulico submerso foi considerada junto à comporta. Desta forma, para o cálculo da diferença de valores entre o ressalto hidráulico submerso e o ressalto livre utilizou-se a expressão proposta por Teixeira (2003) no lugar da pressão adimensionalizada para o ressalto livre.. Assim a expressão anterior passa a ser representada por:

$$\Delta\Psi_s = \frac{\left(\frac{P_s - Y_1}{Y_2 - Y_1}\right)\left(\frac{Y_2}{Y_1}\right) - \Psi}{\Psi} \quad 4.10$$

sendo:

$\Psi$  = ajuste proposto à pressão média adimensionalizada do ressalto hidráulico livre.

Desta maneira foram quantificadas as diferenças relativas em todos os pontos medidos para ao longo dos ressaltos hidráulicos submersos, essas diferenças podem ser verificadas na Figura 4.25. Essas diferenças mostraram-se independentes ao número de Froude do escoamento, sendo funções apenas do fator de submersão e da posição adimensionalizada ao longo do ressalto hidráulico.

Percebe-se na Figura 4.25 que as diferenças entre os valores de pressão do ressalto submerso em relação ao ressalto hidráulico livre tendem a zero após a posição  $X/(Y_2 - Y_1) = 3$ , comportamento que pode ser comprovado pela Figura 4.22, onde foi verificado que, após a posição citada, os dados referentes à pressão média de ressaltos submersos apresentam distribuição praticamente igual ao ressalto hidráulico livre. As grandes diferenças verificadas na região mais a montante do ressalto hidráulico já eram esperadas, uma vez que o ressalto hidráulico submerso apresenta valores de pressão média muito maiores que o ressalto livre junto ao seu trecho inicial, vide Figura 4.22 e Tabela 4.3 apresentada anteriormente.

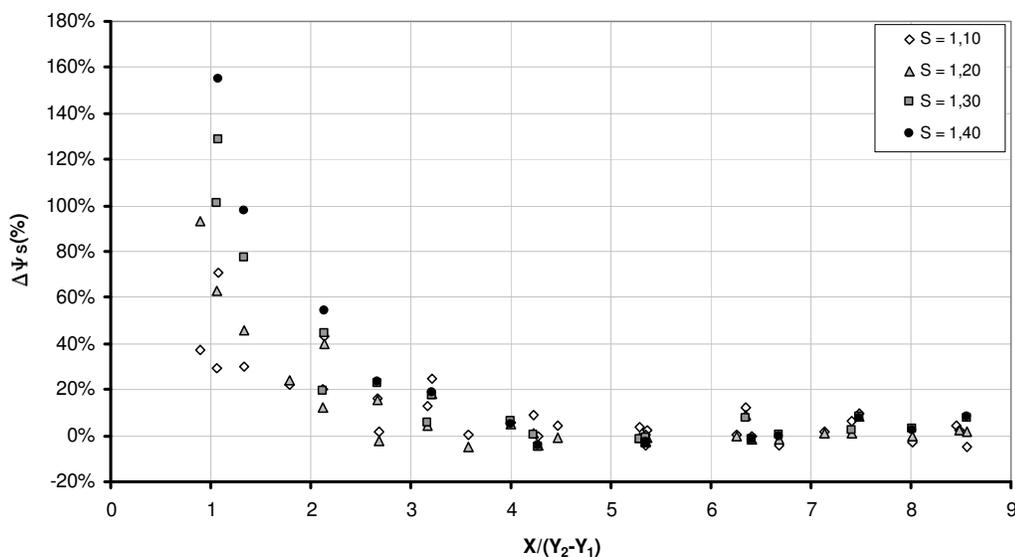


Figura 4.25 – Diferenças relativas da pressão média entre o ressalto hidráulico submerso e o ressalto hidráulico livre em função da posição longitudinal adimensionalizada.

Na busca de ajustes à distribuição longitudinal das diferenças relativas, a forma apresentada pela distribuição dos pontos da Figura 4.25 leva à utilização de expressões que sejam assintóticas ao infinito junto ao início do ressalto hidráulico e a zero junto ao seu final. Os ajustes que se mostraram mais adequados foram os do tipo potencial:

$$\Delta\Psi_s = a_1 \left( \frac{X}{Y_2 - Y_1} \right)^{b_1} \quad 4.11$$

Os coeficientes encontrados, via método de mínimos quadráticos, para o ajuste proposto de cada uma das submergências são apresentados na tabela a seguir.

Tabela 4.4 – Coeficientes da curva de ajuste potencial para as diferenças relativas da pressão média entre o ressalto hidráulico livre e submerso.

Submergência (S)	$a_1$	$b_1$	$R^2$
1,1	0,349	-1,353	0,64
1,2	0,75	-1,76	0,91
1,3	1,32	-2,046	0,95
1,4	1,795	-2,055	0,98

Para satisfazer a condição de ressalto hidráulico livre, onde teoricamente as diferenças em relação ao ajuste proposto por Teixeira (2003) seriam consideradas iguais a zero, o coeficiente  $a_1$  necessariamente deveria assumir o valor nulo para qualquer valor de  $b_1$ . Assim os coeficientes acima citados se distribuiriam de acordo com o grau de submergência como apresentado na Figura 4.26 e na Figura 4.27. Não foram propostas equações de ajuste para os coeficientes uma vez que se desconhece o valor de  $b_1$  para submergências menores que  $S = 1,1$ , assim optou-se por traçar linhas de tendência que se adequassem aos valores verificados.

Como o valor de  $b_1$  se mostrou praticamente o mesmo para as submergências  $S = 1,30$  e  $S = 1,40$ , correspondendo a  $-2,046$  e  $-2,055$  respectivamente, julgou-se que esse coeficiente apresentaria valores constantes para fatores de submergência superiores. O ajuste proposto para  $b_1$  leva em conta essa consideração.

A Figura 4.28 apresenta os ajustes propostos em comparação com as diferenças relativas para a pressão média verificadas.

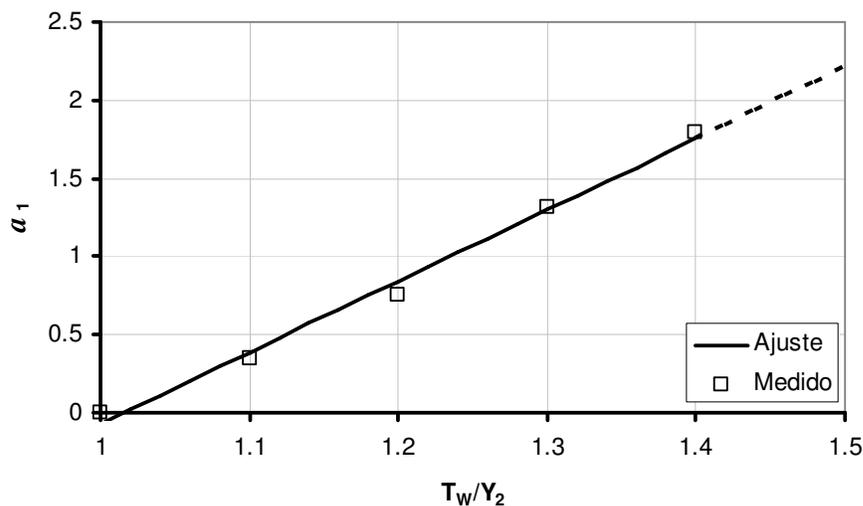


Figura 4.26 – Valores propostos para o coeficiente  $a_1$ .

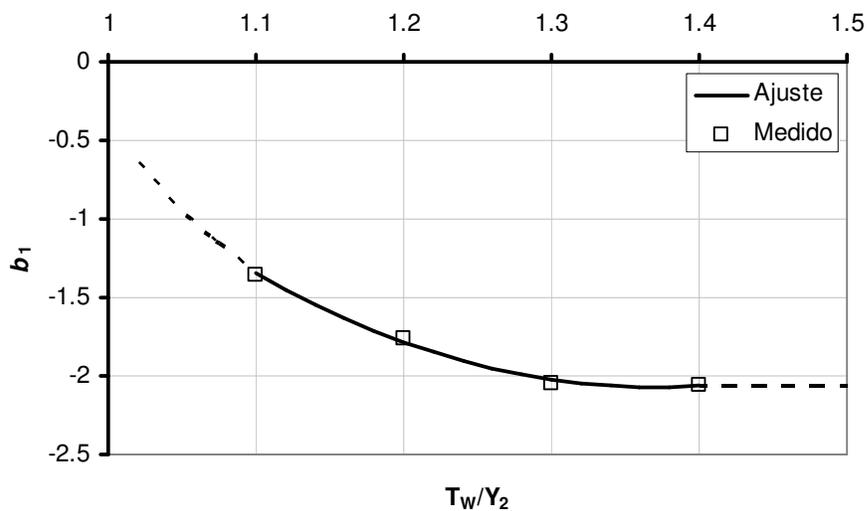


Figura 4.27 – Valores propostos para o coeficiente  $b_1$ .

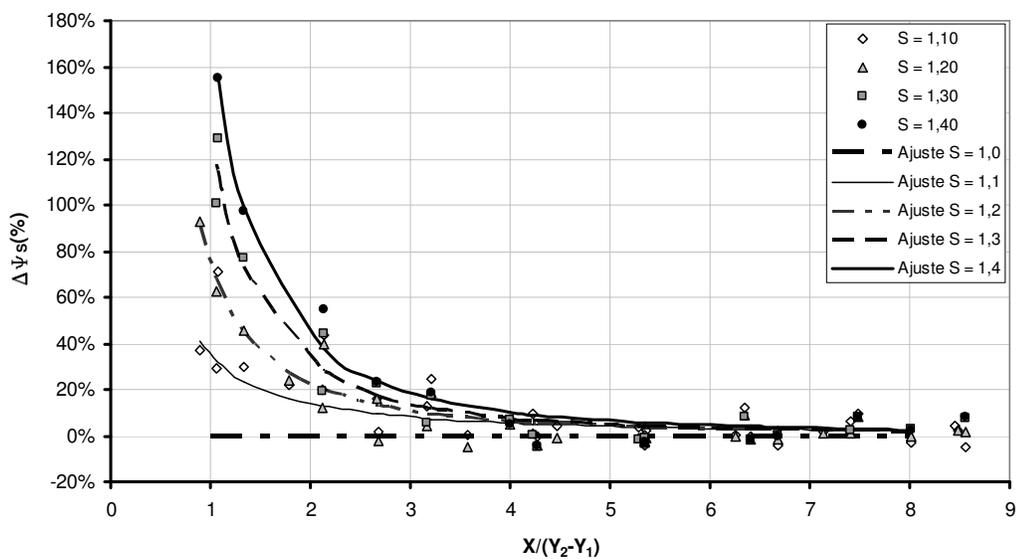


Figura 4.28 – Comparação entre as diferenças relativas de pressão média entre o ressalto hidráulico livre e submergido e os ajustes potenciais propostos.

Os ajustes propostos para as diferenças relativas da pressão média são válidos para as posições entre  $1 < X/(Y_2 - Y_1) < 8$ .

#### 4.4.2 Flutuação de pressão (desvio padrão das amostras de pressão)

De maneira semelhante ao descrito no item anterior, aqui serão apresentados e comparados os comportamentos das distribuições da flutuação de pressão (desvio padrão das amostras de pressão) para diferentes submergências.

A Figura 4.29 apresenta o desvio padrão da amostra de pressão adimensionalizado segundo a proposta de Marques et al (1997) apresentada na *Revisão Bibliográfica*.

Verifica-se que os dados referentes aos ressalto hidráulicos submergidos encontram-se distantes dos apresentados por esse estudo para o ressalto livre a jusante de uma comporta, e por outros autores para o ressalto hidráulico livre a jusante de um vertedouro, principalmente em sua parte mais a jusante. A inclusão do fator de submergência (S), proposto por Marques et al (1999), se faz novamente necessária. A Figura 4.30 apresenta a adimensionalização do desvio padrão considerando a inclusão desse fator.

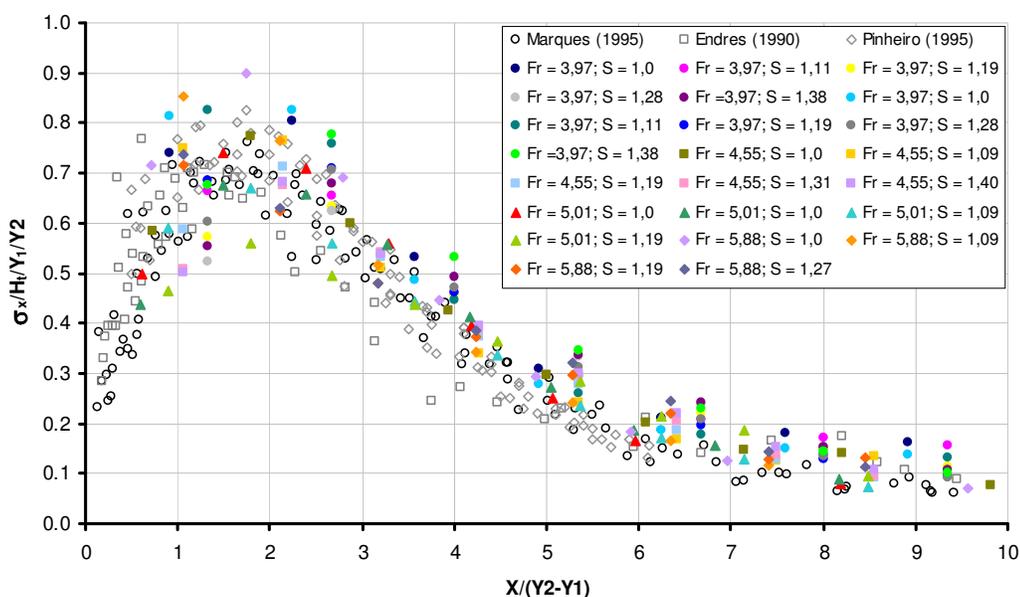


Figura 4.29 – Desvio padrão das amostras de pressão adimensionalizado em função dos parâmetros hidráulicos do escoamento, comparação entre este estudo e os resultados de outros autores.

Com a inclusão do fator de submergência os dados referentes aos ressalto submergidos se distribuem conforme o verificado para os resultados dos ressalto hidráulicos livres na região mais a jusante. Na parte de montante do ressalto hidráulico, junto à posição de maior flutuação, os valores verificados para o ressalto hidráulico submergido tendem a ser inferiores ao ressalto livre. Essa diferença aparentemente aumenta à medida que o fator de

submergência ( $S$ ) cresce. Nota-se, para as submergências iguais a  $S = 1,3$  e  $1,4$ , que os valores de desvio padrão adimensionalizados conforme a metodologia proposta tendem a ser iguais junto às posições de maior flutuação de pressão.

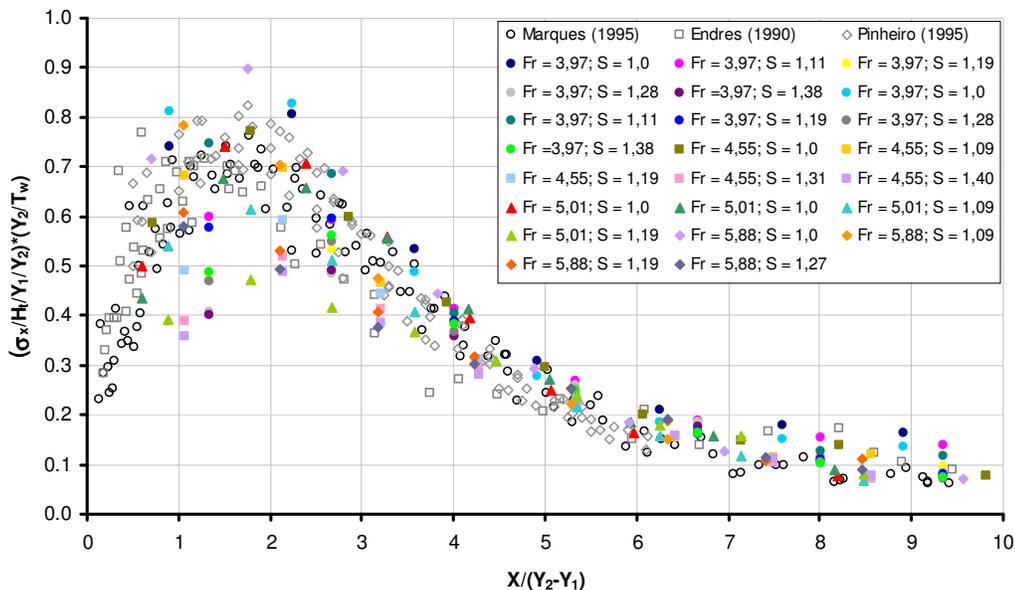


Figura 4.30 – Desvio padrão das amostras adimensionalizados com a inclusão do fator de submergência ( $S=T_w/Y_2$ ), comparação com os resultados de outros autores.

A adimensionalização da flutuação de pressão utilizando-se como parâmetro o coeficiente de flutuação de pressão ( $C_p$ ), muito difundida na bibliografia, permite a comparação dos resultados com outros autores, além de permitir a avaliação de comportamentos distintos aos verificados pela adimensionalização anteriormente proposta. A mudança de metodologia de adimensionalização apresentada aqui visa à comparação do comportamento com autores distintos dos anteriormente mencionados.

Adimensionalizando os valores de desvio padrão da amostra de pressão pelo coeficiente de flutuação de pressão ( $C_p$ ) pode-se verificar, para um número de Froude constante, que a submergência eleva os valores de flutuação de pressão para posições a jusante de  $X/Y_1 = 15$ , conforme verificado por Lopardo et al (2004b). Na região a montante ( $X/Y_1 < 10$ ) não é claro um comportamento característico. Entretanto, pode-se afirmar que o ressalto hidráulico submerso apresenta valores maiores do coeficiente de flutuação de pressão. Conforme Lopardo et al (2004b) esse comportamento pode ser atribuído pela formação de um par de vórtices de eixo vertical a jusante da comporta, verificados por Long et al (1990). A Figura 4.31 ilustra a distribuição do coeficiente de flutuação de pressão para diversas submergências e número de Froude ( $Fr_1$ ) igual a 4,55.

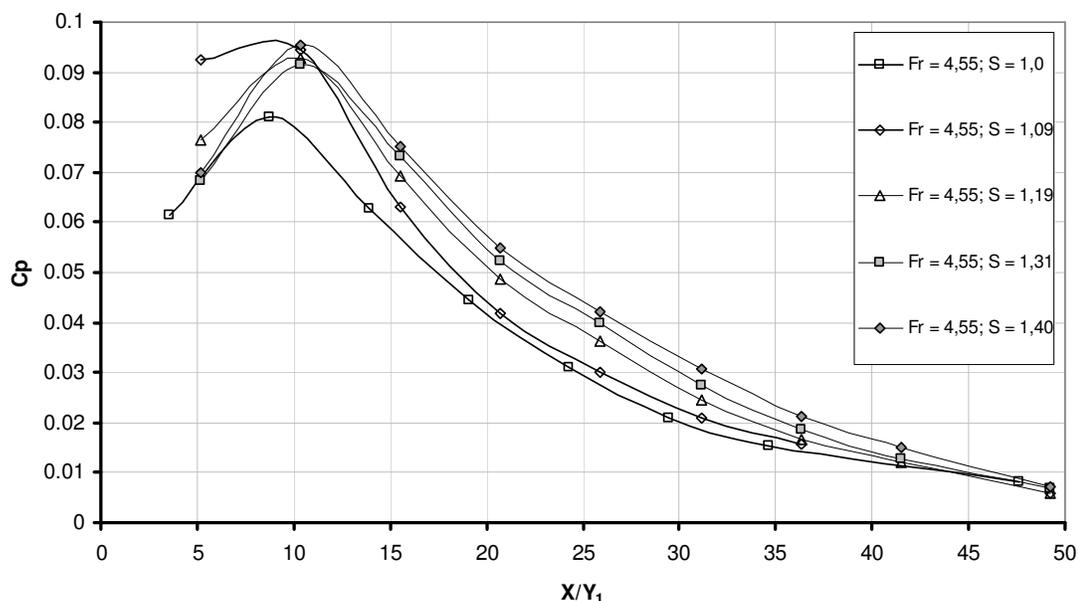


Figura 4.31 – Valores do coeficiente de flutuação de pressão para diversas submergências e  $Fr_1=4,55$ .

Quando mantido o fator de submergência ( $S$ ) constante, pode-se avaliar o efeito do número de Froude sobre a flutuação de pressão em um ressalto hidráulico a jusante de uma comporta, Figura 4.32. Nota-se claramente que à medida que se aumenta o número de Froude, os valores do coeficiente de flutuação de pressão tornam-se mais elevados para posições do ressalto hidráulico maiores que  $X/Y_1 = 30$ , equivalente a  $X/(Y_2 - Y_1) = 5,40$ . Segundo Lopardo et al (2004b), o comportamento para a região de montante do ressalto,  $X/Y_1 < 10$  ou  $X/(Y_2 - Y_1) = 1,75$ , deveria ser o inverso, mostrando o coeficiente de flutuação de pressão crescendo com a diminuição do valor do número de Froude de ingresso, entretanto, não se pode verificar esse comportamento para todos os graus de submergência. A Figura 4.32 apresenta a variação do coeficiente de flutuação de pressão em função do número de Froude para um fator de submergência de, aproximadamente,  $S = 1,20$ .

A Figura 4.33 apresenta a comparação dos resultados desse estudo com os dados apresentados por Lopardo et al (2004a) e Lopardo et al (2004b), para estudos de flutuação de pressão a jusante de comporta. Verifica-se que os resultados do presente trabalho apresentam valores maiores para o coeficiente de flutuação de pressão.

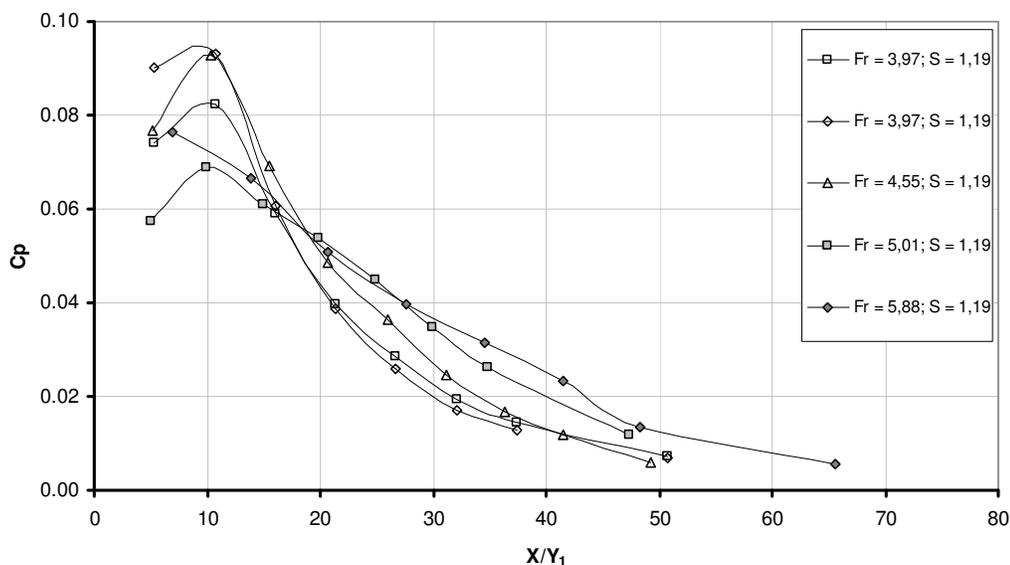


Figura 4.32 – Valores do coeficiente de flutuação de pressão para diversos números de Froude com submergência  $S = 1,19$ .

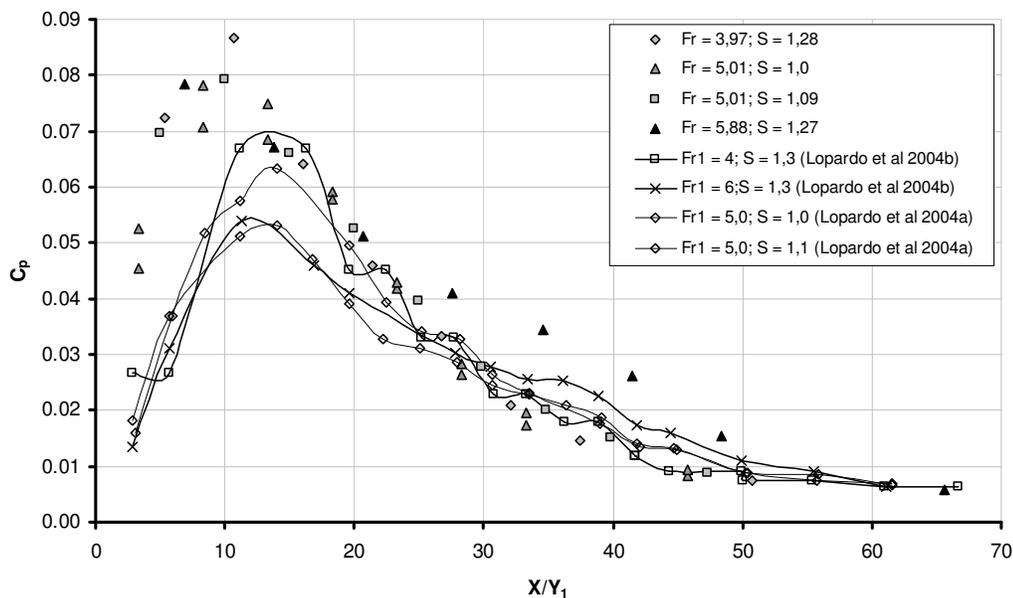


Figura 4.33 – Comparação da flutuação de pressão adimensionalizada na forma do coeficiente de flutuação de pressão ( $C_p$ ) do presente estudo com os dados apresentados por Lopardo et al (2004a) e Lopardo et al (2004b).

Analisando-se o caráter prático dessas afirmações, pode-se dizer que o afogamento de uma bacia de dissipação acarretaria o aumento do coeficiente de flutuação de pressão junto ao fundo, em posições mais a jusante, entretanto, não afetaria de mesma forma a região de

montante do ressalto. O aumento do número de Froude produziria flutuações de pressão maiores junto ao final da bacia de dissipação.

A inclusão do fator de submergência, seguindo a adimensionalização proposta por Marques et al (1999) não permite que as observações apresentadas anteriormente para o coeficiente de flutuação de pressão sejam verificadas. Entretanto, tal adimensionalização apresenta uma característica muito interessante, possibilita o agrupamento de dados, permitindo ajustar expressões algébricas aos dados experimentais.

Como a utilização do fator de submergência (S) visa à uniformização de resultados de ressaltos hidráulicos livres e submergidos, todos os resultados de flutuação de pressão desse estudo foram comparados com as expressões determinadas para o ressalto livre. Mostrou-se que os dados apresentam boa concordância com a expressão representada pelo Ajuste B, com um coeficiente de determinação  $R^2 = 0,92$ , entretanto para a região de validade do Ajuste A verificou-se um baixíssimo valor para o coeficiente de determinação,  $R^2 = 0,11$ .

De maneira análoga à pressão média, procurou-se determinar as diferenças relativas para o desvio padrão da amostra de pressão entre o ressalto hidráulico livre e submergido. A determinação dessas diferenças tem o objetivo de criar uma metodologia que permita prever o valor da flutuação de pressão para diferentes graus de submergência e conseqüentemente, prever valores extremos de pressão com a utilização de informações sobre a distribuição do coeficiente estatístico de distribuição de probabilidade e o conhecimento dos valores médios de pressão.

Como apresentado para a pressa média, as diferenças relativas referentes ao desvio padrão são expressas da seguinte maneira:

$$\Delta\Omega_s = \frac{\left(\frac{\sigma_s}{H_t} \frac{Y_2}{Y_1}\right) \left(\frac{Y_2}{T_w}\right) - \left(\frac{\sigma_L}{H_t} \frac{Y_2}{Y_1}\right)}{\left(\frac{\sigma_L}{H_t} \frac{Y_2}{Y_1}\right)} \quad 4.12$$

onde:

$\Delta\Omega_s$  = diferença relativa entre o desvio padrão do ressalto hidráulico submergido e do ressalto hidráulico livre;

$\sigma_s$  = desvio padrão verificado para o ressalto hidráulico submergido;

$\sigma_L$  = desvio padrão verificado para o ressalto hidráulico livre.

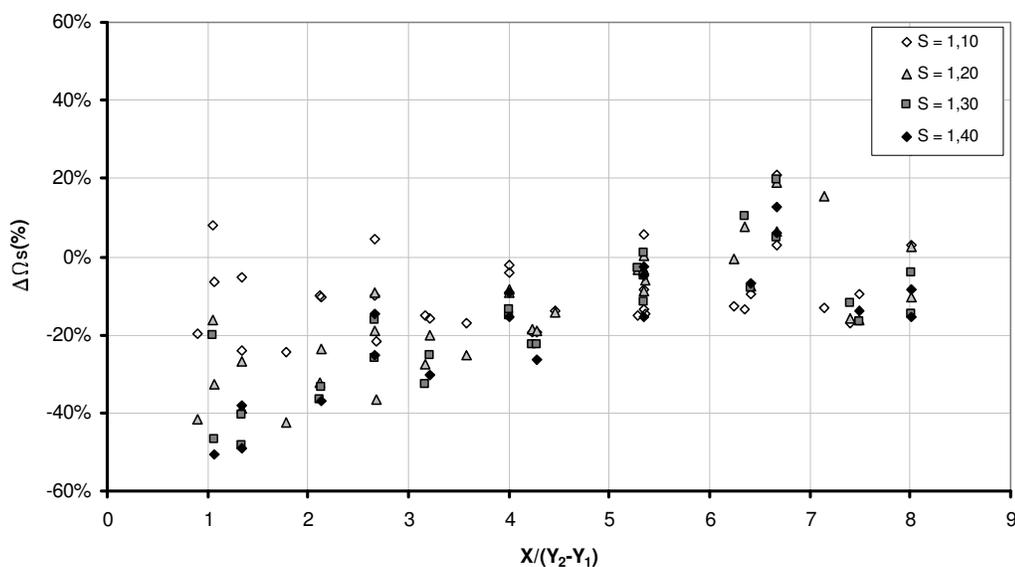
Devido à impossibilidade de determinar as diferenças relativas ponto a ponto, foram utilizadas as expressões ajustadas para o desvio padrão da amostra de pressão adimensionalizado conforme Marques et al (1999) para caracterizar os valores referentes ao ressalto hidráulico livre. Desta forma a expressão anterior passa a ser descrita conforme:

$$\Delta\Omega_s = \frac{\left(\frac{\sigma_s}{H_t} \frac{Y_2}{Y_1}\right) \left(\frac{Y_2}{T_w}\right) - \Omega}{\Omega} \quad 4.13$$

onde:

$\Omega$  = ajuste proposto para o desvio padrão da amostra de pressão do ressalto hidráulico livre.

A Figura 4.34 apresenta a diferença relativa entre o desvio padrão entre ressalto hidráulico submerso e o ressalto hidráulico livre.



*Figura 4.34 - Diferenças relativas do desvio padrão entre o ressalto hidráulico submerso e o ressalto hidráulico livre em função da posição longitudinal adimensionalizada.*

Aparentemente, a primeira vista as diferenças relativas referentes ao desvio padrão não apresentam um comportamento definido, entretanto verificou-se que um simples ajuste através de expressões polinomiais de primeiro grau caracterizam satisfatoriamente o comportamento verificado na Figura 4.34.

$$\Delta\Omega_s = a_2 \left( \frac{X}{Y_2 - Y_1} \right) + b_2 \quad 4.14$$

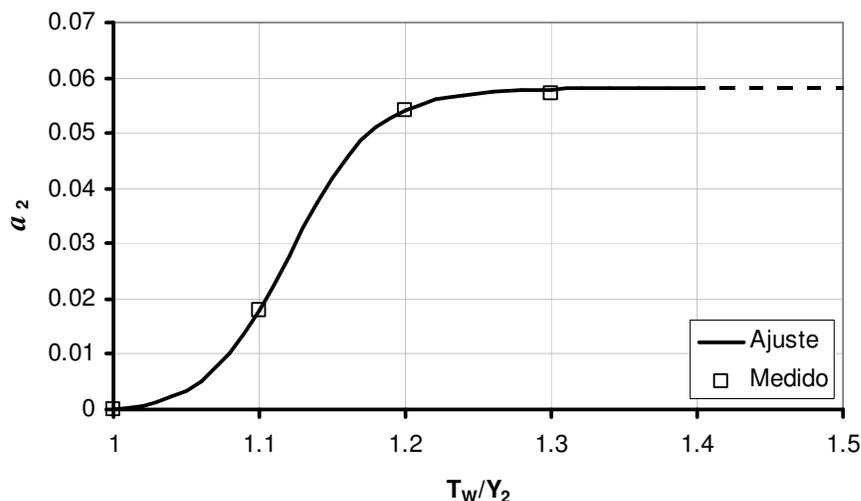
Os coeficientes dos ajustes lineares determinados para cada uma das submergências são apresentados na Tabela 4.5.

*Tabela 4.5 - Coeficientes do ajuste linear das diferenças relativas do desvio padrão entre o ressalto hidráulico livre e submergido*

Submergência (S)	$a_2$	$b_2$	$R^2$
1,1	0,0178	-0,1639	0,11
1,2	0,0542	-0,3773	0,59
1,3	0,0571	-0,4224	0,58
1,4	0,0589	-0,4481	0,62

Para satisfazer a condição de contorno, isto é, o ressalto hidráulico livre, os coeficientes  $a_2$  e  $b_2$  devem ser iguais a zero, pois as diferenças em relação ao ajuste proposto são consideradas teoricamente nulas.

A Figura 4.35 e a Figura 4.36 apresentam os coeficientes  $a_2$  e  $b_2$  em função do fator de submergência (S) juntamente com as tendências sugeridas para os valores intermediários de submergência. Verificou-se na Tabela 4.5 que os valores de  $a_2$  e  $b_2$  aparentemente se tornam constantes à medida que aumenta o grau de afogamento do ressalto, necessitando de estudos com ressaltos hidráulicos com fator de submergências maiores para confirmar essa tendência.



*Figura 4.35 - Valores propostos para o coeficiente  $a_2$ .*

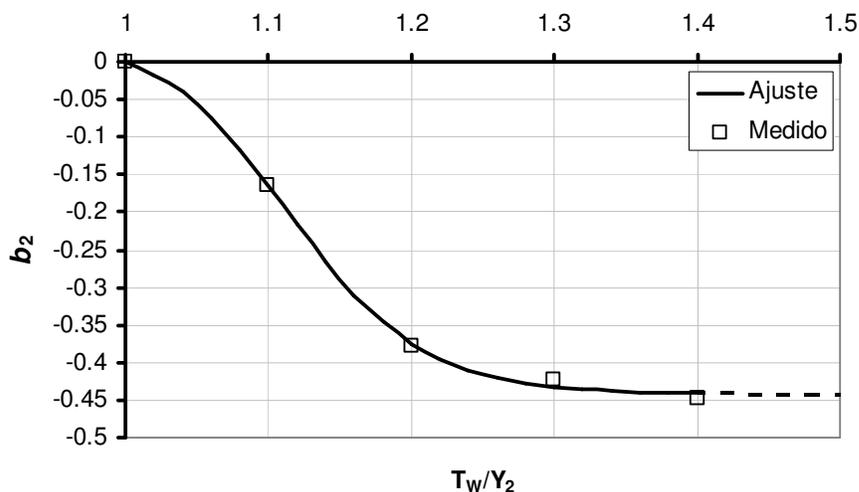


Figura 4.36 - Valores propostos para o coeficiente  $b_2$ .

Os ajustes propostos para a diferença relativa para o desvio padrão são apresentados na Figura 4.37 comparados com os valores verificados.

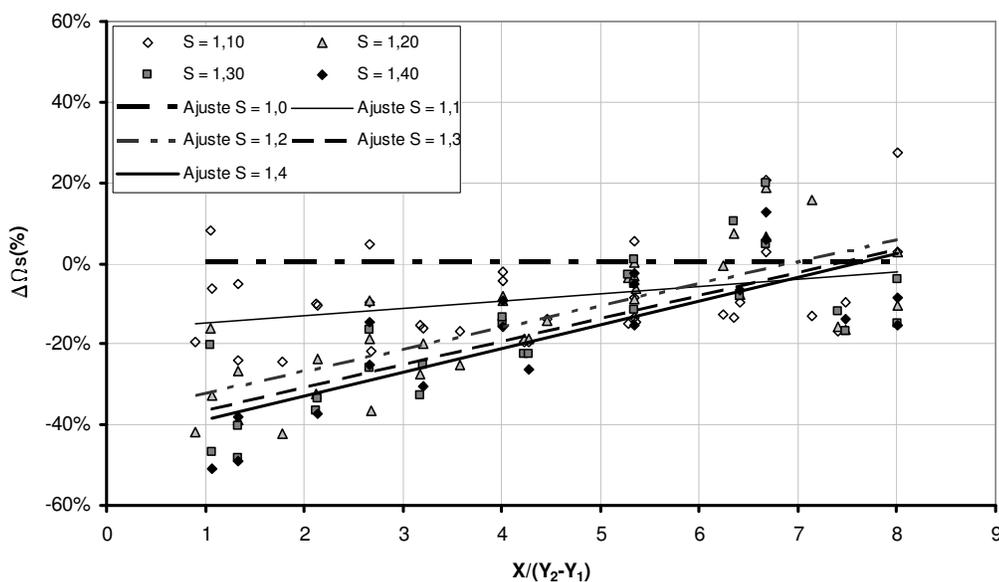


Figura 4.37 - Comparação entre as diferenças relativas do desvio padrão entre o ressalto hidráulico livre e submerso e os ajustes potenciais propostos.

Os ajustes propostos para as diferenças relativas do desvio padrão são válidos para as posições entre  $1 < X/(Y_2 - Y_1) < 8$ .

#### 4.4.3 Coeficiente de Assimetria

Para verificar o comportamento do coeficiente de assimetria com diferentes fatores de submergência será apresentado o comportamento desse parâmetro ao longo do ressalto hidráulico da mesma forma como representado para o desvio padrão da amostra. A Figura 4.38 apresenta a distribuição do coeficiente de assimetria ao longo do ressalto hidráulico para todas as condições de ensaio. Verifica-se pela Figura 4.38 que o comportamento do coeficiente de assimetria para o ressalto hidráulico a jusante de uma comporta com diferentes submergências apresenta uma distribuição semelhante à verificada para o ressalto livre a jusante de comporta e de vertedouros. As posições de início de separação do escoamento, de final do rolo e final da dissipação de energia (final do ressalto) se mostram bem caracterizadas como já discutido nos itens sobre o coeficiente de flutuação, coeficiente de assimetria e coeficiente de curtose para o ressalto hidráulico livre.

Analisando a Figura 4.38, aparentemente os valores verificados para os ressaltos submergidos variam menos em torno do valor nulo, se comparados com os dados de ressalto hidráulico livre. Lopardo et al (2004b) verificou que os ressaltos hidráulicos submergidos apresentam uma distribuição aparentemente mais próxima da gaussiana que os ressaltos hidráulicos livres. O autor também comenta que o aumento da submergência tende a manter o coeficiente de assimetria mais constante. Para avaliar essas afirmações, é interessante verificar o comportamento do coeficiente de assimetria para diferentes fatores de submergência, mantendo-se o número de Froude constante. A Figura 4.39 apresenta o comportamento do coeficiente de assimetria para diversas submergência com número de Froude ( $Fr_1$ ) igual a 4,55.

Nota-se, avaliando a Figura 4.39, que junto ao início do ressalto,  $X/(Y_2-Y_1) < 2,0$ , para os fator de submergência  $S = 1,2$  a  $S = 1,4$  o coeficiente de assimetria assume valores inferiores aos verificados para o ressalto hidráulico livre e para o ressalto com submergência  $S = 1,1$ . Esse fato evidenciaria uma menor influência dos valores superiores à média sobre a função de densidade de probabilidade da amostra, se comparada com as situações menos afogadas. Como os valores para as submergências mais elevadas apresentam valores mais próximos de zero, suas distribuições podem ser consideradas mais próxima à gaussiana se comparadas com a do ressalto livre, confirmando o que foi afirmado por Lopardo et al (2004b). Entretanto, junto ao final do ressalto para posições  $X/(Y_2-Y_1) > 6,0$ , esse comportamento parece se inverter, tendo as assimetrias atribuídas às menores submergências valores mais próximos do valor nulo. O comportamento descrito foi verificado para praticamente todos os números de Froude analisados.

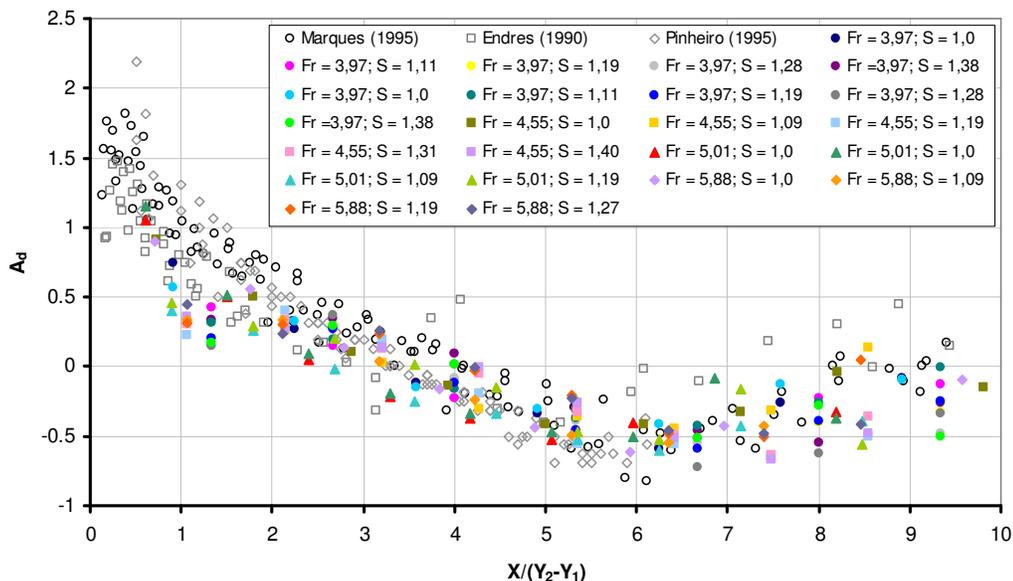


Figura 4.38 – Distribuição longitudinal do coeficiente de assimetria para diferentes níveis de submergência, comparação entre o presente estudo e os resultados de Endres (1990), Marques (1995) e Pinheiro (1995).

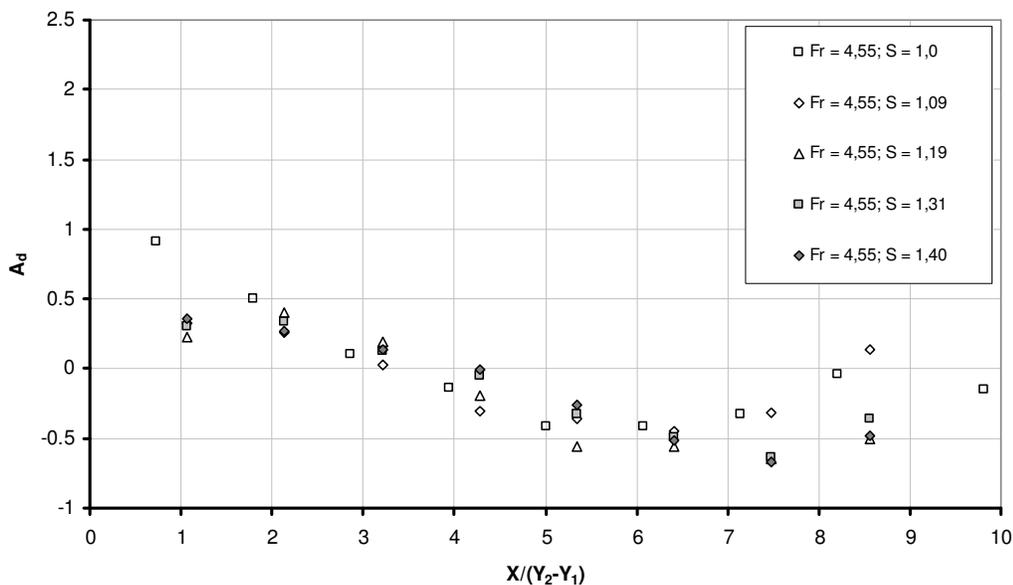


Figura 4.39 – Distribuição longitudinal do coeficiente de assimetria para diferentes níveis de submergência,  $Fr_1 = 4,55$ .

Lopardo et al (2004b) afirmou que as distribuições de pressões de ressaltos hidráulicos submergidos apresentam um comportamento mais parecido com uma distribuição normal, que

as referentes a ressaltos hidráulicos livres, sua análise se estendeu até a posição,  $X/(Y_2 - Y_1) = 6,0$ , final do ressalto hidráulico segundo Smetana (1934).

Quanto à avaliação referente a influência do número de Froude, isto é, mantendo-se submergência constante, não se verificou um comportamento distinto, como pode ser analisado na Figura 4.40.

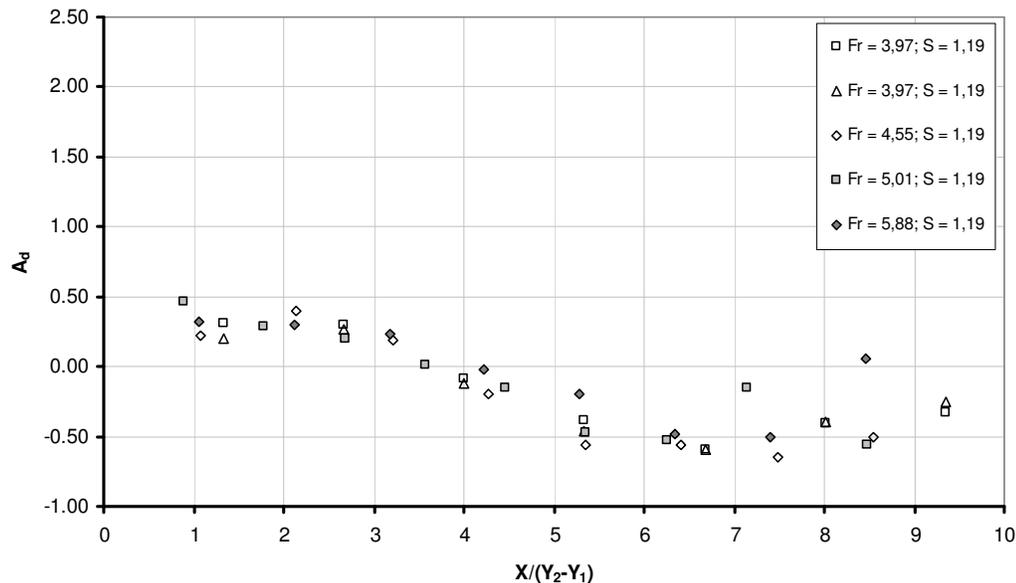


Figura 4.40 - Distribuição longitudinal do coeficiente de assimetria para diferentes número de Froude e fator de submergência  $S = 1,19$ .

#### 4.4.4 Coeficiente de Curtose

Como já mencionado anteriormente, o coeficiente de curtose é uma indicação da concentração dos valores em torno da média. A Figura 4.41 apresenta a distribuição do coeficiente de curtose para os ensaios realizados comparados com resultados para ressaltos hidráulicos livres a jusante de vertedouro. Ao analisar a figura a seguir pode-se verificar que os resultados experimentais desse estudo se encontram coerentes com o comportamento verificado por outros autores para o ressalto hidráulico livre a jusante de vertedouros, confirmando as afirmações feitas para a situação de ressalto livre, discutidas anteriormente.

Entretanto, o ressalto hidráulico submergido apresenta valores de curtose um pouco superiores aos ressaltos livres para a região após o final do rolo,  $X/(Y_2 - Y_1) = 6,0$ , podendo assim apresentar uma distribuição de probabilidades um pouco distinta, com dados menos concentrados em torno da média. A Figura 4.42 ilustra a distribuição do coeficiente de curtose

para diferentes submergências para o número de Froude ( $Fr_1$ ) igual a 4,55, onde pode ser verificada a influência devido à submergência descrita anteriormente.

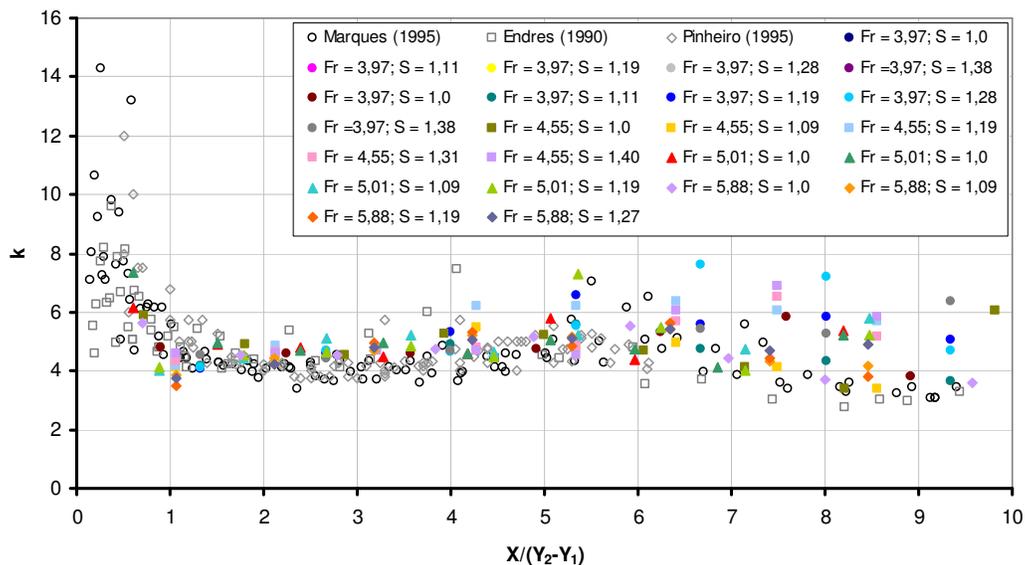


Figura 4.41 - Distribuição longitudinal do coeficiente de curtose para diferentes níveis de submergência, comparação entre o presente estudo e os resultados de Endres (1990), Marques (1995) e Pinheiro (1995).

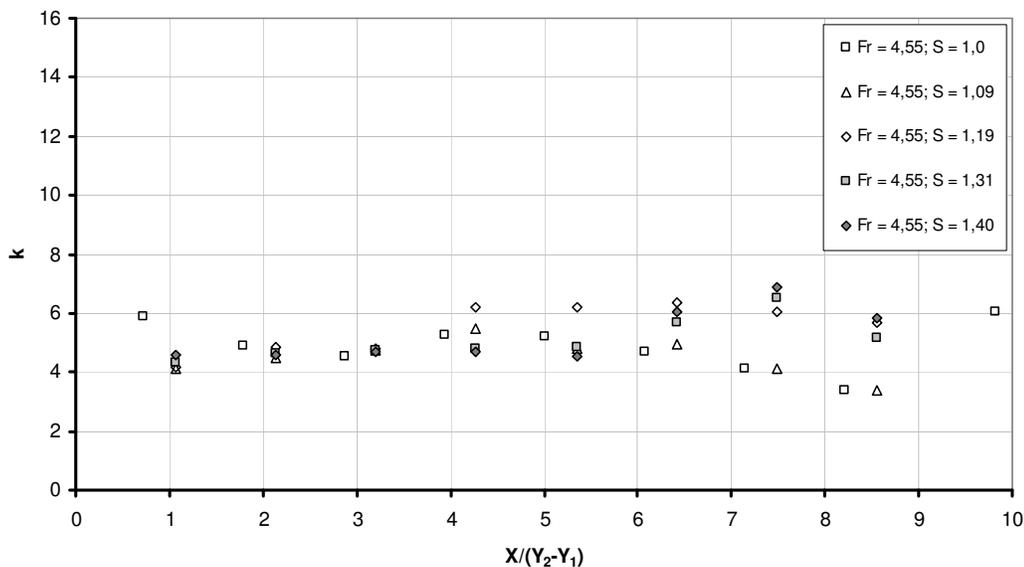


Figura 4.42 - Distribuição longitudinal do coeficiente de curtose para diferentes níveis de submergência,  $Fr_1 = 4,55$ .

Aparentemente a distribuição longitudinal do coeficiente de curtose não apresenta tendências em função do número de Froude incidente ( $Fr_1$ ). Como pode ser visto na Figura

4.43 para os dados de uma mesma submergência com diferentes números de Froude se distribuem de forma aleatória dentro de uma nuvem.

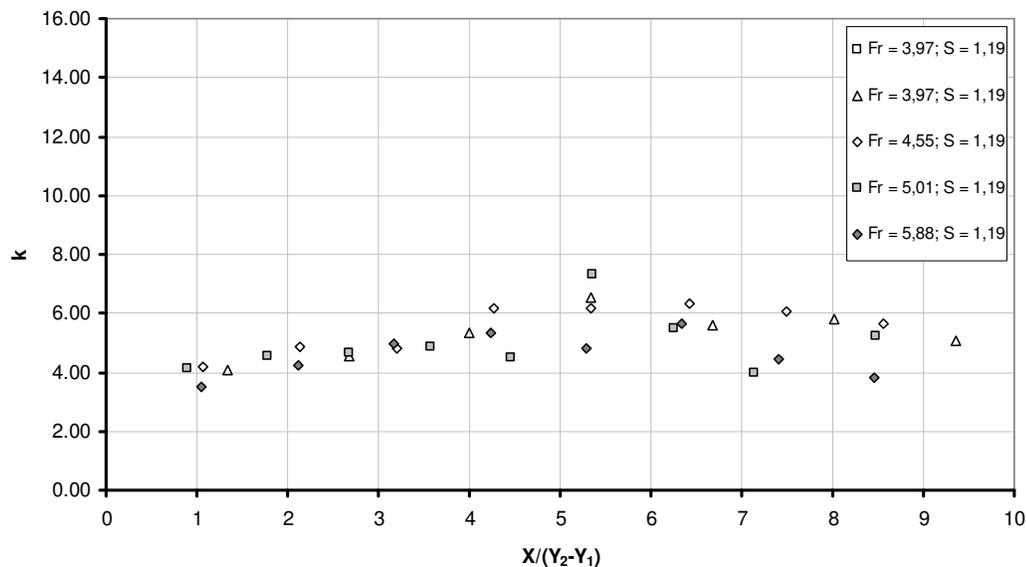


Figura 4.43 - Distribuição longitudinal do coeficiente de curtose para diferentes números de Froude e para uma submergência,  $S = 1,20$ .

#### 4.4.5 Espectro de energia das flutuações de pressão

A partir dos ensaios realizados, com o auxílio do aplicativo Matlab, utilizando técnicas apropriadas para transformadas de Fourier, foram determinadas as funções de densidade espectral das flutuações de pressão.

Verificou-se que o aumento da submergência não afeta a distribuição de energia ao longo do domínio das frequências, independentemente do nível de submergência os picos dos espectros posicionam-se praticamente sobre as mesmas frequências. Diferenças são observadas junto às tomadas mais a montante (início do ressalto). Essa afirmação não está de acordo com o verificado por Pinto et al (1998) que afirmam que, de um modo geral, o aumento da submergência diminui as frequências de pico do espectro. Vale lembrar que Pinto et al (1998) desenvolveram seu trabalho para um ressalto hidráulico formado a jusante de vertedouro e não consideraram a mudança de posição do início do ressalto devido ao aumento da submergência. Dessa forma o sinal medido por um determinado sensor representaria posições distintas no interior do ressalto à medida que altera o afogamento do ressalto. O aumento da submergência desloca o ressalto formado a jusante de um vertedouro

para montante, sobre o paramento do vertedouro, dessa maneira um sensor localizado em uma posição qualquer da bacia de dissipação passaria a medir pressões relacionadas a posições mais a jusante no ressalto hidráulico, se comparado com uma medição com inferior submergência. Notou-se a tendência de diminuição das frequências de pico à medida que se afasta do início do ressalto, comportamento já verificado em referências da bibliografia, podendo-se citar como exemplo o próprio trabalho de Pinto et al (1998). A Figura 4.44 e a Figura 4.45 apresentam a função de densidade espectral para duas posições distintas no ressalto hidráulico. Verifica-se que a energia do escoamento se concentra de forma distinta. Na Figura 4.44 os valores máximos do espectro de energia estão próximos a frequência de 6 Hz para os ressaltos submergido e 4 Hz para o ressalto hidráulico livre, já para a Figura 4.45, que representa posições logo após ao final do rolo, os valores dos picos de energia posicionam-se praticamente sobre o eixo das ordenadas.

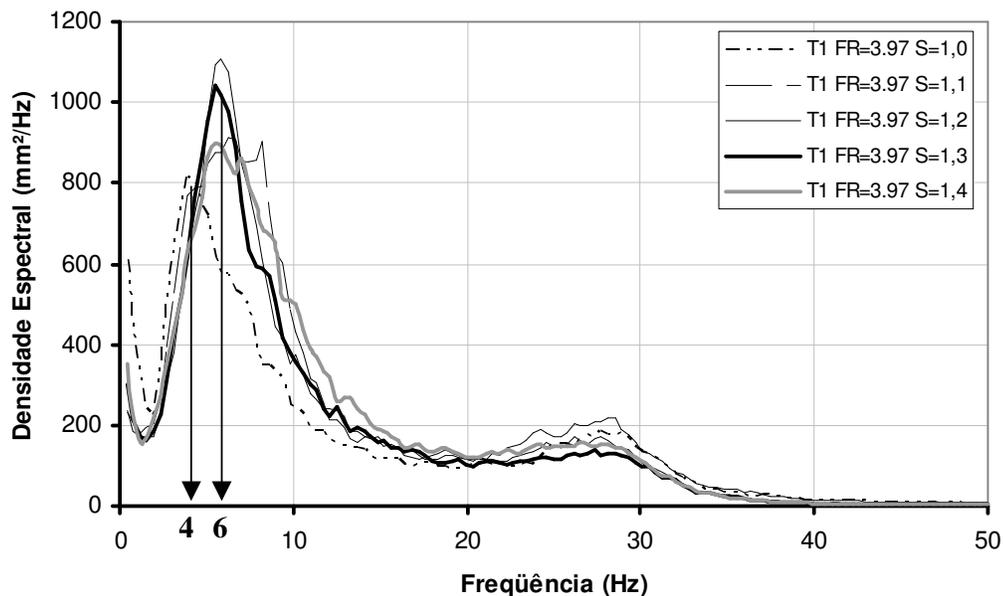


Figura 4.44 – Função de densidade espectral das flutuações de pressão da primeira tomada de pressão (transdutor T1),  $X/(Y_2 - Y_1) = 0,91$  para o ressalto hidráulico livre e  $X/(Y_2 - Y_1) = 1,33$  para os ressaltos submergidos,  $Fr_1 = 3,97$ .

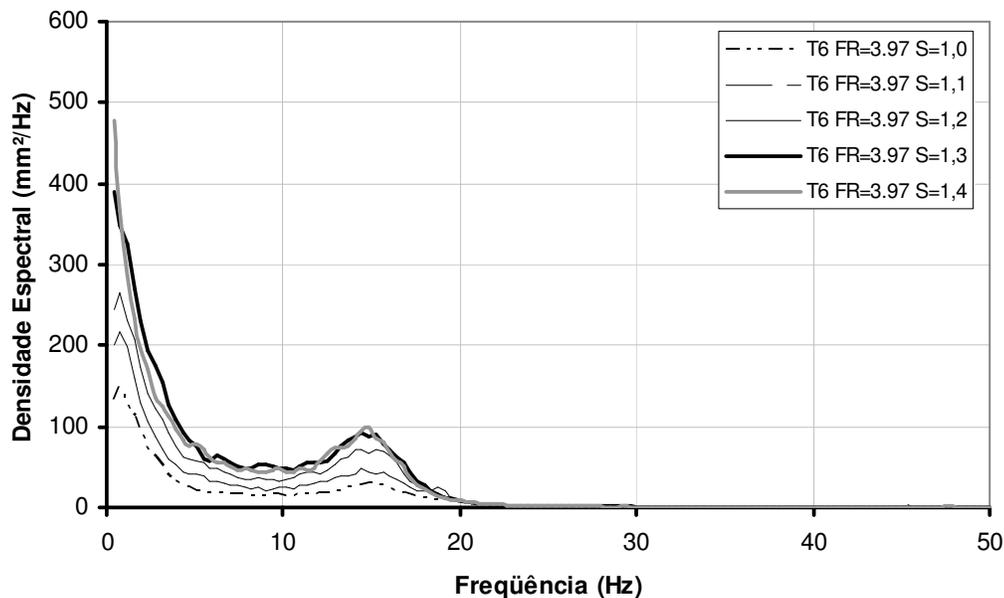


Figura 4.45 - Função de densidade espectral da flutuações de pressão da quinta tomada de pressão (transdutor T6),  $X/(Y_2-Y_1)=6,25$  para o ressalto hidráulico livre e  $X/(Y_2-Y_1)=6,68$  para os ressaltos submergidos,  $Fr_1 = 3,97$ .

Verifica-se, pela análise das Figuras anteriores, que os ressaltos submergidos apresentam valores de energia superiores ao ressalto livre, esse comportamento pode estar associado à formação de um par de vórtices a jusante da comporta, verificado por Long et al (1990) e citado por Lopardo et al (2004b), e também ao próprio afogamento do ressalto.

#### 4.4.6 Coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades (N) para o ressalto hidráulico submergido a jusante de um comporta

Como apresentado por Teixeira (2003), 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 abaixo:

$$P_{\%} = P_x \pm N \cdot \sigma_x \quad 4.15$$

onde:

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

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

$\sigma_x$  = desvio padrão da amostra de pressão em um determinado ponto do ressalto hidráulico.

O valor do coeficiente N é 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. Desta forma a determinação da distribuição longitudinal do coeficiente N é de suma importância para a utilização da metodologia de previsão de valores de pressão.

Foram determinados os valores do coeficiente estatístico N para as probabilidades 0,1%, 1%, 5%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 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 4.46 apresenta a distribuição longitudinal do coeficiente de distribuição de probabilidades para os ressaltos hidráulicos estudados.

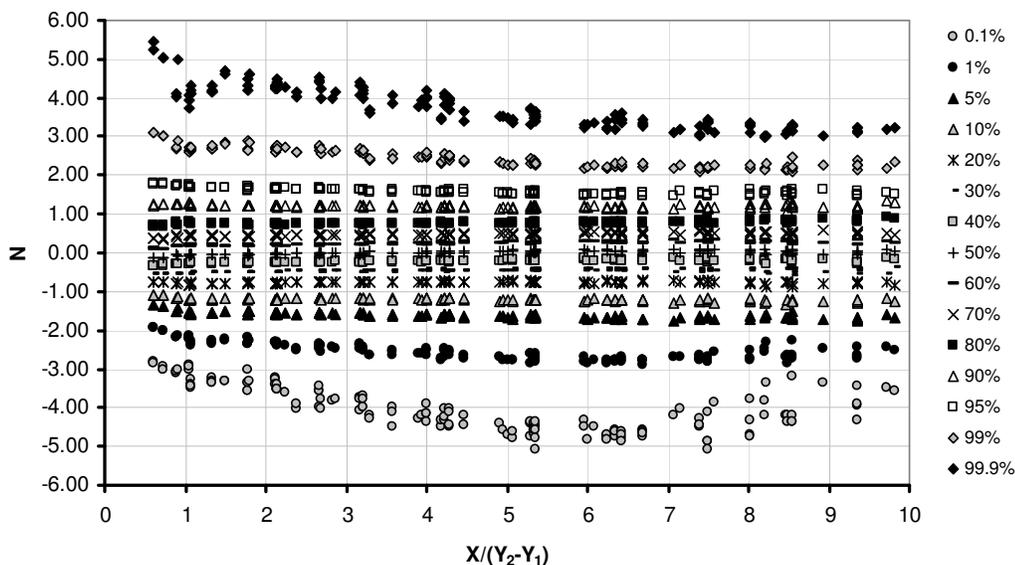


Figura 4.46 – Distribuição longitudinal do coeficiente estatístico (N) em função da posição relativa ao início do ressalto hidráulico.

Teixeira (2003) relata que a distribuição longitudinal do coeficiente N apresenta a tendência de ajuste a um polinômio de segundo grau (Equação 4.16). Essa afirmação também foi confirmada pelos dados experimentais aqui apresentados.

$$N = a \left( \frac{X}{Y_2 - Y_1} \right)^2 + b \left( \frac{X}{Y_2 - Y_1} \right) + c \quad 4.16$$

A análise dos resultados mostrou que a distribuição do coeficiente N não apresenta variações consideráveis em relação ao fator de submergência para a quase totalidade das probabilidades estudadas. Notou-se uma diferença considerável para a probabilidade de 99,9%, onde a distribuição do coeficiente para os ressalto submergido se afasta da tendência verificada para o ressalto livre em posições a montante de  $X/(Y_2 - Y_1) = 2$ . Cabe lembrar que 0,1% e 99,9% correspondem a apenas 90 pontos em uma amostra de 15 minutos aquisitadas a 100 Hz (90.000 pontos medidos).

As Figura 4.47 aFigura 4.52 apresentam a distribuição longitudinal do coeficiente estatístico N para as pressões com probabilidade de 0,1%, 1%, 5%, 95%, 99%, 99,9% e os ajustes propostos para os dados. Para a probabilidade de 99,9% são apresentados dois ajustes, o primeiro é válido para posições a jusante de  $X/(Y_2 - Y_1) = 2$  para todas a submergências e para montante dessa posição no caso do ressalto livre, já o segundo ajuste é valido para os ressalto hidráulicos submergidos para posições a montante de  $X/(Y_2 - Y_1) = 2$ .

A Tabela 4.6 apresenta os coeficientes dos polinômios de segundo grau ajustados para cada uma das probabilidades estudadas, as Figuras 4.49 a 4.51 apresentam a distribuição dos coeficientes dos polinômios ajustados em função da probabilidade de ocorrência, esses dados são comparados com o resultados obtidos por Teixeira (2003) para os dados de Endres (1990).

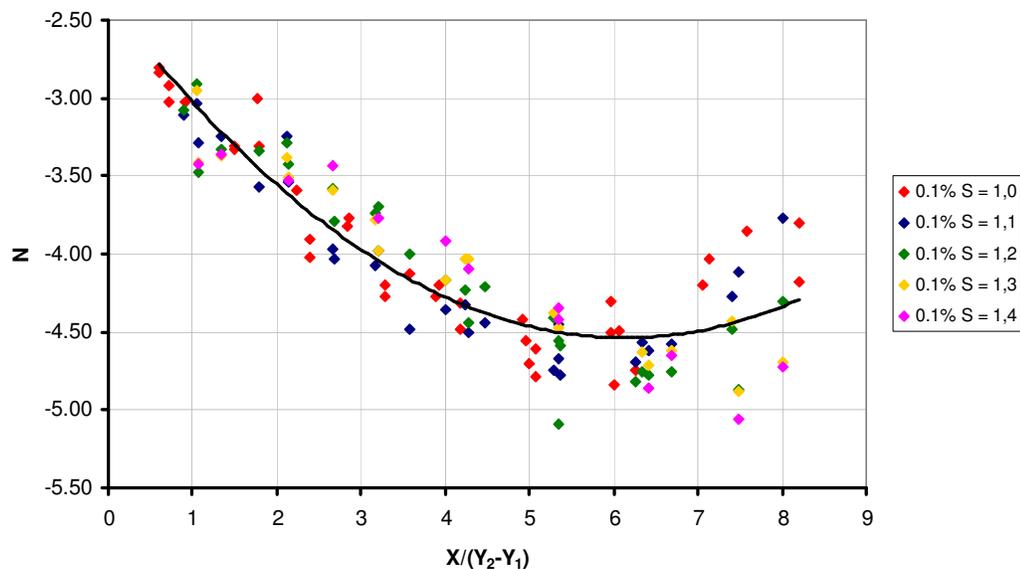


Figura 4.47 – Ajuste proposto para a distribuição do coeficiente estatístico N para a probabilidade de 0,1%.

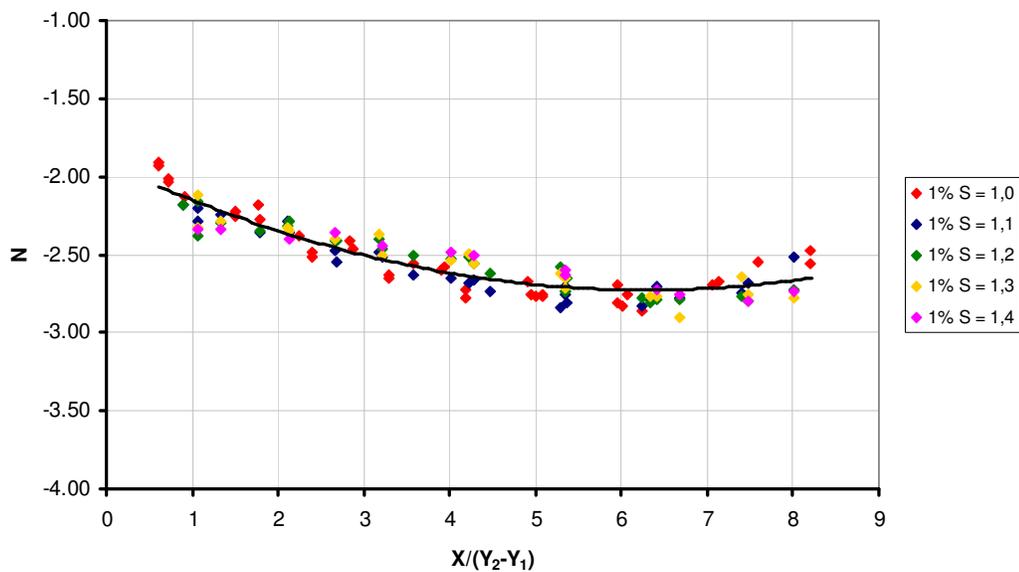


Figura 4.48 - Ajuste proposto para a distribuição do coeficiente estatístico  $N$  para a probabilidade de 1%.

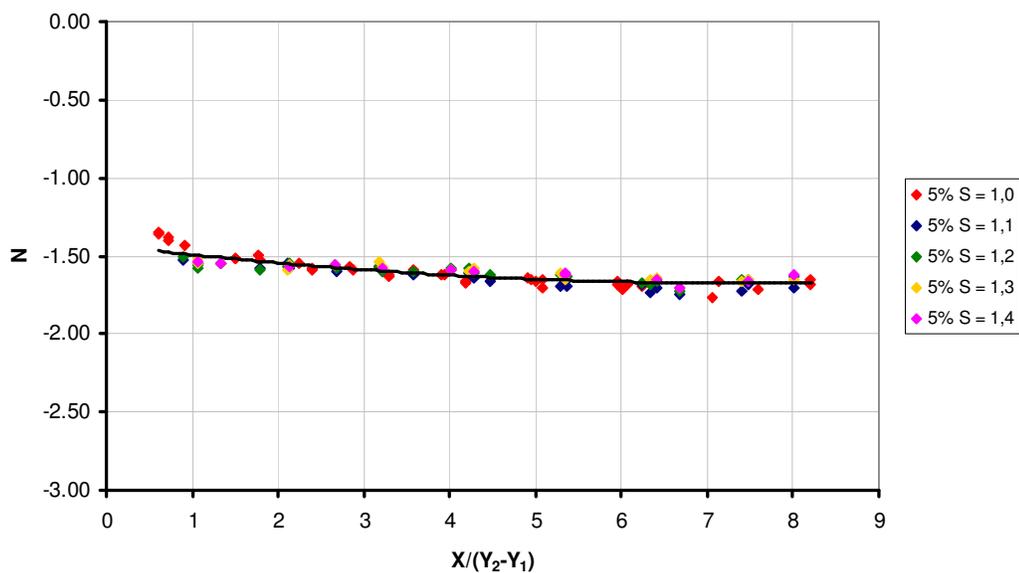


Figura 4.49 - Ajuste proposto para a distribuição do coeficiente estatístico  $N$  para a probabilidade de 5%.

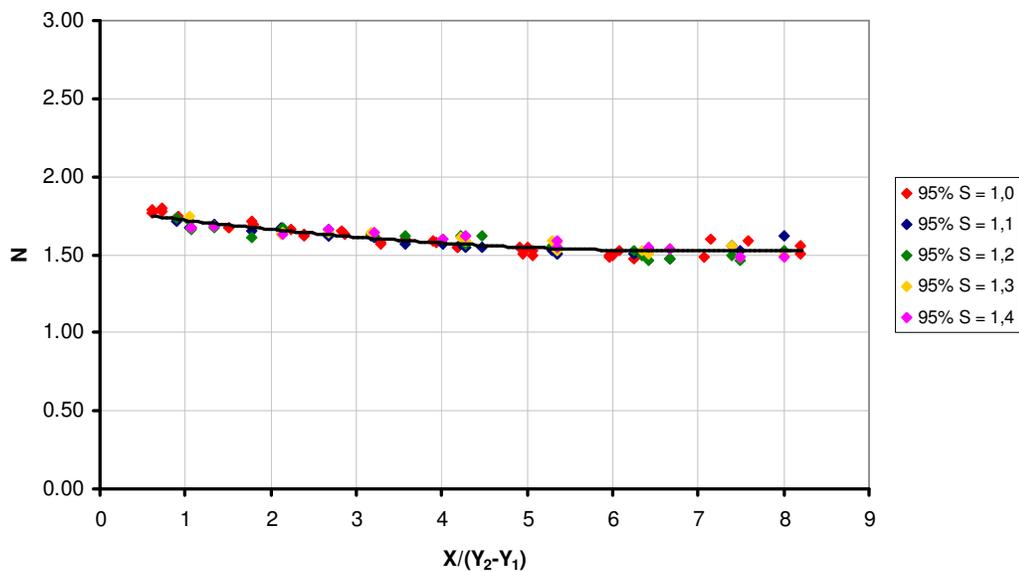


Figura 4.50 - Ajuste proposto para a distribuição do coeficiente estatístico  $N$  para a probabilidade de 95%.

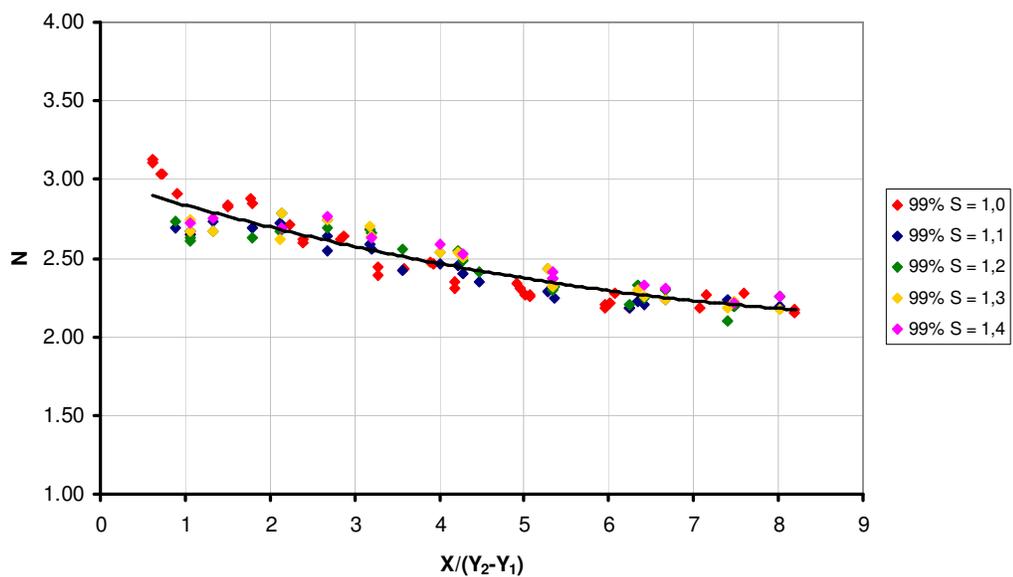


Figura 4.51 - Ajuste proposto para a distribuição do coeficiente estatístico  $N$  para a probabilidade de 99%.

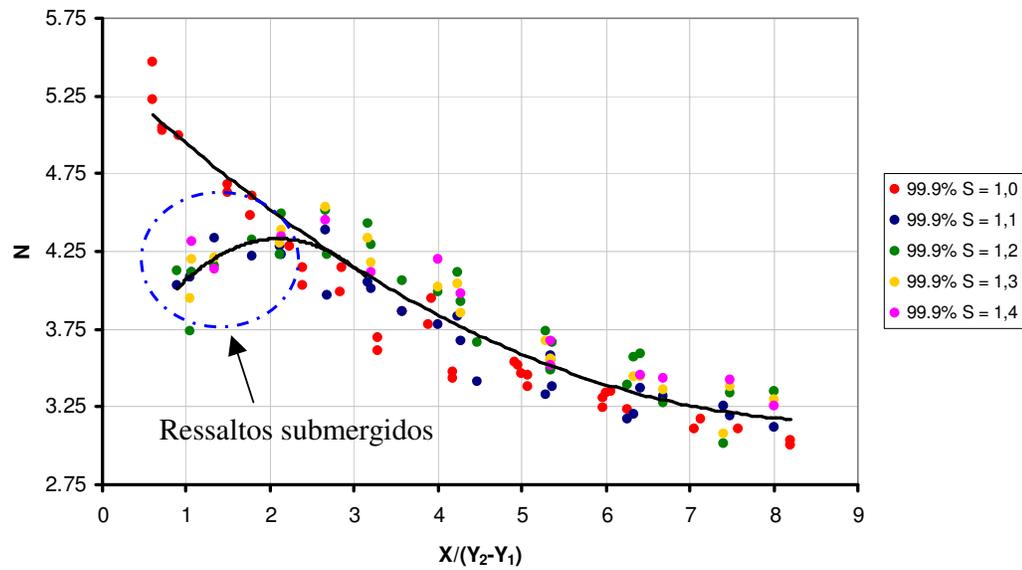


Figura 4.52 - Ajuste proposto para a distribuição do coeficiente estatístico  $N$  para a probabilidade de 99,9%.

Tabela 4.6 – Coeficientes dos polinômios de ajuste para o coeficiente estatístico de distribuição de probabilidade ( $N$ ).

Probabilidade de Ocorrência	a	b	c	R <sup>2</sup>	Validade do ajuste
99,9%	0,0291	-0,5144	5,4314	0,90	$S=1$ e $0 \leq X/(Y_2-Y_1) \leq 8$
	-0,2214	0,9267	3,3617	0,47	$S > 1$ e $2,7 \leq X/(Y_2-Y_1) \leq 8$
99%	0,0076	-0,1618	2,9913	0,86	$S \geq 1$ e $0 \leq X/(Y_2-Y_1) \leq 8$
95%	0,0052	-0,0745	1,7901	0,82	
90%	0,0029	-0,0333	1,274	0,46	
80%	0,0011	-0,0009	0,7458	0,40	
70%	-0,0012	0,0248	0,3967	0,65	
60%	-0,0014	0,0304	0,1358	0,75	
50%	-0,003	0,0437	-0,1108	0,77	
40%	-0,0033	0,0447	-0,3324	0,73	
30%	-0,0034	0,0403	-0,562	0,69	
20%	-0,0025	0,0264	-0,817	0,32	
10%	0,000013	-0,01	-1,1613	0,42	
5%	0,0045	-0,0663	-1,4298	0,75	
1%	0,0205	-0,2583	-1,9128	0,84	
0,1%	0,0574	-0,7041	-2,3775	0,82	

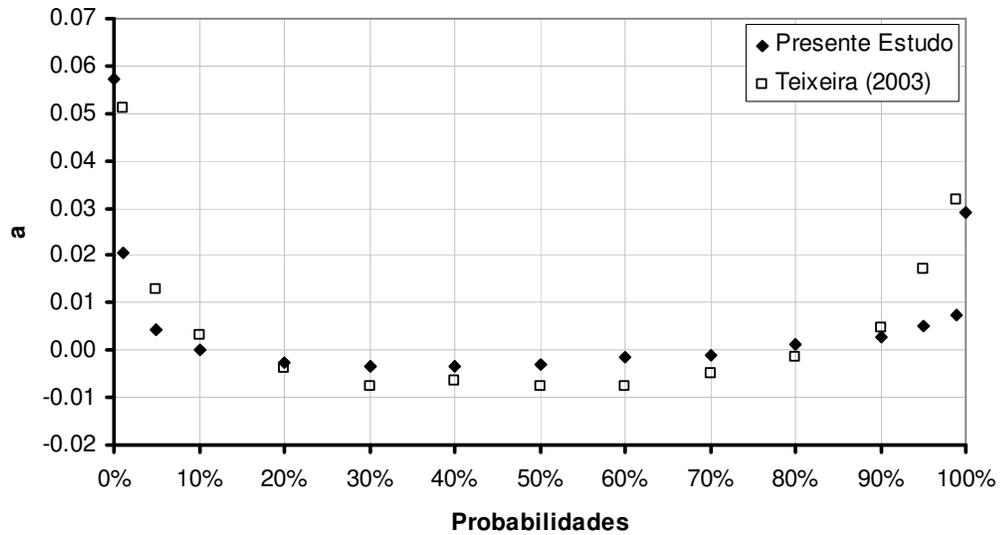


Figura 4.53 – Coeficiente  $a$  da equação utilizada para a determinação do valor do coeficiente estatístico de distribuição de probabilidade ( $N$ ).

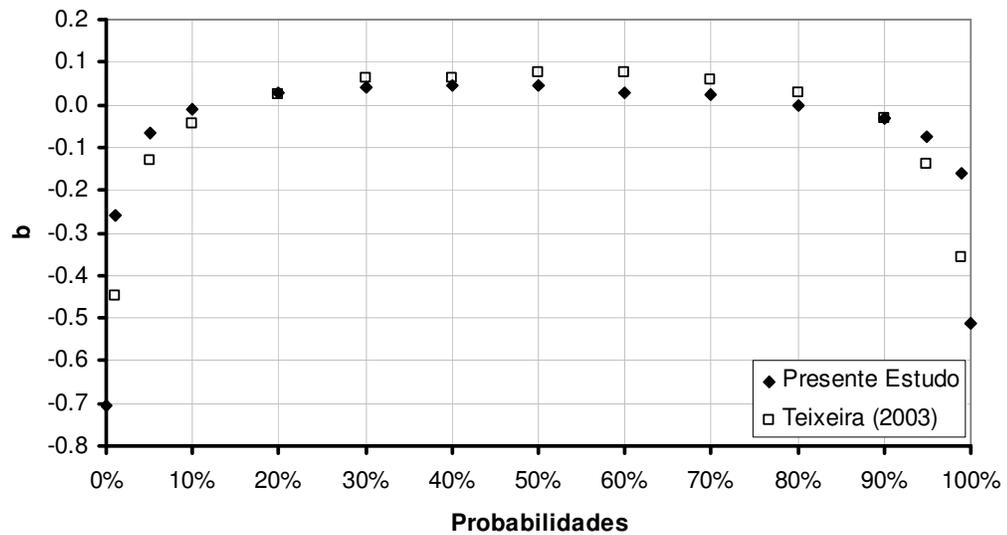


Figura 4.54 – Coeficiente  $b$  da equação utilizada para a determinação do valor do coeficiente estatístico de distribuição de probabilidade ( $N$ ).

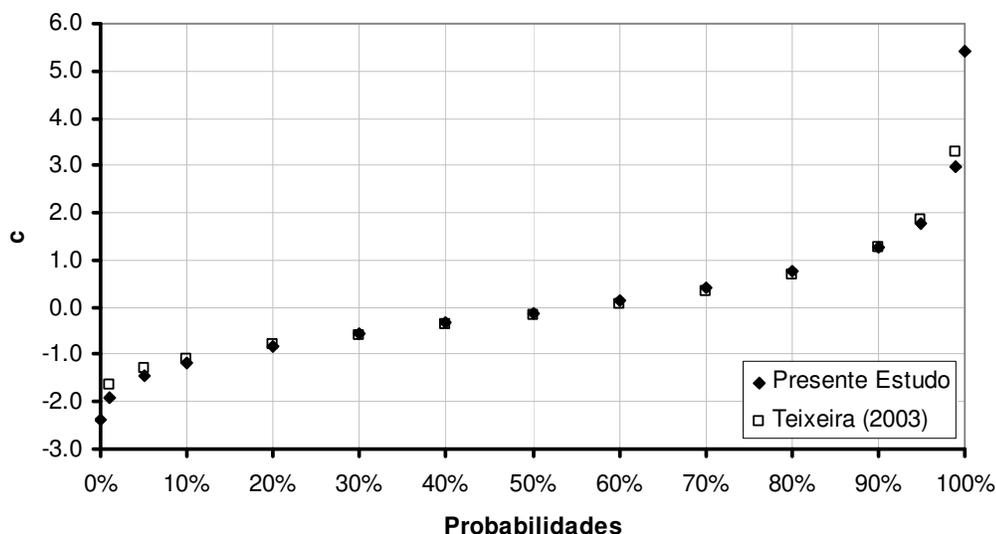


Figura 4.55 – Coeficiente  $c$  da equação utilizada para a determinação do valor do coeficiente estatístico de distribuição de probabilidade ( $N$ ).

Verifica-se pela comparação entre os valores dos coeficientes do polinômio de ajuste proposto para a determinação do coeficiente estatístico ( $N$ ) que estes não apresentam grande variação em função da condição de formação do ressalto hidráulico, a jusante de comporta (presente estudo) e a jusante de vertedouro (Teixeira 2003, obtidos dos dados de Endres 1990). As maiores diferenças foram verificadas para o coeficiente  $a$ . Para esse coeficiente, o presente estudo encontrou valores inferiores aos verificados por Teixeira (2000) junto às pressões extremas, por sua vez, os valores encontrados junto ao centro da distribuição são superiores aos verificados pelo autor.

#### 4.5 Previsão de valores de pressão para diferentes probabilidades de ocorrência e graus de submersão

Conforme já mencionado na *Revisão Bibliográfica*, pode-se determinar pressões com diferentes probabilidades de ocorrência através do conhecimento da pressão média, do desvio padrão e do coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades ( $N$ ) utilizando-se a seguinte expressão:

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

4.17

onde:

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

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

$\sigma_x$  = desvio padrão da amostra de pressão em um determinado ponto do ressalto hidráulico.

No caso do ressalto hidráulico submerso devem ser levados em conta os efeitos da submersão sobre os parâmetros da equação anterior.

A pressão média no caso do ressalto submerso pode ser descrita como combinação da pressão média de um ressalto hidráulico livre e a efeito da submersão na forma de diferenças relativas entre o caso submerso e livre. Desta maneira, na forma adimensional, a pressão média para o ressalto hidráulico submerso é descrito através da seguinte expressão:

$$\Psi_s = (1 + \Delta\Psi_s) \Psi \quad 4.18$$

$\Psi_s$  = pressão média adimensionalizada para o ressalto hidráulico submerso;

$\Psi$  = pressão média adimensionalizada para o ressalto hidráulico livre

$\Delta\Psi_s$  = diferença relativa entre as pressões adimensionalizadas do ressalto hidráulico submerso e do ressalto hidráulico livre;

No caso do desvio padrão a mesma afirmação se mostra válida, sendo a expresso para o caso do ressalto hidráulico submerso através da expressão abaixo:

$$\Omega_s = (1 + \Delta\Omega_s) \Omega \quad 4.19$$

onde:

$\Omega_s$  = expressão de ajuste para o desvio padrão adimensionalizado da amostra para o ressalto hidráulico submerso;

$\Omega$  = expressão de ajuste para o desvio padrão adimensionalizado da amostra para o ressalto hidráulico livre;

$\Delta\Omega_s$  = diferença relativa entre o desvio padrão adimensionalizado do ressalto hidráulico submerso e do ressalto hidráulico livre;

Se mostra interessante a utilização de expressões de ajuste aos parâmetros utilizados para descrever a pressão média e o desvio padrão adimensionalizados para o ressalto hidráulico submergido. Essas expressões são de simples utilização, dependendo apenas do conhecimento de coeficientes em função do grau de submergência, permitindo a determinação de valores de pressão em todo o domínio do ressalto hidráulico,  $0 \leq X/(Y_2 - Y_1) \leq 8$ . As expressões utilizadas são apresentadas a seguir:

Pressão média para o ressalto livre:

$$\Psi = -0,015 \cdot \Gamma^2 + 0,237 \cdot \Gamma + 0,07 \quad 4.20$$

Desvio padrão da amostra de pressão:

$$\Omega = -0,2166 \cdot \Gamma^2 + 0,7404 \cdot \Gamma + 0,185 \quad (\text{Ajuste A}) \quad 4.21$$

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

$$\Omega = 0,0187 \cdot \Gamma^2 + 0,2998 \cdot \Gamma + 1,3235 \quad (\text{Ajuste B}) \quad 4.22$$

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

onde:

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

Diferença relativa entre as pressões adimensionalizadas do ressalto hidráulico submergido e do ressalto hidráulico livre:

$$\Delta\Psi_s = a_1 \left( \frac{X}{Y_2 - Y_1} \right)^{b_1} \quad 4.23$$

Diferença relativa entre o desvio padrão adimensionalizado do ressalto hidráulico submergido e do ressalto hidráulico livre:

$$\Delta\Omega_s = a_2 \left( \frac{X}{Y_2 - Y_1} \right) + b_2 \quad 4.24$$

Os valores dos coeficientes  $a_1$ ,  $b_1$ ,  $a_2$ , e  $b_2$  são apresentados em função do grau de submergência ( $S$ ) na Figura 4.26, Figura 4.27, Figura 4.35 e Figura 4.36 respectivamente.

O primeiro passo para prever pressões com diferentes probabilidades de ocorrência e graus de submergência através da metodologia aqui proposta é conhecer o ajuste adimensional para a pressão média e o desvio padrão para diferentes valores do fator de submergência ( $S$ ).

No caso da pressão média, a existência de pressões aparentemente constantes ( $\Psi_c$ ) na região de montante do ressalto hidráulico deve ser considerada (Tabela 4.3). Essas pressões correspondem ao limite inferior para o ajuste dos valores de pressão média para diferentes submergências.

Através dos ajustes conhecidos para a pressão média, desvio padrão para o ressalto hidráulico livre e diferenças relativas e dos valores de  $\Psi_c$  pode-se determinar os ajustes adimensionais para a pressão média e desvio padrão para diferentes submergências. Esses ajustes são apresentados na Figura 4.56 e na Figura 4.57 comparados com os dados experimentais.

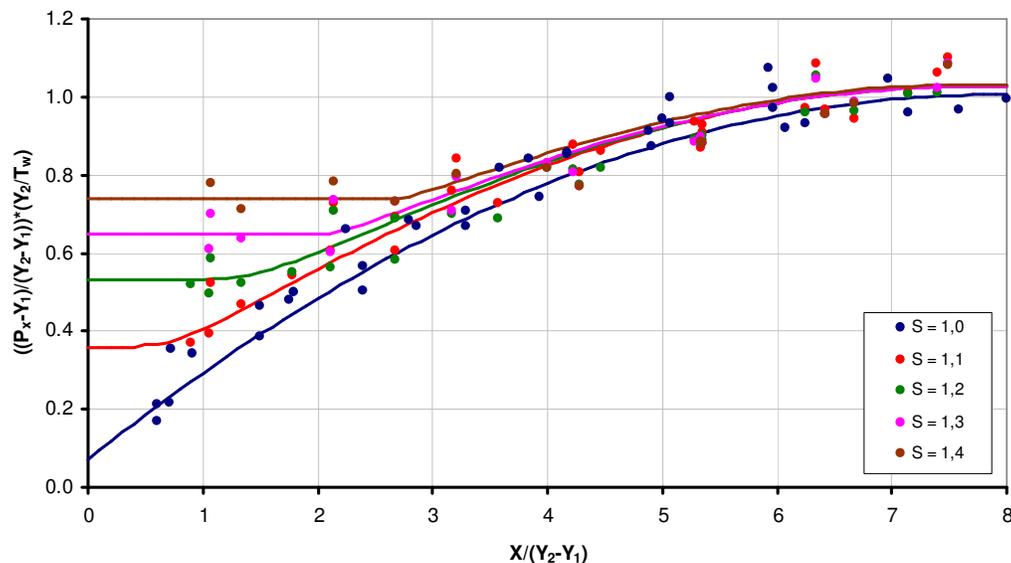


Figura 4.56 – Ajustes para a pressão média adimensionalizada para diferentes submergências.

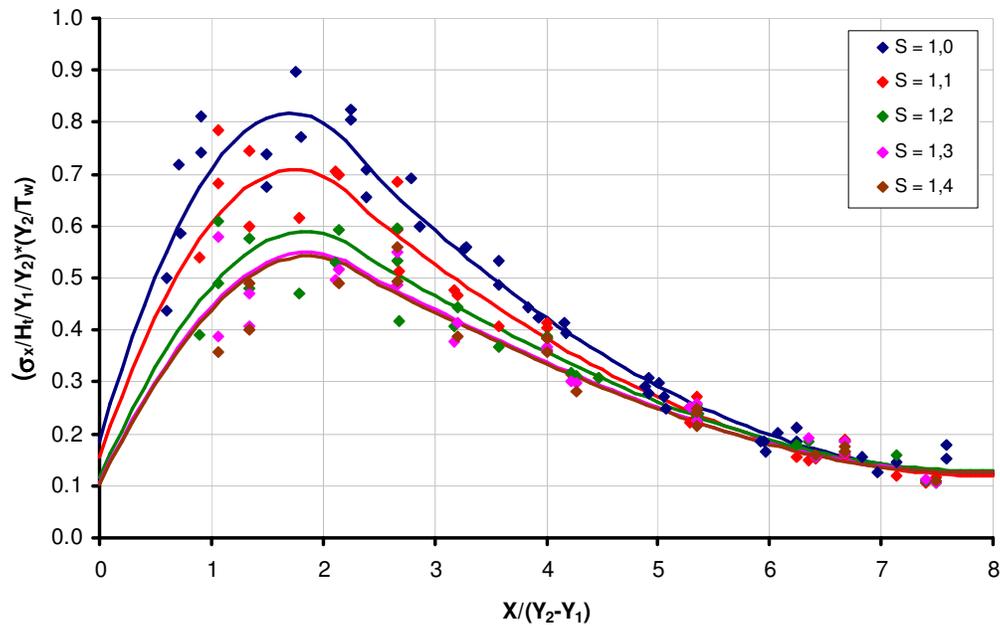


Figura 4.57 – Ajustes para o desvio padrão adimensionalizado para diferentes submergências.

Verifica-se que os ajustes obtidos representam bem os dados experimentais. A Tabela 4.7 apresenta o coeficiente de determinação encontrado entre os ajustes e os dados experimentais.

Tabela 4.7 – Coeficiente de determinação dos ajuste apresentados para a pressão média e desvio padrão para diferentes submergências do ressalto hidráulico.

Submergência (S)	Número de Froude Ensaiado	Coeficiente de Determinação (R <sup>2</sup> )			
		Pressão média	Nº pontos	Desvio Padrão	Nº pontos
1,0	3,97; 4,55; 5,01 e 5,88	0,96	35	0,95	42
1,1	3,97; 4,55; 5,01 e 5,88	0,93	28	0,92	34
1,2	3,97; 4,55; 5,01 e 5,88	0,93	28	0,92	34
1,3	3,97; 4,55 e 5,88	0,87	20	0,91	26
1,4	3,97 e 5,88	0,51	13	0,91	19

Nota-se que os menores coeficientes de determinação são verificados para as submergências que apresentam menor quantidade de dados experimentais analisados. Um resultado que não apresenta um bom ajuste possui um peso maior na determinação do coeficiente R<sup>2</sup> quando o número de dados verificados é menor. Pontualmente as diferenças

verificadas entre os dados experimentais e os ajustes propostos podem chegar a 30%. As Figuras a seguir apresentam as diferenças pontualmente verificadas entre os dados experimentais e os ajustes propostos para o ressalto hidráulico submergidos.

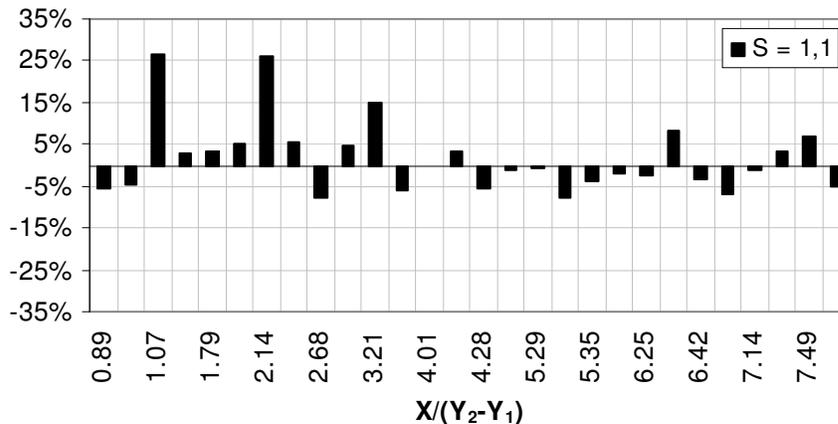


Figura 4.58 – Diferenças verificadas para a pressão média com submergência  $S = 1,1$ .

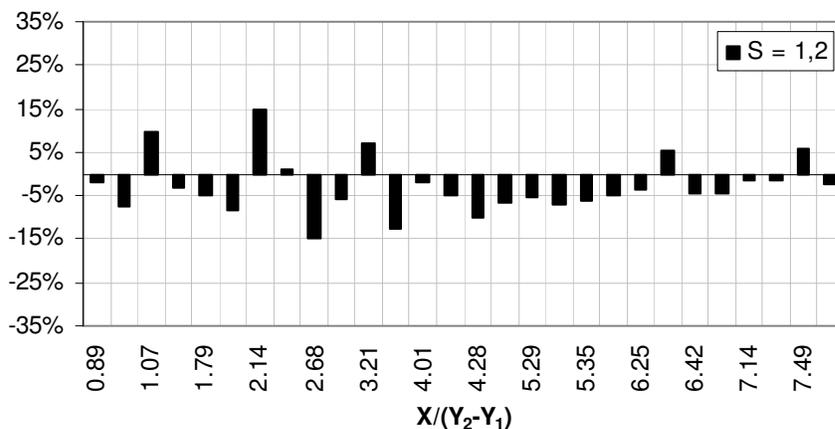


Figura 4.59 - Diferenças verificadas para a pressão média com submergência  $S = 1,2$ .

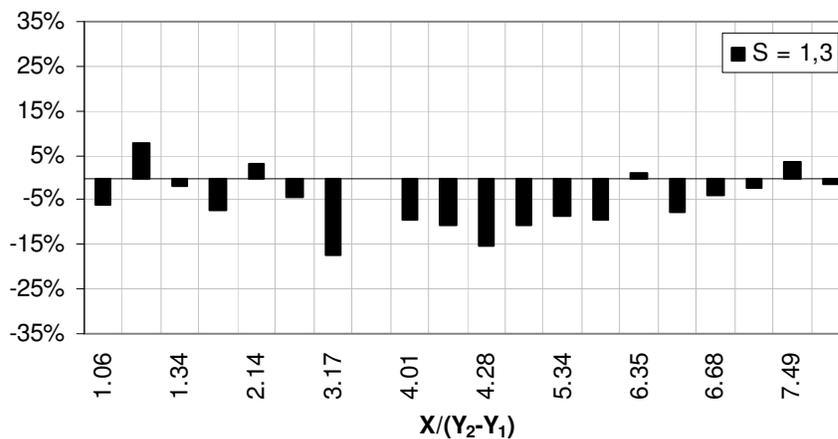


Figura 4.60 - Diferenças verificadas para a pressão média com submergência  $S = 1,3$ .

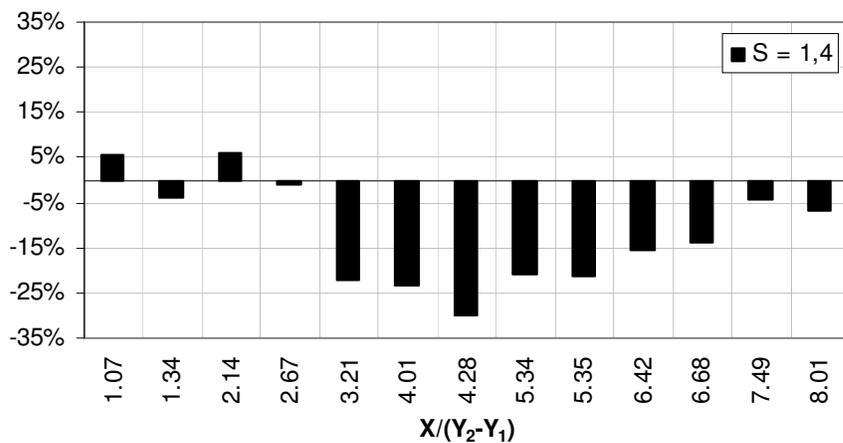


Figura 4.61 - Diferenças verificadas para a pressão média com submergência  $S = 1,4$ .

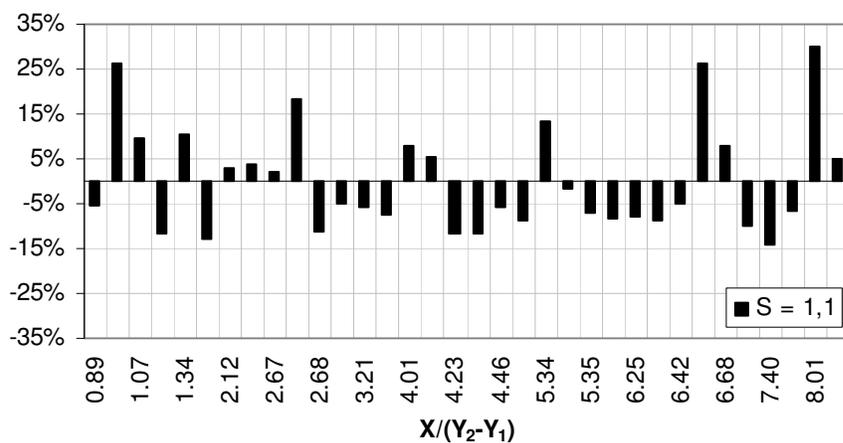


Figura 4.62 - Diferenças verificadas para o desvio padrão com submergência  $S = 1,1$ .

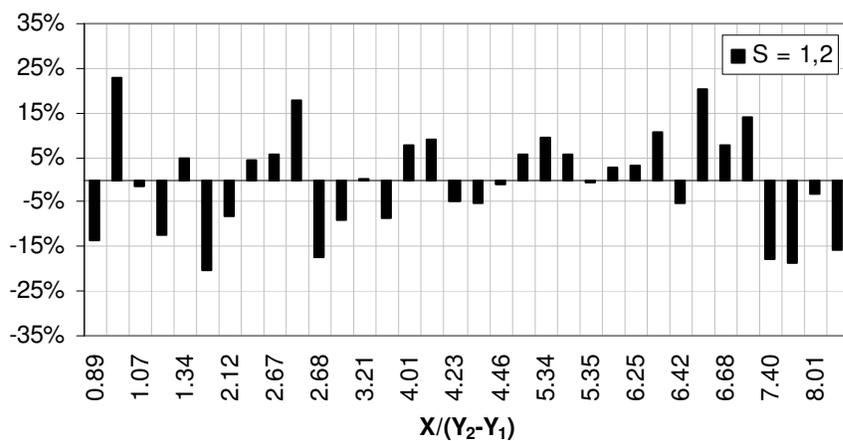


Figura 4.63 - Diferenças verificadas para o desvio padrão com submergência  $S = 1,2$ .

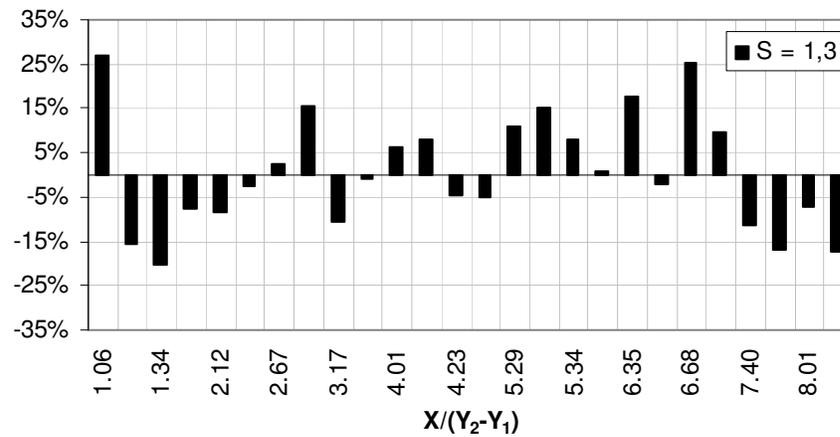


Figura 4.64 - Diferenças verificadas para o desvio padrão com submergência  $S = 1,3$ .

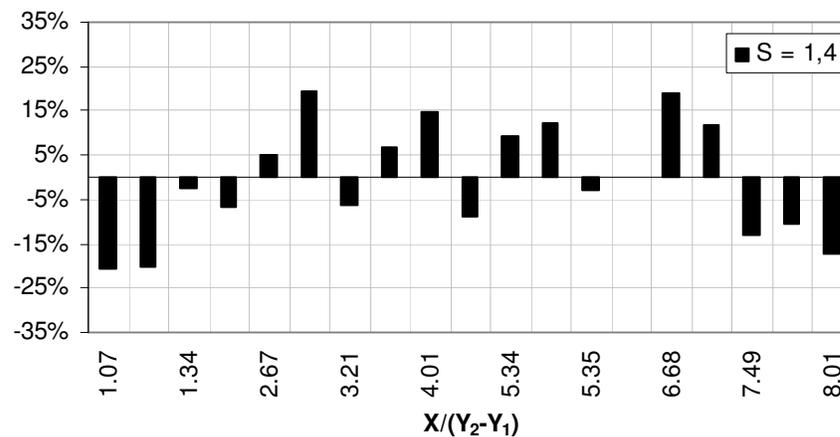


Figura 4.65 - Diferenças verificadas para o desvio padrão com submergência  $S = 1,4$ .

A partir do conhecimento dos ajustes adimensionais da pressão média e do desvio padrão apresentados e do coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades ( $N$ ) pode-se determinar valores de pressão para diferentes probabilidades de ocorrência.

#### 4.6 Aplicação da metodologia de previsão de pressões para o ressalto hidráulico submergido

Neste item será apresentada a aplicabilidade da metodologia proposta para a determinação de pressões com diferentes probabilidades de ocorrência para ressalto hidráulico submergido.

O exemplo aqui utilizado considera que o modelo de laboratório representa um protótipo hipotético em escala 1:10 para um ressalto hidráulico com  $Fr_1 = 4,55$  e fator de submergência  $S = 1,30$ . Serão calculadas nesse exemplo as pressões referentes às probabilidades de 0,1%,

1%, 5%, 10%, 90%, 95%, 99% e 99,9% de serem menores ou iguais a um determinado valor de pressão.

As características da estrutura e os valores dos parâmetros hidráulicos do ressalto hidráulico em questão são apresentados abaixo:

Vazão = 7,59 m<sup>3</sup>/s

Largura da comporta: 4,5 m;

Abertura da comporta: 0,35 m;

Altura conjugada rápida (Y<sub>1</sub>) = 0,24 m;

Altura conjugada lenta (Y<sub>2</sub>) = 1,41 m;

Lâmina d'água a jusante do ressalto (T<sub>w</sub>) = 1,83 m;

Perda de energia no ressalto hidráulico (H<sub>t</sub>) = 1,97 m.

Os valores adimensionalizados da distribuição longitudinal da pressão média e do desvio padrão com submergência S = 1,3 são respectivamente os apresentados anteriormente na Figura 4.56 e na Figura 4.57.

Os valores adimensionais de pressão e desvio padrão devem ser primeiramente transformados em valores com suas respectivas dimensões através dos parâmetros hidráulicos apresentados para que se possa determinar os valores de pressão com diferentes probabilidades de ocorrência através da expressão abaixo:

$$P_{\%} = P_X \pm N \cdot \sigma_X \quad 4.25$$

onde:

$P_X$  = pressão média;

$$P_X = \Psi_s (Y_2 - Y_1) \left( \frac{T_w}{Y_2} \right) + Y_1;$$

$$\Psi_s = (1 + \Delta\Psi_s) \Psi;$$

$$\Delta\Psi_s = a_1 \left( \frac{X}{Y_2 - Y_1} \right)^{b_1}$$

$$\Psi = -0,015\Gamma^2 + 0,237\Gamma + 0,07;$$

$\sigma_X$  = desvio padrão da amostra de pressão;

$$\sigma_X = \Omega_s H_t \left( \frac{Y_1}{Y_2} \right) \left( \frac{T_w}{Y_2} \right)$$

$$\Delta\Omega_s = (1 + \Delta\Omega_s)\Omega;$$

$$\Omega = -0,2166 \cdot \Gamma^2 + 0,7404 \cdot \Gamma + 0,185 \quad \text{Ajuste A} \quad \text{para } 0 \leq \frac{X}{(Y_2 - Y_1)} < 2,4;$$

$$\Omega = 0,0187 \cdot \Gamma^2 + 0,2998 \cdot \Gamma + 1,3235 \quad \text{Ajuste B} \quad \text{para } 2,4 \leq \frac{X}{(Y_2 - Y_1)} \leq 8,0;$$

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

$$N = a \left( \frac{X}{Y_2 - Y_1} \right)^2 + b \left( \frac{X}{Y_2 - Y_1} \right) + c.$$

Os valores do coeficiente estatístico (N) são determinados a partir de polinômios de segundo grau. Os coeficientes dos polinômios são dados pela Tabela 4.6.

Através da Equação 4.25 são previstos os valores de pressão para as probabilidades escolhidas. As Figuras a seguir apresentam os valores previstos comparados com os valores experimentalmente medidos para o ressalto hidráulico submerso com  $Fr_1 = 4,55$  e  $S = 1,30$ .

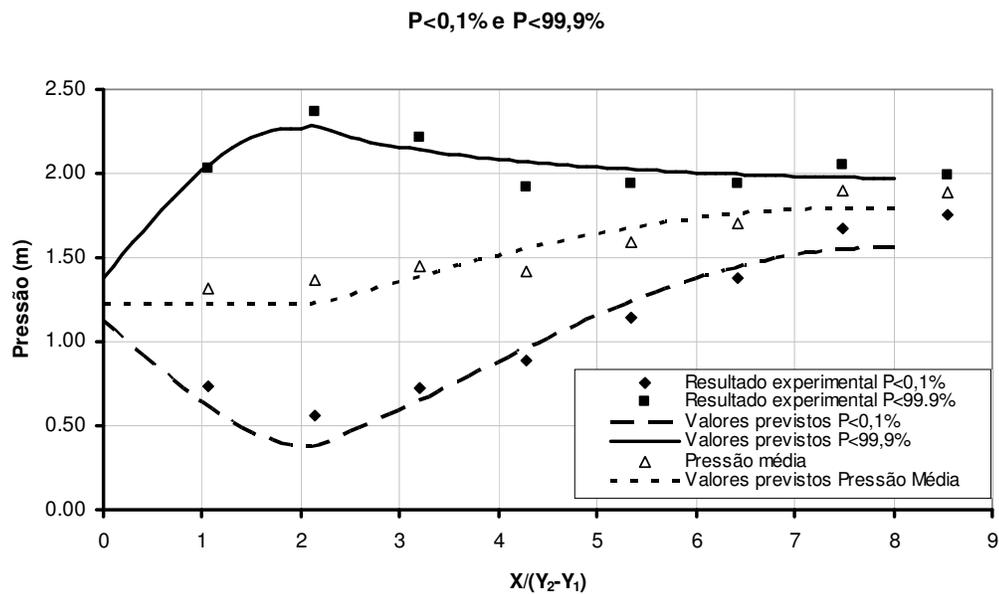


Figura 4.66 – Comparação entre os ajustes propostos para as pressões com probabilidades de 0,1% e 99,9% e os dados experimentais verificados para o ressalto hidráulico com  $Fr_1 = 4,55$  e  $S = 1,30$ .

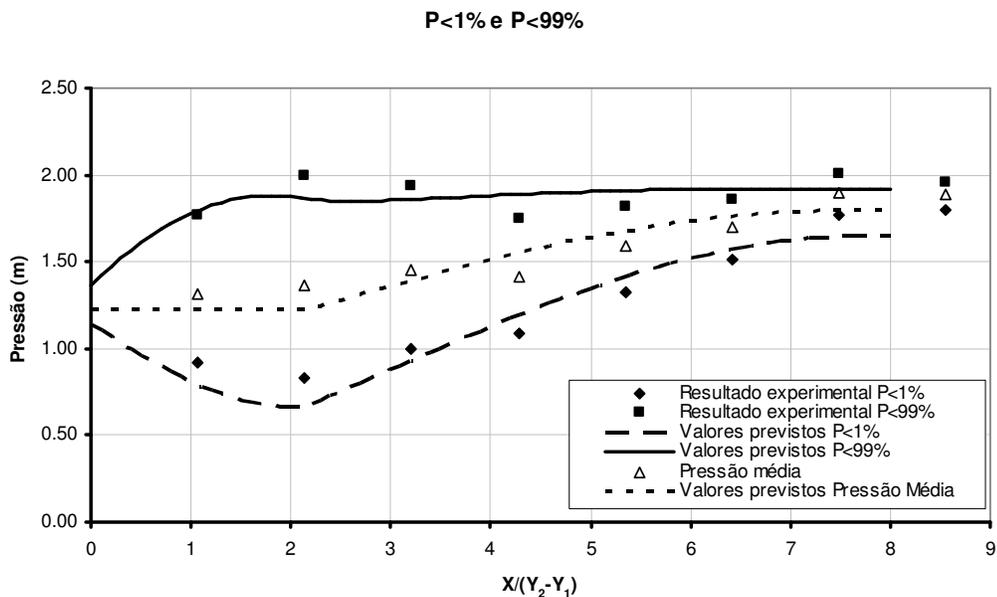


Figura 4.67 – Comparação entre os ajustes propostos para as pressões com probabilidades de 1% e 99% e os dados experimentais verificados para o ressalto hidráulico com  $Fr_1 = 4,55$  e  $S = 1,30$ .

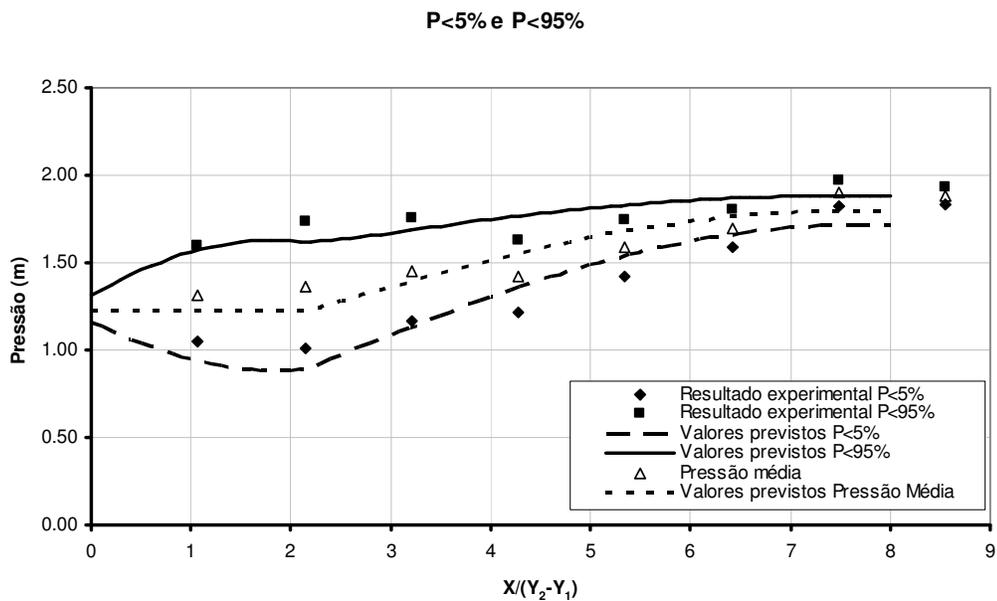


Figura 4.68 – Comparação entre os ajustes propostos para as pressões com probabilidades de 5% e 95% e os dados experimentais verificados para o ressalto hidráulico com  $Fr_1 = 4,55$  e  $S = 1,30$ .

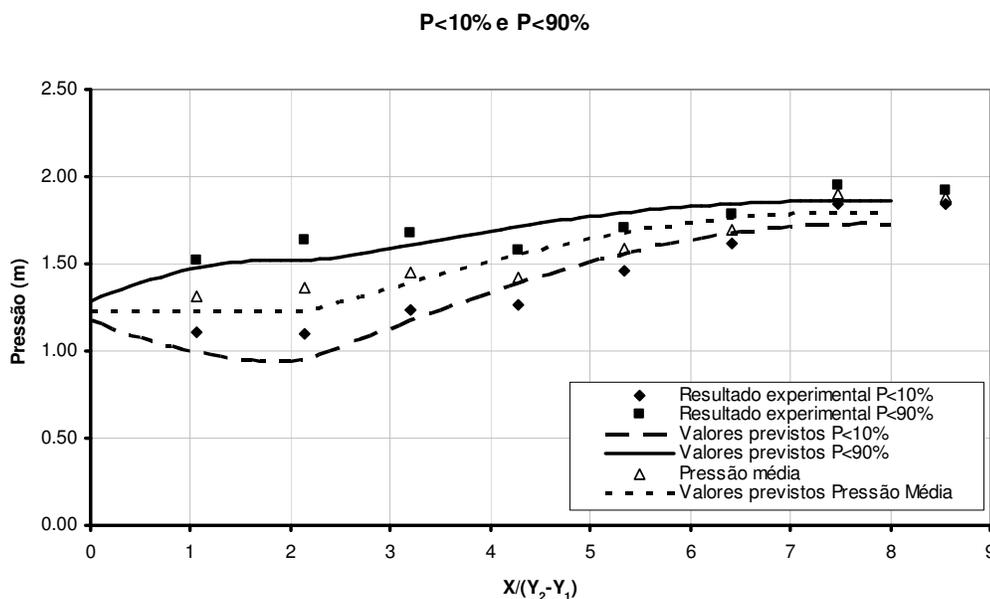


Figura 4.69 – Comparação entre os ajustes propostos para as pressões com probabilidades de 10% e 90% e os dados experimentais verificados para o ressalto hidráulico com  $Fr_1 = 4,55$  e  $S = 1,30$ .

Os ajustes obtidos através da metodologia proposta representam bem a distribuição longitudinal dos valores experimentais para as probabilidades apresentadas, caracterizando-se ferramenta útil para a previsão de valores extremos de pressão.

Como ressalva, verifica-se, analisando as Figura 4.66 a Figura 4.69, que os ajustes obtidos tendem, na maioria dos casos, a subestimar os valores referentes às pressões extremas de 90% a 99,9% (semi-amplitudes positivas em relação à média) e a superestimar os valores para as probabilidades de 0,1% a 10% (semi-amplitudes negativas em relação a média), junto a zona de maior flutuação de pressão,  $X/(Y_2 - Y_1) = 1,75$ .

Como as semi-amplitudes negativas podem estar significativamente relacionadas aos processos de cavitação por pulsos de pressão, que muitas vezes causam prejuízos a bacias de dissipação, os valores apresentados pelo modelo (superestimados) estão a favor da segurança para previsão de pressões mínimas.

As diferenças verificadas para os valores extremos referentes às semi-amplitudes positivas para as probabilidades de 90% a 99,9% dificilmente superam os 20 cm, o que pode ser considerado um bom resultado levando-se em conta os valores de pressão verificados.

A Tabela 4.8 apresenta as relações entre as amplitudes previstas pelo modelo proposto e as verificadas experimentalmente, representadas da seguinte forma:

$$\frac{\Delta P_{\%C}}{\Delta P_{\%O}} = \frac{(P_{\%C} - P_{XC})}{(P_{\%O} - P_X)}$$

onde

$\Delta P_{\%C}$  = amplitude relacionada a uma certa probabilidade para os valores previstos pelo modelo proposto;

$\Delta P_{\%O}$  = amplitude relacionada a uma certa probabilidade para os valores experimentais;

$P_{\%C}$  = pressão relacionada a uma certa probabilidade de ser menor do que um determinado valor de pressão prevista pelo modelo proposto;

$P_{\%O}$  = pressão relacionada a uma certa probabilidade de ser menor do que um determinado valor de pressão observada experimentalmente;

$P_{XC}$  = pressão média calculada pelo modelo proposto;

$P_X$  = pressão média observada experimentalmente.

As relações apresentadas na tabela a seguir permitem avaliar as diferenças entre o modelo proposto para prever valores extremos de pressão e os valores verificados experimentalmente. Para o número de Froude ( $Fr_1$ ) igual 4,55 e fator de submergência igual a 1,3 o modelo apresentou diferenças máximas da ordem de 27% junto ao final do ressalto hidráulico. Como a flutuação de pressão no final do ressalto é pequena, as diferenças entre as semi-amplitudes medidas e previstas pelo modelo tendem a apresentar valores relativos mais elevados, ver Tabela 4.8. Junto à posição de maior flutuação de pressão verifica-se que as diferenças relativas máximas são da ordem de 7%, o que indica que o modelo proposto reproduz bem as amplitudes de pressão verificadas no ressalto hidráulico.

*Tabela 4.8 – Diferenças relativas entre as semi-amplitudes de pressão para o ressalto hidráulico com  $Fr_1 = 4,55$  e  $S = 1,3$ .*

	X/(Y2-Y1)	P<0,1%	P<1%	P<5%	P<10%	P<90%	P<95%	P<99%	P<99,9%
$Fr_1 = 4,55; S = 1,3$	1.07	-6%	-10%	-9%	-15%	-19%	-21%	-24%	-15%
	2.14	-7%	-4%	5%	-4%	-5%	-4%	1%	-5%
	3.21	-2%	-1%	9%	0%	0%	2%	4%	2%
	4.28	-13%	-8%	5%	-6%	-3%	-3%	-2%	-2%
	5.35	1%	0%	13%	3%	3%	4%	0%	2%
	6.42	2%	0%	11%	-4%	-1%	-3%	-2%	2%
	7.49	-8%	-17%	-3%	-24%	-27%	-22%	-18%	-14%

São apresentadas no ANEXO II as diferenças relativas entre as semi-amplitudes de pressão previstas pelo modelo proposto e as verificadas experimentalmente para as outras situações estudadas neste trabalho, mostrando diferenças relativas entre os valores verificados e os previstos pelo modelo, para a posição de máxima flutuação de pressão e probabilidades extremas, inferiores a 15% na maior parte dos ensaios.

## 5 CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho é propor uma metodologia de determinação de pressões com diferentes probabilidades de ocorrência, através da análise do campo de pressões em um ressalto hidráulico formado a jusante de um comporta de fundo com diferentes níveis de submersão. Para se atingir esse foi necessário:

- Avaliar a influência da utilização de condutos flexíveis entre a tomada de pressão e transdutor sobre as medições de flutuação de pressão;
- Comparar o campo de pressões entre o ressalto hidráulico livre a jusante de uma comporta e a jusante de um vertedouro.
- Avaliar a influência da submersão sobre a distribuição de pressões junto ao fundo, em ressalto hidráulico a jusante de comporta;

Para cada uma das etapas propostas nos *Objetivos* deste trabalho são apresentadas as principais conclusões.

### 5.1 *Influência da utilização de condutos flexíveis em medições de flutuação de pressão em ressalto hidráulico*

Instalação do sensor faceado ao contorno sólido da estrutura é a situação ideal para estudos de flutuação de pressão, muitas vezes essa condição não pode ser executada, sendo necessária a utilização de condutos de união entre o sensor e a tomada de pressão. Conforme apresentado no Capítulo 4 e no ANEXO I, a utilização de condutos flexíveis em medições de flutuação de pressão em ressalto hidráulico pode influenciar os resultados dos diversos parâmetros que se deseja avaliar. De uma maneira geral, a pressão média, o coeficiente de assimetria e o coeficiente de curtose sofrem pouca ou nenhuma influência em função dos diferentes comprimentos, dos diâmetros e espessuras de parede de condutos estudados. No entanto, parâmetros como desvio padrão e valores extremos de pressão sofrem influência direta dos diâmetros internos dos condutos, sendo recomendado neste caso, para que não haja perda de informação sobre pressões extremas e conseqüentemente sobre o desvio padrão, os diâmetros apresentados na Tabela 4.1. Também se verificou que a densidade espectral das flutuações de pressão é influenciada pelo comprimento, independentemente do diâmetro utilizado nas condições verificadas. Foram verificadas que as frequências dominantes dos espectros de

energia tendem a apresentar valores menores quando são utilizados condutos mais extensos. Através das análises feitas, recomenda-se a utilização de condutos com comprimentos pequenos e diâmetros maiores, sempre se levando em conta o parâmetro que se deseja quantificar e o grau de influência ao qual este pode estar submetido. Para estudos em modelo reduzido em laboratório sobre a densidade espectral de flutuações de pressão no interior do ressalto hidráulico que se adotem os comprimentos máximos apresentados na Tabela 4.2.

*Tabela 4.1 – Recomendações de diâmetros e comprimentos de condutos para estudos de pressões extremas em medições de flutuação de pressão em ressalto hidráulico*

<b>Material</b>	<b>Diâmetro (mm)</b>	<b>Comprimento Recomendado (cm)</b>
Nylon	2	$\leq 25$
PVC	4,8	$\leq 200$
	6,4	
	7,8	

*Tabela 4.2 – Recomendações de comprimentos de condutos para estudos de espectro de frequência em medições de flutuação de pressão em ressalto hidráulico*

<b>Frequência de Interesse</b>	<b>Material</b>	<b>Diâmetro (mm)</b>	<b>Comprimento Recomendado (cm)</b>
$\leq 1$ Hz	PVC	4,8 a 7,9	$\leq 200$
	Nylon	$\leq 2$	$\leq 200$
$\leq 5$ Hz	PVC	7,9	$\leq 100$
	PVC	4,8 a 6,4	$\leq 50$
	Nylon	$\leq 2$	$\leq 10$
$\leq 10$ Hz	PVC	6,4 a 7,9	$\leq 25$
	PVC	4,8	$\leq 10$
	Nylon	$\leq 2$	Sem condutos
$>10$ Hz	PVC	4,8 a 7,9	$\leq 5$
	Nylon	$\leq 2$	Sem condutos

## **5.2 Comparações entre o ressalto hidráulico livre a jusante de comporta e a jusante de vertedouro**

A avaliação dos resultados deste estudo, para o caso do ressalto hidráulico livre e a comparação com os resultados de outros autores, para o ressalto hidráulico livre formado a jusante de um vertedouro, concluiu que as distribuições longitudinais da pressão média, desvio padrão, do coeficiente de assimetria e do coeficiente de curtose são muitíssimo semelhantes. Pode-se afirmar que as regiões características, determinadas por

Marques et al (1997) para o ressalto formado a jusante de uma comporta, são aplicadas ao ressalto hidráulico livre a jusante de uma comporta. Verificou-se que os valores de desvio padrão para o ressalto hidráulico formado a jusante de uma comporta, para o estudo em questão, apresentam valores superiores ao ressalto formado a jusante de um vertedouro, sendo assim, foi proposto um novo par de expressões para descrever o comportamento médio desse parâmetro. As diferenças dos valores de desvio padrão, verificada entre o ressalto hidráulico formado a jusante de uma comporta (presente estudo) e a jusante de vertedouro, junto à posição de maior flutuação de pressão, podem chegar a 20%, conforme já relatado por Lopardo (1986) em uma comparação de resultados entre ensaios a jusante de vertedouros com os dados de Lopardo e Solari (1980) para o ressalto hidráulico formado a jusante de comporta.

### ***5.3 Influência da submergência sobre a distribuição de pressões junto ao fundo em ressalto hidráulico a jusante de comporta***

A influência do efeito da submergência sobre o campo de pressões é muito importante, uma vez que a maioria dos dissipadores de energia e descargas de fundo funcionam afogados. Através dos resultados apresentados, considerando as condições ensaiadas, provou-se que a utilização do fator de submergência (S) para a adimensionalização dos valores de pressão média e desvio padrão possibilita um melhor agrupamento dos dados permitindo a utilização de expressões com o intuito de caracterizar seu comportamento. Neste caso, dependendo da metodologia de adimensionalização utilizada, diferentes conclusões podem ser feitas. No caso da adimensionalização da flutuação de pressão através do coeficiente de flutuação de pressão ( $C_p$ ) foi possível verificar a comportamento da variável em função do grau de submergência e do número de Froude, sendo confirmadas as afirmações feitas por Lopardo et al (2004b)

Através das comparações dos resultados entre o ressalto hidráulico livre o ressalto submerso, verificou-se que estes apresentam distribuições do coeficiente de assimetria e curtose levemente distintas, mostrando-se que até a região do rolo,  $X/(Y_2 - Y_1) = 6$ , os ressaltos submersos apresentam uma distribuição aparentemente mais próxima da distribuição Normal.

Através das metodologias de adimensionalização propostas por Marques et al (1997) e (1999) para o ressalto hidráulico foi possível avaliar e quantificar as diferenças atribuídas à submergência para os parâmetros pressão média e desvio padrão. Esta avaliação caracterizou-se como o primeiro passo para a determinação de uma metodologia de previsão de pressões para o ressalto hidráulico submerso.

No que diz respeito à densidade auto-espectral das amostras de pressão, as afirmações de que o aumento da submergência tende a diminuir o valor das frequências dominantes no ressalto hidráulico, feitas por Pinto et al (1998), não foram confirmadas. O autor analisou o ressalto hidráulico a jusante de um vertedouro e não levou em consideração o deslocamento do ressalto em direção a montante, causada pelo aumento no nível d'água, desta forma não comparou regiões semelhantes do ressalto hidráulico.

Devido às diferentes distribuições estatísticas verificadas para os dados de flutuação de pressão junto ao fundo, existentes no interior do ressalto hidráulico, foi realizada a determinação do coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades (N), proposto por Teixeira (2003), para a previsão de pressões com diferentes probabilidades de ocorrência. A distribuição do coeficiente N se mostrou praticamente independente em relação ao fator de submergência para quase todos os valores de probabilidades estudados. Diferenças mais significativas foram apreciadas para a probabilidade de 99,9%, onde foram procurados ajustes em função da submergência.

#### ***5.4 Previsão de valores de pressão para diferentes probabilidades de ocorrência e graus de submergência***

O objetivo principal desta pesquisa foi avaliar o campo de pressões em um ressalto hidráulico formado a jusante de uma comporta com o intuito de propor uma metodologia de previsão de valores de pressão com diferentes probabilidades. Esta metodologia baseou-se na avaliação das diferenças verificadas para a pressão média e desvio padrão entre o ressalto hidráulico submergido e o ressalto hidráulico livre e na determinação do coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades. Foram determinadas expressões que representassem essas diferenças e o coeficiente estatístico de distribuição de probabilidade (N) ao longo do ressalto hidráulico.

A metodologia proposta se mostrou bastante eficiente em suas previsões. No entanto mostrou uma leve tendência de subestimar, na maioria dos casos, os valores extremos máximos de pressão. As diferenças absolutas verificadas, na suposição de um caso em protótipo em escala 10:1, foram da ordem de, no máximo, 0,2 m para pressões extremas da ordem de 2,4 m considerando 99,9% de probabilidade de serem menores ou iguais a este valor. Esse resultado pode ser considerado satisfatório uma vez que a diferença verificada foi da ordem de 8,3%. Já para a previsão dos valores extremos mínimos, a metodologia proposta

apresentou a tendência de superestimar os valores de pressão, apresentando semi-amplitudes negativas superiores, em módulo, às verificadas. Os valores atribuídos a pequenas probabilidades de serem menores ou iguais a uma determinada pressão estão diretamente ligados às causas do efeito de cavitação em dissipadores de energia. Desta forma, os valores previstos para os mínimos extremos estão a favor da segurança no caso da determinação de regiões onde pode ocorrer cavitação na estrutura.

O modelo apresentou diferenças relativas entre os valores verificados e os previstos pelo modelo, para a posição de máxima flutuação de pressão e probabilidades extremas, inferiores a 15% em uma grande quantidade de ensaios.

Considera-se o modelo proposto como satisfatório para a estimativa de pressões com diferentes probabilidades de ocorrência e graus de submergência ao longo do ressalto hidráulico. Espera-se que esta pesquisa possa contribuir para o dimensionamento seguro e econômico de estruturas de dissipação de energia a jusante de descargas de fundo, além de permitir um melhor conhecimento do processo de dissipação de energia.

.

## 6 RECOMENDAÇÕES

Esta pesquisa está inserida em um tema abrangente que diz respeito à eficiência e segurança de estruturas hidráulicas de dissipação de energia. Dentro desse amplo tema a continuidade de estudos se mostra importante. Desta forma, as recomendações feitas para a continuidade desta pesquisa dizem respeito à:

- a) Influência da utilização de condutos flexíveis em medições de pressão em ressalto hidráulico.
  - Avaliar o efeito da utilização de diferentes materiais, diâmetros e condutos, além dos aqui estudados, efetuando-se comparações com a utilização de condutos rígidos (tubos de cobre, por exemplo);
  - Avaliar a influência da mudança de diâmetro ao longo dos condutos escolhidos, para que se possa quantificar a influência devida à utilização de conectores.
  
- b) Influência da submergência sobre a distribuição de pressões junto ao fundo em ressalto hidráulico.
  - Aplicar a metodologia proposta aos dados de outros autores para o ressalto hidráulico submergido a jusante de um comporta, tendo como objetivo validar a metodologia apresentada;
  - Efetuar medições para faixas mais amplas de submergência, principalmente para  $S < 1,1$  e  $S > 1,4$ , com o intuito de ampliar a análise do efeito da submergência sobre o campo de pressões e estender faixa de aplicação metodologia proposta;
  - Ampliar a faixa do número de Froude estudada, com o intuito de ampliar a análise do efeito da submergência sobre o campo de pressões e estender faixa de aplicação metodologia de previsão;
  - Utilização de uma distância menor entre os transdutores de pressão e medições de pressão mais próximas da comporta ou da estrutura de concordância entre a bacia e o vertedouro, permitindo uma melhor caracterização do campo de pressões, da posição de início do ressalto, da altura conjugada rápida e do efeito do raio de curvatura;
  - Avaliar a perda de carga junto à comporta permitindo a determinação do valor real de  $H_t$ ;
  - Quantificar a perda de energia ao longo do ressalto hidráulico submergido. Essa informação seria muito importante no dimensionamento de bacias de dissipação;

- Estudo de correlação cruzada entre diferentes tomadas de pressão de maneira a conhecer qual a influência e a probabilidade de ocorrência de eventos extremos simultaneamente.
- c) Estudar o ressalto hidráulico submerso a jusante de vertedouros.
- Efetuar comparações entre o ressalto hidráulico submerso a jusante de comporta e a jusante de vertedouro.

## 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.
- BAKHMETEFFF, B. A. **Hydraulics of open channels**, McGraw – Hill, New York, 1932 apud HAGER, W.H. **Energy dissipators and hydraulic jump**, Water Science and Technology Library, Kluwer Academic Publishers, 1992, 289 p.
- BAKHMETEFFF, B. A., MATZKE, A. E. The hydraulic jump in terms of dynamic similarity. **ASCE**, vol. 101, p. 630-680, 1936.
- BAZIN, H., e DARCY, H. **Recherches expérimentales relatives au remous et à la propagation des ondes**. Recherches Hydrauliques, Parites I et II. Académie des Sciences, Paris, 1865 apud HAGER, W.H. **Energy dissipators and hydraulic jump**, Water Science and Technology Library, Kluwer Academic Publishers, 1992, 289 p.
- BOUSSINESQ, J. **Essais sur la théorie dex taux tourants**: Memoires présentés par divers avants à l’academie dès sciences, Paris, 1877, 680p. apud HAGER, W.H. **Energy dissipators and dydraulic jump**, Water Science and Technology Library, Kluwer Academic Publishers, 1992, 289 p.
- BRESSE. J. A. C. **Cours de mecanique applique**. Part II “Hydraulics”, Mallet-Bachelier, Paris, 1860 apud HAGER, W.H. **Energy dissipators and hydraulic jump**, Water Science and Technology Library, Kluwer Academic Publishers, 1992, 289 p.
- BIDONE, G. **Esperiences sur le remous et la propagation de ondes**. Reale Accudemia 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, 289 p.
- BENDAT, J. S. e PIERSOL, A. G. **Random data: analysis and measurement procedures**. 3<sup>rd</sup> ed. New York: John Wiley, 2000.
- 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.
- BROWN, G. e ROSHKO, A. On density effects and large structures in turbulent mixing layer. **Journal of Fluid Mechanics**, vol.64, n. 4, p.775-816, 1974.
- CHANSON, H. Air Entrainment in two dimensional turbulent shear flows with partially developed inflow conditions. **International Journal of Multiphase Flow**, vol. 21 (6), p.1107 –1121, 1995.
- CHANSON, H. Air-water Gas Transfer at Hydraulic Jump with Partially Developed Inflow. **Water Research**, vol.29 (10), p. 2247-2254, 1995.
- CHANSON, H. e BRATTBERG, T. Experimental Study of the Air-water Shear Flow in a Hydraulic Jump. **International Journal of Multiphase Flow**, vol. 26, p.583-607, 2000.
- ELDER, R. A. Model-Prototype Turbulence Scaling. In: IAHR, 9, Dubrovnik, p. 24-31, 1961.
- ELEVATORSKY, E. A. **Hydraulic Energy Dissipators**. New-York, McGraw-Hill, 1959, 214 p.
- 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.
- FRAGOSO, M. M., e ALDAPE, G. E. Perfil de un salto hidráulico tridimensional y comportamiento de la velocidad. In: XXI CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA. São Pedro/SP, Brasil, 2004.
- GOMES, J. F. **Visualização de escoamento turbulento – ressalto hidráulico a jusante de uma comporta**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 90 p., 2000.
- 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. e BREMEN, R. Classical hydraulic jump: sequent depths. **Journal of Hydraulic Research**, vol. 27, n. 5, p. 565-585, 1989.
- HAGER, W.H. **Energy dissipators and hydraulic jump**, Water Science and Technology Library, Kluwer Academic Publishers, 1992, 289 p.
- HORNUNG et al The flow field downstream of a hydraulic jump. **Journal of Fluid Mechanics.**, vol. 287, p.299-316, 1995 apud GOMES, J. F. **Visualização de Escoamento Turbulento – Ressalto Hidráulico a Jusante de uma Comporta**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 90 p., 2000.
- HOYT, J.W. e SELLIN, R.H.J. Hydraulic jump as “mixing layer”. **Journal of Hydraulic Engineering**, vol. 115, n. 12, p.1607-1614, 1989
- LEUTHEUSSER, H.J. e KARTHA, V.C. Effect of inflow condition on hydraulic 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, 289 p.

- LONG, D., RAJARATNAM, N., STEFFLER, P. M. e SMY, P. R. Structure of flow in hydraulic jumps. **Journal of Hydraulic Research**, vol. 29, n. 2, pg. 207-218, 1991.
- LONG, D., STEFFLER, P. M. e RAJARATNAM, N. LDA study of flow structure in submerged hydraulic jump. **Journal of Hydraulic Research**. vol. 28, n. 4, p. 437-459, 1990.
- LOPARDO, R. A., e SOLARI, H. G. Flutuaciones de Presión en la Base de Resalto Libre. In: IX CONGRESSO 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 instantáneas. 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. **Cavitación em fluxos macroturbulentos**, Mathematicae 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 aproximação por turbulência 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.
- 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.
- McCORMODALE, J. A. e KHALIFA, A. Internal flow in hydraulic jumps. **Journal.  
Hydraulic Engineering**, vol. 109, n. 5, p.684-701, 1983.
- MOK, K. M. Relation of surface roller eddy formation and surface fluctuation in hydraulic  
jump, **Journal of Hydraulic Research IAHR**. vol. 4, n. 2, p. 270-212, 2004.
- MOSSA, M., TOLVE, U. Flow visualization in bubbly two-phase hydraulic jump. **Journal of  
Fluids Engineering**, ASME 120, p. 160-165, 1998.
- MOSSA, M. On the oscillating characteristics of hydraulic jumps. **Journal of Hydraulic  
Research IAHR**, n. 37, 541-557, 1999.
- OHTSU, I.O. e YASUDA, Y., AWAZU, S. Free and submerged hydraulic jumps in  
rectangular channels. **Report of Research Institute of Science and Technology**, n. 35,  
Nihon University, Japan, February, 50p. 1990 apud CHANSON, H. e BRATTBERG, T.  
Experimental Study of the Air-water Shear Flow in a Hydraulic Jump. **International  
Journal of Multiphase Flow**, vol. 26, p.583-607, 2000.
- 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, Engineering 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, Havana, Cuba, 13p, 1998
- PORTO, R. M. **Hidráulica Básica**. 2ª Ed, São Carlos/SP,EESC/USP, 1999, 519p.
- RETI, L. **Léonard de Vinci; L’Humaniste, L’Artiste, L’inventeur**. Paris, Robert Laffont, S.A., 1974, 319 p.
- 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, 1965.
- RAJARATNAM, N. (1965b). The Hydraulic Jump as Wall Jet. **Journal of Hydraulic Division**. v. 91, n. 5, p. 107-132.
- 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.
- RESCH. F. J., Hot-film turbulence measurements in water flow. **Journal of Hydraulic Division** vol. 96, p. 787 – 800, 1970 apud HAGER, W.H. **Energy dissipators and**

**hydraulic jump**, Water Science and Technology Library, Kluwer Academic Publishers, 1992, 289 p.

RESCH, F.J. e LEUTHEUSSER, H. J. Bubbly two-phase flow in hydraulic jump, **Journal of Hydraulics Division**, vol 100, n. HY1, p.137-149., 1974 apud HAGER, W.H. **Energy dissipators and hydraulic jump**, Water Science and Technology Library, Kluwer Academic Publishers, 1992, 289 p.

ROUSE, H. On the use of dimensionless numbers, **Civil Engineering** vol.4 (11), p. 563 – 568, 1934 apud HAGER, W.H. **Energy dissipators and hydraulic jump**, Water Science and Technology Library, Kluwer Academic Publishers, 1992, 289 p.

ROUSE, H.; SIAO, T. T. e NAGARATNAM, S. Turbulence characteristics of hydraulic jump. **ASCE**. vol. 124, p. 926-950, 1959.

SAFRANEZ, K. Untersuchungen über den Wechselsprung (Researches relating to the hydraulic jump), *Der Bauingenieur*, Berlim, vol.10, n. 37, p.649-651, 1929 apud CHOW, V.T. **Open channel hydraulics**, McGraw-Hill Book Co., Inc., p.393-438, 1959.

SAUMA HADDAD , J. C. S.; DE LIO, J. C. e LOPARDO, R. A. Una Aproximación Analítica para la Superficie Libre del Resalto Hidráulico. In: XV CONGRESO LATINO AMERICANO DE HIDRAULICA, 1992.

SAUMA HADDAD, J. C., DE Lio, J. C. e Lopardo, R A. Contribuicion al estudio macroscópico del resalto sumergido. In: XV CONGRESO LATINO AMERICANO DE HIDRÁULICA, IAHR, Cartagena: Colômbia. vol. 1, p. 73-82, 1992 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.

SCHRÖDER, R. Die turbulente strömung im freien wechselsprung, habilitationsschrift, mitteilung, vol. 59, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU Berlim, 1963 apud HAGER, W.H. **Energy dissipators and hydraulic jump**, Water Science and Technology Library, Kluwer Academic Publishers, 1992, 289 p.

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, 2003.

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, 2003.

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.

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. (2005)  
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.

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, 435p.

VASILIEV, D. F. e 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.

WANIEWSKI, T. A., UNTER, C., BRENNEM, C. E. Bubble measurements downstream of hydraulic jump. **International Journal of Multiphase Flow** vol. 27, p. 1271-1284, 2001.

WU, S., RAJARATNAM, N. Free jumps, submerged jumps and wall jets. **Journal of Hydraulic Research** vol. 33, n 2, p.197 – 212, 1995.

## 8 ANEXO I

## 8.1 Influência de utilização de condutos flexíveis em medições de flutuação pressão em ressalto hidráulico

Tabela 8.1– Condições de Ensaio.

Material	Comprimento (cm)	Diâmetro Interno (mm)	Espessura da Parede (mm)	Froude	Reynolds	Y <sub>1</sub> (cm)	Y <sub>2</sub> (cm)
PVC	200	4,8	1,5	5,11	6.10 <sup>4</sup>	2,47	16,3
PVC	150	4,8	1,5	5,11	6.10 <sup>4</sup>	2,47	16,3
PVC	100	4,8	1,5	5,11	6.10 <sup>4</sup>	2,47	16,3
PVC	50	4,8	1,5	5,11	6.10 <sup>4</sup>	2,47	16,3
PVC	25	4,8	1,5	5,11	6.10 <sup>4</sup>	2,47	16,3
PVC	10	4,8	1,5	5,11	6.10 <sup>4</sup>	2,47	16,3
PVC	5	4,8	1,5	5,11	6.10 <sup>4</sup>	2,47	16,3
PVC	200	6,4	1,0	5,01	6.10 <sup>4</sup>	2,51	16,2
PVC	150	6,4	1,0	5,01	6.10 <sup>4</sup>	2,51	16,2
PVC	100	6,4	1,0	5,01	6.10 <sup>4</sup>	2,51	16,2
PVC	50	6,4	1,0	5,01	6.10 <sup>4</sup>	2,51	16,2
PVC	50	6,4	1,0	5,01	6.10 <sup>4</sup>	2,51	16,2
PVC	25	6,4	1,0	5,01	6.10 <sup>4</sup>	2,51	16,2
PVC	25	6,4	1,0	5,01	6.10 <sup>4</sup>	2,51	16,2
PVC	10	6,4	1,0	5,01	6.10 <sup>4</sup>	2,51	16,2
PVC	5	6,4	1,0	5,01	6.10 <sup>4</sup>	2,51	16,2
PVC	200	6,4	1,5	5,08	6.10 <sup>4</sup>	2,43	16,3
PVC	150	6,4	1,5	5,08	6.10 <sup>4</sup>	2,43	16,3
PVC	100	6,4	1,5	5,08	6.10 <sup>4</sup>	2,43	16,3
PVC	50	6,4	1,5	5,05	6.10 <sup>4</sup>	2,42	16,2
PVC	25	6,4	1,5	5,12	6.10 <sup>4</sup>	2,42	16,2
PVC	10	6,4	1,5	5,02	6.10 <sup>4</sup>	2,43	16,2
PVC	5	6,4	1,5	5,08	6.10 <sup>4</sup>	2,43	16,2
PVC	200	6,4	2,0	5,01	6.10 <sup>4</sup>	2,51	16,2
PVC	150	6,4	2,0	5,01	6.10 <sup>4</sup>	2,51	16,2
PVC	100	6,4	2,0	5,01	6.10 <sup>4</sup>	2,51	16,2
PVC	50	6,4	2,0	5,01	6.10 <sup>4</sup>	2,51	16,2
PVC	25	6,4	2,0	5,01	6.10 <sup>4</sup>	2,51	16,2
PVC	10	6,4	2,0	5,01	6.10 <sup>4</sup>	2,51	16,2
PVC	5	6,4	2,0	5,01	6.10 <sup>4</sup>	2,51	16,2
PVC	200	7,9	1,5	5,14	6.10 <sup>4</sup>	2,42	16,3
PVC	150	7,9	1,5	5,16	6.10 <sup>4</sup>	2,42	16,4
PVC	100	7,9	1,5	5,20	6.10 <sup>4</sup>	2,42	16,4
PVC	50	7,9	1,5	5,11	6.10 <sup>4</sup>	2,42	16,4
PVC	50	7,9	1,5	5,21	6.10 <sup>4</sup>	2,44	16,4
PVC	50	7,9	1,5	5,21	6.10 <sup>4</sup>	2,44	16,4

Material	Comprimento (cm)	Diâmetro Interno (mm)	Espessura da Parede (mm)	Froude	Reynolds	Y <sub>1</sub> (cm)	Y <sub>2</sub> (cm)
PVC	25	7,9	1,5	5,15	6.10 <sup>4</sup>	2,42	16,4
PVC	10	7,9	1,5	5,16	6.10 <sup>4</sup>	2,42	16,4
PVC	5	7,9	1,5	5,23	6.10 <sup>4</sup>	2,40	16,3
PVC	5	7,9	1,5	5,20	6.10 <sup>4</sup>	2,44	16,4
Nylon	200	2,0	0,8	4,99	6.10 <sup>4</sup>	2,51	16,2
Nylon	150	2,0	0,8	4,99	6.10 <sup>4</sup>	2,51	16,2
Nylon	100	2,0	0,8	4,99	6.10 <sup>4</sup>	2,51	16,2
Nylon	50	2,0	0,8	5,03	6.10 <sup>4</sup>	2,50	16,2
Nylon	25	2,0	0,8	5,03	6.10 <sup>4</sup>	2,50	16,2
Nylon	10	2,0	0,8	4,99	6.10 <sup>4</sup>	2,51	16,2
Nylon	5	2,0	0,8	4,99	6.10 <sup>4</sup>	2,51	16,2
Nylon	5	2,0	0,8	4,99	6.10 <sup>4</sup>	2,51	16,2
Nylon	5	2,0	0,8	4,99	6.10 <sup>4</sup>	2,51	16,2
Nylon	2	2,0	0,8	4,99	6.10 <sup>4</sup>	2,51	16,2
Nylon	2	2,0	0,8	4,99	6.10 <sup>4</sup>	2,51	16,2
Nylon	2	2,0	0,8	4,99	6.10 <sup>4</sup>	2,51	16,2
Nylon	200	2,0	0,8	4,97	6.10 <sup>4</sup>	2,51	16,2
Nylon	150	2,0	0,8	4,97	6.10 <sup>4</sup>	2,51	16,2
Nylon	100	2,0	0,8	4,97	6.10 <sup>4</sup>	2,51	16,2
Nylon	50	2,0	0,8	4,97	6.10 <sup>4</sup>	2,51	16,2
Nylon	25	2,0	0,8	4,97	6.10 <sup>4</sup>	2,51	16,2
Nylon	10	2,0	0,8	4,98	6.10 <sup>4</sup>	2,51	16,2
Nylon	5	2,0	0,8	4,99	6.10 <sup>4</sup>	2,51	16,2
Nylon	2	2,0	0,8	4,99	6.10 <sup>4</sup>	2,51	16,2

### 8.1.1 Comparações entre sinais coletados com diferentes comprimentos de conduto

Inicialmente, para verificar a presença de tendenciosidades e avaliar as amplitudes do sinal, efetuou-se uma análise visual do comportamento do sinal coletado ao longo do tempo. São apresentadas nas figuras a seguir as comparações entre as flutuações de pressão dos sinais coletados pelos transdutores para os diferentes condutos com comprimento de 5 cm e 200 cm.

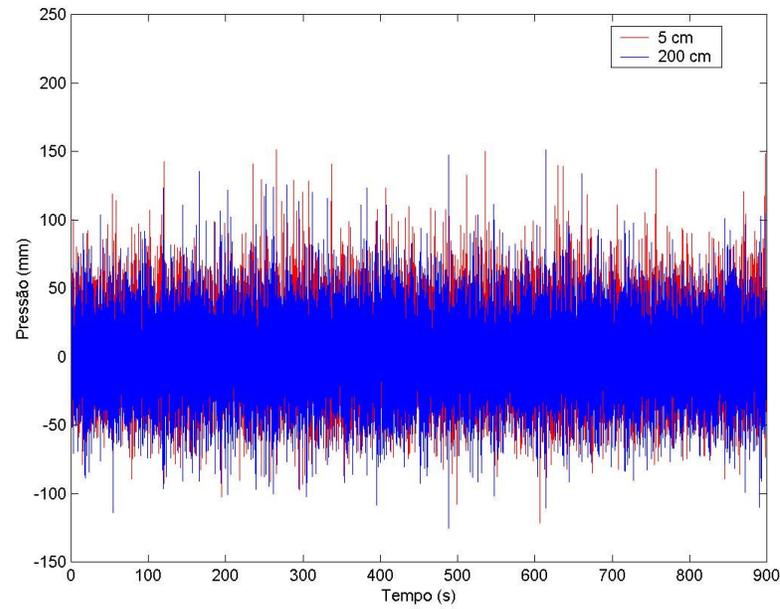


Figura 8.1 – Comparação entre os sinais coletados com condutos de PVC com 4,8 mm de diâmetro, com 1,5 mm de espessura de parede e comprimentos de 5 cm e 200 cm,  $X/(Y_2 - Y_1) = 1,49$  e  $Fr_1 = 5,1$ .

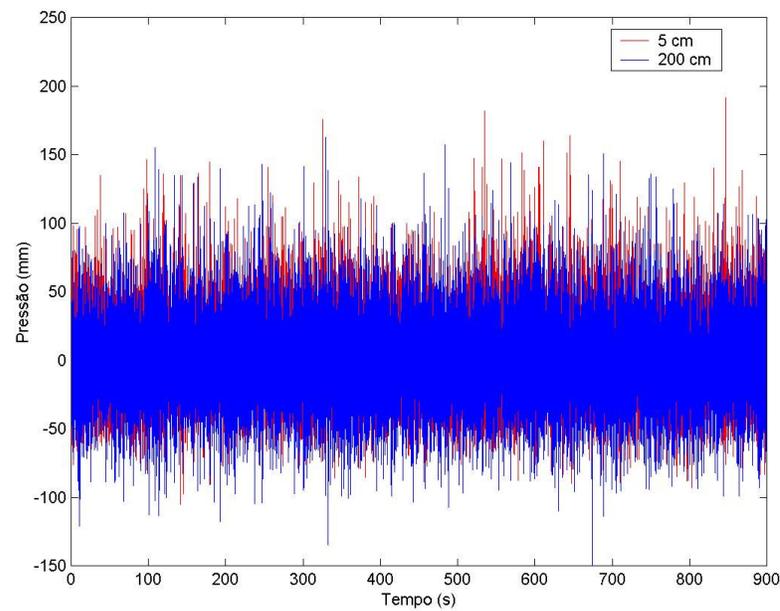


Figura 8.2 – Comparação entre os sinais coletados com condutos de PVC com 6,4 mm de diâmetro, com 1,5 mm de espessura de parede e comprimentos de 5 cm e 200 cm,  $X/(Y_2 - Y_1) = 1,35$  e  $Fr_1 = 5,1$ .

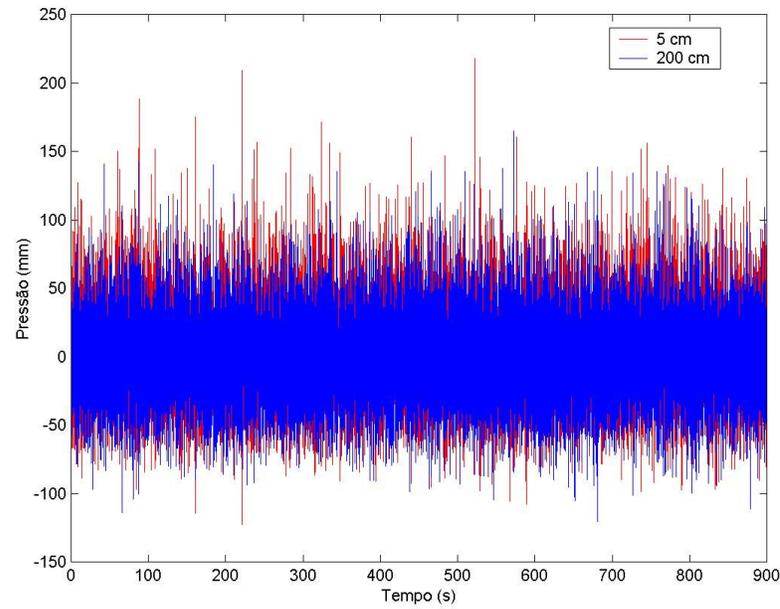


Figura 8.3 – Comparação entre os sinais coletados com condutos de PVC com 7,9 mm de diâmetro, com 1,5 mm de espessura de parede e comprimentos de 5 cm e 200 cm,  $X/(Y_2 - Y_1) = 1,43$  e  $Fr_1 = 5,2$ .

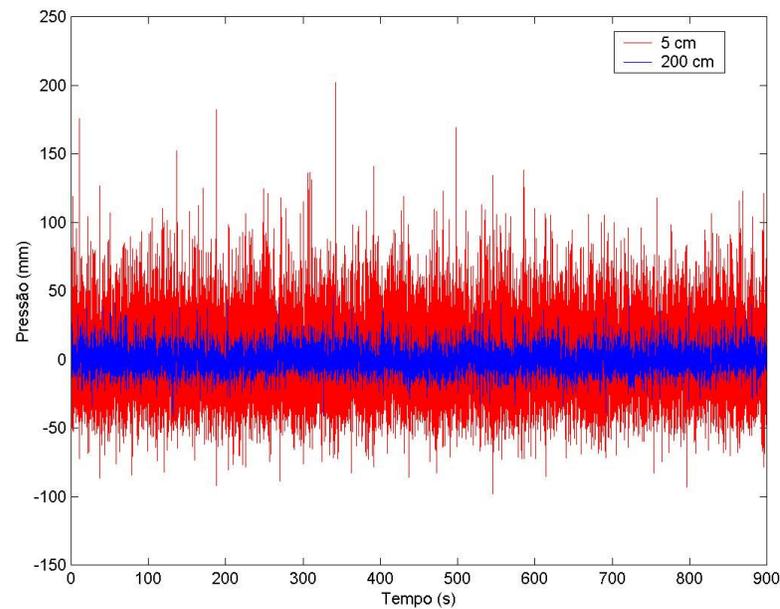


Figura 8.4 – Comparação entre os sinais coletados com condutos de nylon com 2,0 mm de diâmetro e comprimentos de 5 cm e 200 cm,  $X/(Y_2 - Y_1) = 1,50$  e  $Fr_1 = 5,0$ .

Verifica-se nas Figuras 8.1 a 8.3, que amplitudes dos sinais se mantêm semelhantes, independente do comprimento do conduto utilizado.

Através da Figura 8.4 fica evidente que há perda de informação sobre o sinal coletado por transdutores instalado com o objetivo de medir a flutuação de pressão em um ressalto hidráulico, ocasionada pela utilização de condutos de nylon com diâmetro de 2 mm,.

As análises que serão feitas a seguir mostram que a utilização de condutos com diâmetros maiores (4,8 mm, 6,4 mm e 7,9 mm) apresenta influência pouco significativa sobre algumas grandezas do sinal de pressão coletado.

### **8.1.2 Pressão média e desvio padrão**

Verifica-se que os valores de pressão média e desvio padrão, resultantes dos ensaios com utilização de condutos de PVC, não sofreram influência significativa com o aumento do comprimento do conduto. Como justificativa a essa afirmação, a Figura 8.5 e a Figura 8.6 apresentam os valores da pressão média e a variação do desvio padrão em função do comprimento do conduto para os condutos com diâmetro interno de 4,8 e 7,9. Também são apresentadas nessas figuras as faixas de variação da pressão média consideradas normais, de acordo com o erro dos transdutores e diferenças de valores verificadas através da repetição de ensaios. O intervalo delimitado pelas faixas que representam a variação normal da pressão média está centrado em torno do valor de pressão que referente ao menor conduto ensaiado (5 cm), considerado com o comprimento de referencia para os condutos de PVC. A tomada de pressão apresentada pela Figura 8.5 e pela Figura 8.6 é a posicionada mais próxima à região de maior flutuação de pressão, que conforme Marques et al (1997) posiciona-se próximo a  $X/(Y_2 - Y_1) = 1,75$ . As análises apresentadas a seguir se referem a essa tomada.

As diferenças verificadas nos valores de pressão média apresentados nas figuras anteriores sofrem influência da oscilação natural da posição do início do ressalto hidráulico. Segundo Gomes (2000), a posição do início do ressalto possui uma variação de aproximadamente  $0,25(Y_2 - Y_1)$ . Além disto, deve-se considerar, somando ao efeito causado pela flutuação da posição do início do ressalto, o erro atribuído ao transdutor, no caso  $\pm 3,5$  mm.

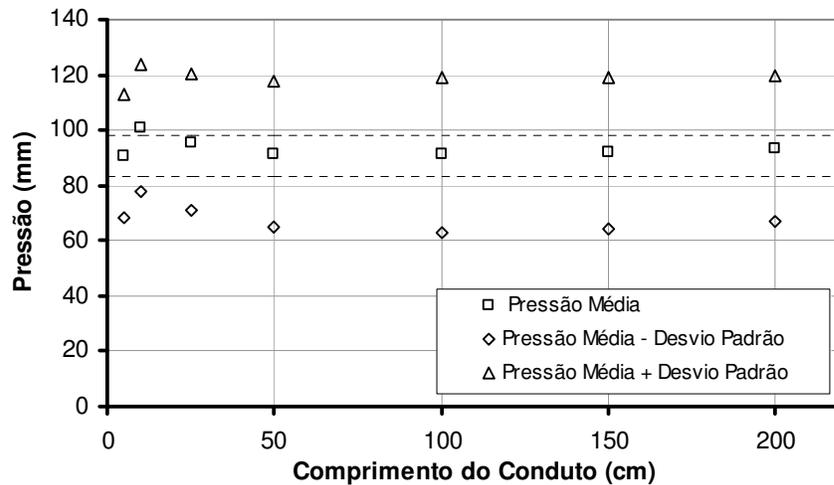


Figura 8.5 – Variação da pressão média e do desvio padrão em função do comprimento do conduto de PVC com diâmetro interno de 4,8 mm, espessura de parede igual a 1,5 mm,  $Fr_1 = 5,1$  e  $X/(Y_2 - Y_1) = 1,49$ .

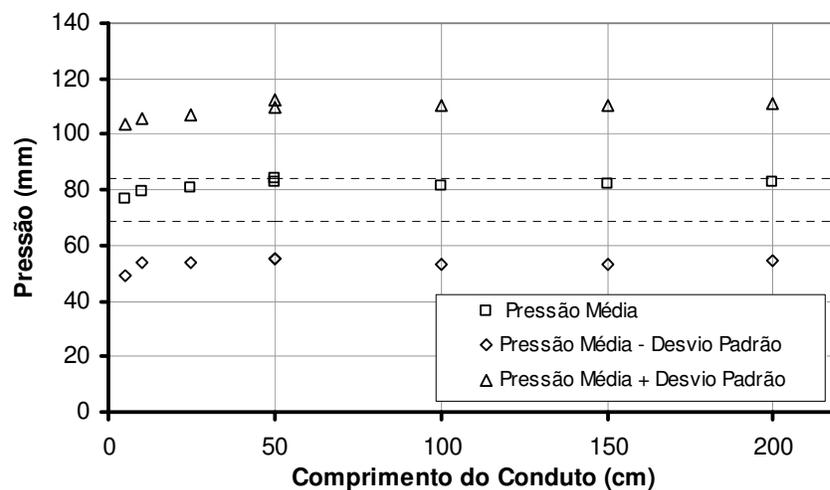


Figura 8.6 – Variação da pressão média e do desvio padrão em função do comprimento do conduto de PVC com diâmetro interno de 7,9 mm, espessura de parede igual a 1,5 mm,  $Fr_1$  entre 5,1 e 5,2 e  $X/(Y_2 - Y_1) = 1,43$ .

Houve necessidade de mudança na posição dos transdutores em alguns ensaios, impossibilitando que o nível de referência fosse mantido o mesmo para todos os comprimentos ensaiados. Verifica-se que os três primeiros comprimentos (5 cm, 10 cm e 25 cm) apresentam valores um pouco diferentes dos demais, para esses comprimentos houve mudança de posição dos transdutores devido a limitações da instalação experimental. Essa mudança de posição pode causar pequenos erros, devido à mudança de nível de referência, que se propagam na análise dos dados, podendo gerar as diferenças verificadas em relação aos outros comprimentos.

A repetição de uma mesma condição de ensaio mostrou que podem ser esperadas diferenças da ordem de 3 a 4 mm sobre os valores de pressão média e desvio padrão da amostra. Avaliando a variação da pressão média e do desvio padrão dentro da amostra total, utilizando-se cinco trechos de tamanhos iguais, isto é, dentro de uma amostra de 15 minutos avaliar a variação da média e desvio padrão em cinco trechos de 3 minutos, podem ser esperadas diferenças de cerca de 4% para o desvio padrão, ou seja 0,7 mm para um desvio padrão de aproximadamente 18 mm. Para a pressão média, essas diferenças são da ordem de 0,90%, representando 0,7 mm para uma pressão média de aproximadamente 85 mm.

Todas essas diferenças e fontes de erros verificadas devem ser levadas em conta, o que dificulta um pouco a análise dos resultados. Dessa maneira, a soma dos erros dos transdutores às variações verificadas nos ensaios permite criar uma faixa de variação considerada aceitável para os resultados. Considerou que uma variação de  $\pm 7,5$  mm seria aceitável para os valores de pressão média e desvio padrão (4mm de variação na repetição de ensaios somado a 3,5 mm do erro esperado para o transdutor). Nota-se na Figura 8.5 e na Figura 8.6 que as variações verificadas se encontram dentro da faixa considerada aceitável.

Quanto às espessuras de parede dos condutos, não se verificou de forma clara uma influência sobre os valores de pressão e desvio padrão. Acredita-se que esse efeito possa ser verificado em situações onde a magnitude das pressões atuantes seja muito maior. Segundo Lopardo (1986), para pressões máximas inferiores a um metro de coluna d'água, os resultados experimentais demonstraram que os condutos plásticos com 5 mm de diâmetro interno e 7 mm de diâmetro externo apresentam resposta idêntica às conexões com condutos absolutamente rígidos. As pressões máximas medidas neste estudo ficaram em torno 250 mm.

Não se pode concluir que a diferença de diâmetro influencie significativamente os valores de pressão média e desvio padrão. O principal motivo que impossibilitou uma análise mais detalhada sobre a influência do diâmetro interno e da espessura de parede sobre a aquisição de flutuações de pressão no ressalto hidráulico é a dificuldade de repetição total e integral dos ensaios, já que se mostrou muito difícil posicionar o início do ressalto hidráulico em igual posição após a interrupção de uma seqüência de ensaio. Cabe salientar, novamente, que se iniciava uma nova seqüência de ensaios, interrompendo o escoamento no canal, toda a vez que se trocava o conduto a ser estudado.

Nos estudos com conduto de nylon pode-se verificar um comportamento semelhante em relação à pressão média, onde se constatou que o comprimento do conduto não influencia os resultados de forma significativa. A Figura 8.7 apresenta os valores de pressão média em função do comprimento do conduto nylon para três posições ao longo do ressalto hidráulico, considerando as faixas de variação aceitáveis para a pressão média. Estas faixas então

centradas no valor de pressão referente aos ensaios com os transdutores junto ao fundo do canal com a utilização de um conduto de nylon de 2 cm.

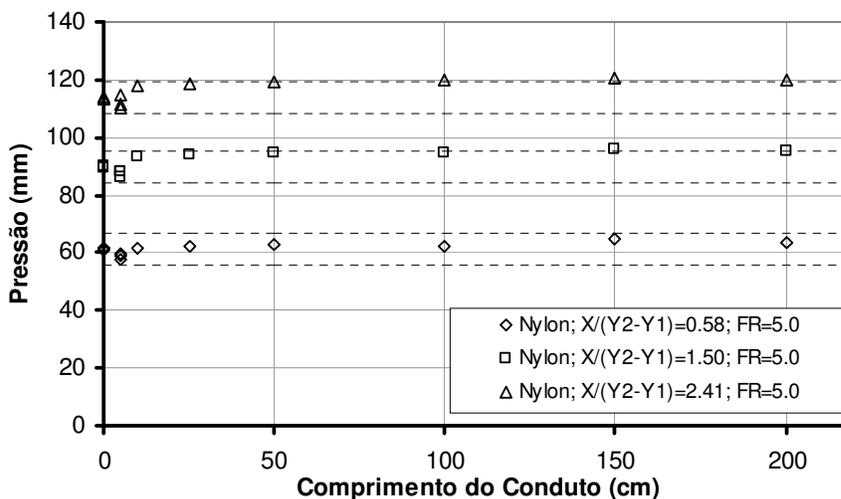


Figura 8.7 - Variação da pressão média em função do comprimento do conduto de nylon para três posições ao longo do ressalto hidráulico,  $Fr_1 = 5,0$ .

Foi verificado que o desvio padrão sofre influência significativa à medida que são modificados os comprimentos dos condutos de nylon utilizados. A Figura 8.8 apresenta os valores de desvio padrão em função do comprimento do conduto nylon para três posições ao longo do ressalto hidráulico, pode-se verificar que a medida que os comprimentos de conduto aumentam o valor do desvio padrão diminui consideravelmente.

Para os estudos dos três menores comprimentos de condutos de nylon houve necessidade de mudança de posição dos transdutores devido às limitações da instalação experimental, podendo causar algumas diferenças nos resultados obtidos, como anteriormente comentado. Através da repetição de condições de ensaio dentro da mesma seqüência de ensaio verificaram-se diferenças da ordem de 2 mm para a pressão média e de 3,3 mm para o desvio padrão. Essas diferenças, somadas aos erros dos transdutores, permite criar faixas de variação considerada como aceitável para os resultados dos ensaios com condutos de nylon. Essas faixas seriam de  $\pm 5,5$  mm para a pressão média e de aproximadamente  $\pm 7$  mm para o desvio padrão. Verifica-se que os dados referentes à pressão média se encontram dentro da dessa faixa de variação.

Pela análise do desvio padrão, pode-se dizer que ocorre perda de informação e descaracterização do sinal coletado à medida que o comprimento do conduto de nylon aumenta. O pequena variação no valor do desvio padrão verificado nos comprimentos

menores está dentro da faixa de erro aceitável do transdutor de pressão ( $\pm 3,5$  mm). Analisando-se a Figura 8.8 pode-se sugerir que a utilização de condutos de nylon com diâmetro de 2 mm e com comprimentos inferiores a 25 cm possibilita coletar sinais de flutuação de pressão no ressalto hidráulico sem gerar efeitos que causem perda significativa de informação.

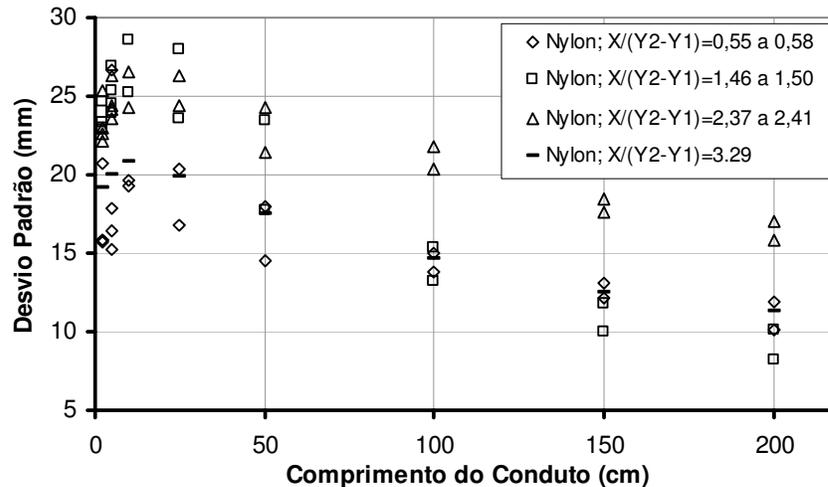


Figura 8.8 - Variação do desvio padrão em função do comprimento do conduto de nylon para três posições ao longo do ressalto hidráulico,  $Fr_1 = 5,0$ .

### 8.1.3 Valores extremos de pressão

Para verificar a influência do comprimento dos condutos sobre os valores extremos e sanar os erros que poderiam ocorrer devido a algum erro de nível de referência (zero do transdutor), foram retiradas as médias dos sinais a fim de se trabalhar apenas com a variação do sinal coletado. A partir do sinal coletado e subtraindo suas médias, foram determinadas as semi-amplitudes para diversas probabilidades de serem inferiores ou iguais a determinado valor. As probabilidades de maior interesse são as que apresentam valores extremos de pressão, e conseqüentemente esforços extremos sobre a estrutura. Serão apresentados aqui os resultados obtidos para as probabilidades de 1%, 5%, 10%, 90%, 95% e 99% de serem inferiores a um determinado valor.

As Figura 8.9, Figura 8.10 e Figura 8.11 apresentam a variação dos valores das flutuações de pressões extremas em função do comprimento do conduto.

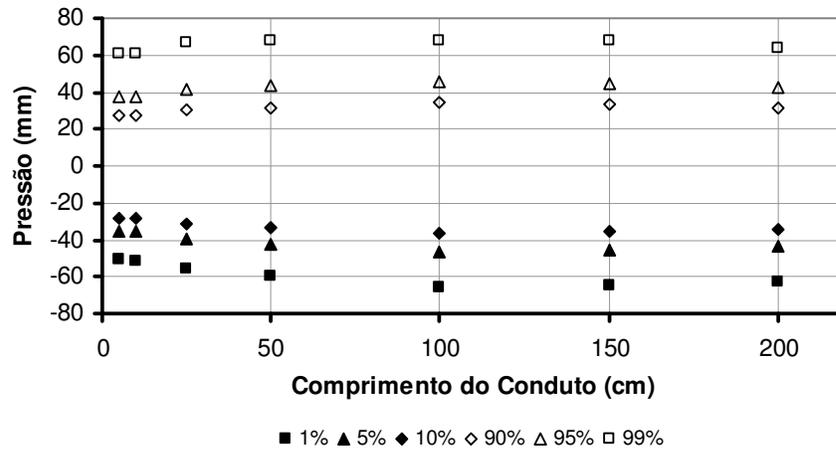


Figura 8.9 – Pressões extremas em função do comprimento de conduto de PVC, 4,8 mm de diâmetro e espessura de 1,5 mm,  $X/(Y_2-Y_1)=1,49$  e  $Fr_1 = 5,1$ .

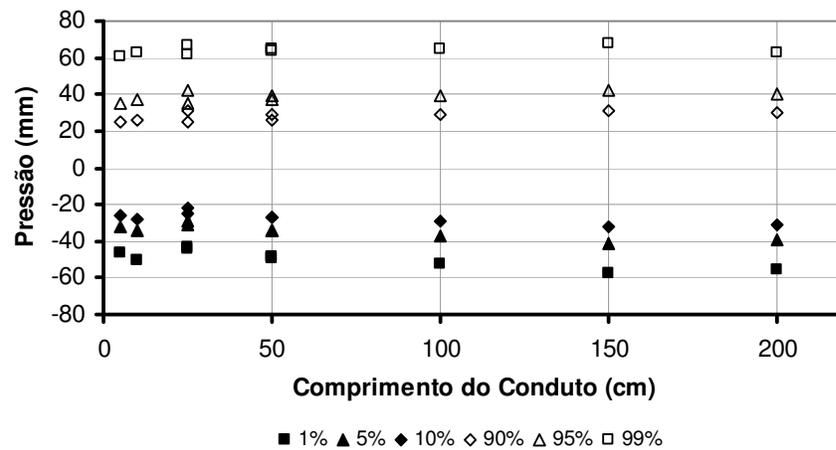


Figura 8.10 – Pressões extremas em função do comprimento de conduto de PVC, 6,4 mm de diâmetro e espessura de 1,0 mm,  $X/(Y_2-Y_1)=1,50$  e  $Fr_1$  entre 5,0 e 5,1.

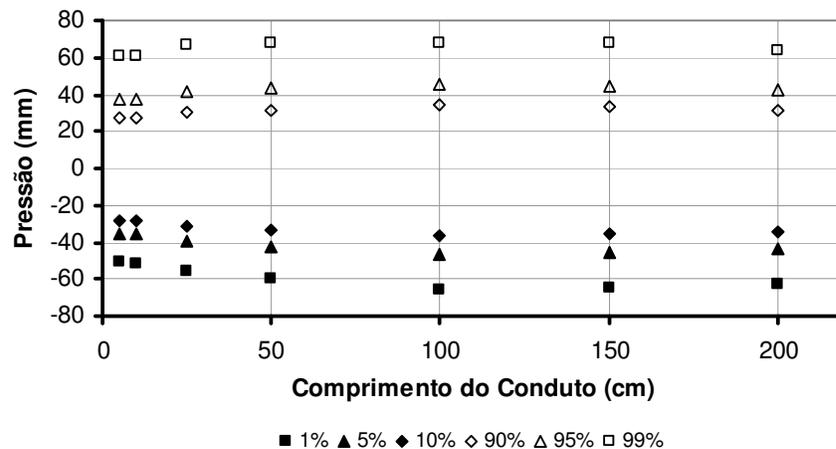


Figura 8.11 – Pressões extremas em função do comprimento de conduto de PVC, 7,9 mm de diâmetro e espessura de 1,5mm,  $X/(Y_2-Y_1)=1,43$  e  $Fr_1$  entre 5,1 e 5,2.

Verifica-se que existe uma pequena variação, mas de uma maneira geral pode-se concluir que o comprimento dos condutos não tem grande influência sobre o valor coletado. A repetição de alguns ensaios mostrou que se pode esperar uma variação de cerca de 7 mm sobre o valor pressão das semi-amplitudes referentes as probabilidades apresentadas. A essa variação devem ser agregados os efeitos da oscilação da posição do ressalto hidráulico e o erro do transdutor ( $\pm 3,5$  mm)

A mesma afirmação pode ser feita quando nos referimos as diferentes espessuras e aos diâmetros internos estudados. A Figura 8.12 apresenta a comparação das pressões com probabilidade de 1%, 10%, 90% e 99% em função do diâmetro e do comprimento dos condutos. Apesar de existirem variações consideráveis, não se verificou um padrão claro de comportamento referente aos diâmetros analisados.

Entretanto, quando se analisam os valores extremos adquiridos com a utilização de condutos de nylon unindo a tomada de pressão ao transdutor, mais uma vez, são percebidas diferenças de valores à medida que aumentamos os comprimentos dos condutos. De uma forma geral há uma diminuição de extremos, uma diminuição de seus módulos, Figura 8.13

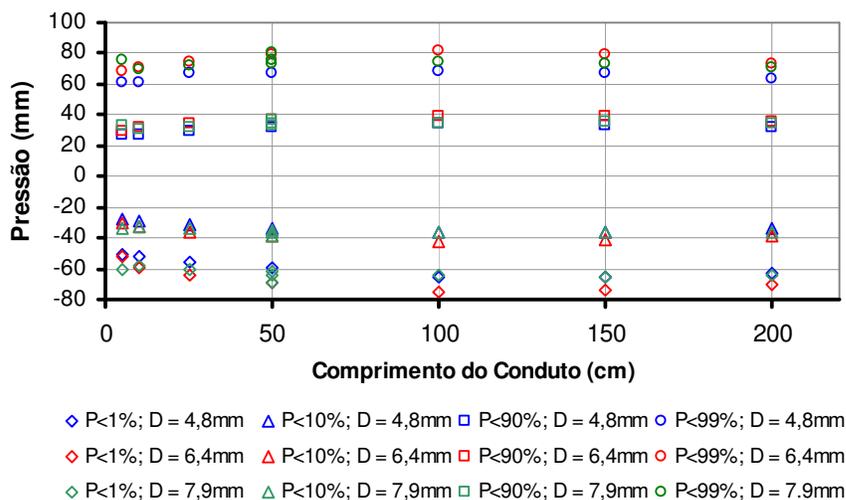


Figura 8.12 – Pressões extremas em função do diâmetro do conduto de PVC com espessura de parede igual a 1,5 mm,  $Fr_1$  entre 5,0 e 5,2.

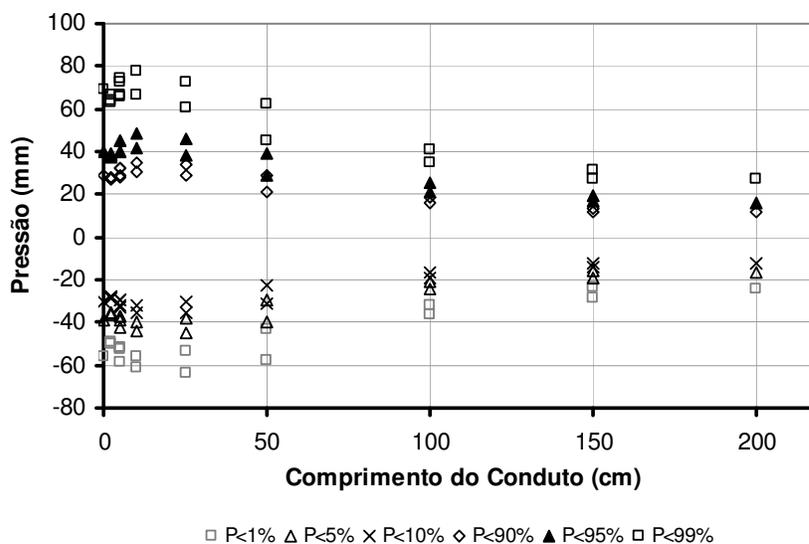


Figura 8.13 – Pressões extremas em função do comprimento do conduto de nylon,  $X/(Y_2 - Y_1) = 1,50$ ,  $Fr_1 = 5,0$ .

Nota-se claramente na figura anterior que o comprimento do conduto de nylon utilizado tem grande influência sobre os valores extremos de pressão. Pode-se dizer que a influência é considerada pequena e os valores não sofrem grandes alterações para comprimentos até a ordem de 25 cm. Verifica-se também, para comprimentos demasiadamente grandes, que os valores atribuídos às probabilidades exemplificadas acima tendem a apresentar valores muito próximos. A perda de informação sobre valores extremos de pressão causada com a utilização de condutos longos pode representar subestimação dos esforços hidrodinâmicos em bacias de dissipação.

Pelas análises feitas pode-se dizer que para diâmetros iguais ou superiores a 4,8 mm não ocorre perda de informação sobre os valores extremos de pressão em um ressalto hidráulico, entretanto, à medida que o diâmetro diminui (2,0 mm para o conduto de nylon utilizado), os efeitos tornam-se importantes, recomendando-se a utilização de condutos com pequenos comprimentos, menores que 25 cm.

#### 8.1.4 Função de densidade de probabilidade e coeficientes de assimetria e curtose

A função de densidade de probabilidade informa sobre a concentração (porcentagem) esperada dos dados de uma amostra ao longo da amplitude dessa amostra.

Um coeficiente de assimetria ( $A_d$ ) positivo indica a existência, na amostra, de uma maior concentração de valores muito superiores à média, deslocando a função de densidade

de probabilidade para a direita (valores superiores à média). Da mesma maneira, um valor de assimetria negativo indica uma função de densidade de probabilidade deslocada para a esquerda (valores inferiores à média). Uma distribuição do tipo normal, que é simétrica em relação à média, possui assimetria igual a zero.

Já o coeficiente de curtose ( $k$ ) é uma medida de dispersão que caracteriza o "achatamento" da curva da função de distribuição. Valores inferiores a três indicam distribuições mais afuniladas (mais altas) e concentradas em torno do valor médio, quando comparadas com a distribuição Normal. Em oposição, valores superiores a três indicam que a função de distribuição dados é mais achatada, estão menos concentrados em relação à média em comparação com uma distribuição do tipo Normal.

A utilização de condutos flexíveis com diâmetros pequenos em medições de flutuação pressão em ressalto hidráulico, como no caso o conduto de nylon com 2 mm de diâmetro, poderia afetar os valores dos coeficientes assimetria e curtose, uma vez que influencia os valores extremos de pressão e o desvio padrão da amostra.

A Figura 8.14 apresenta a comparação das funções de densidade de probabilidade de frequência (histogramas de frequência) dos ensaios realizados com condutos de PVC de 4,8 mm de diâmetro. Verifica-se que não há diferença significativa sobre a forma dos histogramas. Podendo-se afirmar que o comprimento do conduto não influencia a forma do histograma. O mesmo comportamento foi verificado para todos os ensaios realizados para os demais condutos de PVC. Vale lembrar que os histogramas apresentados foram feitos para sinais dos quais foram subtraídas as médias, por esse motivo, se encontram centrados sobre o valor nulo. Uma vez que os valores extremos de pressão e o desvio padrão não sofreram influência significativa com a utilização de condutos com diâmetro iguais ou superiores a 4,8 mm, resolveu-se dar maior atenção aos condutos flexíveis de nylon (2 mm de diâmetro) no que diz respeito ao coeficiente de assimetria e curtose.

A análise do efeito da utilização de condutos flexíveis sobre os valores do coeficiente de assimetria e do coeficiente de curtose se mostra difícil devido a grande dispersão desses coeficientes (Marques et al 1997). Primeiramente, no caso dos condutos de nylon, serão apresentados os histogramas dos ensaios realizados e as distribuições dos coeficientes de assimetria e curtose comparada com os resultados de outros autores.

A Figura 8.15 apresenta o histograma de frequência dos ensaios realizados com condutos de nylon. Verifica-se forte influência sobre a forma do histograma à medida que modificam os comprimentos dos condutos. Pela Figura 8.15, pode-se verificar claramente que o histograma torna-se cada mais concentrado em torno da média a medida que o comprimento do conduto aumenta, o que pode indicar perda de informação sobre valores extremos.

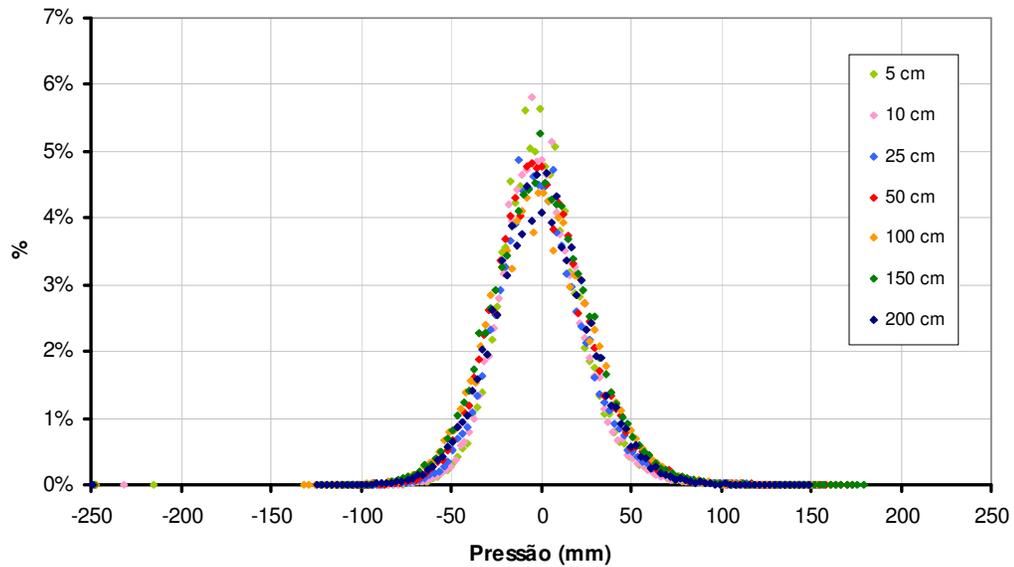


Figura 8.14 – Histogramas de frequência referente as medições efetuadas com condutos de PVC, diâmetro de 4,8 mm,  $X/(Y_2 - Y_1) = 1,49$ ,  $Fr_1 = 5,1$ .

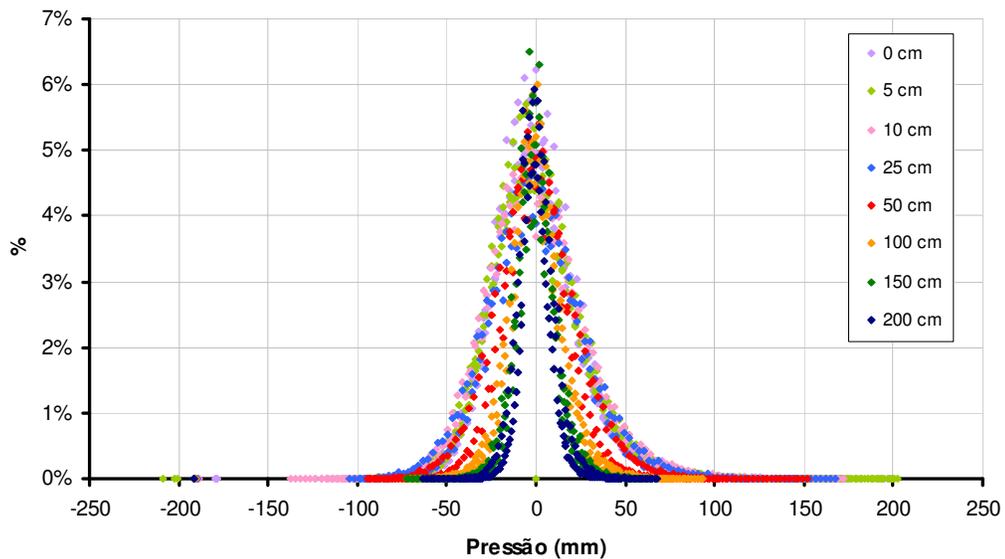


Figura 8.15 - Histogramas de frequência referente as medições efetuadas com condutos de nylon, diâmetro de 2,0 mm,  $X/(Y_2 - Y_1)$  entre 1,46 e 1,50,  $Fr_1 = 5,0$ .

A Figura 8.16 e a Figura 8.17 apresentam a distribuição dos coeficientes de assimetria e curtose para os ensaios em que se utilizou os condutos de nylon. Verifica-se que ambos coeficientes apresentam a tendência esperada quando comparados com dados de outros autores. Cabe lembrar que os estudos realizados pelos autores citados são referentes a ressaltos formados a jusante de vertedouros, portanto, pode-se esperar alguma diferença de

comportamento devido às condições de desenvolvimento do escoamento. A Figura 8.18 e a Figura 8.19 apresentam o comportamento dos coeficientes de assimetria e curtose em função do comprimento do conduto.

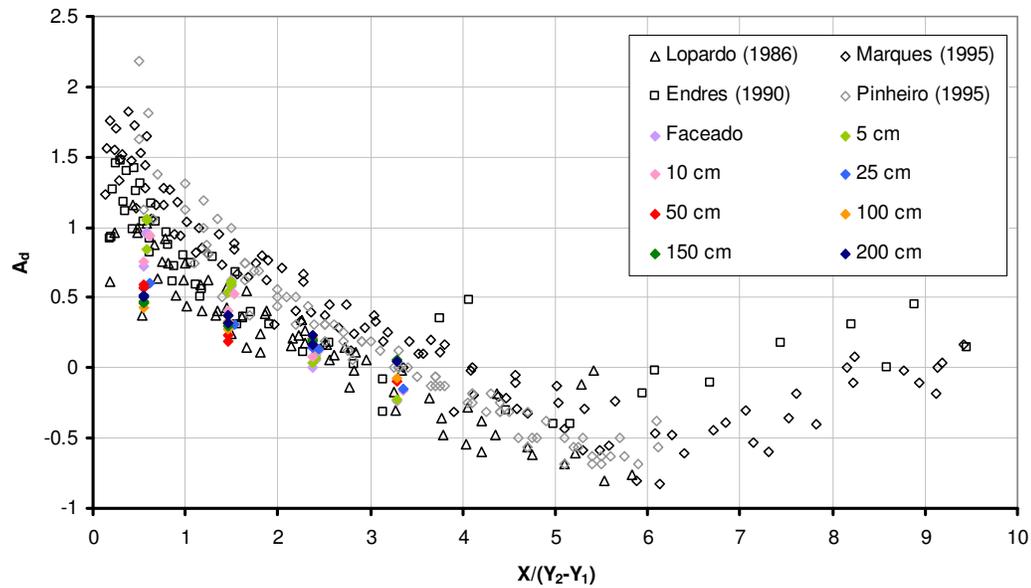


Figura 8.16 – Coeficiente de assimetria dos ensaios realizados com a utilização de condutos de nylon, diâmetro de 2,0 mm,  $Fr_1 = 5,0$ .

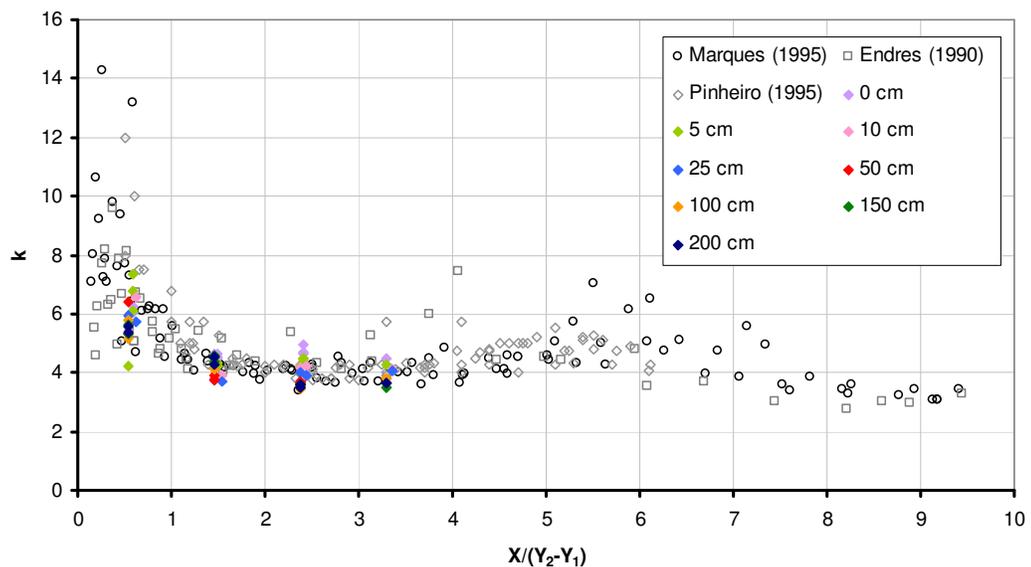


Figura 8.17 - Coeficiente de curtose dos ensaios realizados com a utilização de condutos de nylon, diâmetro de 2,0 mm,  $Fr_1 = 5,0$ .

Analisando a Figura 8.18 verifica-se uma diminuição do coeficiente de assimetria em função do comprimento do conduto utilizado para as primeira e a segunda tomadas de

pressão,  $X/(Y_2-Y_1) = 0,55$  a  $0,58$  e  $X/(Y_2-Y_1) = 1,46$  a  $1,50$  respectivamente. Esse comportamento indicaria que os valores que são muito maiores à média poderiam estar sofrendo algum tipo de efeito com o aumento do comprimento do conduto. Segundo os dados de Lopardo (1986), Endres (1990), Marques (1995) e Pinheiro (1995), para a posição adimensionalizada referente à primeira tomada de pressão, uma variação do coeficiente de assimetria entre 0,45 e 1,5 pode ser considerada normal, conforme a Figura 8.16. No presente estudo essa variação permaneceu entre 0,43 e 1,06, valores muito próximo do esperado. Para a posição referente à segunda tomada de pressão, os dados dos autores apresentam uma variação de 0,25 a 1,0 aproximadamente. Neste estudo a variação registrada ficou em torno de 0,20 a 0,63, sendo bem próxima à esperada.

Para a terceira e quarta tomadas de pressão,  $X/(Y_2-Y_1) = 2,37$  a  $2,41$  e  $X/(Y_2-Y_1) = 3,29$ , verificam-se que os valores de assimetria apresentam a tendência de aumentarem a medida que se incrementa o comprimento do conduto utilizado. Esse comportamento pode indicar que os valores muito menores à média sofrem algum tipo de influência à medida que se aumentam os comprimentos dos condutos de nylon. Os valores variam de 0,00 a 0,24 para a terceira tomada e entre -0,24 e 0,06 para a quarta tomada de pressão. A variação verificada para os dados de Lopardo (1986) Endres (1990), Marques (1995) e Pinheiro (1995) é de 0,05 a 0,50 para a terceira tomada e em torno de -0,30 e 0,25 para a quarta tomada. A variações encontradas nesse estudo, para as posições adimensionalizadas referentes a terceira e quarta tomada de pressão, estão dentro das faixas verificadas pelos autores citados.

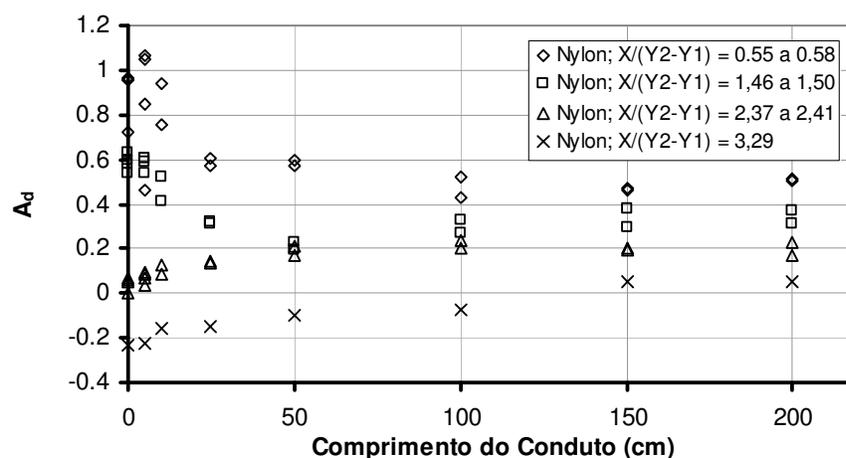


Figura 8.18 – Coeficiente de assimetria em função do comprimento dos condutos de nylon,  $Fr1 = 5,0$ .

Talvez as variações verificadas na Figura 8.18 sejam normais e não atribuídas ao comprimento, uma vez que, o coeficiente de assimetria, apresenta naturalmente grande dispersão. As tendências de diminuição registradas para as duas primeiras tomadas e de crescimento para as duas seguintes induz acreditar que existam tais influências devido ao comprimento, mas a confirmação dessa afirmação se mostra difícil devido à grande dispersão natural dos dados.

Ao analisar-se a Figura 8.19, verificamos que, aparentemente, o coeficiente de curtose referente as medições de pressão das posições  $X/(Y_2-Y_1) = 0,55$  a  $0,58$ ,  $X/(Y_2-Y_1) = 2,37$  a  $2,41$  e  $X/(Y_2-Y_1) = 3,29$  apresenta a tendência de diminuir a medida que o conduto utilizado torna-se maior. Para a tomada de pressão localizada na posição  $X/(Y_2-Y_1) = 0,55$  a  $0,58$ , o coeficiente de curtose apresenta valores entre aproximadamente 5,15 e 7,34, dentro da faixa de variação verificada por Lopardo (1986), Endres (1990), Marques (1995) e Pinheiro (1995). Os dados da segunda e terceira tomada de pressão apresentam valores que variam dentro de uma faixa entre 3,42 e 4,92, da mesma ordem de grandeza da encontrada pelos autores citados. Da mesma maneira, a quarta tomada, localizada na posição  $X/(Y_2-Y_1) = 3,29$ , apresentou uma variação que também se manteve dentro da faixa verificada pelos autores citados, variando para este estudo entre 3,47 e 4,50.

A diminuição do valor do coeficiente de curtose em função do aumento do comprimento do conduto indicaria que os dados estariam se concentrando mais em torno do valor médio, esse comportamento foi apresentado pela Figura 8.15.

Ao contrário das demais tomadas de pressão, o coeficiente de curtose calculado para a segunda tomada, posição  $X/(Y_2-Y_1) = 1,46$  a  $1,50$ , não apresenta uma tendência clara de diminuição em função do aumento do conduto utilizado, apresentando variação entre 3,68 a 4,61.

O coeficiente de curtose apresenta normalmente uma variação maior que a assimetria e que o desvio padrão, pois as diferenças entre os valores medidos e a média são elevadas à quarta potência. Devido a grande dispersão do coeficiente de curtose, naturalmente verificada, inclusive por outros autores, não se concluir categoricamente que o coeficiente de curtose sofre influência devido ao comprimento dos condutos utilizados.

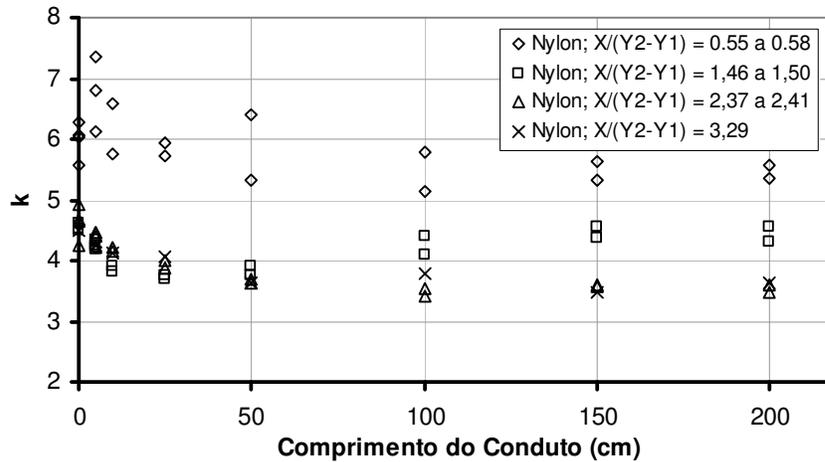


Figura 8.19 - Coeficiente de curtose em função do comprimento dos condutos de nylon,  $Fr_1 = 5,0$ .

### 8.1.5 Espectro de Energia (densidade espectral das flutuações de pressão)

A análise da densidade espectral das flutuações de pressão (espectros de energia das flutuações de pressão) mostrou que existe influência devido ao comprimento do conduto utilizado. A Figura 8.22, a Figura 8.23, a Figura 8.24 e a Figura 8.25 apresentam os espectros de energia em função do comprimento do conduto para as situações estudadas, avaliando o comportamento referente à segunda tomada de pressão.

Verifica-se que a forma do espectro muda de acordo com o comprimento de conduto utilizado. Nota-se que os condutos de comprimentos menores apresentam espectros com frequências dominantes na faixa de 15 a 20 Hz. A bibliografia a respeito afirma que as frequências dominantes do ressalto hidráulico estão dentro de faixas bem inferiores às medidas neste trabalho. (Lopardo 1986, Ortiz 1998). Entretanto, sabe-se, através de comparações entre modelos reduzidos e protótipo, que os ressaltos hidráulicos em modelo (menores dimensões) apresentam frequências dominantes superiores às verificadas em protótipo, como é de se esperar em modelos de semelhança de Froude. A instalação aqui estudada, devido as suas dimensões, deve apresentar comportamento semelhante ao de modelos. Através da semelhança de Froude temos:

$$\frac{Freq_{PROTÓTIPO}}{Freq_{MODELO}} = \lambda_{freq};$$

onde:

$$\lambda_{freq} = \frac{1}{\lambda_t};$$

$$\lambda_t = \frac{\lambda_L}{\lambda_v};$$

$$\lambda_v = \sqrt{\lambda_L};$$

$$\lambda_{freq} = \frac{1}{\sqrt{\lambda_L}};$$

sendo:

$\lambda_{freq}$  = relação de escala de frequências;

$\lambda_t$  = relação de escala temporal;

$\lambda_v$  = relação de escala de velocidades;

$\lambda_L$  = relação de escala geométrica.

Exemplificando: em um protótipo onde a frequência dominante das medições de pressão em um determinado ponto apresentasse um valor próximo a 2 Hz, seria esperado para um modelo, em escala 1:50 frequência dominante em torno de 14 Hz.

Foi descartada a hipótese da presença de ruído no sinal justificar a energia verificada em frequências mais elevadas para o caso dos menores comprimentos de conduto. O ruído existente não possuía intensidade suficiente para causar influência sobre o sinal.

Com a instalação de um acelerômetro junto ao fundo do canal, que possibilitava medir oscilações da estrutura na direção transversal ao escoamento, verificou-se que a instalação experimental apresentava vibrações em frequências próximas de 17,5 Hz, 22 Hz, 36 Hz e 44,5 Hz, dentro da faixa que foi investigada, até 50 Hz. Através de um teste de pulso expedito, foi verificado que uma frequência natural significativa da estrutura se encontra em torno da frequência 50 Hz.

Constatou-se, à medida que se aumenta o comprimento do conduto utilizados, que os picos dos espectros tendem a se deslocar para valores menores de frequência, apresentando um efeito semelhante a um órgão de tubos, onde os tubos maiores produzem os sons mais graves (frequências mais baixas). Esse comportamento pode ser verificado através da Figura 8.20 e Figura 8.21, onde são apresentadas as distribuições do número de Strouhal em função do comprimento dos condutos utilizados.

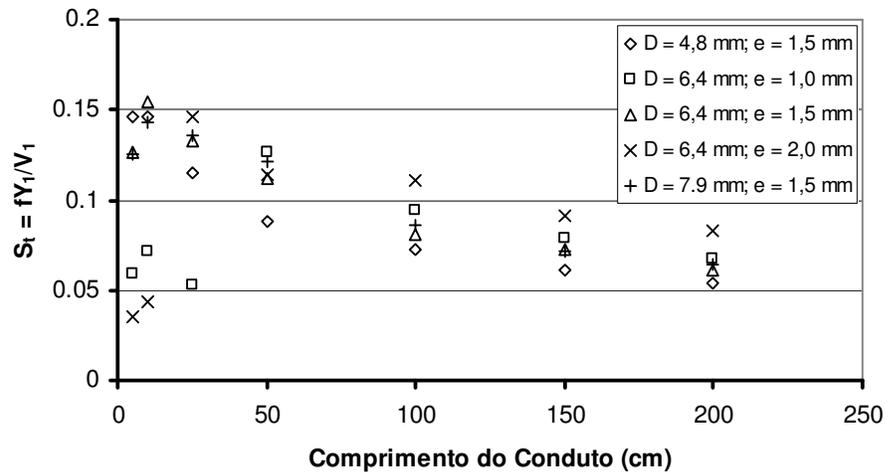


Figura 8.20 – Variação do número de Strouhal em função do comprimento dos condutos de PVC,  $Fr_1$  entre 5,0 e 5,20 e  $X/(Y_2-Y_1)$  entre 1,34 e 1,53.

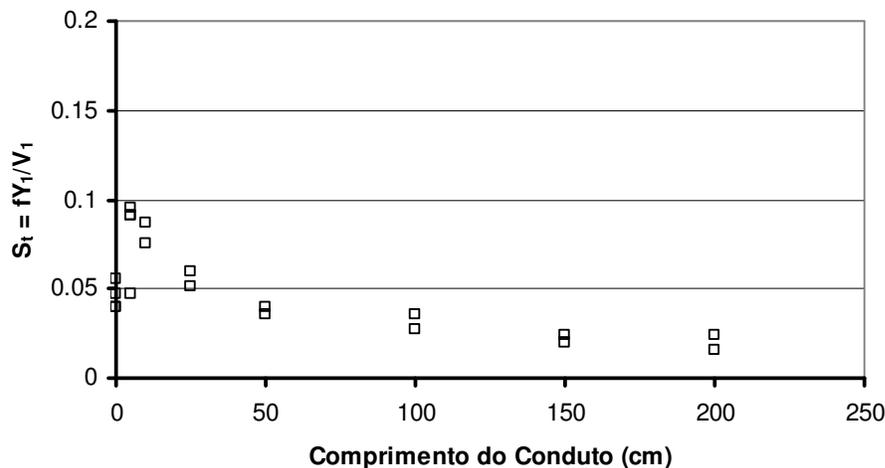


Figura 8.21 - Variação do número de Strouhal em função do comprimento do conduto de nylon,  $Fr_1 = 5,0$  e  $X/(Y_2-Y_1)$  entre 1,46 e 1,53.

No entanto, analisando a Figura 8.22, a Figura 8.23 e a Figura 8.24 verificou-se que os diversos comprimentos podem apresentar comportamentos semelhantes, de acordo com o valor frequência observada. Por exemplo, para os condutos de PVC com comprimentos de 5 a 25 cm e diâmetros internos de 6,4 e 7,9 mm pode-se dizer que até as frequências próximas a 10 Hz os espectros apresentam comportamentos semelhantes. Segundo o verificado nas figuras apresentadas, para caracterizar frequências de até 10 Hz poderiam ser utilizados, sem efeito sobre o espectro de energia, comprimentos de até 25 cm, considerando as condições de ensaio apresentadas. A medida as frequências de interesse tornam se menores as figuras

abaixo mostram, para os condutos de PVC, que a utilização de condutos de maior comprimento seria aceitável. Por exemplo, para uma frequência de interesse da ordem de 5 Hz, poderiam ser utilizados condutos de até 50 cm com diâmetros internos de 4,8 a 7,9 mm.

Para os condutos de nylon, Figura 8.25, verifica-se que os espectros apresentam maiores diferenças entre os diferentes comprimentos de condutos utilizados. Não se pode afirmar para frequências de até 10 Hz que os condutos com comprimentos de até 25 cm representem bem o espectro de energia, se comparados com a situação onde o transdutor se encontra instalado com a utilização de um conduto de apenas 2 cm. Essa diferença pode ser atribuída ao menor diâmetro dos condutos de nylon, da mesma forma que o observado para os valores extremos ou para o desvio padrão. A Tabela 4.2 apresenta algumas sugestões de comprimentos de condutos de PVC e nylon em função do da frequência de interesse, baseada nos resultados aqui apresentados.

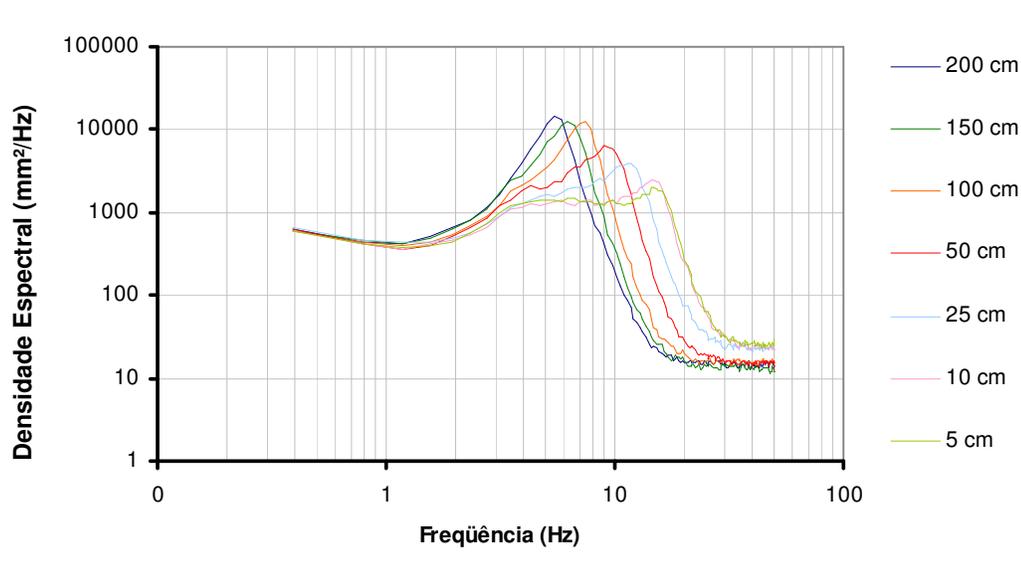


Figura 8.22 – Espectro de energia dos experimentos com condutos de PVC de 4,8 mm de diâmetro e espessura de 1,5 mm,  $X/(Y_2 - Y_1) = 1,49$ ,  $Fr_1 = 5,11$ .

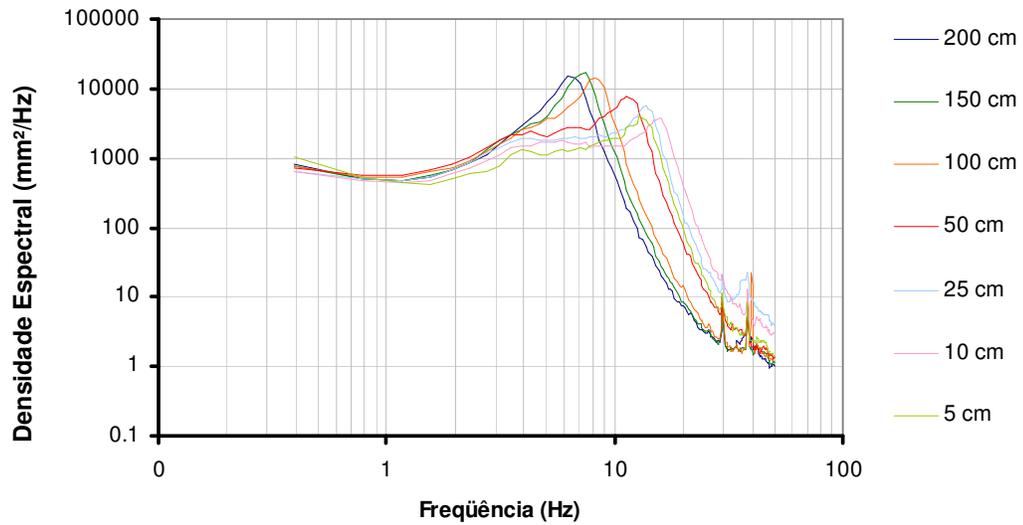


Figura 8.23 – Espectro de energia dos experimentos com condutos de PVC de 6,4 mm de diâmetro e espessura de 1,5 mm,  $X/(Y_2 - Y_1)$  entre 1,34 e 1,53,  $Fr_1$  entre 5,02 e 5,12.

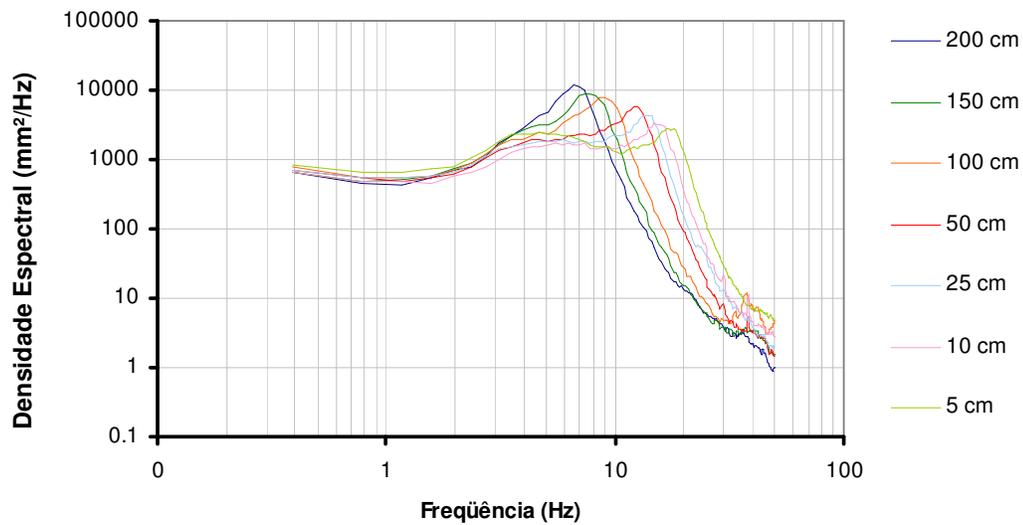


Figura 8.24 – Espectro de energia dos experimentos com condutos de PVC de 7,9 mm de diâmetro e espessura de 1,5 mm,  $X/(Y_2 - Y_1)$  entre 1,43 e 1,47,  $Fr_1$  entre 5,11 e 5,23.

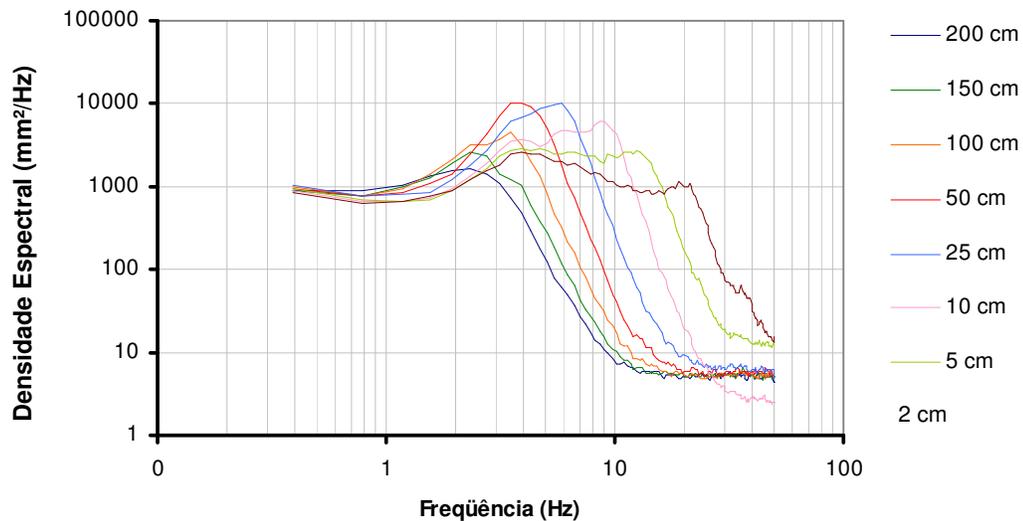


Figura 8.25 – Espectro de energia dos experimentos com condutos de PVC de 7,9 mm de diâmetro e espessura de 1,5 mm  $X/(Y_2 - Y_1)$  entre 1,46 e 1,50,  $Fr_1$  entre 4,97 e 4,99.

Tabela 8.2 – Recomendações de comprimentos de condutos para estudos de espectro de frequência em medições de flutuação de pressão em ressalto hidráulico

Frequência de Interesse	Material	Diâmetro (mm)	Comprimento Recomendado (cm)
$\leq 1$ Hz	PVC	4,8 a 7,9	$\leq 200$
	Nylon	$\leq 2$	$\leq 200$
$\leq 5$ Hz	PVC	7,9	$\leq 100$
	PVC	4,8 a 6,4	$\leq 50$
	Nylon	$\leq 2$	$\leq 10$
$\leq 10$ Hz	PVC	6,4 a 7,9	$\leq 25$
	PVC	4,8	$\leq 10$
	Nylon	$\leq 2$	Sem condutos
$>10$ Hz	PVC	4,8 a 7,9	$\leq 5$
	Nylon	$\leq 2$	Sem condutos

A Figura 8.26, Figura 8.27 e Figura 8.28 ilustram o efeito da diferença de diâmetro sobre o espectro de energia para três comprimentos de conduto (5 cm, 10 cm e 25 cm). Verificam-se diferenças não muito significativas, principalmente entre os diâmetros de 6,4 mm e 7,9 mm. Os picos dos espectros se posicionam sobre a mesma faixa de frequência. Não se pode confirmar que os condutos com maior diâmetro apresentam menores valores para a ordenada espectral, como o verificado por Trierweiler et al (2005b), uma vez que os valores máximos de pico alternam entre os diâmetros estudados. Possivelmente, Trierweiler et al (2005b) não verificaram o comportamento aqui descrito, pois dispunham de menor quantidade de ensaios realizados.

Quando se analisa o efeito devido à espessura da parede do conduto (e), Figura 8.29, verifica-se para frequências inferiores a 10 Hz, que não há influência significativa. Diferenças são verificadas para frequências mais elevadas, mas o comportamento foi considerado satisfatório, uma vez que a forma do espectro não apresenta grande diferença para frequências inferiores as 30 Hz. Para o ressalto hidráulico, valores importantes de energia são dificilmente encontrados acima de 25 Hz em modelos reduzidos.

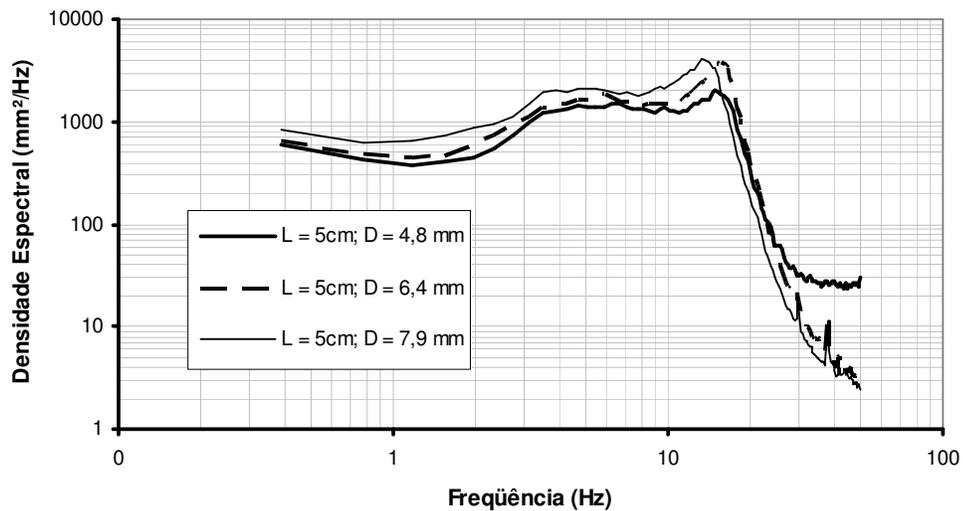


Figura 8.26 – Avaliação do efeito do diâmetro interno sobre o espectro de energia para condutos com 5 cm de comprimento, medições referentes à segunda tomada de pressão,  $X/(Y_2 - Y_1)$  entre 1,35 e 1,49,  $Fr_1$  entre 5,08 e 5,23.

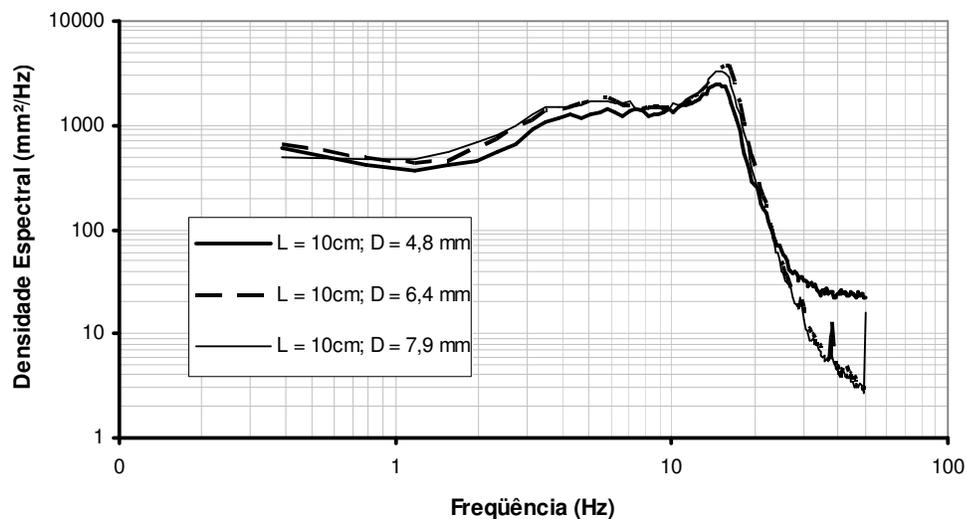


Figura 8.27 – Avaliação do efeito do diâmetro interno sobre o espectro de energia para condutos com 10 cm de comprimento, medições referentes à segunda tomada de pressão,  $X/(Y_2 - Y_1)$  entre 1,43 e 1,53,  $Fr_1$  entre 5,02 e 5,16.

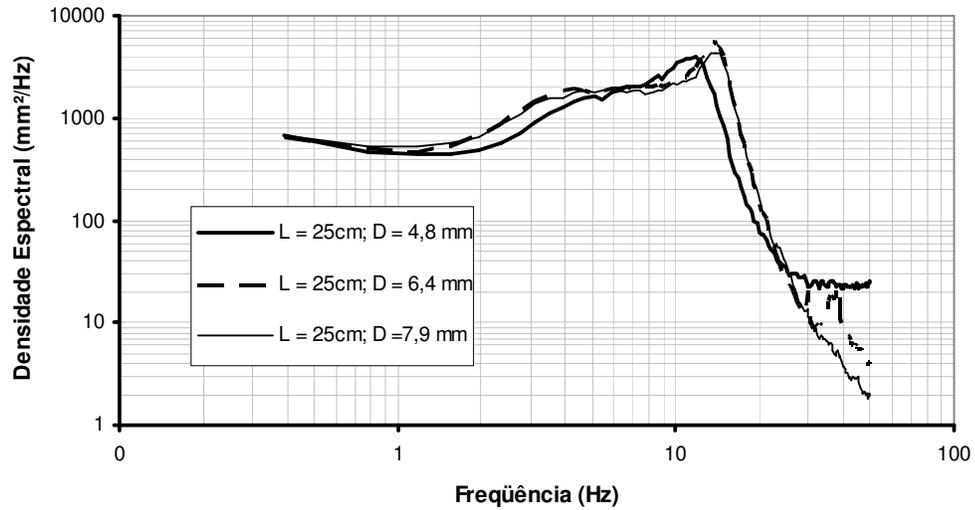


Figura 8.28 - Avaliação do efeito do diâmetro interno sobre o espectro de energia para condutos com 25 cm de comprimento, medições referentes à segunda tomada de pressão,  $X/(Y_2 - Y_1)$  entre 1,43 e 1,52,  $Fr_1$  entre 5,11 e 5,15.

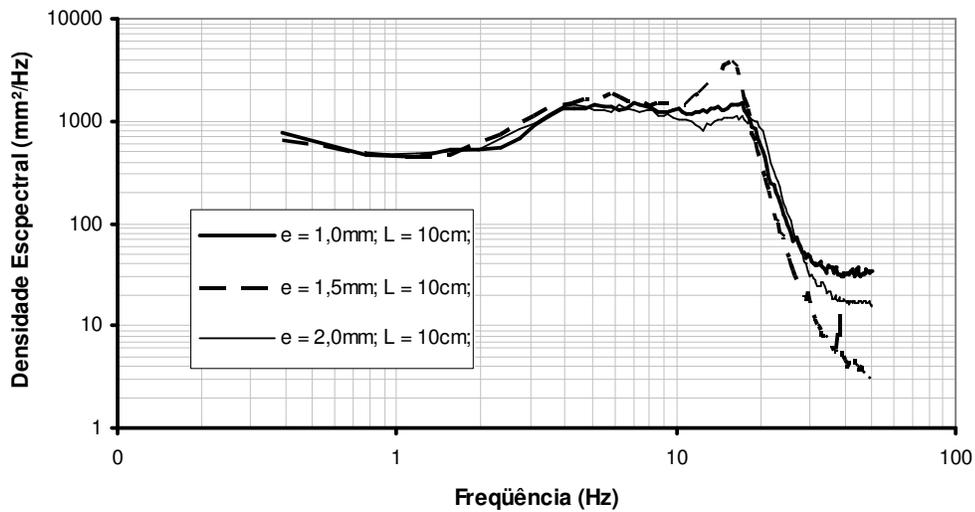


Figura 8.29 - Avaliação do efeito da espessura do conduto sobre o espectro de energia para condutos com 10 cm de comprimento, medições referentes à segunda tomada de pressão,  $X/(Y_2 - Y_1)$  entre 1,50 e 1,523,  $Fr_1 = 5,02$ .

## 9 ANEXO II

### 9.1 Diferenças relativas entre o modelo proposto e os valores verificados experimentalmente

Tabela 9.1 – Diferenças relativas verificadas entre o modelo proposto e os valores verificados experimentalmente para  $Fr_1 = 3,97$ .

	$X/(Y_2-Y_1)$	P<0,1%	P<1%	P<5%	P<10%	P<90%	P<95%	P<99%	P<99,9%
$Fr_1 = 3,97; S = 1,0$	0,91	-11%	-21%	-39%	-50%	59%	46%	32%	39%
	2,24	-9%	-14%	-24%	-34%	44%	35%	25%	14%
	3,58	-6%	-14%	-27%	-34%	54%	42%	27%	19%
	4,91	-12%	-21%	-36%	-45%	53%	42%	27%	18%
	6,25	8%	2%	-12%	-24%	52%	43%	32%	26%
	7,59	19%	25%	30%	31%	33%	36%	35%	30%
$Fr_1 = 3,97; S = 1,1$	1,34	-12%	-12%	-11%	-12%	-12%	-14%	-15%	-10%
	2,67	11%	9%	8%	7%	7%	7%	9%	10%
	4,01	9%	9%	5%	8%	7%	7%	7%	6%
	5,34	15%	12%	12%	11%	9%	12%	11%	11%
	6,68	22%	23%	24%	23%	22%	18%	20%	21%
	8,01	12%	18%	25%	24%	28%	28%	24%	22%
$Fr_1 = 3,97; S = 1,2$	1,34	-11%	-11%	-6%	-12%	-14%	-16%	-19%	-16%
	2,67	4%	9%	18%	11%	9%	13%	15%	16%
	4,01	5%	4%	16%	6%	8%	8%	10%	11%
	5,34	10%	10%	19%	8%	10%	9%	10%	10%
	6,68	21%	19%	31%	17%	15%	14%	19%	17%
	8,01	-4%	-1%	10%	-1%	-6%	-3%	0%	2%
$Fr_1 = 3,97; S = 1,3$	1,34	-19%	-22%	-15%	-23%	-25%	-27%	-31%	-25%
	2,67	1%	6%	16%	7%	8%	9%	13%	14%
	4,01	3%	3%	16%	5%	7%	7%	9%	10%
	5,34	13%	13%	25%	12%	12%	12%	13%	14%
	6,68	22%	25%	33%	19%	20%	21%	20%	22%
	8,01	1%	-3%	7%	-11%	-11%	-10%	-8%	-4%
$Fr_1 = 3,97; S = 1,4$	1,34	-19%	-22%	-15%	-23%	-25%	-27%	-31%	-25%
	2,67	1%	6%	16%	7%	8%	9%	13%	14%
	4,01	3%	3%	16%	5%	7%	7%	9%	10%
	5,34	13%	13%	25%	12%	12%	12%	13%	14%
	6,68	22%	25%	33%	19%	20%	21%	20%	22%
	8,01	1%	-3%	7%	-11%	-11%	-10%	-8%	-4%

Tabela 9.2 – Diferenças relativas verificadas entre o modelo proposto e os valores verificados experimentalmente para  $Fr_1 = 4,55$ .

	$X/(Y_2-Y_1)$	P<0,1%	P<1%	P<5%	P<10%	P<90%	P<95%	P<99%	P<99,9%
$Fr_1 = 4,55; S = 1,0$	0,73	-17%	-35%	-49%	-61%	40%	29%	19%	30%
	1,80	-21%	-23%	-30%	-36%	22%	16%	11%	9%
	2,87	-17%	-19%	-26%	-36%	28%	21%	13%	5%
	3,93	-13%	-19%	-27%	-36%	33%	24%	14%	11%
	5,00	-2%	-10%	-23%	-32%	37%	29%	16%	11%
	6,07	-5%	-8%	-17%	-30%	37%	29%	20%	14%
	7,14	-8%	-1%	-4%	-9%	27%	23%	17%	11%
$Fr_1 = 4,55; S = 1,1$	1,07	16%	14%	13%	11%	10%	7%	4%	10%
	2,14	2%	3%	5%	4%	3%	3%	4%	-2%
	3,21	-7%	-6%	-5%	-6%	-5%	-5%	-5%	-7%
	4,28	-8%	-11%	-11%	-13%	-12%	-13%	-13%	-15%
	5,35	-8%	-5%	-6%	-8%	-8%	-9%	-8%	-4%
	6,42	-2%	-5%	-2%	-6%	-2%	-3%	-7%	-3%
	7,49	-14%	-7%	-5%	-6%	-5%	-6%	-7%	-7%
$Fr_1 = 4,55; S = 1,2$	1,07	11%	8%	8%	1%	-3%	-4%	-8%	-1%
	2,14	-2%	0%	11%	4%	2%	4%	7%	4%
	3,21	-9%	-2%	11%	1%	1%	2%	5%	6%
	4,28	-2%	-8%	7%	-7%	-6%	-5%	-3%	-1%
	5,35	12%	1%	13%	0%	-1%	0%	-2%	-1%
	6,42	0%	-2%	9%	-4%	-5%	-10%	-6%	3%
	7,49	-11%	-18%	-6%	-22%	-26%	-27%	-23%	-18%
$Fr_1 = 4,55; S = 1,3$	1,07	-6%	-10%	-9%	-15%	-19%	-21%	-24%	-15%
	2,14	-7%	-4%	5%	-4%	-5%	-4%	1%	-5%
	3,21	-2%	-1%	9%	0%	0%	2%	4%	2%
	4,28	-13%	-8%	5%	-6%	-3%	-3%	-2%	-2%
	5,35	1%	0%	13%	3%	3%	4%	0%	2%
	6,42	2%	0%	11%	-4%	-1%	-3%	-2%	2%
	7,49	-8%	-17%	-3%	-24%	-27%	-22%	-18%	-14%
$Fr_1 = 4,55; S = 1,4$	1,07	-13%	-16%	-17%	-26%	-27%	-29%	-30%	-19%
	2,14	-11%	-7%	1%	-7%	-8%	-9%	-8%	-11%
	3,21	-14%	-10%	4%	-6%	-6%	-4%	-3%	-6%
	4,28	-16%	-15%	2%	-11%	-7%	-6%	-6%	-4%
	5,35	-6%	-7%	9%	-3%	1%	1%	-1%	-2%
	6,42	7%	0%	14%	-1%	-2%	2%	3%	4%
	7,49	0%	-11%	2%	-20%	-17%	-18%	-14%	-8%

Tabela 9.3 – Diferenças relativas verificadas entre o modelo proposto e os valores verificados experimentalmente para  $Fr_1 = 5,01$ .

	$X/(Y_2-Y_1)$	P<0,1%	P<1%	P<5%	P<10%	P<90%	P<95%	P<99%	P<99,9%
$Fr_1 = 5,01; S = 1,0$	0,61	-46%	-69%	-84%	-89%	19%	8%	1%	22%
	1,50	-29%	-34%	-42%	-49%	6%	0%	-5%	-1%
	2,39	-11%	-18%	-26%	-33%	15%	9%	2%	-7%
	3,29	0%	-5%	-14%	-22%	28%	20%	11%	1%
	4,18	-4%	-5%	-13%	-21%	31%	23%	13%	4%
	5,07	-9%	-15%	-22%	-33%	25%	16%	7%	0%
	5,96	-16%	-17%	-27%	-32%	24%	13%	3%	-2%
	6,86	-16%	-9%	-11%	-8%	24%	24%	20%	17%
$Fr_1 = 5,01; S = 1,1$	0,89	-1%	-3%	-4%	-4%	-4%	-7%	-13%	-6%
	1,79	-11%	-13%	-12%	-14%	-16%	-17%	-17%	-18%
	2,68	-8%	-9%	-12%	-13%	-13%	-13%	-16%	-21%
	3,57	-1%	-6%	-8%	-10%	-10%	-10%	-13%	-12%
	4,46	-5%	-4%	-5%	-6%	-8%	-7%	-10%	-16%
	5,36	-3%	-6%	-7%	-10%	-11%	-12%	-14%	-14%
	6,25	-5%	-5%	-8%	-11%	-10%	-10%	-13%	-15%
	7,14	-14%	-10%	-6%	-14%	-15%	-12%	-15%	-18%
$Fr_1 = 5,01; S = 1,2$	0,89	-12%	-13%	-10%	-15%	-14%	-15%	-21%	-13%
	1,79	-30%	-24%	-13%	-23%	-27%	-30%	-30%	-25%
	2,68	-23%	-24%	-10%	-20%	-20%	-20%	-18%	-22%
	3,57	-14%	-12%	2%	-10%	-8%	-8%	-8%	-7%
	4,46	-5%	-3%	10%	-3%	2%	2%	-2%	-3%
	5,36	4%	0%	14%	1%	2%	1%	1%	6%
	6,25	8%	4%	17%	1%	1%	3%	0%	4%
	7,14	2%	5%	22%	10%	17%	17%	14%	7%

Tabela 9.4 – Diferenças relativas verificadas entre o modelo proposto e os valores verificados experimentalmente para  $Fr_1 = 5,88$ .

	$X/(Y_2-Y_1)$	P<0,1%	P<1%	P<5%	P<10%	P<90%	P<95%	P<99%	P<99,9%
$Fr_1 = 5,88; S = 1,0$	0,72	18%	13%	10%	10%	16%	18%	20%	34%
	1,78	-4%	4%	7%	8%	9%	11%	14%	12%
	2,83	8%	7%	9%	10%	12%	11%	11%	5%
	3,89	2%	1%	1%	1%	2%	2%	1%	-1%
	4,95	0%	1%	-2%	-3%	-4%	-5%	-5%	-4%
	6,01	-1%	-3%	-4%	-6%	-8%	-10%	-11%	-9%
	7,06	-17%	-11%	-4%	-4%	-14%	-13%	-12%	-15%

	$X/(Y_2-Y_1)$	$P<0,1\%$	$P<1\%$	$P<5\%$	$P<10\%$	$P<90\%$	$P<95\%$	$P<99\%$	$P<99,9\%$
$F_{r_1} = 5,88; S = 1,1$	1,06	25%	29%	34%	38%	5%	6%	7%	14%
	2,12	-2%	10%	18%	25%	-21%	-15%	-8%	-10%
	3,17	2%	5%	13%	22%	-35%	-28%	-20%	-17%
	4,23	-6%	2%	9%	19%	-51%	-42%	-32%	-25%
	5,29	3%	9%	16%	23%	-53%	-41%	-33%	-31%
	6,35	-3%	4%	14%	21%	-45%	-40%	-32%	-29%
	7,40	-19%	-10%	-5%	-1%	-31%	-28%	-26%	-23%
$F_{r_1} = 5,88; S = 1,2$	1,06	3%	3%	4%	-3%	43%	34%	22%	17%
	2,12	-14%	-3%	15%	13%	-32%	-27%	-21%	-24%
	3,17	-11%	-3%	20%	18%	-41%	-32%	-20%	-12%
	4,23	0%	3%	28%	25%	-37%	-28%	-18%	-8%
	5,29	10%	13%	37%	32%	-23%	-18%	-8%	0%
	6,35	18%	21%	39%	31%	-20%	-13%	-2%	6%
	7,40	-20%	-16%	2%	-10%	-38%	-38%	-38%	-38%
$F_{r_1} = 5,88; S = 1,3$	1,06	-18%	-30%	-43%	-63%	102%	80%	55%	23%
	2,12	-13%	-5%	11%	7%	-25%	-24%	-20%	-19%
	3,17	-12%	-6%	17%	15%	-40%	-32%	-20%	-15%
	4,23	-5%	3%	28%	24%	-36%	-28%	-17%	-9%
	5,29	14%	18%	40%	36%	-19%	-10%	-2%	3%
	6,35	22%	25%	42%	36%	-11%	-4%	3%	8%
	7,40	-12%	-12%	10%	-5%	-26%	-22%	-23%	-25%