

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

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

**ENGº CIVIL RAFAEL ANDRÉ WIEST**

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.

Porto Alegre, Julho de 2008

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

**Banca Examinadora:**

---

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

---

Prof. Dr. Luiz Augusto Magalhães Endres (IPH/UFRGS)

---

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

Data de Defesa: 02 de Julho de 2008

## APRESENTAÇÃO

Este trabalho foi desenvolvido no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob orientação do Prof. Dr. Marcelo Giulian Marques.

O trabalho teve o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, que possibilitou auxílio financeiro através de bolsa de estudos, indispensável para a evolução do trabalho.

Gostaria de agradecer a Furnas Centrais Elétricas S.A pelo apoio e parceria no projeto e especialmente o Laboratório de Hidráulica Experimental – LAHE, com sua estrutura e corpo técnico qualificado, através do Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) “Análise da Macroturbulência em Dissipadores por Ressalto Hidráulico”.

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

Agradecimento especial ao meu orientador, Prof. Dr. Marcelo Giulian Marques, pela confiança, dedicação e valiosos ensinamentos.

Agradeço a todos aqueles que, de alguma maneira participaram da elaboração deste trabalho, principalmente os bolsistas Cassius Palauro e Guilherme Finger, de indispensáveis colaborações na evolução do trabalho.

Em especial gostaria de agradecer aos grandes amigos Eder Daniel Teixeira, pelos momentos de reflexão e parceria na elaboração do trabalho, Edgar Fernando Trierweiler Neto, pelo companheirismo e contribuições, Maurício Dai Prá, cujo competente trabalho e dedicação colaboraram muito na realização do trabalho e Alexandre Augusto Mees Alves, pela indispensável contribuição nos trabalhos.

## RESUMO

Este 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 e teve apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES e de Furnas Centrais Elétricas S.A., promotora do Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) intitulado “Análise da Macroturbulência em Dissipadores por Ressalto Hidráulico”, no qual o presente encontra-se inserido.

A dissipação da energia acumulada resultante de barramentos de cursos d’águas, na maioria das vezes com o propósito de geração de energia, é, geralmente, proporcionada a partir da formação de um ressalto hidráulico na base da estrutura, com a implantação de bacias de dissipação e a formação do ressalto hidráulico. O ressalto é caracterizado como um fenômeno bruscamente variado em que ocorre a rápida passagem de um regime de escoamento rápido para um regime lento, com a formação de intensa turbulência e grande incorporação de ar. Os danos causados às estruturas de dissipação de energia após anos de operação, principalmente em função de esforços resultantes de cavitação, ressonância e fadiga, implicam na necessidade de uma avaliação mais aprofundada do fenômeno, principalmente com a caracterização de parâmetros inerentes ao escoamento macroturbulento formado, como, por exemplo, o campo de pressões sobre a estrutura. Dessa forma, pode-se obter subsídios para um projeto deste tipo de estrutura cada vez mais seguro, otimizado e, por conseguinte, cada vez mais viável economicamente.

Este trabalho tem por objetivo apresentar uma metodologia para a previsão das grandezas atuantes sobre as bacias de dissipação por ressalto hidráulico, principalmente no tocante ao comportamento das pressões médias sobre a estrutura, das flutuações de pressão e das pressões extremas resultantes do escoamento, com a peculiaridade de tratar-se de ressaltos ditos submergidos, cujo número de trabalhos ainda é reduzido. Foram utilizados dados de modelo físico, concebido sob semelhança de Froude, comparados com dados obtidos com medições em escala real.

Em linhas gerais a metodologia proposta, que consiste da utilização de adimensionalização dos parâmetros estudados ao longo do ressalto, mostrou-se bastante eficaz na determinação dos esforços atuantes sobre a estrutura, bem como na comparação com o empreendimento na escala real. Verifica-se uma intensa influência da submergência nos parâmetros avaliados, de forma que se entende que sua influência deve ser considerada no projeto deste tipo de estrutura.

## ABSTRACT

The present work was developed in the *Programa de Pós Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental* of the *Instituto de Pesquisas Hidráulicas* of the *Universidade Federal do Rio Grande do Sul*, with support of *CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior* and *Furnas Centrais Elétricas S.A.* as part of a Research and Development (P&D) project entitled “Macroturbulence Analysis of Hydraulic Jump Stilling Basins”.

The dissipation of accumulated energy in the form of water head in dams (most often with the purpose of generating energy) is usually provided by the hydraulic jump formation at the base of the structure with the implantation of stilling basins. The hydraulic jump is an abrupt phenomena caused by a change from super-critical to sub-critical flow creating intense turbulence and air entrainment. The damages caused to energy dissipation structures through the years due to cavitation, resonance and fatigue indicate a need to thoroughly evaluate this phenomena, mainly by characterizing its macroturbulent flow parameters such as the pressure field. This way, it is possible to have safer, optimized and economically viable structures.

This work presents a reliable methodology to establish the parameters of hydraulic jump stilling basins, mainly regarding the mean pressure, pressure fluctuations and extreme pressures of the flow in submerged hydraulic jumps. The bibliography found on this subject is reduced. Data from physical models using Froude similarity principle were compared with real scale measurements.

The proposed methodology which consisted of using non-dimensional parameters along the hydraulic jump was very efficient to determine the active forces over the structure as well as comparing the structure in real scale. There is a high influence of the submergence in the evaluated parameters and this should be considered in designing this type of structures.

## SUMARIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>MOTIVAÇÃO .....</b>	<b>3</b>
<b>4</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>4</b>
4.1	RESSALTO HIDRÁULICO EM CANAIS PLANOS .....	7
4.1.1	<i>Ressalto Livre .....</i>	8
4.1.1.1	Formas de Ressalto Hidráulico .....	8
4.1.1.2	Alturas Conjugadas .....	9
4.1.1.3	Comprimento do Ressalto .....	10
4.1.1.4	Comprimento do Rolo .....	11
4.1.1.5	Perfil da Linha d'água .....	11
4.1.1.6	Dissipação de Energia .....	14
4.1.1.7	Características internas .....	16
4.1.2	<i>Ressalto Submergido .....</i>	21
4.2	RESSALTO HIDRÁULICO EM CANAIS INCLINADOS .....	24
4.2.1	<i>O ressalto afogado – Tipo B .....</i>	27
4.2.1.1	Alturas Conjugadas .....	28
4.2.1.2	Comprimento do Ressalto .....	31
4.2.1.3	Comprimento do Rolo .....	33
4.2.1.4	Eficiência do Ressalto .....	33
4.2.1.5	Características internas do ressalto afogado .....	34
4.3	ESCOAMENTO SOBRE CURVAS VERTICAIS .....	38
<b>5</b>	<b>INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL E METODOLOGIA .....</b>	<b>44</b>
5.1	INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL .....	44
5.2	METODOLOGIA EXPERIMENTAL .....	46
5.2.1	<i>Medição de Pressão .....</i>	49
5.2.2	<i>Visualização do Escoamento .....</i>	52
5.3	METODOLOGIA DE ANÁLISE .....	53
5.3.1	<i>Posição de início do ressalto junto ao perfil do vertedouro .....</i>	54
5.3.2	<i>Avaliação do efeito da submergência sobre as pressões em um ressalto hidráulico a jusante de vertedouro. ....</i>	54
5.3.3	<i>Previsão de valores de pressão para diferentes probabilidades de ocorrência e fatores de submergência. ....</i>	57
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>58</b>
6.1	POSIÇÃO DE INÍCIO DO RESSALTO HIDRÁULICO CONFORME O GRAU DE SUBMERGÊNCIA .....	58
6.2	CAMPO DE PRESSÕES EM BACIAS DE DISSIPACÃO A JUSANTE DE VERTEDOUROS .....	62
6.2.1	<i>Caracterização da Pressão Média do escoamento sobre bacias de dissipação a jusante de vertedouro .....</i>	62
6.2.2	<i>Comportamento da Flutuação de Pressão .....</i>	75

6.2.3	<i>Coeficiente de Assimetria</i> .....	90
6.2.4	<i>Coeficiente de Curtose</i> .....	91
6.2.5	<i>Coeficiente Estatístico de Distribuição de Probabilidades</i> .....	92
6.2.6	<i>Pressões Extremas</i> .....	99
<b>7</b>	<b>EXEMPLO DE DIMENSIONAMENTO</b> .....	<b>107</b>
<b>8</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b> .....	<b>112</b>
<b>9</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>117</b>
	<b>ANEXOS</b> .....	<b>126</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 4.1 -RESSALTO À JUSANTE DE UMA COMPORTA .....	6
FIGURA 4.2 - RESSALTO FORMADO À JUSANTE DE UM VERTEDOURO .....	6
FIGURA 4.3 - CLASSIFICAÇÃO DO RESSALTO HIDRÁULICO FORMADO EM CANAIS PLANOS À JUSANTE DE COMPORTAS. ....	8
FIGURA 4.4 - COMPRIMENTO DO RESSALTO PARA DIVERSOS NÚMEROS DE FROUDE ADAPTADO DE CHOW (1959). (GOMES,2000).....	10
FIGURA 4.5 – PERFIL DO RESSALTO EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE FROUDE POR BAKHMETEFF E MATZKE,(1936) (RAJARATNAM E SUBRAMANYA, 1968) .....	12
FIGURA 4.6 - PERFIL DO RESSALTO ADAPTADO DE RAJARATNAM E SUBRAMANYA, 1968 (GOMES, 2000).....	12
FIGURA 4.7 – FREQUÊNCIAS CARACTERÍSTICAS DA OSCILAÇÃO DE NÍVEL A JUSANTE DO RESSALTO. ....	13
FIGURA 4.8 - DISSIPAÇÃO ESQUEMA DAS ALTURAS CONJUGADAS RELACIONADAS COM A PERDA DE ENERGIA. - ELEVATORSKI (1959).....	14
FIGURA 4.9 – EFICIÊNCIA DO RESSALTO HIDRÁULICO EM RELAÇÃO AO NÚMERO DE FROUDE (PETERKA, 1974) ...	15
FIGURA 4.10 - ENERGIA DISSIPADA AO LONGO DO RESSALTO CONFORME APRESENTADO EM MARQUES ET AL. (1998) – $\Delta H$ = PERDA DE ENERGIA E $H_1$ = ENERGIA NA ENTRADA DO RESSALTO. ....	15
FIGURA 4.11 - FLUTUAÇÃO DE PRESSÃO ADIMENSIONALISADA EM RELAÇÃO À DISTÂNCIA DE INÍCIO DO RESSALTO (X) E A ALTURA CONJUGADA NA ENTRADA DO RESSALTO HIDRÁULICO ( $Y_1$ ).....	17
FIGURA 4.12 - FLUTUAÇÃO DE PRESSÃO ADIMENSIONALIZADA EM RELAÇÃO À DISTÂNCIA DE INÍCIO DO RESSALTO (X) E A ALTURA CONJUGADA NA ENTRADA DO RESSALTO HIDRÁULICO ( $Y_1$ ).....	18
FIGURA 4.13 – COMPORTAMENTO DO RESSALTO SUBMERGIDO EM RELAÇÃO AO RESSALTO LIVRE (NARAYANAN, 1978) .....	22
FIGURA 4.14 - COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES DO $C_{p_{gx}}$ OBTIDOS POR TRIERWEILER, 2006 COM OS DADOS DE LOPARDO ET AL., 2004A E LOPARDO ET AL., 2004B, EM FUNÇÃO DE $Fr_1$ E DA POSIÇÃO RELATIVA ( $X/H_1$ )....	23
FIGURA 4.15 - RESSALTO LIVRE .....	26
FIGURA 4.16 - RESSALTO TIPO B .....	26
FIGURA 4.17 - RESSALTO TIPO C .....	26
FIGURA 4.18 - RESSALTO TIPO D .....	26
FIGURA 4.19 - CARACTERÍSTICAS DO RESSALTO HIDRÁULICO AFOGADO -TIPO B .....	27
FIGURA 4.20 - ÁBACO PARA A RELAÇÃO ENTRE ALTURAS CONJUGADAS DO RESSALTO TIPO B (FONTE: RAJARATNAM, 1967, ADAPTADO DE BRADLEY E PETERKA (1957) – $Y^*_2$ = ALTURA LENTA OBTIDA PELA EQUAÇÃO DE BÉLANGER, L = DISTÂNCIA HORIZONTAL ENTRE O ÍNICO DA BACIA E O FINAL DO RESSALTO))	29
FIGURA 4.21 - CONJUNTO DE PARÂMETROS ADOTADOS POR HAGER (1988).....	29
FIGURA 4.22 – ÁBACO PARA ESTABELECIMENTO DO COMPRIMENTO DOS RESSALTO TIPO B, C E D (FONTE: PETERKA, 1974 – L = COMPRIMENTO DO RESSALTO, $D_2$ = ALTURA CONJUGADA LENTA E $F_1$ = NÚMERO DE FROUDE PARA O ESCOAMENTO NA ENTRADA DO RESSALTO).....	32
FIGURA 4.23 – COMPARATIVO ENTRE MEDIÇÕES REALIZADAS COM RESSALTO LIVRE (A E B) E RESSALTO AFOGADO (C E D).....	35
FIGURA 4.24 – PRESSÃO MÉDIA ADIMENSIONALIZADA CONFORME MARQUES ET AL (1997) .....	37
FIGURA 4.25 – PRESSÃO MÉDIA ADIMENSIONALIZADA CONFORME MARQUES ET AL (1999) .....	37



FIGURA 4.26 - CARACTERÍSTICAS DAS PRESSÕES EM CURVAS VERTICAIS – (A) SOBREPRESSÃO EM CURVAS CÔNCAVAS; (B) SUBPRESSÃO EM CURVAS CONVEXAS; (ADAPTADO DE BAPTISTA E LARA, 2003).....	39
FIGURA 4.27 - DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÕES AO LONGO DO ESCOAMENTO SOBRE VERTEDOUROS .....	40
FIGURA 4.28 - CONJUNTO DE PARÂMETROS ADOTADOS POR LIN FU E JIE (1985) .....	41
FIGURA 5.1 - PANORAMA GERAL DO CANAL DE ENSAIOS .....	44
FIGURA 5.2 – (A) VISTA FRONTAL DA ESTRUTURA ESTUDADA, COM DESTAQUE PARA O END-SILL E AS CONDIÇÕES DE JUSANTE; (B) VISTA SUPERIOR (MONTANTE PARA JUSANTE), COM DESTAQUE PARA AS COMPORTAS. ....	45
FIGURA 5.3 - DISPOSIÇÃO DAS TOMADAS DE PRESSÃO (DISTÂNCIAS EM METROS – PROTÓTIPO) .....	45
FIGURA 5.4 – (A) MEDIÇÃO DE NÍVEL DE JUSANTE; (B) COMPORTA REGULADORA DE NÍVEL (ANTERIOR AO VERTEDOURO BAZIN).....	46
FIGURA 5.5 - DISPOSIÇÃO DAS TOMADAS DE PRESSÃO (MEDIDAS EM METROS – PROTÓTIPO COLOCAR MEDIDAS DO MODELO).....	51
FIGURA 5.6 - VISTA GERAL DO ESCOAMENTO ( $Q_p=4.000 \text{ m}^3/\text{s}$ – $S=1,61$ ). ....	52
FIGURA 5.7 - CONJUNTO DE TOMADAS DE IMAGENS: (A) REGIÃO DA CURVA VERTICAL DE CONCORDÂNCIA E INÍCIO DO RESSALTO; (B) PARTE INTERMEDIÁRIA DO RESSALTO; (C) PARTE FINAL DA BACIA (END-SILL) ( $Q_p=4.000 \text{ m}^3/\text{s}$ – $S=1,61$ ).....	52
FIGURA 5.8 - VISTA SUPERIOR DO RESSALTO ( $Q_p = 4.000 \text{ m}^3/\text{s}$ – $S=1,61$ ).....	53
FIGURA 5.9 - CARACTERÍSTICAS DE JUSANTE DA ESTRUTURA ENSAIADA, COM DESTAQUE PARA TOPOGRAFIA DIFERENCIADA A JUSANTE DA BACIA DE DISSIPAÇÃO (DIMENSÕES DA UHE PORTO COLÔMBIA – PROTÓTIPO) .....	55
FIGURA 6.1 - CONJUNTO DE PARÂMETROS DESCRITIVOS DO RESSALTO .....	60
FIGURA 6.2 - POSIÇÃO DE INÍCIO DO RESSALTO A PARTIR DO ESTABELECIMENTO DO PARÂMETRO $Z_r$ , CORRESPONDENTE A ELEVAÇÃO DA ESTRUTURA NO INÍCIO DO RESSALTO .....	60
FIGURA 6.3 - COMPORTAMENTO CARACTERÍSTICO DA DISTRIBUIÇÃO DAS PRESSÕES MÉDIA COM RELAÇÃO AO RESSALTO LIVRE .....	63
FIGURA 6.4 - AJUSTE TEÓRICO PARA A DISTRIBUIÇÃO DA PRESSÃO MÉDIA AO LONGO DA CURVA VERTICAL.....	64
FIGURA 6.5 - AJUSTE PARA A PRESSÃO MÉDIA, DESCARTADOS OS PONTOS SOB INFLUÊNCIA DA CURVA VERTICAL.....	65
FIGURA 6.6 - DISTRIBUIÇÃO DAS PRESSÕES MÉDIAS NA ZONA DE INFLUÊNCIA DA CURVA.....	66
FIGURA 6.7 - PONTOS CARACTERÍSTICOS DA DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÃO MÉDIA DO RESSALTO SUBMERGIDO .....	67
FIGURA 6.8 - AJUSTE PARA A PRESSÃO MÉDIA NO PONTO DE INÍCIO DA CURVA. ....	68
FIGURA 6.9 - AJUSTE PARA A PRESSÃO MÉDIA NA TOMADA B .....	68
FIGURA 6.10 – AJUSTE PARA A PRESSÃO MÉDIA NO FINAL DA CURVA .....	69
FIGURA 6.11 - AJUSTE PARA A PRESSÃO MÉDIA NO PONTO 4 .....	70
FIGURA 6.12 - AJUSTE PARA A DETERMINAÇÃO DA POSIÇÃO DO PONTO 4 .....	70
FIGURA 6.13 - AJUSTE PARA A POSIÇÃO DO PONTO 5 .....	71
FIGURA 6.14 - COMPARAÇÃO ENTRE O AJUSTE ESTABELECIDO PARA A PRESSÃO MÉDIA E A MEDIÇÃO EM PROTÓTIPO ( $Q_p = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$ ).....	72
FIGURA 6.15 - INTERVALO DE CONFIANÇA PARA O AJUSTE DA PRESSÃO MÉDIA ( $Q_p = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$ ).....	73
FIGURA 6.16 - INTERVALO DE CONFIANÇA PARA O AJUSTE DA PRESSÃO MÉDIA ( $Q_p = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$ - DADOS DE PROTÓTIPO).....	73
FIGURA 6.17 - INTERVALO DE CONFIANÇA PARA A PRESSÃO MÉDIA. ....	74

FIGURA 6.18 - FLUTUAÇÃO DE PRESSÃO ADIMENSIONALIZADA CONFORME PROPOSIÇÃO DE MARQUES (1999), UTILIZADA POR TEIXEIRA (2003).	76
FIGURA 6.19 - COMPORTAMENTO DAS FLUTUAÇÕES DE PRESSÃO COM RELAÇÃO AO RESSALTO LIVRE ADOTANDO- SE A ADIMENSIONALIZAÇÃO PROPOSTA.	77
FIGURA 6.20 - COMPORTAMENTO DA FLUTUAÇÃO DE PRESSÃO DO RESSALTO LIVRE (EXCLUÍDOS OS PONTOS SOB INFLUÊNCIA DA CURVA)	78
FIGURA 6.21 - VARIAÇÃO DA FLUTUAÇÃO DE PRESSÃO DO RESSALTO HIDRÁULICO DE ACORDO COM A SUBMERGÊNCIA ( $Q_p = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$ )	79
FIGURA 6.22 - PONTOS CARACTERÍSTICOS DA FLUTUAÇÃO DE PRESSÃO DO RESSALTO SUBMERGIDO.	80
FIGURA 6.23 - AJUSTE PARA A FLUTUAÇÃO DE PRESSÃO NO PONTO DE INÍCIO DA CURVA VERTICAL (1) EM FUNÇÃO DA SUBMERGÊNCIA DO ESCOAMENTO.	81
FIGURA 6.24 - AJUSTE PARA A FLUTUAÇÃO DE PRESSÃO NO PONTO PRÓXIMO AO CENTRO DA CURVA VERTICAL EM FUNÇÃO DA SUBMERGÊNCIA DO ESCOAMENTO.	82
FIGURA 6.25 - FLUTUAÇÃO DE PRESSÃO NO FINAL DA CURVA VERTICAL EM FUNÇÃO DA SUBMERGÊNCIA DO ESCOAMENTO.	82
FIGURA 6.26 - AJUSTE PARA O ESTABELECIMENTO DA POSIÇÃO DO PONTO DE INFLEXÃO (D).	84
FIGURA 6.27 - AJUSTE PARA O ESTABELECIMENTO DA FLUTUAÇÃO DE PRESSÃO NO PONTO DE INFLEXÃO (D)	84
FIGURA 6.28 - AJUSTE PARA O ESTABELECIMENTO DA POSIÇÃO DO PONTO DE MÁXIMO	85
FIGURA 6.29 - AJUSTE PARA O ESTABELECIMENTO DA FLUTUAÇÃO DE PRESSÃO NO PONTO DE MÁXIMO	85
FIGURA 6.30 - AJUSTE PARA O ESTABELECIMENTO DA POSIÇÃO DO PONTO DE INTERSECÇÃO	86
FIGURA 6.31 - AJUSTE PARA O ESTABELECIMENTO DA FLUTUAÇÃO DE PRESSÃO NO PONTO DE INTERSECÇÃO.	86
FIGURA 6.32 - COMPARAÇÃO ENTRE O AJUSTE ESTABELECIDO PARA A FLUTUAÇÃO DE PRESSÃO E A MEDIÇÃO EM PROTÓTIPO ( $Q_p = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$ )	87
FIGURA 6.33 - INTERVALO DE CONFIANÇA PARA O AJUSTE DA FLUTUAÇÃO DE PRESSÃO ADIMENSIONALIZADA ( $Q_p = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$ )	88
FIGURA 6.34 - INTERVALO DE CONFIANÇA PARA O AJUSTE DA FLUTUAÇÃO DE PRESSÃO ( $Q_p = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$ - DADOS DE PROTÓTIPO).	89
FIGURA 6.35 - INTERVALOS DE CONFIANÇA PARA A FLUTUAÇÃO DE PRESSÃO	90
FIGURA 6.36 - DISTRIBUIÇÃO DO COEFICIENTE DE ASSIMETRIA, COMPARADA COM DADOS DE RESSALTO LIVRE – MARQUES (1995), ENDRES (1990) E PINHEIRO (1995).	91
FIGURA 6.37 - DISTRIBUIÇÃO DO COEFICIENTE DE CURTOSE COMPARADA COM DADOS DE RESSALTO LIVRE – MARQUES (1995), ENDRES (1990) E PINHEIRO (1995).	92
FIGURA 6.38 - DISTRIBUIÇÃO DO COEFICIENTE N	93
FIGURA 6.39 - COEFICIENTE N PARA UMA PRESSÃO COM PROBABILIDADE MENOR OU IGUAL A 99,9% DE OCORRÊNCIA. ( $\Gamma = X/(Y_2 - Y_1)$ )	95
FIGURA 6.40 – COEFICIENTE N PARA UMA PRESSÃO COM PROBABILIDADE MENOR OU IGUAL A 99% DE OCORRÊNCIA ( $\Gamma = X/(Y_2 - Y_1)$ )	95
FIGURA 6.41 - COEFICIENTE N PARA UMA PRESSÃO COM PROBABILIDADE MENOR OU IGUAL A 95% DE OCORRÊNCIA ( $\Gamma = X/(Y_2 - Y_1)$ )	95
FIGURA 6.42 - COEFICIENTE N PARA UMA PRESSÃO COM PROBABILIDADE MENOR OU IGUAL A 5% DE OCORRÊNCIA ( $\Gamma = X/(Y_2 - Y_1)$ )	96

FIGURA 6.43 - COEFICIENTE N PARA UMA PRESSÃO COM PROBABILIDADE MENOR OU IGUAL A 1% DE OCORRÊNCIA ( $\Gamma=X/(Y_2-Y_1)$ ).....	96
FIGURA 6.44 - COEFICIENTE N PARA UMA PRESSÃO COM PROBABILIDADE MENOR OU IGUAL A 0,1% DE OCORRÊNCIA ( $\Gamma=X/(Y_2-Y_1)$ ) .....	96
FIGURA 6.45 - AJUSTE PROPOSTO PARA O CÁLCULO DO COEFICIENTE DE DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE (N) PARA O RESSALTO SUBMERGIDO ( $R^2=0,983$ ).....	97
FIGURA 6.46 - CURVAS ENVOLTÓRIAS DO COEFICIENTE N .....	99
FIGURA 6.47 - COMPARATIVO ENTRE A METODOLOGIA DE CÁLCULO APRESENTADA E OS VALORES MEDIDOS EM PROTÓTIPO .....	100
FIGURA 6.48 - COMPARATIVO ENTRE A METODOLOGIA DE CÁLCULO APRESENTADA E OS VALORES MEDIDOS EM PROTÓTIPO .....	100
FIGURA 6.49 - COMPARATIVO ENTRE A METODOLOGIA DE CÁLCULO APRESENTADA E OS VALORES MEDIDOS EM PROTÓTIPO .....	100
FIGURA 6.50 - COMPARATIVO ENTRE A METODOLOGIA DE CÁLCULO APRESENTADA E OS VALORES MEDIDOS EM PROTÓTIPO .....	101
FIGURA 6.51 - ENVOLTÓRIA DE PRESSÃO EXTREMA – MÁXIMA ( $P \leq 99,9\%$ ).....	103
FIGURA 6.52 - ENVOLTÓRIA DE PRESSÃO EXTREMA – MÁXIMA ( $P \leq 99\%$ ).....	103
FIGURA 6.53 - ENVOLTÓRIA DE PRESSÃO EXTREMA - MÍNIMA ( $P \leq 1\%$ ).....	103
FIGURA 6.54 - ENVOLTÓRIA DE PRESSÃO EXTREMA - MÍNIMA ( $P < 0,1\%$ ).....	104
FIGURA 7.1 - DISTRIBUIÇÃO DA PRESSÃO MÉDIA ( $Q=59,3 \text{ m}^2/\text{s}$ ) .....	110
FIGURA 7.2 - DISTRIBUIÇÃO DA FLUTUAÇÃO DE PRESSÃO ( $Q=59,3 \text{ m}^2/\text{s}$ ) .....	110
FIGURA 7.3 - COMPORTAMENTO DAS PRESSÕES EXTREMAS - APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA .....	111

## ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 4.1 - PONTOS CARACTERÍSTICOS DO RESSALTO HIDRÁULICO (MARQUES, 1996).....	19
TABELA 4.2 - FÓRMULAS PARA DETERMINAÇÃO DO COMPRIMENTO DO RESSALTO EM CANAIS INCLINADOS .....	31
TABELA 4.3 - PARÂMETROS PARA ESTIMATIVA DO COMPRIMENTO DO RESSALTO .....	33
TABELA 5.1 - CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS ENSAIOS REALIZADOS (DADOS EM ESCALA DE PROTÓTIPO).....	47
TABELA 5.2 – CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS ENSAIOS REALIZADOS (DADOS EM ESCALA DE MODELO) .....	48
TABELA 5.3 - EQUIPAMENTOS: CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS .....	50
TABELA 6.1 - PARÂMETROS RELATIVOS À POSIÇÃO DE INÍCIO DO RESSALTO AFOGADO (DADOS EM ESCALA DE PROTÓTIPO).....	59
TABELA 6.2 - ERRO RELATIVO ENTRE O AJUSTE E OS DADOS DE CAMPO .....	61
TABELA 6.3 - PARÂMETROS CALCULADOS A PARTIR DA ANÁLISE TEÓRICA ESTABELECID.....	62
TABELA 6.4 – PARÂMETROS DE AJUSTE DEFINIDOS PARA A DISTRIBUIÇÃO DA PRESSÃO MÉDIA AO LONGO DA CURVA VERTICAL .....	69
TABELA 6.5 - AJUSTES PARA O PONTO DE INTERSECÇÃO ENTRE O RESSALTO SUBMERGIDO E O RESSALTO LIVRE...	71
TABELA 6.6 - ERRO RELATIVO ENTRE AS MEDIDAS DO AJUSTE E A MEDIÇÃO DE PROTÓTIPO. ....	74
TABELA 6.7 - AJUSTES PARA DETERMINAÇÃO DA FLUTUAÇÃO DE PRESSÃO NA CURVA VERTICAL .....	82
TABELA 6.8 - PONTOS CARACTERÍSTICOS DA FLUTUAÇÃO DE PRESSÃO PARA O RESSALTO SUBMERGIDO .....	83
TABELA 6.9 - AJUSTES PARA O PONTO DE INFLEXÃO DA FLUTUAÇÃO DE PRESSÃO .....	85
TABELA 6.10 - AJUSTES PARA O PONTO DE MÁXIMO DA FLUTUAÇÃO DE PRESSÃO .....	86
TABELA 6.11 - AJUSTES PARA O PONTO DE INTERSECÇÃO COM A CURVA CORRESPONDENTE AO RESSALTO LIVRE.	87
TABELA 6.12 - DADOS DE N CALCULADOS PARA O RESSALTO SUBMERGIDO .....	97
TABELA 6.13 - COMPARATIVO ENTRE OS VALORES DE N MEDIDOS E CALCULADOS ATRAVÉS DO AJUSTE ESTABELECIDO .....	98
TABELA 6.14 - VALORES RELATIVOS ÀS PRESSÕES CUJA PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA É MENOR OU IGUAL A 99,9% .....	105
TABELA 6.15 - VALORES RELATIVOS ÀS PRESSÕES CUJA PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA É MENOR OU IGUAL A 99% .....	105
TABELA 6.16 - VALORES RELATIVOS ÀS PRESSÕES CUJA PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA É MENOR OU IGUAL A 1% .....	106
TABELA 6.17 - VALORES RELATIVOS ÀS PRESSÕES COM PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA MENOR OU IGUAL A 0,1% .....	106
TABELA 7.1 - DADOS RELATIVOS À PRESSÃO MÉDIA .....	108
TABELA 7.2 - DADOS REFERENTES À FLUTUAÇÃO DE PRESSÃO.....	108
TABELA 7.3 - RESUMO DOS PARÂMETROS OBTIDOS (DADOS NÃO ADIMENSIONALISADOS).....	109
TABELA 7.4 - VALORES DAS PRESSÕES EXTREMAS CALCULADAS A PARTIR DA METODOLOGIA PROPOSTA .....	110

## LISTA DE SIMBOLOS

Símbolo	Descrição
$A_d$ _____	coeficiente de assimetria
$a, b, c, d$ _____	coeficientes da equação proposta para determinação da pressão média nos pontos 1, 2 e 3
$CIRA$ _____	cota de início do ressalto afogado
$C_F$ _____	cota de fundo da estrutura
$C_p$ _____	coeficiente de flutuação de pressão
$C_{pCM}$ _____	Coeficiente de pressão máxima devido à força centrífuga
$d$ _____	lâmina d'água sobre a curva (LinFu e Jie)
$E_1$ _____	energia na seção imediatamente anterior ao ressalto hidráulico
$E_2$ _____	energia na seção imediatamente posterior ao ressalto hidráulico
$Fr$ _____	número de Froude
$Fr_1$ _____	número de Froude na entrada do ressalto
$Fr_2$ _____	número de Froude na saída do ressalto
$g$ _____	aceleração da gravidade
$h_1$ _____	projeção vertical de $N_1$
$h_2$ _____	altura de água a jusante, abordado o caso livre
$h_c$ _____	altura crítica;
$H$ _____	energia
$H_1$ _____	energia total na seção 1
$H_2$ _____	energia total na seção 2
$H_t$ _____	perda de energia na estrutura, igual a diferença entre as energias

	de montante e jusante
$k$ _____	probabilidade desejada no cálculo do coeficiente $N$
$K$ _____	coeficiente de curtose
$LAHE$ _____	Laboratório de Hidráulica Experimental (Furnas)
$L_d$ _____	posição do ponto de descolamento
$L_r$ _____	comprimento do rolo
$L_j$ _____	comprimento do ressalto hidráulico
$N$ _____	coeficiente estatístico de distribuição de probabilidade
$n$ _____	número de observações
$N_l$ _____	lâmina perpendicular ao vertedouro na seção de início do ressalto
$N_m$ _____	nível de montante (reservatório)
$N_j$ _____	nível a jusante
$N.A.$ _____	nível de água
$P$ _____	pressão média no ressalto hidráulico
$P_x$ _____	pressão média em um ponto $x$ ao longo do ressalto
$P_{x\%}$ _____	pressão para uma certa probabilidade de ocorrência de ser inferior ou igualada
$PC$ _____	UHE de Porto Colômbia
$p_{CM}$ _____	valor da pressão máxima na curva
$p, q, r, s$ _____	coeficientes da equação proposta para determinação do parâmetro $N$
$PIRA$ _____	posição de início do ressalto afogado
$q$ _____	descarga por unidade de largura

	do canal
$Q$ _____	vazão teórica vertida
$R$ _____	raio de curvatura do trecho de concordância entre o perfil do vertedouro e a bacia de dissipação;
$Re$ _____	número de Reynolds
$S$ _____	fator de submergência adimensional;
$t$ _____	tempo
$Tw$ _____	altura de água sobre o fundo da bacia a jusante do ressalto hidráulico;
$UHE$ _____	usina hidrelétrica;
$V$ _____	velocidade média do escoamento nas seções consideradas;
$V_1$ _____	velocidade rápida na entrada do ressalto;
$V_2$ _____	velocidade lenta na saída do ressalto;
$x, y, z$ _____	coordenada do ponto da medida em relação a um ponto de referência;
$x$ _____	distância em relação ao início do ressalto hidráulico;
$y_r$ _____	Altura conjugada rápida para o ressalto livre (Marques et al, 1997)
$y_l$ _____	Altura conjugada lenta para o ressalto livre (Marques et al, 1997)
$Y_1$ _____	altura conjugada na entrada do ressalto hidráulico;
$Y_2$ _____	altura conjugada na saída do ressalto hidráulico;
$Z$ _____	medida da diferença entre a cota de início do ressalto e o fundo da bacia de dissipação

*Zcalc* \_\_\_\_\_

Medida entre a cota de início do ressalto e o fundo da bacia de dissipação, calculado a partir da relação estabelecida.



## SIMBOLOS GREGOS

Símbolo	Descrição
$\beta$ _____	ângulo correspondente à curva vertical
$\Gamma$ _____	posição relativa do ressalto adimensionalizada;
$\Psi$ _____	pressão média adimensionalizada
$\sigma$ _____	desvio padrão da amostra de pressão
$\Omega$ _____	flutuação de pressão adimensionalizada;
$\Omega_s$ _____	flutuação de pressão do ressalto submerso adimensionalizada;
$\gamma$ _____	peso específico da água;
$\eta\%$ _____	eficiência percentual do ressalto;
$\nu$ _____	viscosidade cinemática da água;
$\theta$ _____	inclinação do paramento reto do vertedouro;
$\rho$ _____	massa específica da água;

## 1 INTRODUÇÃO

O ressalto hidráulico é um fenômeno ocasionado pela mudança brusca do regime de escoamento em canais abertos de supercrítico para subcrítico, isto é, o escoamento que ocorria sob influência acentuada de efeitos cinéticos ( $Fr > 1$ ) para um escoamento caracterizado por efeitos cinéticos reduzidos ( $Fr < 1$ ). Esta mudança ocorre através de intensa agitação e com a formação de turbilhões, que resultam em incorporação de ar atmosférico. O ressalto, dadas as suas características principais, é uma das principais formas de dissipação de energia em escoamentos sobre canais.

O fenômeno do ressalto hidráulico vem sendo alvo de estudos desde o século XV, remontando aos tempos de Leonardo da Vinci, o precursor em seu estudo. No entanto as pesquisas tiveram um incremento a partir do século XIX, com Bidone e Bèlanger e desenvolveram-se a partir da segunda metade do século XX, acompanhando o desenvolvimento de técnicas de medição e o emprego de equipamentos apropriados.

A utilização do ressalto hidráulico no âmbito dos sistemas de geração de energia refere-se principalmente à dissipação de energia na base de barragens, uma vez que há um incremento na energia do escoamento natural resultante do barramento. Da mesma forma que as condições das estruturas de geração de energia, as estruturas de segurança (vertedouros) e o arranjo geral das obras são bastante variados. Estas condições diversas levam à criação de vários tipos de ressalto, que, de maneira geral, apresentam características peculiares para cada caso.

Grande parte dos estudos relativos ao ressalto refere-se ao fenômeno ocasionado em canais planos. Todavia, um número bastante grande de estruturas não apresenta o comportamento característico deste tipo de escoamento, podendo ocorrer variações tanto das características na porção mais a montante do ressalto (ressalto a jusante de comportas e ressalto a jusante de vertedouros) como na parte a jusante do ressalto (ressalto livre e submergido), além das próprias condições geométricas e de concepção das estruturas de dissipação. Normalmente, as condições estabelecidas à jusante de vertedouros ocasionam condições de afogamento da estrutura, ressaltando o interesse neste tipo de situação.

## 2 OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo a caracterização do campo de pressões resultante do ressalto hidráulico desenvolvido em bacias de dissipação a jusante de vertedouros. Através de medições em modelo físico, pretende-se verificar a influência de diversos graus de submersão nestas características, com destaque para a distribuição de pressão ao longo da bacia, de forma a contribuir para a otimização do dimensionamento desse tipo de estrutura.

O trabalho propõe ainda o desenvolvimento de uma metodologia de previsão de pressões extremas junto ao fundo da bacia, em função da submersão a que a mesma encontra-se submetida. Da mesma forma, visa o estabelecimento de uma estimativa confiável da posição de início do ressalto junto ao perfil do vertedouro, segundo o grau de afogamento imposto à estrutura vertente.

A fim de atingir estes preceitos, optou-se, como mencionado acima, pela avaliação das características do escoamento através de medições em modelo reduzido, visando:

- O estabelecimento de grandezas intrínsecas do escoamento macroturbulento, particularmente a avaliação dos parâmetros estatísticos da distribuição da pressão sobre o fundo da bacia de dissipação, com destaque para as pressões médias e as flutuações de pressão.
- A avaliação das pressões com diversas probabilidades de ocorrência (inclusive pressões extremas);
- A identificação de uma metodologia para o estabelecimento da posição de início do ressalto.

Em seguimento, a análise dos dados obtidos deverá proporcionar o estudo dos seguintes pontos:

- Comparação das medições em ressalto submerso e em ressalto livre.
- Estabelecimento de uma metodologia descritiva das pressões atuantes sobre a estrutura em função da submersão do escoamento.
- Comparação dos dados de modelo reduzido com as medições realizadas em protótipo.

### 3 MOTIVAÇÃO

Os critérios mais aceitos de projeto de estruturas de dissipação por ressalto hidráulico consideram os esforços resultantes do ressalto livre como a pior situação à qual a obra será submetida em sua vida útil. Entretanto, grande parte das estruturas vertentes raramente apresenta tais condições quando em operação normal, de forma que o escoamento formado a jusante de vertedouros na maior parte das vezes apresenta algum grau de afogamento.

Este cenário pode indicar a necessidade de avaliação da possibilidade de otimização desses critérios, uma vez que o cenário previsto em projeto dificilmente acontece de fato. Assim, avaliando as pressões sobre a estrutura no caso de diversos graus de afogamento do vertedouro, pode-se avaliar a viabilidade de otimização do projeto, reduzindo custos de implantação, sem provocar redução na confiabilidade e segurança da estrutura. O estabelecimento de um método de estimativa de pressões extremas junto à bacia de dissipação vem corroborar com este cenário, possibilitando a avaliação dos esforços mais nocivos à estrutura e constituindo importante fator quando do dimensionamento das bacias de dissipação por ressalto hidráulico.

Este trabalho, como parte integrante do programa de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) desenvolvido por Furnas Centrais Hidrelétricas em parceria com o Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH/UFRGS, denominado *Análise da Macroturbulência em Dissipadores por Ressalto Hidráulico*, busca acrescentar ao estudo do ressalto hidráulico metodologias de estabelecimento de suas grandezas intrínsecas, favorecendo o trabalho de projetistas na concepção de estruturas de dissipação, além de fornecer, dentro do contexto do P&D, subsídios para outras pesquisas em andamento. Da mesma forma, espera agregar parâmetros e, por que não dizer, indagações à continuidade dos estudos deste fenômeno singular e de grande importância à engenharia hidráulica.

## 4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O ressalto hidráulico pode ser descrito como o fenômeno à superfície livre no qual ocorre a brusca variação de um escoamento em regime supercrítico (rápido) para o regime subcrítico (lento), com a intensa incorporação de ar através de sua interface com a atmosfera e a formação de vórtices que caracterizam a macroturbulência do fluxo. Essas características imprimem elevados níveis de dissipação de energia ao fenômeno, o que explica sua fundamental importância em estruturas como os barramentos para geração de energia.

O ressalto hidráulico tem sido objeto de diversos estudos ao longo, principalmente, dos últimos dois séculos, apesar de as primeiras observações do fenômeno serem relatadas por Leonardo Da Vinci, no século XV. Entre os primeiros pesquisadores a trabalhar com o ressalto hidráulico pode-se destacar Bidone (1820) e Bélanger (1828), que enfocaram seus estudos principalmente nas características externas do escoamento. Hager (1992) cita ainda os trabalhos de Bresse (1860), Bazin e Darcy (1865) e Boussinesq (1877), a partir da segunda metade do século XIX. Já na primeira metade do século XX, Hager (1992) destaca ainda os trabalhos de Safranez (1929), Einwachter (1932), Bakhmeteff e Matzke (1936).

Já na década de 1950, o estudo do ressalto hidráulico apresenta um incremento significativo, quando são apresentados os estudos de Rouse *et al* (1959), Schröder (1963) e Rajaratnam (1965b). Rajaratnam (1967) apresenta um apanhado bastante completo dos trabalhos desenvolvidos no período. Hager (1992) relata os principais avanços no estudo do ressalto nas últimas décadas.

Nas últimas décadas, inúmeros foram os trabalhos que se referem à temática do conhecimento das características do ressalto. Dai Prá (2006) apresenta uma relação com mais de 40 trabalhos detalhando o comportamento do ressalto. Cabe destacar que nos últimos anos grande parte dos trabalhos busca entender as características internas do ressalto, com destaque para a distribuição de velocidades ao longo de seu desenvolvimento, as flutuações de pressão em seu interior e também o efeito da aeração do escoamento em seu comportamento.

As aplicações do ressalto hidráulico com relação ao escoamento em canais abertos incluem:

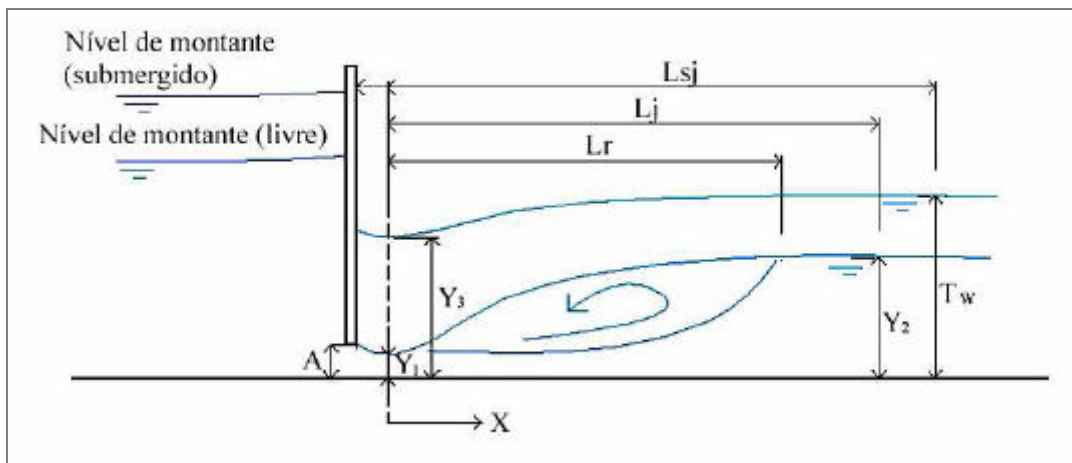
- A dissipação de energia em escoamentos sobre vertedouros e outras estruturas hidráulicas;
- A manutenção de níveis d'água elevados em canais de distribuição de água;

- O aumento da descarga sob comportas, já que o ressalto repele o nível de jusante, mais elevado, aumentando a carga efetiva na comporta;
- A mistura de produtos químicos usados para tratamento de água e esgotos.
- A aeração de escoamentos;
- A remoção de bolsões de ar em canais circulares;
- A identificação de condições especiais de escoamento como a existência de escoamentos supercríticos ou a presença de uma seção de controle. (French, 1985)

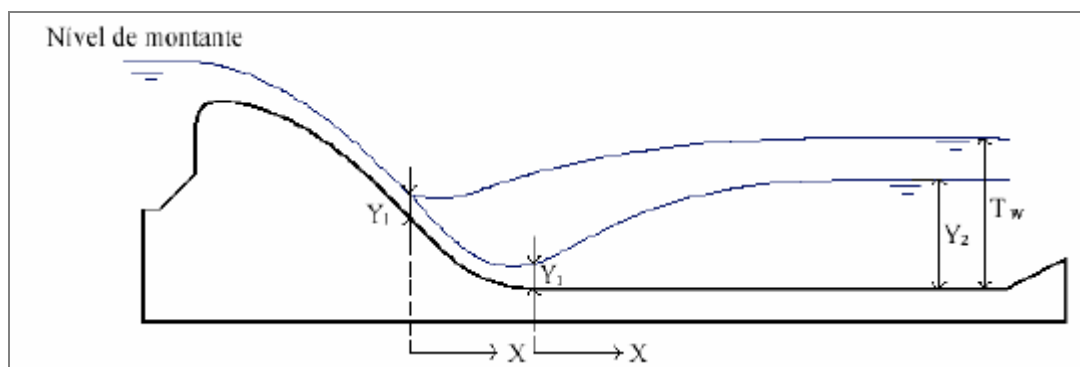
O ressalto hidráulico pode ser agrupado, de acordo com as condições do contorno do escoamento, em pelo menos três tipos:

- a) Quanto ao controle de montante: a partir de descargas de fundo (comportas) ou a partir de escoamentos a superfície livre em canais (vertedouros).
- b) Quanto às condições de jusante: ressalto livre ou ressalto afogado (submergido).
- c) Quanto à declividade de montante: ressalto formado a partir de um trecho plano ou a partir de um trecho com declividade (vertedouros).
- d) Quanto às condições de entrada do ressalto hidráulico:
  - Escoamento supercrítico parcialmente desenvolvido: apresenta a camada limite parcialmente desenvolvida na seção de entrada do ressalto.
  - Escoamento completamente desenvolvido: apresenta a camada limite plenamente desenvolvida quando do início do ressalto hidráulico.
  - Ressalto pré-aerado: apresenta, na seção de entrada do ressalto, escoamento supercrítico já com algum grau de aeração (Chanson, 1995).

As Figuras 4.1 e 4.2 apresentam as principais características do ressalto hidráulico, tanto para o escoamento a jusante de comportas como a jusante de vertedouros.



*Figura 4.1 - Ressalto à jusante de uma comporta*



*Figura 4.2 - Ressalto formado à jusante de um vertedouro*

onde:

$A$  é a abertura da comporta,

$X$  é a distância longitudinal tomada a partir do início do ressalto,

$Y_1$  é a altura d'água na entrada do ressalto hidráulico, ou altura rápida,

$Y_2$  é a altura d'água na saída do ressalto hidráulico, ou altura lenta,

$Y_3$  é a altura d'água na entrada do ressalto hidráulico submerso,

$T_w$  é a altura d'água na saída do ressalto afogado ou submerso,

$L_r$  é o comprimento do rolo,

$L_j$  é o comprimento do ressalto hidráulico livre,

$L_{sj}$  é o comprimento do ressalto hidráulico submerso ou afogado (Dai Prá, 2006)

Wilson e Turner (1972) abordam o efeito da camada limite na posição do ressalto. Os autores relatam a dependência da posição do ressalto com o número de Froude do escoamento, o tipo de camada limite e a rugosidade na interface fluido-estrutura. De acordo com os pesquisadores, as condições ideais para a avaliação do fenômeno remetem a altos números de Froude e condições de camada limite completamente desenvolvida.

O estudo de Leutheusser e Kartha (1972) aborda de forma bastante objetiva a influência das condições de entrada no desenvolvimento do ressalto hidráulico. Segundo relatam os autores, tornou-se comum desprezar-se as condições de entrada, de forma que tal as diferenças resultantes dificilmente é avaliada. Os pesquisadores realizaram diversas avaliações experimentais, com ressaltos iniciando tanto para perfis de velocidades na entrada completamente desenvolvidos como virtualmente não desenvolvidos, contemplando escoamentos com número de Froude até 30,0. O estudo aponta que para número de Froude menor do que 10,0 as condições de entrada não acarretam qualquer influência sobre a relação  $Y_2/Y_1$  estabelecida a partir da equação de Bélanger. No entanto, para Froude na faixa de 10,0 a 30,0 os autores relatam que a equação adequou-se melhor à escoamentos não completamente desenvolvidos. Também com relação ao comprimento do ressalto, o trabalho aponta que para ressaltos com escoamento desenvolvido na entrada a relação entre o comprimento do ressalto e a altura lenta do ressalto é 35% maior do que em ressaltos com escoamento não desenvolvidos.

Este trabalho, como já relatado, tem por objetivo o estudo do ressalto hidráulico a jusante de vertedouros e a influência da submergência no desenvolvimento do mesmo. Tal situação leva à formação de ressaltos sobre a estrutura vertente, sendo que o fenômeno ocorre, portanto, sobre um canal com uma certa inclinação. Em um primeiro momento deverão ser abordados dados relativos ao ressalto sobre canais planos, cujo estudo encontra-se bastante difundido e que proporcionam informações valiosas à compreensão do fenômeno. Na sequência, a revisão bibliográfica buscará abordar ressaltos com condições de contorno diversas das normalmente elencadas, principalmente o ressalto formado em situações de afogamento, ocorrendo, na maioria das vezes, sobre canais inclinados.

#### **4.1 RESSALTO HIDRÁULICO EM CANAIS PLANOS**

O estudo do ressalto hidráulico formado em canais planos, tanto a jusante de comportas como a jusante de vertedouros, pode ser considerado bastante desenvolvido, sendo que as primeiras pesquisas remontam ao século XVIII. Dessa maneira, a quantidade de material disponível é bastante extensa, de forma que este estudo se limitará a executar um breve relato das principais características inerentes ao fenômeno e que de certa maneira influenciam sobremaneira na avaliação geral do fenômeno.

Entre os ressaltos em canais planos enquadram-se aqueles desenvolvidos a jusante de descargas de fundo (comportas), tanto de forma livre como submergidos, e também aqueles a jusante de estruturas vertentes, porém somente o ressalto considerado livre, isto é, totalmente



contido na bacia. Enquanto inicialmente os estudos enfocavam a descrição das características externas desse tipo de escoamento, nas últimas décadas tem crescido o interesse na avaliação das características internas desse tipo de escoamento.

#### 4.1.1 Ressalto Livre

Conforme já relatado, o ressalto é considerado livre quanto não há qualquer condição de contorno a jusante que impeça sua completa formação, como por exemplo, topografia e/ou nível d'água que signifique oposição ao fluxo. Apesar de estudos mostrarem uma influência das condições de entrada (Wilson e Turner, 1972; Leutheusser e Kartha, 1972), este capítulo deverá abordar o fenômeno formado tanto a jusante de comportas como a jusante de vertedouros.

##### 4.1.1.1 Formas de Ressalto Hidráulico

Entre as principais classificações quanto a forma do ressalto, a mais difundida e aceita é a proposta por Peterka (1974), em função do número de Froude do escoamento.

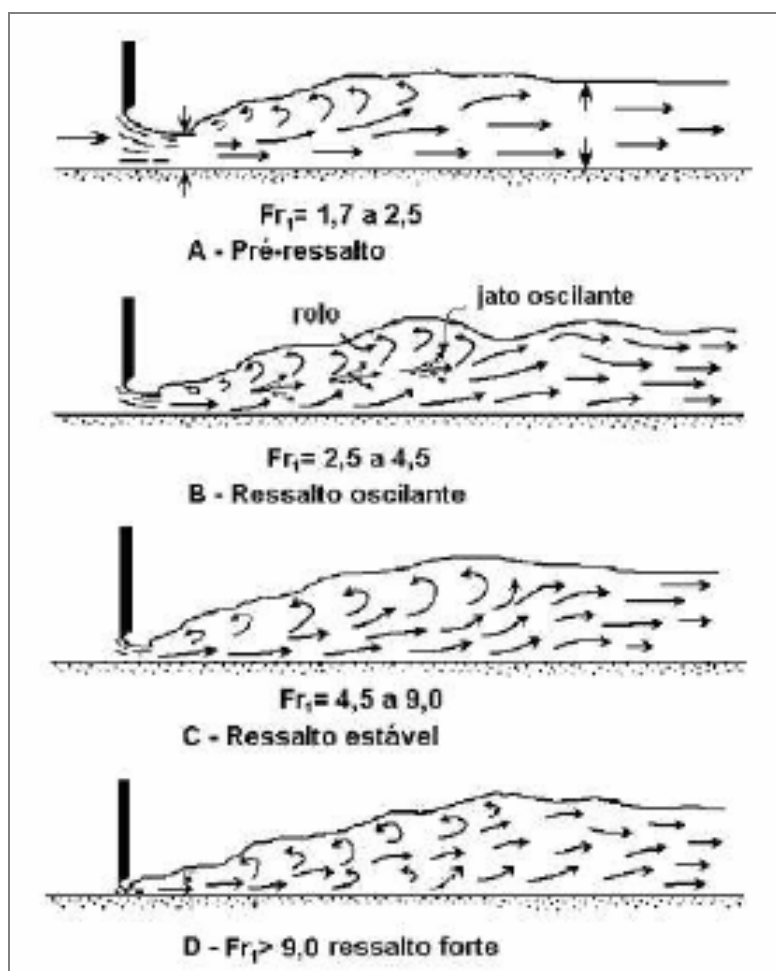


Figura 4.3 - Classificação do ressalto hidráulico formado em canais planos à jusante de comportas.

Quando o número de Froude está entre 1,7 e aproximadamente 2,5, uma série de pequenos rolos se desenvolvem na superfície, sendo formado o “pré-ressalto”. Para valores de número de Froude variando entre 2,5 a 4,5, o ressalto hidráulico é chamado “oscilante”, 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. Para valores de Froude variando entre 4,5 e 9,0, o ressalto hidráulico é bem estabilizado, sendo conhecido como “ressalto estável” e proporcionando um perda de energia entre 45% e 70% da energia de entrada. O “ressalto forte”, para Froude acima de 9,0, apresenta uma intensa formação de vórtices, emulsionamento de corrente, agitação da superfície e jatos de alta turbulência se propagam para jusante por uma longa distância. A perda de energia é alta e pode alcançar 85% da energia de entrada.

#### 4.1.1.2 Alturas Conjugadas

As alturas conjugadas constituem importante fator na descrição do ressalto hidráulico, influenciando na determinação do tipo de ressalto e de características como o comprimento do rolo e do próprio ressalto. A altura na entrada do ressalto, isto é, onde ocorre o início da macroturbulência, é chama altura conjugada rápida do ressalto. Já a correspondente lâmina d’água a jusante do fenômeno, cessada a intensa agitação do escoamento, é chamada altura conjugada lenta.

Teixeira (2003) e Trierweiler (2006) apresentam uma série de trabalhos que estabeleceram relações para o cálculo das alturas conjugadas. Entretanto, não existe um consenso quanto a relação mais adequada, sendo que a mais utilizada é a relação estabelecida por Bélanger (1828).

$$\frac{Y_2}{Y_1} = \frac{1}{2} \cdot \left[ \sqrt{1 + 8 \cdot Fr_1^2} - 1 \right] \quad \text{Equação 4.1.1}$$

onde:

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

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

$Fr_1$  = número de Froude correspondente a  $Y_1$ .

A relação de Bélanger tem como embasamento teórico a conservação da quantidade de movimento, tomada em duas seções de controle, na entrada e no final do ressalto. Além disso, o pesquisador adotou ainda as seguintes considerações:

- canal de seção transversal retangular;
- canal de fundo plano horizontal;

- distribuição hidrostática de pressões nas seções de controle;
- distribuição uniforme de velocidades nas seções de controle;
- escoamento permanente e incompressível;
- efeitos viscosos desprezíveis.

Apesar das peculiaridades, os efeitos diversos na maioria das vezes são insignificantes, sendo desta forma largamente utilizada na análise do ressalto.

#### 4.1.1.3 Comprimento do Ressalto

A determinação do comprimento do ressalto é de extrema importância no cálculo de estruturas de dissipação. A partir do conhecimento da extensão dos efeitos do ressalto, é possível garantir a eficiência da estrutura. Diversos pesquisadores estudaram o comprimento do ressalto, sendo que neste trabalho serão apresentadas as mais difundidas.

Bakhmeteff e Matzke (1936) *apud* Rajaratnam (1968) definiram o final do ressalto como a seção onde a superfície média da água atinge a máxima profundidade e torna-se constante.

Elevatorski (1959) determinou o comprimento do ressalto como a distância entre o seu início e a posição onde inexitem variações de níveis.

U.S. Bureau of Reclamation (1955) *apud* Chow (1959) apresenta uma outra proposta de determinação do comprimento do ressalto (Figura 4.4). O gráfico apresentado pelo USBR abrange uma grande faixa de números de Froude e indica uma tendência de decréscimo no comprimento do ressalto com o aumento do número de Froude. Pode ser verificado ainda um comportamento praticamente constante para número de Froude entre 6,0 e 9,0.

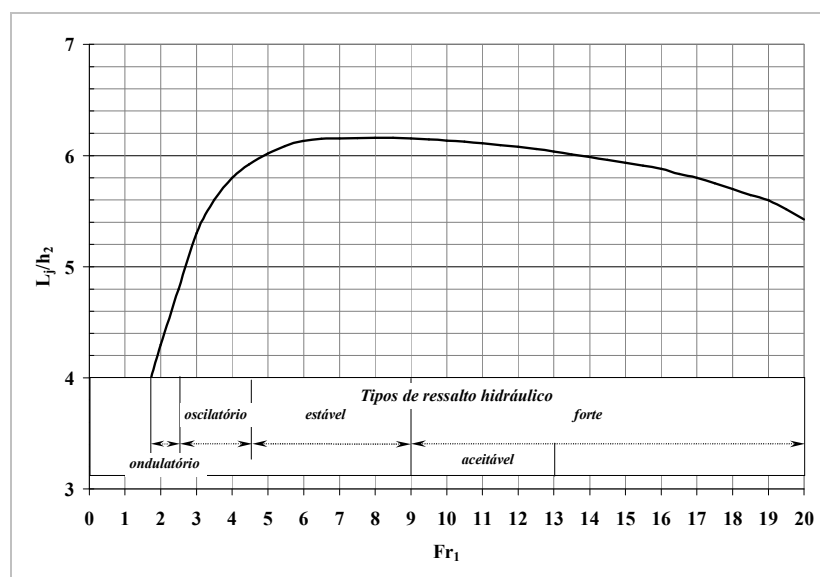


Figura 4.4 - Comprimento do ressalto para diversos números de Froude adaptado de Chow (1959). (Gomes, 2000)

Rajaratnam (1967) definiu que o ressalto estende-se até o local onde sua altura encontra a altura conjugada de saída. Já Marques *et al* (1997) determinou como final do ressalto a posição na qual terminam as perturbações causadas pelo mesmo, podendo ser descrito pela Equação 4.1.2.

$$x = 8.(Y_2 - Y_1) \quad \text{Equação 4.1.2}$$

Lopardo *et al* (2004a) sugerem uma nova metodologia para o estabelecimento do comprimento do ressalto para o caso afogado. Teixeira (2003) e Trierweiler (2006) apresentam uma extensa listagem de diferentes metodologias para o cálculo do comprimento do ressalto.

#### 4.1.1.4 Comprimento do Rolo

O comprimento do rolo foi definido por Rajaratnam (1965b), confirmado posteriormente por Peterka (1974) e Lopardo (1986) como a distância entre o início do ressalto e o ponto onde a altura de água alcança 95% da altura conjugada de saída.

Marques *et al* (1997) determinaram o comprimento do rolo como a distância entre o início do ressalto e o local no qual o coeficiente de assimetria das medidas de pressão “instantânea” muda de sinal e encontra seu valor mínimo, indicando que o escoamento atingiu a superfície, podendo ser descrito pela equação 4.3.

$$x = 6.(Y_2 - Y_1) \quad \text{Equação 4.1.3}$$

Teixeira (2003) e Trierweiler (2006), assim como para o comprimento do ressalto, apresentam uma extensa listagem de metodologias diferentes para o cálculo do comprimento do rolo.

#### 4.1.1.5 Perfil da Linha d'água

Bakhmeteff e Matzke (1936) *apud* Rajaratnam e Subramanya (1968) encontraram uma relação entre o perfil da linha d'água do ressalto em um canal horizontal com a variação do número de Froude (Figura 4.5):

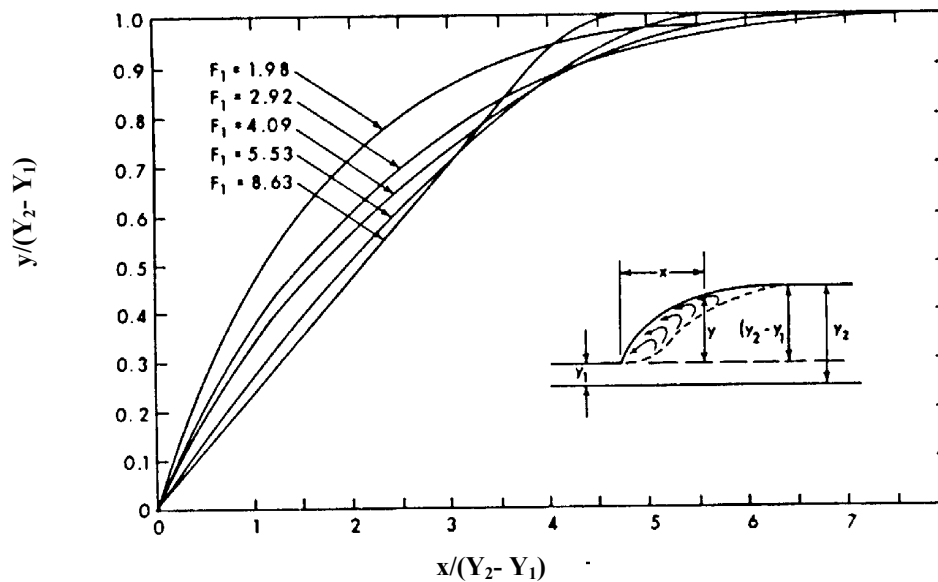


Figura 4.5 – Perfil do ressalto em função do número de Froude por Bakhmeteff e Matzke, (1936) (Rajaratnam e Subramanya, 1968)

Rajaratnam (1962) *apud* Rajaratnam e Subramanya (1968), utilizando o estudo teórico de Flores (1954), estabeleceu o perfil do ressalto dado por:

$$\frac{(y - Y_1)}{Y_2} = A_1 \left( \frac{x}{Y_2} \right) + A_2 \left( \frac{x}{Y_2} \right)^2 \quad \text{Equação 4.1.4}$$

onde:

A1 e A2 são coeficientes que dependem do número de Froude

Rajaratnam e Subramanya (1968) sugerem um método de determinação do perfil de pressões sobre o fundo e do perfil médio da superfície da linha d'água, assumidos como sendo coincidentes.

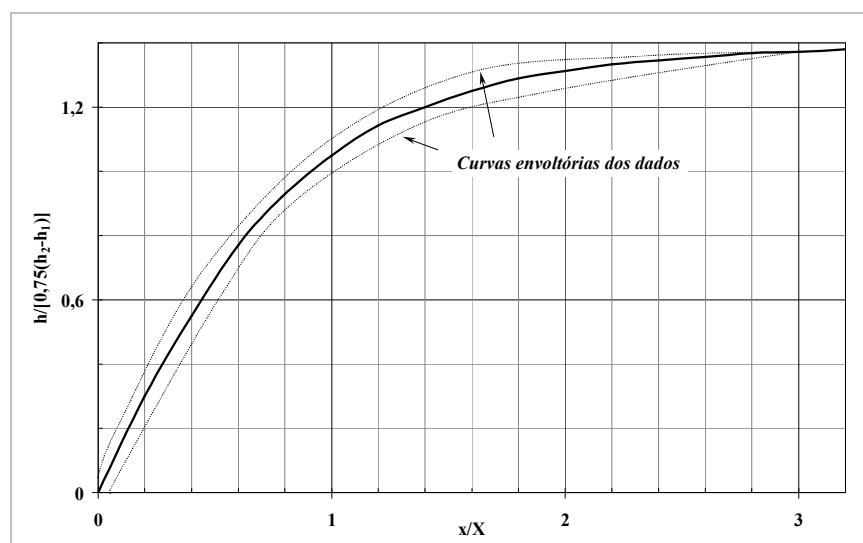


Figura 4.6 - Perfil do Ressalto adaptado de Rajaratnam e Subramanya, 1968 (Gomes, 2000)

onde:

$h$  = coordenada vertical do ressalto;

$x$  = coordenada horizontal do ressalto;

$h_2 = Y_2$  = altura conjugada lenta;

$h_1 = Y_1$  = altura conjugada rápida e;

$X$  = Comprimento de escala horizontal, igual a posição de  $x$  para  $h/[0,75(h_2 - h_1)]$ .

Sauma Haddad *et al* (1992) determinou uma equação para a superfície livre do ressalto através de sua representação por uma série de Fourier, admitindo uma extensão periódica fictícia da linha d'água.

$$y(x) \cong Y_1 + Y_1 \cdot \sin\left(\frac{\pi x}{2L_j}\right) \quad \text{Equação 4.1.5}$$

Mok (2004) utilizando medições da oscilação da superfície a jusante do ressalto estabeleceu uma relação entre os vórtices formados na região do rolo e a flutuação da superfície livre a jusante do ressalto. O pesquisador propõe uma equação para a frequência de formação de vórtices, para valores de Froude maiores do que 1,5.

$$freq = \frac{V_1}{2L_r} \quad \text{Equação 4.1.6}$$

O autor compara a expressão teórica (Equação 4.1.6) com as frequências características das mudanças de nível a jusante do ressalto, adimensionalizadas pelo número de Strouhal, para diversos números de Froude. Pode-se notar um bom ajuste dos dados. (Figura 4.7):

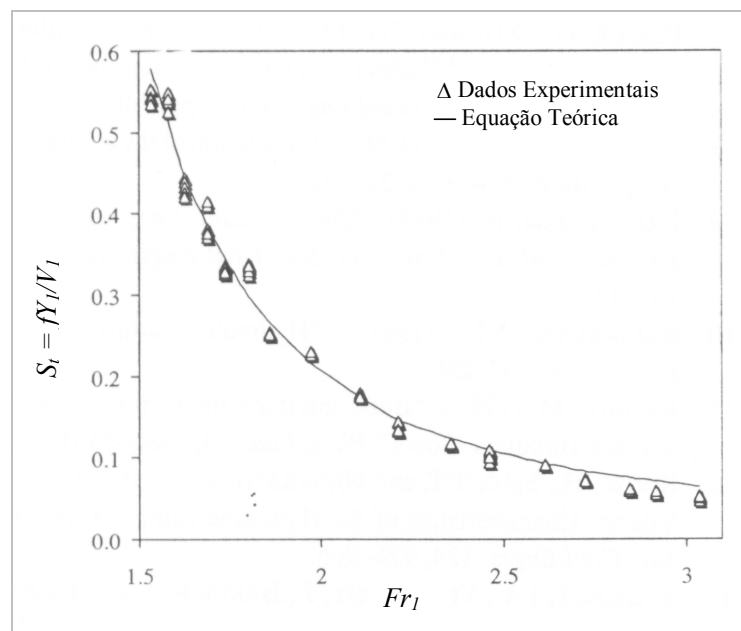


Figura 4.7 – Frequências características da oscilação de nível a jusante do ressalto.

Fragoso e Aldape (2004) mediram as velocidades e a altura da lâmina d'água em diversos pontos de um ressalto tridimensional a jusante de um vertedouro e traçaram o perfil de sua superfície livre. Os autores realizaram medições na parte central do escoamento, junto às paredes do canal, e em posições intermediárias na direção perpendicular ao escoamento. Os pesquisadores verificaram a mudança do perfil do ressalto formado dependendo da posição das medições, principalmente pelo efeito das paredes do canal, sendo indispensável sua consideração em ensaios futuros.

#### 4.1.1.6 Dissipação de Energia

A perda de energia no ressalto hidráulico tem como uma das primeiras relações a equação estabelecida por Bakhmetef e Matzke (1946), que determinaram a eficiência da dissipação de energia ( $\Delta H/H_1$ ) através da diferença entre as energias de montante ( $H_1$ ) e de jusante ( $H_2$ ) do ressalto (Gomes, 2000):

$$\frac{\Delta H}{H_1} = 1 - \frac{H_2}{H_1} \quad \text{Equação 4.1.7}$$

onde:

$\Delta H$  é igual a perda de energia;

$H_1$  é a energia do escoamento a montante do ressalto;

$H_2$  é a energia do escoamento a jusante do ressalto;

A perda de energia ( $\Delta H$ ) no ressalto hidráulico pode ser determinada a partir da diferença de energia nas seções imediatamente anterior ( $E_1$ ) e posterior ( $E_2$ ) do ressalto, como pode ser vista na Figura 4.8.

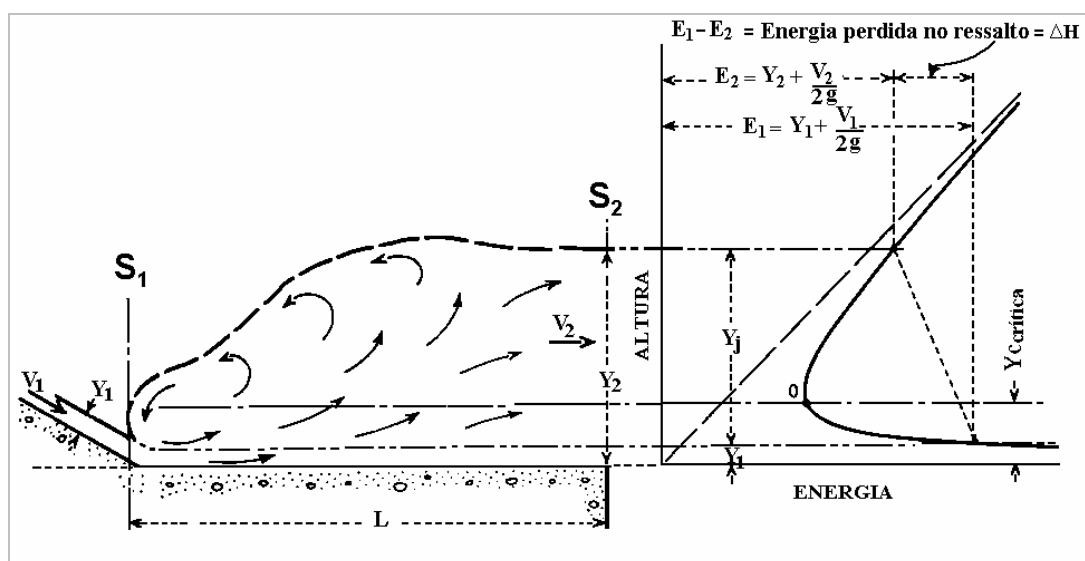


Figura 4.8 - Dissipação Esquema das alturas conjugadas relacionadas com a perda de energia. - Elevatorski (1959)

Em grande parte das vezes, a perda de energia é expressa como uma perda relativa  $\Delta E/E_1$ , ou ainda pela sua eficiência  $E_2/E_1$ . Para o caso de um canal retangular horizontal, French (1985) apresenta a relação:

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{[(8Fr_1^2 + 1)^{3/2} - 4Fr_1^2 + 1]}{[8Fr_1^2 \cdot (2 + Fr_1^2)]} \quad \text{Equação 4.1.8}$$

Peterka (1974) mostra que a eficiência do ressalto, definida como a relação entre a energia perdida ( $\Delta E$ ) e a energia mantida ( $E_r$ ), é proporcional ao número de Froude, porém com um gradiente menos acentuado a medida que o Froude aumenta.

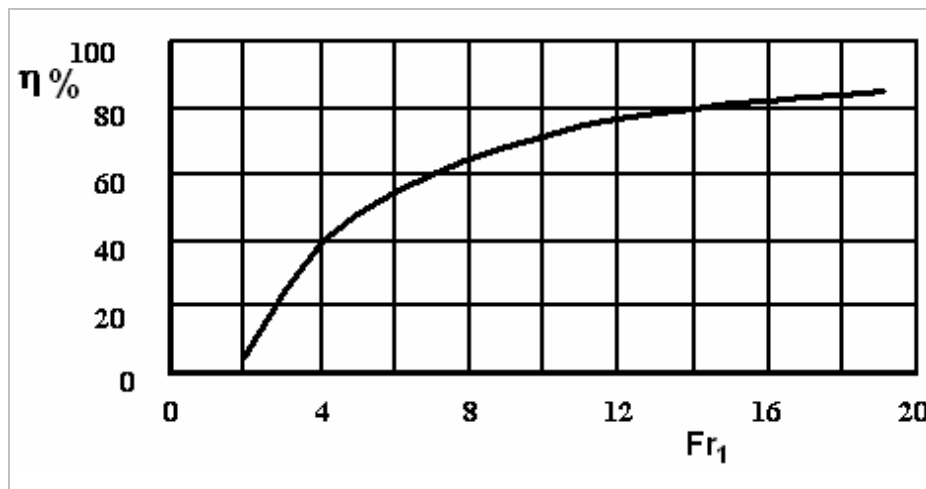


Figura 4.9 – Eficiência do Ressalto Hidráulico em relação ao número de Froude (Peterka, 1974)

Marques *et al* (1998) apresentaram um gráfico no qual identifica-se a dissipação de energia ao longo do ressalto formado a jusante de um vertedouro. Os pesquisadores relacionaram as flutuações de pressão no fundo da estrutura de dissipação com a perda de energia, conforme pode ser constatado na Figura 4.10.

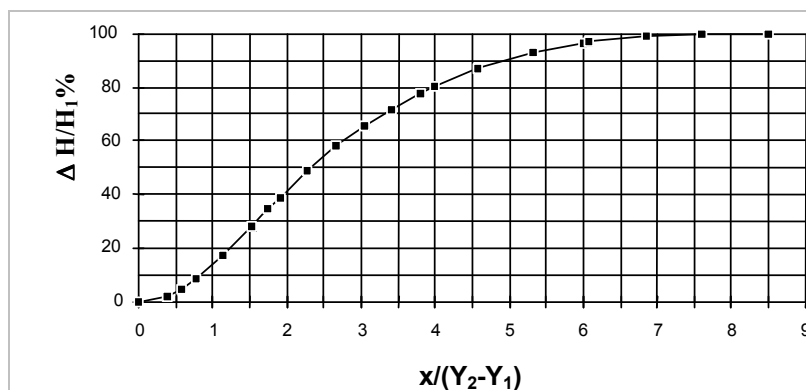


Figura 4.10 - Energia dissipada ao longo do ressalto conforme apresentado em Marques *et al.* (1998) –  $\Delta H$  = perda de energia e  $H_1$  = energia na entrada do ressalto.



#### 4.1.1.7 Características internas

O conhecimento dos esforços atuantes na estrutura de dissipação de energia a jusante de um vertedouro está ligado à definição das flutuações de pressão a que tal estrutura é submetida. Dessa maneira, a medição tanto de pressões médias quanto de pressões “instantâneas”, isto é, a intervalos de tempo muito pequenos, vem sendo alvo de estudos de vários pesquisadores nas últimas décadas.

Diversos pesquisadores contribuíram para o desenvolvimento das pesquisas referentes às pressões no ressalto. Bowers *et al* (1964) estudaram os danos da barragem de Karnafuli, os quais foram atribuídos à intensa flutuação de pressão no ressalto hidráulico. Vasiliev e Bukreyev (1967) apresentaram uma extensa gama de parâmetros estatísticos para as pressões para apenas uma condição de ressalto. Já Abdul Khader e Elango (1974) apresentaram uma extensão do trabalho de Vasiliev e Bukreyev, fornecendo dados estatísticos para uma grande faixa de número de Froude (Toso e Bowers, 1988).

Akbari *et al* (1982) mediram a flutuação de pressão em um ressalto livre e também em um ressalto forçado. Os pesquisadores utilizaram transdutores de pressão indutivos, conectados às tomadas de pressão no fundo do canal por mangueiras plásticas flexíveis de até 0,50 m. Ensaio preliminares com vários comprimentos de mangueira indicaram que como máximo o comprimento de 1,0 m. Além disso, os autores realizaram estudos quanto ao tempo de amostragem ideal para a caracterização do fenômeno e concluíram ser necessária uma amostragem maior do que 60 s.

Lopardo (1986) estudou a flutuação de pressão para números de Froude variando entre 4,5 e 10,0 (Figura 4.11), utilizando o coeficiente de flutuação de pressão  $C_p'$  e a relação  $(X/Y_1)$  entre a coordenada do ponto estudado e altura conjugada rápida do ressalto.

$$C_p' = \frac{\sigma_x}{\frac{V_1^2}{2 \cdot g}} = f\left(\frac{X}{Y_1}; Fr_1\right) \quad \text{Equação 4.1.9}$$

onde

$\sigma_x$  = Desvio padrão das flutuações de pressão  
 $V_1$  = Velocidade do fluxo no início do ressalto

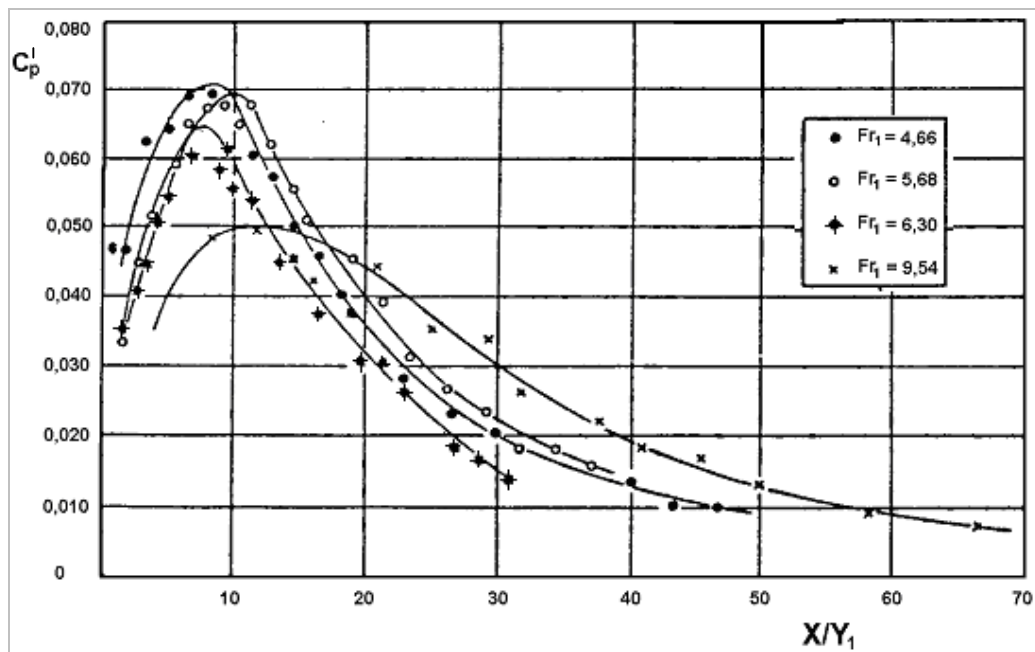


Figura 4.11 - Flutuação de pressão adimensionalizada em relação à distância de início do ressalto ( $X$ ) e a altura conjugada na entrada do ressalto hidráulico ( $Y_1$ )

Lopardo (1986) apresenta ainda uma série de recomendações quanto ao processo experimental das pesquisas com o ressalto hidráulico e especificamente as medições de flutuações de pressão:

- Reynolds na entrada do ressalto maior que 100.000 ( $Re_1 \geq 100.000$ );
- Altura conjugada rápida de, no mínimo, 3,0 cm ( $Y_1 \geq 3$  cm);
- Tempo de aquisição dos dados igual a 60 segundos;
- Frequência de aquisição entre 50 e 100 Hz e;
- Comprimento máximo da mangueira entre a tomada de pressão e o sensor de, no máximo, 55 cm.

Toso e Bowers (1988) estudaram em modelo reduzido a flutuação de pressão no fundo da estrutura de dissipação, para uma faixa de número de Froude de 3,0 até 10,0 e diferentes condições de entrada na bacia de dissipação, inclusive variando-se a inclinação do vertedouro a montante da estrutura. Entre as principais discussões, os autores ressaltam que a análise estatística da flutuação de pressão indica que a distribuição de probabilidades difere substancialmente de uma distribuição normal.

Endres (1990) mediu a flutuação de pressão a jusante de um vertedouro para uma faixa de números de Froude variando entre 4,5 e 10,0. Seus resultados possuem a mesma tendência que os apresentados por Lopardo (1986).

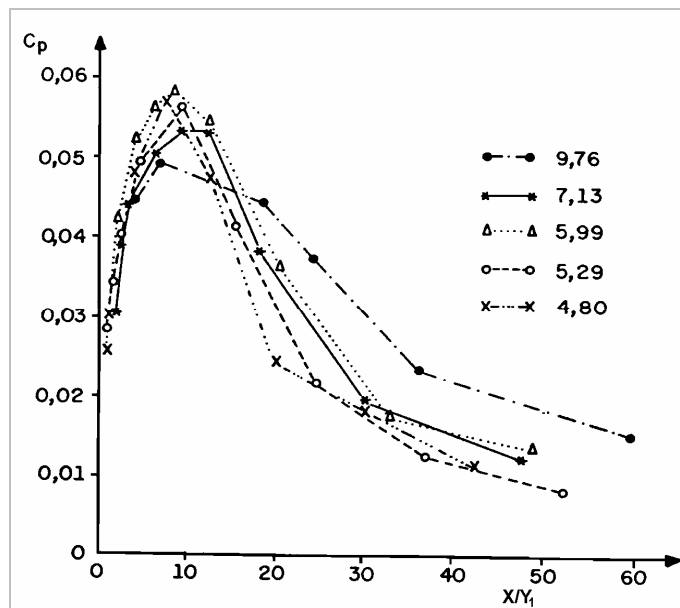


Figura 4.12 - Flutuação de pressão adimensionalizada em relação à distância de início do ressalto ( $X$ ) e a altura conjugada na entrada do ressalto hidráulico ( $Y_1$ )

Fiorotto e Rinaldo (1991), através de trabalho experimental, apresentaram a estrutura estatística das flutuações de pressão no ressalto hidráulico, principalmente em relação à estabilidade de bacias de dissipação para números de Froude entre 7,0 e 9,5. Os autores apresentam os valores máximos de pressão e sua correlação no tempo e no espaço.

Marques *et al* (1991) avaliaram algumas características estatísticas das flutuações de pressão no fundo de uma bacia de dissipação a jusante de um vertedouro. Entre as principais constatações pode-se destacar a verificação de pressões negativas de pressão e Coeficiente de Flutuação de pressão ( $C_p'$ ) máximo igual a 0,063, bastante semelhante aos dados apresentados por Lopardo (1986).

Lopardo (1992) *apud* Teixeira (2003) apresenta dados de flutuação de pressão para o caso ressalto hidráulico forçado, observando que a capacidade de dissipação de energia sofre um incremento mediante a utilização do ressalto forçado. No entanto, o autor ressalta um maior efeito destrutivo devido às pressões produzidas.

O trabalho de Marques *et al* (1994) *apud* Marques *et al* (1997) apresenta uma relação para o estabelecimento da posição de maior flutuação de pressão, conforme equação 4.1.10.

$$X_{C_p \max} = 2.y_r (Fr - 1) \quad \text{Equação 4.1.10}$$

onde:

$y_r$  = altura conjugada rápida do ressalto

Pinheiro (1995) mediu a flutuação de pressão no interior do ressalto hidráulico com número de Froude variando de 6,0 a 10,0. O autor demonstrou que as pressões junto ao fundo,

ao longo do ressalto hidráulico, são inferiores às que correspondem à altura média do escoamento.

Marques *et al* (1996) apresentam relações adimensionais para a representação da pressão média e da flutuação de pressão, de modo a viabilizar o agrupamento dos resultados de diferentes escoamentos e a caracterização de pontos de interesse no ressalto hidráulico. As Equações 4.1.11 e 4.1.12 apresentam as relações estabelecidas. O trabalho destaca ainda alguns pontos de interesse ao longo do desenvolvimento do ressalto, descritos na Tabela 4.1.

$$\frac{P_X - Y_1}{Y_2 - Y_1} = f\left(X = \frac{x}{Y_2 - Y_1}\right) \quad \text{Equação 4.1.11}$$

$$\frac{\sigma_X \cdot Y_2}{H_t \cdot Y_1} = f\left(X = \frac{x}{Y_2 - Y_1}\right) \quad \text{Equação 4.1.12}$$

onde:

$x$  = Posição do ponto avaliado, relativo ao início do ressalto;

$P_X$  = Pressão média em uma posição adimensional  $X$  do ressalto;

$\sigma_X$  = Flutuação de pressão em uma posição adimensional  $X$  do ressalto e;

$H_t$  = Perda de carga total atribuída ao ressalto.

Tabela 4.1 - Pontos característicos do ressalto hidráulico (Marques, 1996)

Pontos de interesse	$X = x/(Y_2 - Y_1)$
▪ Maior flutuação de pressão	1,75
▪ Descolamento	4,00
▪ Final do rolo	6,00
▪ Final da influência do ressalto hidráulico	8,00

Marques *et al* (1997) apresenta e compara medidas de pressão em um ressalto hidráulico a jusante de um vertedouro para uma faixa de números de Froude entre 4,5 e 10,0. São apresentados os comportamentos das pressões médias e das flutuações de pressão utilizando-se das relações estabelecidas por Marques *et al* (1996), além de dados estatísticos complementares das amostras (distribuição dos coeficientes de assimetria e curtose). Através da análise dos dados, são apresentados pontos característicos do ressalto e a sugestão de uma metodologia de estabelecimento dos esforços hidrodinâmicos sobre a bacia através da adoção de uma distribuição estatística que melhor descrevesse o fenômeno, uma vez que os dados não se mostraram Gaussianos.

Teixeira (2003), partindo do conhecimento de que as pressões resultantes do ressalto hidráulico não seguem uma distribuição normal, obteve uma estimativa dos valores de pressão que podem ocorrer ao longo de uma bacia de dissipação para diversas probabilidades de ocorrência, através da determinação do coeficiente estatístico  $N$ . A determinação desse coeficiente deu-se a partir dos dados brutos de pressão média ( $P_x$ ) e desvio padrão ( $\sigma_x$ ) obtidos por Endres (1990). As pressões foram determinadas a partir da equação 4.1.13. O autor apresenta ainda uma metodologia para o estabelecimento da pressão média e do desvio padrão ao longo do ressalto. Para validação do método proposto foram utilizados os dados coletados no protótipo da UHE Porto Colômbia. Os resultados são apresentados ainda em Teixeira (2003a).

$$P_{x\%} = \overline{P_x} \pm N \cdot \sigma_x \quad \text{Equação 4.1.13}$$

onde:

$P_{x\%}$  = Pressão com uma certa probabilidade de ocorrência, em uma posição  $X$  do ressalto;

$\overline{P_x}$  = Pressão Média em uma posição  $X$  do ressalto;

$\sigma_x$  = Desvio Padrão da pressão medida em uma posição  $X$  do ressalto e;

$N$  = Coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades.

Teixeira *et al* (2003b) determinaram os valores extremos das pressões no fundo de uma bacia de dissipação para diferentes probabilidades de ocorrência, utilizando os dados de Endres (1990). Os autores verificaram uma maior variação das pressões extremas na parte inicial do ressalto assim como a ocorrência de pressões negativas nessa faixa.

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

Marques *et al* (2006) apresentam algumas relações para o estabelecimento de pontos característicos do ressalto, entre os quais o a posição de maior flutuação de pressão, final do rolo e posição de término da dissipação de energia. Foram utilizados exclusivamente dados oriundos de medições de pressão em modelo reduzido de ressaltos originados a jusante de comporta. Entre as principais conclusões pode-se destacar que, quando comparados à ensaios realizados em ressaltos à jusante de vertedouro, os dados coletados não mostraram alterações significativas com relação aos aspectos avaliados. Os autores mencionam que a partir desse comportamento é possível crer que o processo de dissipação de energia desenvolve-se da mesma maneira em ambas as situações.

#### **4.1.2 Ressalto Submergido**

O enfoque do trabalho, segundo largamente comentado até aqui, é o ressalto submergido a jusante de canais inclinados (vertedouros), situação comumente encontrada em obras de segurança de barragem. Desse modo, a influência do grau de afogamento nas características desse tipo de ressalto deverá ser abordada no capítulo que versará sobre o ressalto formado em canais inclinados. O presente, por conseguinte, deverá enfocar situações em que ocorre a formação de ressalto submergidos a jusante de comportas e sobre canais planos.

Govinda Rao e Rajaratnam (1963) apresentam um trabalho experimental baseado no estudo do ressalto afogado a jusante de um orifício constituído tal qual uma comporta, porém sem os efeitos de contração do escoamento comuns quando da utilização das mesmas. Os autores estabeleceram um fator de submergência do escoamento igual a diferença entre altura da lâmina d'água a jusante do ressalto descontada da altura conjugada lenta, considerando o ressalto livre, dividido pela altura conjugada lenta. Dessa maneira, em se tratando do ressalto livre, o fator de submergência é igual a zero. Entre as principais conclusões está o estabelecimento de relações descritivas do ressalto afogado e a afirmação de que mesmo com um aumento no grau de submergência do ressalto pode ocorrer uma redução na energia dissipada.

Narayanan (1978) desenvolveu um trabalho no sentido de investigar o comportamento das flutuações de pressão no ressalto submergido. As medições foram desenvolvidas a partir da utilização de transdutores de pressão instalados no fundo do canal e o ressalto era originado a partir de uma comporta. O autor destaca que a intensidade das flutuações de pressão no ressalto submergido são de 4 a 7 vezes superiores à ocorrente na camada limite turbulenta. Além disso, o pesquisador menciona que as flutuações de pressão não são causadas exclusivamente pelas características do fluxo, mas também pelas instabilidades do meio no qual o escoamento se desenvolve. A Figura 4.13 apresenta o comportamento das flutuações de pressão quando comparados o ressalto livre e o submergido.

Lopardo *et al* (2004a) sugerem uma nova metodologia para o estabelecimento 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 corresponde a um escoamento livre em canal.

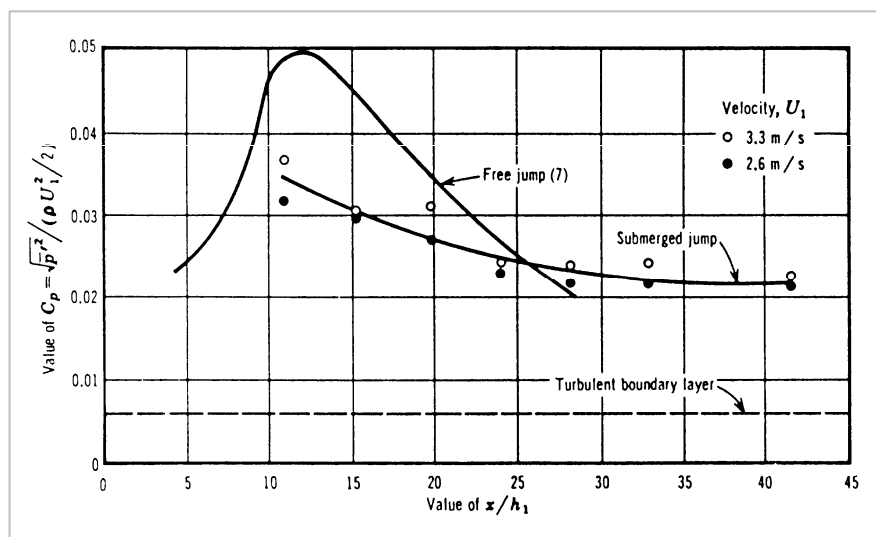


Figura 4.13 – Comportamento do ressalto submergido em relação ao ressalto livre (Narayanan, 1978)

Lopardo *et al* (2004b) estudaram a flutuação em ressalto hidráulico submergido formado a jusante de uma comporta para uma faixa de números de Froude entre 3 e 6 e fatores de submergência entre 0,1 e 1,1, ou seja, entre 1,1 e 2,1 para o fator de submergência ( $S=Tw/Y_2$ ) proposto por Marques *et al* (1999). De acordo com os autores, para um mesmo fator de submergência, há um aumento no coeficiente de flutuação de pressão ( $C_p$ ) proporcional à diminuição do valor do Froude incidente, isto para a região mais à montante do ressalto ( $X/Y_1 < 10$ ). Contudo, quando avaliada a região mais à jusante ( $X/Y_1 > 30$ ) pode-se verificar que ocorre um aumento do valor de  $C_p$  em função do número de Froude. Os autores relatam ainda que o fator de submergência aumenta a intensidade da flutuação de pressão junto ao piso da bacia de dissipação para uma região de  $X/Y_1 > 12$ . Os valores encontrados para o ressalto hidráulico livre apresentam uma diferença de 50% em relação à flutuação de pressão verificada para  $S = 2,1$ .

O estudo de Trierweiler (2006) apresenta o comportamento da flutuação de pressão em ressalto hidráulico livre e submergido formado a jusante de uma comporta. O pesquisador estabeleceu escoamentos para números de Froude ( $Fr_1$ ) na faixa de 3,97 até 5,88 para diferentes graus de submergência, variando de 1,0 até 1,40. De maneira geral o autor destaca que o comportamento das flutuações de pressão ( $C_{p_{\sigma x}}$ ) segue a mesma distribuição apresentada por outros pesquisadores, no entanto com valores um pouco superiores. A Figura 4.14 apresenta resultados do autor e sua comparação com os valores apontados por Lopardo *et al.*, 2004a e Lopardo *et al.*, 2004b. O pesquisador destaca que o aumento do número de  $Fr_1$  deve ocasionar maiores flutuações de pressão na parte final da bacia de dissipação e que o maior afogamento da bacia de dissipação deve levar a um aumento do coeficiente de

flutuação de pressão junto ao fundo, em posições mais a jusante. A princípio, esse comportamento não ocorre na região de montante do ressalto.

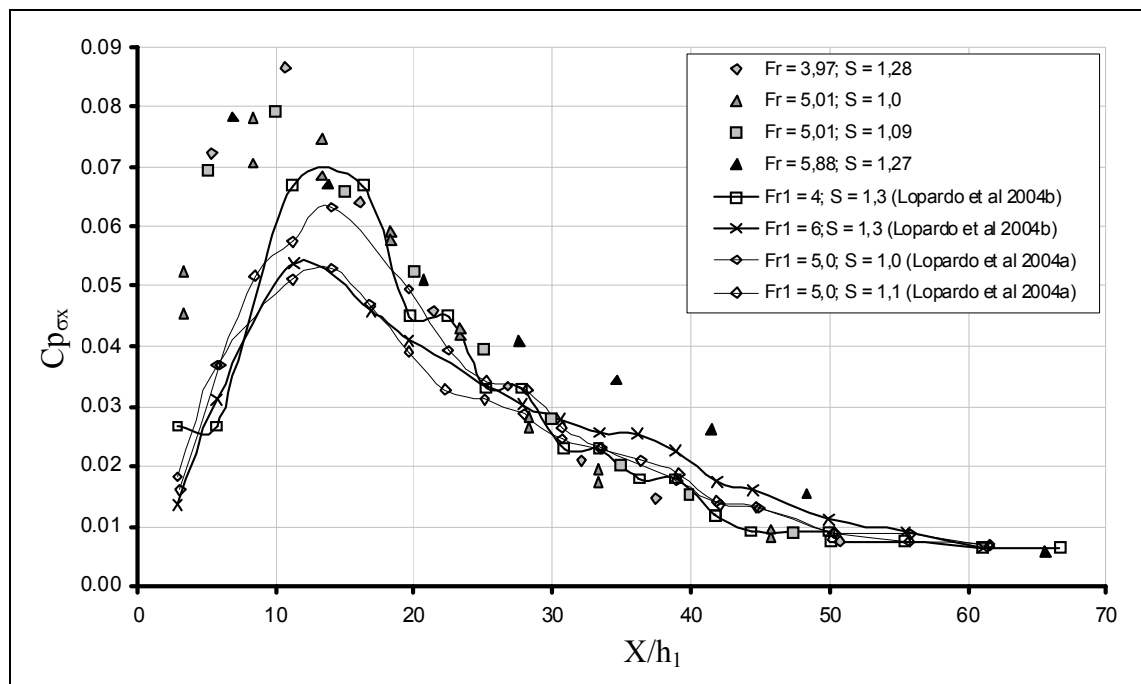


Figura 4.14 - Comparação entre os valores do  $Cp_{ox}$  obtidos por Trierweiler, 2006 com os dados de Lopardo et al., 2004a e Lopardo et al., 2004b, em função de  $Fr_1$  e da posição relativa ( $X/h_1$ ).

Trierweiler (2006) ressalta ainda a necessidade da utilização do fator de submergência “S” ( $S = T_w/Y_2$ ) quando da avaliação das pressões desenvolvidas no ressalto afogado, conforme apresentado por Marques (1999). Para o caso da pressão média, o autor menciona que as diferenças significativas em relação ao ressalto livre restringem-se à posição adimensional igual a três ( $x/(Y_2 - Y_1) = 3$ ). Com relação à flutuação de pressão, o autor destaca que 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 e que essa diferença aparentemente aumenta à medida que o fator de submergência ( $S$ ) cresce. O pesquisador apresenta ainda uma metodologia de estabelecimento de pressões extremas, baseado na metodologia estabelecida por Teixeira (2003).

Pode-se notar, portanto, que grande parte dos estudos aponta a influência do grau de afogamento sobre as características do ressalto hidráulico resultante. Boa parte dos estudos menciona ainda que a maioria dos ressaltos que ocorrem em situações reais acontece sob condições com algum grau de afogamento. Destaca-se, desta forma, a necessidade de um estudo apurado destas condições, com ênfase sobre os ressaltos formados a jusante de vertedouros.



## 4.2 RESSALTO HIDRÁULICO EM CANAIS INCLINADOS

Sabe-se que o ressalto hidráulico pode ocorrer em canais com certa inclinação, o que obriga à consideração das forças devidas a gravidade em sua resolução. Apesar de a equação da conservação da quantidade de movimento ser teoricamente aplicável para este tipo de ressalto, na prática o número de soluções disponíveis é limitado. De acordo com French (1987), existe uma série de dificuldades para a obtenção de soluções para este tipo de fenômeno, das quais podem ser destacadas:

- O termo referente a componente horizontal da massa do fluxo geralmente é insuficientemente quantificado, principalmente em razão do comprimento e da forma do ressalto, que não é bem definida;
- O peso específico do fluido no volume de controle pode sofrer alterações devido à significativa entrada de ar no escoamento;
- Os termos de pressão na equação de conservação da quantidade de movimento não podem ser suficientemente quantificados.

Conforme ressalta Rajaratnam (1967), no caso de a equação da quantidade de movimento ser escrita na direção paralela ao fundo canal, o componente do peso do corpo do ressalto entra na relação.

Rajaratnam (1967) faz uma breve revisão histórica dos trabalhos relacionados ao estudo do ressalto em canais inclinados. O autor, citado também por French (1987) e por Hager (1992), menciona que o trabalho de Bidone em 1818, um dos precursores dos estudos do ressalto hidráulico de forma geral, foi na verdade executado em canais com inclinação. Também Bazin em 1965 e Beebe e Riegel em 1917 fizeram experiências com ressaltos em canais inclinados, além de Ellms em 1927, que desenvolveu um estudo teórico e experimental sobre o fenômeno. Em 1935 Rindlaub conduziu uma série de estudos experimentais com canais de inclinação de 8,2°, 12,5°, 24,2° e 30°. Em 1938 Bakhmeteff e Matzke publicaram uma análise apurada do fenômeno com dados experimentais para várias inclinações.

Ainda de acordo com o trabalho de Rajaratnam (1967), o primeiro trabalho racional e de sucesso com relação a este tipo de ressalto, foi realizado por Kindsvater em 1944, cujo trabalho foi suplementado posteriormente por Hickox e Dutta, que em 1949 construiu alguns ábacos de dimensionamento para algumas inclinações de canal. O autor destaca ainda o extenso trabalho realizado por Bradley e Peterka, em 1957.

Peterka (1974) a partir de medições de vazão, da lâmina d'água na entrada do ressalto, seu comprimento, a lâmina d'água a jusante do ressalto e a inclinação da estrutura de

montante, realizou diversos ensaios no intuito de estabelecer dados suficientemente precisos que servissem como subsídio para a descrição do ressalto em canais inclinados e como parâmetro de projeto para estruturas que se valem deste tipo de fenômeno. De acordo com o pesquisador o ressalto sobre canais inclinados pode assumir diversas formas, dependendo da inclinação e das características da estrutura de aproximação, o valor do número de Froude do escoamento e, por conseguinte, sua vazão específica. Da mesma forma, relata que a dissipação de energia apresenta a mesma eficiência alcançada no ressalto em canais planos.

Pode-se destacar ainda, mais recentemente, os trabalhos desenvolvidos por Pinto *et al* (1988), Hager (1989), Ohtsu e Yasuda (1991). O trabalho de Pinto *et al* (1988) aborda o ressalto formado a jusante de vertedouro com relação as pressões exercidas sobre a bacia de dissipação, de forma a subsidiar o projeto das estruturas. Já os demais estudos estabelecem principalmente parâmetros descritivos do ressalto, como o comprimento do rolo ou suas alturas conjugadas.

O ressalto a jusante de canais inclinados, segundo apresentam Rajaratnam (1967) e também Peterka (1974), segue uma classificação atribuída a Kindsvater, que indica a formação de quatro tipos de ressalto:

- Ressalto Tipo A;
- Ressalto Tipo B;
- Ressalto Tipo C;
- Ressalto Tipo D;

O ressalto do tipo A (*A-jump*) forma-se quando a altura conjugada lenta, calculada pela equação de Bélanger ( $Y_2$ ), é igual àquela existente a jusante ( $Y_1$ ), sendo que o ressalto formado encontra-se inteiramente no canal horizontal a jusante do vertedouro (Figura 4.15).

À medida que se incrementa a altura da lâmina d'água a jusante, de maneira que  $h_2 > Y_2$ , a parte inicial do ressalto move-se em direção ao vertedouro, “afogando” o ressalto formado. Dependendo da posição do ressalto, podem ocorrer três tipos de ressalto:

Ressalto do tipo B (*B-jump*), quando o ressalto encontra-se parte na estrutura de dissipação e parte no vertedouro, “afogando” parcialmente a estrutura (Figura 4.16);

Ressalto do tipo C (*C-jump*), quando o final do rolo encontra-se no início da estrutura de dissipação (Figura 4.17);

Ressalto do tipo D (*D-jump*), caracterizado pela formação do rolo inteiramente sobre o vertedouro (Figura 4.18).

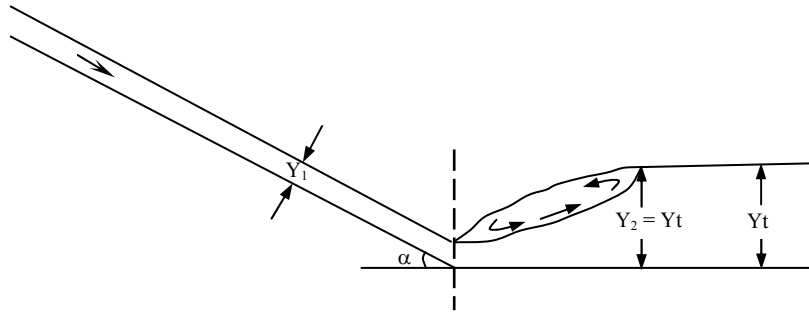


Figura 4.15 - Ressalto Livre

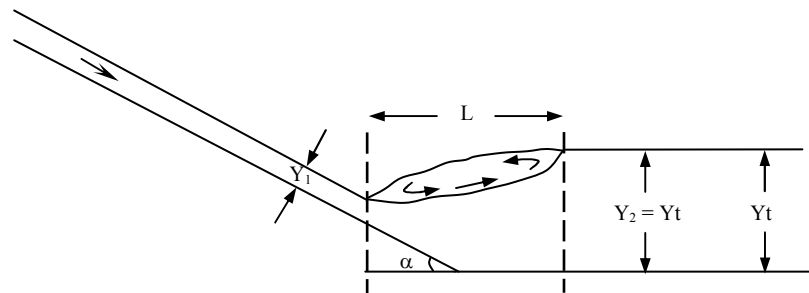


Figura 4.16 - Ressalto tipo B

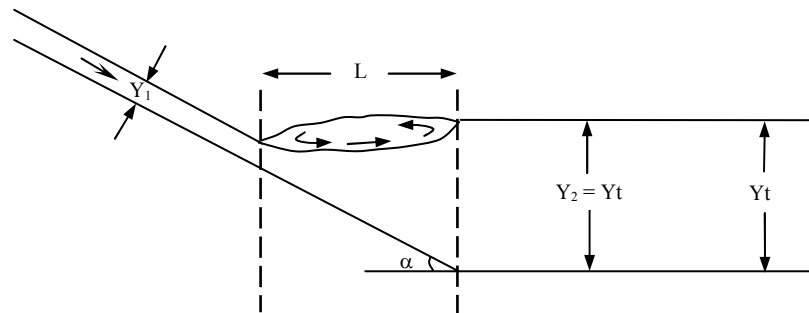


Figura 4.17 - Ressalto tipo C

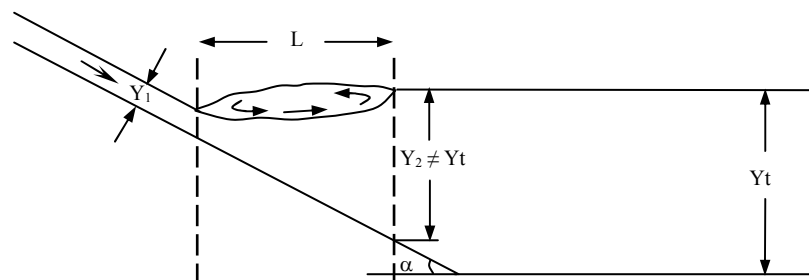


Figura 4.18 - Ressalto tipo D

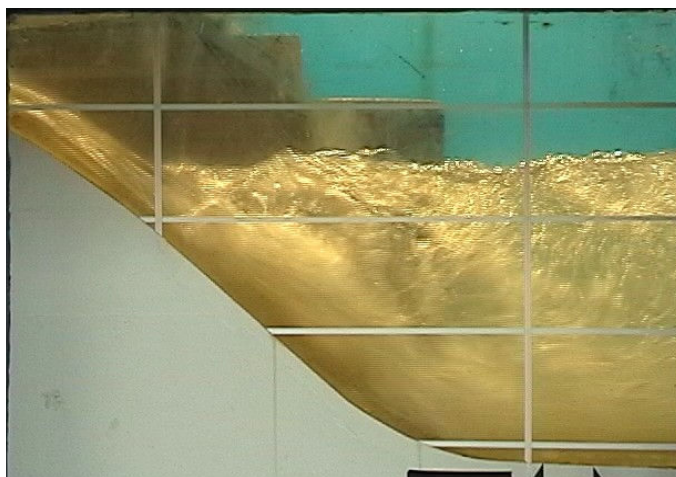
Peterka (1974) relata que os fenômenos envolvidos nos ressaltos do tipo C e do tipo D são, em linhas gerais, idênticos, tomando-se como premissa uma superfície plana a jusante do ressalto. De acordo com o autor, diversas abordagens experimentais demonstram essa constatação. Através de ensaios com canais com inclinação entre  $3^\circ$  e  $17^\circ$  o pesquisador

apresenta ajustes para o estabelecimento do comprimento desse tipo de ressalto e também para o cálculo da relação entre as suas alturas conjugadas, comparando os dados com os trabalhos de Kindsvater, Bakhmeteff e Matzke, entre outros.

De forma geral, os escoamentos a jusante de vertedouros apresentam a configuração do ressalto de tipo B, isto é, parte do ressalto forma-se sobre o vertedouro e parte sobre a bacia de dissipação. Os ressaltos do tipo A, C e D raramente ocorrem em condições reais de operação deste tipo de estrutura, de forma que as análises preponderantemente restringem-se à análise do ressalto do tipo B.

#### **4.2.1 O ressalto afogado – Tipo B**

O ressalto hidráulico do tipo B, nesse trabalho chamado somente ressalto afogado, ocorre a medida que há um incremento da lâmina d'água a jusante do ressalto, de forma que a parte inclinada a montante da bacia passa a ser parte da estrutura de dissipação. A Figura 4.19 apresenta as características do ressalto do tipo B.



*Figura 4.19 - Características do Ressalto Hidráulico afogado -tipo B*

Segundo apresentado por Peterka (1974), com o acréscimo na lâmina d'água no final da bacia ocorre também um aumento na parte inicial do ressalto, “afogando” a estrutura. De forma diversa do que se poderia supor, entretanto, este aumento não é proporcional ao inicialmente estabelecido a jusante. De acordo com o pesquisador, esse comportamento prossegue até um valor limite de 30% superior à altura conjugada lenta do ressalto, sendo que a partir deste valor, a relação é de proporcionalidade.

Em comparação ao volume de estudos realizados com relação ao ressalto sobre canais horizontais, é reduzido o número de estudos com relação ao ressalto afogado. Pode-se destacar principalmente os estudos apresentados por Elevatorski (1959), que resume as características observadas em ressaltos afogados, Rajaratnam (1967) que faz uma revisão do assunto de forma

genérica, englobando ainda os demais tipos de ressaltos sobre canais inclinados. Como já relatado também Peterka (1974) faz uma abordagem resumida desse tipo de ressalto. Hager (1988) estabeleceu relações descritivas do ressalto afogado, entre elas a relação entre as alturas conjugadas ( $Y = Y_2/Y_1$ ), o comprimento do rolo e a eficiência do ressalto. De forma geral, os diversos autores enfocam as características externas do ressalto, através do estabelecimento do perfil da linha d'água e parâmetros como o comprimento do ressalto e as alturas conjugadas.

Com relação às características internas desse tipo ressalto, como a distribuição de pressões ao longo de seu desenvolvimento e o perfil de velocidades em seu interior, o número de estudos é um tanto reduzido em comparação aos trabalhos que se dedicam às características externas do fenômeno. Entre os principais trabalhos destacam-se os desenvolvidos por Pinto *et al* (1988), Toso e Bowers (1988), Marques *et al* (1999) e Wiest *et al* (2005).

#### 4.2.1.1 Alturas Conjugadas

Elevatorski (1959) apresenta uma equação para o cálculo da relação entre as alturas conjugadas do ressalto através de análise derivada do estudo originalmente desenvolvido por Kidsvater (1944) – Equação 4.2.1. Entretanto, o autor ressalta a sua validade apenas para ressaltos dos tipos C e D. O mesmo é confirmando Rajaratam (1967) ao citar Bradley e Peterka (1957). No entanto o autor apresenta uma metodologia para aplicação para o estabelecimento da altura lenta do ressalto, através da utilização da Figura 4.20.

$$\frac{Y_2}{Y_1} = \frac{1}{2 \cdot \cos \phi} \cdot \left[ \sqrt{\frac{8Fr_1 \cdot \cos^3 \phi}{1 - 2\delta \cdot \tan \phi} + 1} - 1 \right] \quad \text{Equação 4.2.1}$$

onde:

$\phi$  = ângulo de inclinação do canal e;

$\delta$  = parâmetro adimensional dependente de Froude e da inclinação.

Hager (1988), através da utilização da equação de conservação da quantidade de movimento ao longo do ressalto, identificou a necessidade do estabelecimento de um fator  $\phi$ , que denota o conjunto de forças externas atuantes. De acordo com o autor, devido a dificuldade de obter-se esse parâmetro, é mais adequada a utilização das variáveis  $e$ , denominada depressão do ressalto e  $z$ , que é altura em que inicia o ressalto em relação ao fundo da bacia de dissipação. A relação entre essas variáveis resulta no parâmetro  $E$  ( $E = e/Y_2$ ), cuja variação representa, de certa forma, a variação de  $\phi$  (para  $\phi = 0$ ,  $E = 1$  e para

$\phi = 1$ ,  $E = 0$ ). A Figura 4.21 apresenta o conjunto de parâmetros adotados pelo autor. Foi utilizado um canal retangular de 0,50m de largura, no qual foi montado um vertedouro de 0,70m de altura e inclinação de  $45^\circ$ , cuja ligação com o canal horizontal a jusante possuía um raio de 0,40m. Foram testadas vazões variando de 11 l/s até 240 l/s.

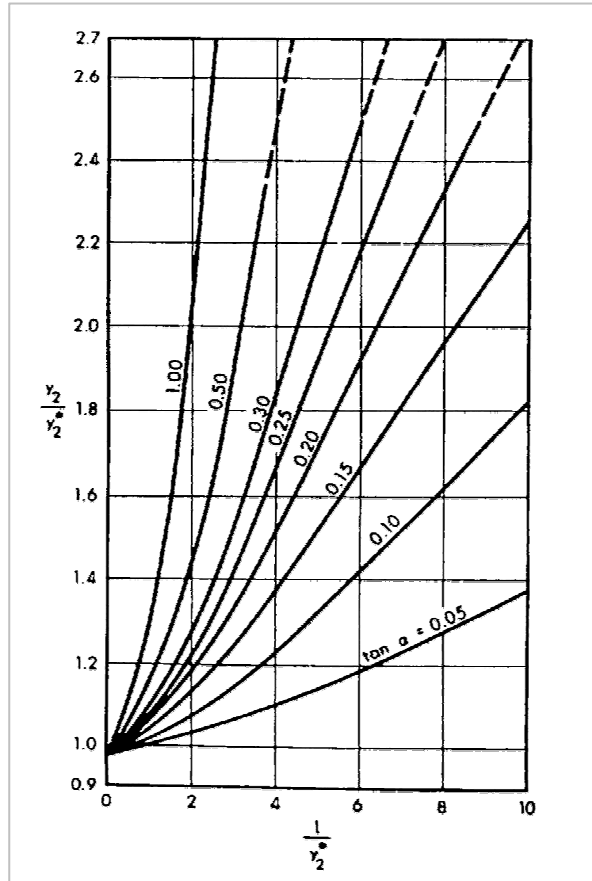


Figura 4.20 - Ábaco para a relação entre alturas conjugadas do ressalto tipo B (Fonte: Rajaratnam, 1967, adaptado de Bradley e Peterka (1957) –  $y_{*2}$  = altura lenta obtida pela equação de Bélanger,  $l$  = distância horizontal entre o início da bacia e o final do ressalto))

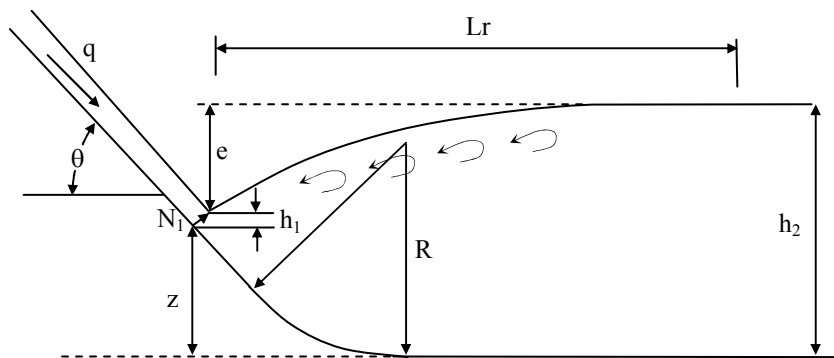


Figura 4.21 - Conjunto de parâmetros adotados por Hager (1988)

Considerando a existência de uma relação entre Y e F1 para certos intervalos de E, o autor estabeleceu através dos dados experimentais uma equação para a relação entre alturas conjugadas Y para o ressalto afogado (Equação 4.2.2). O autor relata que tal equação é válida para vertedouros de inclinação de 45° e número de Froude no intervalo de 3 até 11.

$$Y = 23,5(1 + \frac{3}{2}E)^{-2} + \frac{\sqrt{2}(F_1 - 3)}{Th(\frac{5}{2}E)} \quad \text{Equação 4.2.2}$$

onde:

$Y = h_2/h_1$ , relação entre as alturas conjugadas;

$E = e/h_2 = (h_2 - z)/h_2$ ;

$z$  = medida vertical entre a posição de início do ressalto e a bacia de dissipação.

$Th$  = tangente hiperbólica e;

É apresentada ainda a comparação dos dados experimentais com os resultados da equação. Pode-se notar que a medida que os valores de E decrescem, a diferença entre os valores sofre um sensível aumento. Da mesma forma a concordância entre os valores torna-se pobre com o aumento de  $F_1$  e Y. O autor comenta que a dificuldade de medida da altura da lâmina no início do ressalto ( $N_1$ ) pode ser uma das causas dessas discrepâncias.

Hager (1992) cita os estudos de Hager (1988) e Kawagoshi e Hager (1990) e descreve uma relação válida para estruturas de montante com inclinações de 30° e 45°

$$Y = 3,75E^{-tg\theta} + \frac{\sqrt{2}(F_1 - 3)}{Th(3,5 \cos \theta)} \quad \text{Equação 4.2.3}$$

onde:

$Y = h_2/h_1$ , relação entre as alturas conjugadas;

$\theta$  = inclinação do paramento de montante;

Ohtsu e Yasuda (1991) apresentam relações para as alturas conjugadas a jusante de um canal inclinado, sem um raio de concordância com o canal horizontal, para inclinações da estrutura de montante variando de 0° a 60° e uma faixa de número de Froude entre 6,0 e 14,0:

$$\frac{l}{h_2} = \left[ \frac{2,3}{(\tan \theta)^{0,73}} - 0,8 \right] \left( \frac{h_d}{h_2} - 1 \right)^{0,75} \quad \text{Equação 4.2.4}$$

onde:

$l$  = comprimento horizontal entre a seção de início do ressalto e o início do canal horizontal à jusante;

$\theta$  = ângulo de inclinação do canal de montante;

$h_d$  = altura da lâmina d'água à jusante do ressalto e;

$h_2$  = altura conjugada lenta.

#### 4.2.1.2 Comprimento do Ressalto

Elevatorski (1959) menciona que a determinação do comprimento do ressalto é um tanto dificultada primeiramente por não haver um consenso quanto ao término real do mesmo. De qualquer maneira, o autor estabelece em seu estudo como final do ressalto o ponto onde o jato de alta velocidade se desprende o fundo da bacia, isto é, o ponto imediatamente a jusante do rolo. A Tabela 4.2 apresenta os resultados encontrados pelo pesquisador, para diferentes inclinações da estrutura de aproximação.

Tabela 4.2 - Fórmulas para determinação do comprimento do ressalto em canais inclinados

Inclinação	Comprimento do Ressalto
Horizontal	$L_j = 6,9 \cdot (Y_2 - Y_1)$
1:20	$L_j = 5,2 \cdot (Y_2 - Y_1)$
1:10	$L_j = 4,4 \cdot (Y_2 - Y_1)$
1:6,7	$L_j = 3,8 \cdot (Y_2 - Y_1)$
1:5	$L_j = 3,25 \cdot (Y_2 - Y_1)$
1:3,6	$L_j = 2,75 \cdot (Y_2 - Y_1)$

O comprimento do ressalto afogado tipo B é determinado por Peterka (1974) através da utilização de dados experimentais para diversos tipos de ressaltos, inclusos os tipos C e D. De acordo com o pesquisador, o erro relativo resultante da utilização para o ressalto tipo B da metodologia, originalmente concebida para ressaltos tipo C e D, pode ser considerado desprezível. Conforme verificado na Figura 4.22, sabendo-se o número de Froude do escoamento e a altura conjugada lenta do fluxo, tem-se uma estimativa do comprimento do ressalto. O autor ressalta que o projeto de bacias de dissipação que contemple todo o comprimento do ressalto pode tornar-se antieconômico. É importante notar ainda, que os dados experimentais utilizados pelo autor restringe-se a estruturas cuja inclinação de montante é um tanto reduzida, de no máximo 15°, bem menor que as inclinações normalmente utilizadas quando da construção de estruturas vertedouras em obras de geração de energia, que variam de 30° a 45°.



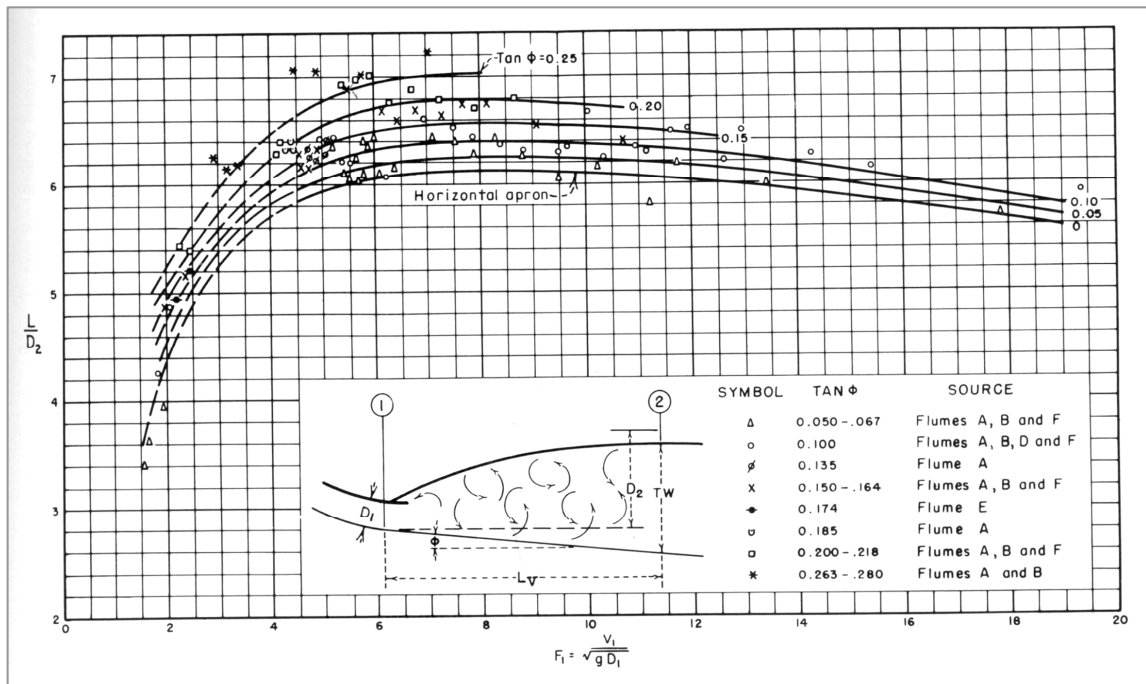


Figura 4.22 – Ábaco para estabelecimento do comprimento dos ressalto tipo B, C e D (Fonte: Peterka, 1974 –  $L$  = Comprimento do Ressalto,  $D_2$  = Altura conjugada lenta e  $F_1$  = Número de Froude para o escoamento na entrada do ressalto)

Ohhtsu e Yasuda (1991) estabeleceram estudos experimentais que confirmaram as afirmações de Peterka (1974), ampliando, todavia, sua utilização em estruturas vertedouros com inclinação de até  $19^\circ$  a montante de bacias de dissipação. Os autores apresentam uma equação que relaciona o comprimento do ressalto com a altura conjugada lenta do ressalto, com um erro relativo de no máximo 20%, quando comparada aos valores medidos experimentalmente (Equação 4.2.5). Adicionalmente, é apresentada ainda uma relação a ser utilizada em estruturas com ângulos de aproximação na faixa entre  $19^\circ$  e  $60^\circ$  – Equação 4.2.6. Os pesquisadores valeram-se de dados experimentais e também de outros pesquisadores, como os de Kawagoshi e Hager (1990) e Hager (1988)

$$L_j/h_2 = 5,75 \cdot \tan \theta + 5,70 \quad - \quad (0^\circ \leq \theta \leq 19^\circ, 4 \leq F_1 \leq 14) \quad \text{Equação 4.2.5}$$

$$L_j/h_2 = 4,6 \cdot (h_d/h_2 - 1) + 5,7 \quad - \quad (19^\circ \leq \theta \leq 60^\circ, 4 \leq F_1 \leq 14) \quad \text{Equação 4.2.6}$$

onde:

$L_j$  = comprimento do ressalto afogado;

$h_d$  = altura da lâmina d'água à jusante do ressalto e;

$h_2$  = altura conjugada lenta.

#### 4.2.1.3 Comprimento do Rolo

O comprimento do rolo é normalmente identificado como a região em que não ocorre mais o desprendimento de bolhas no interior do ressalto. Hager (1988), adotando essa premissa, estabeleceu o parâmetro  $\lambda$ , igual a relação entre o comprimento do rolo ( $L_r$ ) e altura conjugada lenta do ressalto ( $h_2$ ), em função de  $F_1$ . Para  $3 \leq F_1 \leq 11$  o autor sugere a adoção da seguinte equação:

$$\lambda = \lambda_2 + \text{tg} \varepsilon (F_1 - 2) \quad \text{Equação 4.2.7}$$

com:

$$\begin{aligned} \lambda &= L_r / h_2 \\ \lambda_2 &= (5,2 + a) + (5 - b)E \\ \text{tg} \varepsilon &= -\frac{1}{8} \left( 1 + \frac{4}{3}E + 4E^4 \right) \end{aligned}$$

onde:

$L_r$  = Comprimento do rolo;  
 $h_2$  = altura conjugada lenta do ressalto;  
 $E = e/h_2 = (h_2 - z)/h_2$   
 $a$  e  $b$  conforme Tabela 4.3:

Tabela 4.3 - Parâmetros para estimativa do comprimento do ressalto

$a = 0$	$b = 0$	$0 < E < 0,3$
$a = 1,5$	$b = 5$	$0,3 \leq E \leq 0,63$
$a = -1,65$	$b = 0$	$0,63 \leq E \leq 0,9$

O comprimento do rolo é comentado ainda por Ohtsu e Yasuda (1990). Os autores relatam que os valores obtidos por Hager (1988) e Kawagoshi e Hager (1990) apresentam a mesma tendência que os valores calculados por eles para o comprimento do ressalto (Equação 4.2.6), para valores de  $F_1 \geq 4$ .

#### 4.2.1.4 Eficiência do Ressalto

A eficiência do ressalto pode ser definida como a medida da dissipação de energia em relação a carga total do escoamento, ou seja, a razão entre a perda de carga ( $E_{\text{montante}} - E_{\text{jusante}}$ ) sobre a energia total disponível ( $E_{\text{montante}}$ ).

Hager (1988) avaliou a eficiência do ressalto afogado para uma série de ensaios experimentais. O autor definiu que a eficiência ( $\eta$ ) pode ser representada como função de  $F_1$ , para várias faixas de  $E$  ( $E = e/h_2 = (h_2 - z)/h_2$ ). Para um mesmo número de Froude, ocorre

um decréscimo de eficiência a medida que o valor de  $E$  diminui, ou seja, a medida que o ressalto torna-se mais afogado.

#### *4.2.1.5 Características internas do ressalto afogado*

O ressalto hidráulico tem como uma das principais utilidades a dissipação de energia no pé de barragens, através da construção de bacias de dissipação. Normalmente o projeto de tais estruturas é realizado através da utilização de parâmetros externos do ressalto, como seu comprimento e as alturas conjugadas. Entretanto tem ganhado força a investigação dos parâmetros internos do fenômeno, resultantes preponderantemente de sua macroturbulência, como por exemplo, a distribuição de pressão ao longo de seu desenvolvimento, a aeração do fluxo e também as pressões extremas a que estão sujeitas as estruturas, bem como a influência do grau de submergência do escoamento sobre estes parâmetros.

A investigação das características internas do ressalto hidráulico é mais recente se comparada com a avaliação de outros parâmetros do escoamento. Isso se explica pela evolução do ferramental utilizado nas medições, a necessidade de otimização no projeto das estruturas e também a verificação de danos nas estruturas após décadas de operação. Entretanto, da mesma forma que ocorre com os demais parâmetros envolvidos, os estudos que identificam a distribuição de pressões e suas flutuações, por exemplo, são mais raros quando se trata de ressaltos afogados a jusante de canais inclinados (ressalto tipo B).

Rajaratnam e Murahari (1974) através de medições de velocidade com tubo de Prandtl concluíram que em ressaltos formados em canais inclinados há um acréscimo na tensão cisalhante no fundo comparativamente ao ressalto formado com a mesma energia de entrada.

MuLan *et al* (1987) em um modelo de 45 cm de altura e 30 cm de largura e utilizando microtransdutores de pressão, avaliaram as flutuações de pressão em 15 pontos ao longo do ressalto, incluindo junto à curva de concordância com a bacia. Os autores abordam diferentes parâmetros, como a intensidade da flutuação de pressão, as suas características espectrais e a correlação entre as diferentes tomadas ensaiadas. Os pesquisadores relatam que no final da curva de concordância as flutuações de pressão ainda são relativamente altas, podendo-se atribuir a flutuação de pressão no local à ação conjunta do ressalto em fundo plano e da parede da curva.

Toso e Bowers (1988) citam, principalmente, o trabalho de Lopardo e Henning (1985) como precursor do desenvolvimento das pesquisas das pressões desenvolvidas no ressalto hidráulico. Em seu trabalho, Toso e Bowers (1988) desenvolveram uma série de escoamentos sobre vertedouros com inclinações variando de  $0^\circ$  a  $45^\circ$ , com a formação de ressaltos tanto

exclusivamente na bacia de dissipação quanto na parte inclinada do vertedouro e utilizaram transdutores para a medição da pressão junto ao fundo da bacia. Os autores avaliaram as flutuações de pressão através do parâmetro adimensional  $C_p$ , (Equação 4.2.8), concluindo, de maneira geral, que há um acréscimo em tal parâmetro quando comparados os ressaltos iniciantes sobre o canal inclinado e no pé do barramento. A Figura 4.23 apresenta os resultados encontrados, sendo que são relatados valores máximos de  $C_p = 0,4$  para ressaltos completamente na bacia de dissipação e  $C_p$  entre 0,4 e 0,7 para aqueles formados no canal inclinado. De acordo com os pesquisadores, é necessário que a diferença entre a altura de início do ressalto, em relação à bacia, seja agregada a carga total de entrada do ressalto.

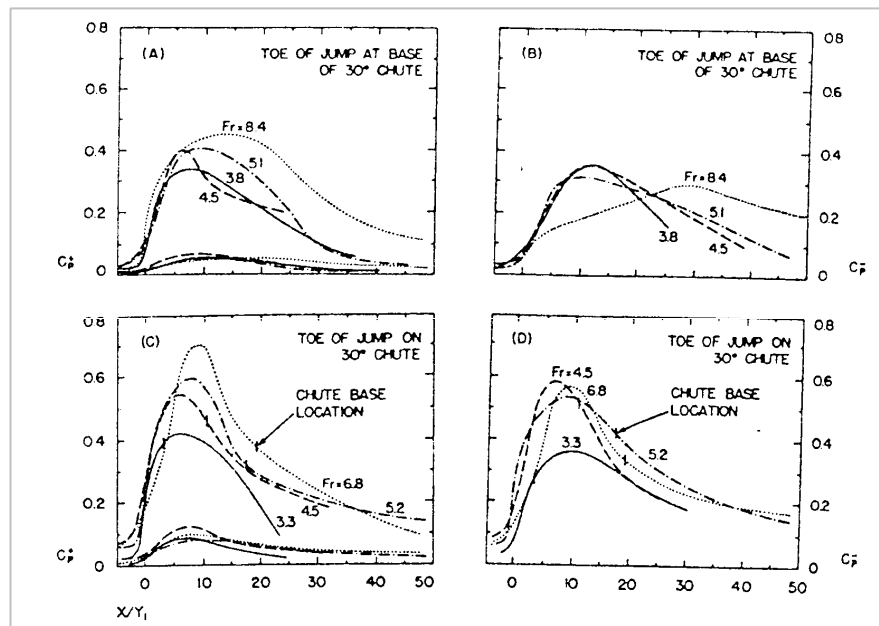


Figura 4.23 – Comparativo entre medições realizadas com ressalto livre (A e B) e ressalto afogado (C e D)

$$C_p = \frac{\Delta P}{\frac{\alpha V^2}{2g}} \quad \text{Equação 4.2.8}$$

onde:

$\Delta P$  = variação da pressão em relação ao valor médio;

$\alpha$  é função do perfil de velocidades e, normalmente, adotado igual a unidade;

$V$  = velocidade do escoamento na entrada do ressalto;

$g$  = aceleração da gravidade

Um dos primeiros trabalhos no Brasil cuja abordagem é enfocada na apuração da distribuição de pressão ao longo do ressalto formado a jusante de vertedouros é o de Pinto et al (1988). Os pesquisadores mencionam o pequeno número de trabalhos que tratam do tema, citando o trabalho de Camargo (1980), que apresenta resultados pra uma única condição de Froude ( $F_1 = 5,1$ ). Os autores analisam, através da medição em modelo reduzido da pressão

no fundo da bacia, a variação do coeficiente de flutuação de pressão  $C_p$  ao longo do ressalto hidráulico e a influência de diversos graus de afogamento impostos ao fluxo. Foram avaliadas três situações de afogamento –  $S = 0,1$ ,  $S = 0,3$  e  $S = 0,5$  – calculados conforme Equação 4.2.9. Entre as principais conclusões, os autores relatam que os maiores valores de  $C_p$  ocorrem para o ressalto livre, quando avaliadas as posições intermediárias da bacia de dissipação. Quando focado a parte inicial da bacia, verificou-se maiores valores de  $C_p$  para a submergência de 10% ( $S = 0,1$ ). Já na parte final do ressalto, foi verificado um incremento no valor de  $C_p$  para as submergências 30 % e 50 % ( $S = 0,3$  e  $S = 0,5$ ).

$$S = \frac{y_T - y_2}{y_2} \quad \text{Equação 4.2.9}$$

onde:

$y_T$  = lâmina d'água a jusante do ressalto;  
 $y_2$  = altura conjugada lenta do ressalto

Ortiz *et al* (1998) apresenta os resultados das medições de pressão na bacia de dissipação da UHE Porto Colômbia, bem como o relato das adaptações realizadas na estrutura e os equipamentos utilizados. São apresentadas as flutuações de pressão resultantes do ressalto, pressão média, máxima e mínima para cada tomada de pressão, entretanto, de forma não adimensionalizada. É possível notar nos gráficos apresentados uma intensificação dos valores máximos de pressão junto aos transdutores de n° 2 e 3, correspondentes às tomadas, respectivamente, do centro da curva e de seu final.

Marques *et al* (1999) apresentam uma metodologia para análise das pressões sobre bacias de dissipação através da utilização de uma adimensionalização dos dados que congrega, além de resultados para ressalto livre, também dados de ressaltos submergidos. Os autores sugerem a adoção de um fator de submergência (Equação 4.2.10), que possibilita uma maior uniformidade dos dados de pressões no fundo de bacias de dissipação, seja ressalto livre ou ressalto afogado. A Equação 4.2.11 apresenta a metodologia proposta. As Figuras 4.24 e 4.25 apresentam um comparativo entre a adimensionalização proposta por Marques *et al* (1997) para o ressalto livre e a nova composição. É possível notar uma melhora significativa no ajuste dos dados. O comportamento heterogêneo das amostras para a posição adimensionalizada de 0 a 3 deve-se ao fato destas tomadas de pressão, no protótipo de Porto Colômbia, estarem localizadas na parte curva do vertedouro, ao contrário do que ocorre em modelo.

$$S = \frac{T_w}{y_l} \quad \text{Equação 4.2.10}$$

onde:

$T_w$  = lâmina d'água a jusante do ressalto;

$y_l$  = altura conjugada lenta do ressalto, a partir da Eq. de Bèlanger

$$\frac{(P - y_r)}{(y_l - y_r)} \cdot \frac{y_l}{T_w}$$

Equação 4.2.11

onde:

$P$  = pressão medida sobre a bacia de dissipação;

$y_r$  = altura conjugada rápida do ressalto, medida na entrada do ressalto.

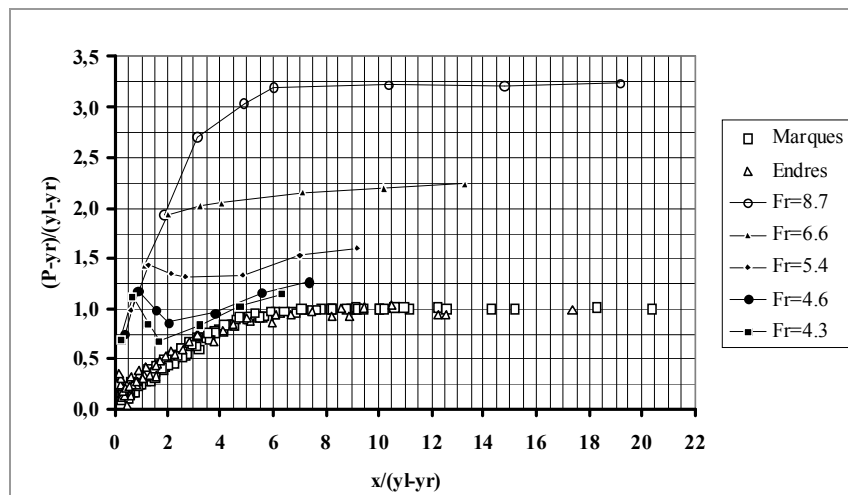


Figura 4.24 – Pressão média adimensionalizada conforme Marques et al (1997)

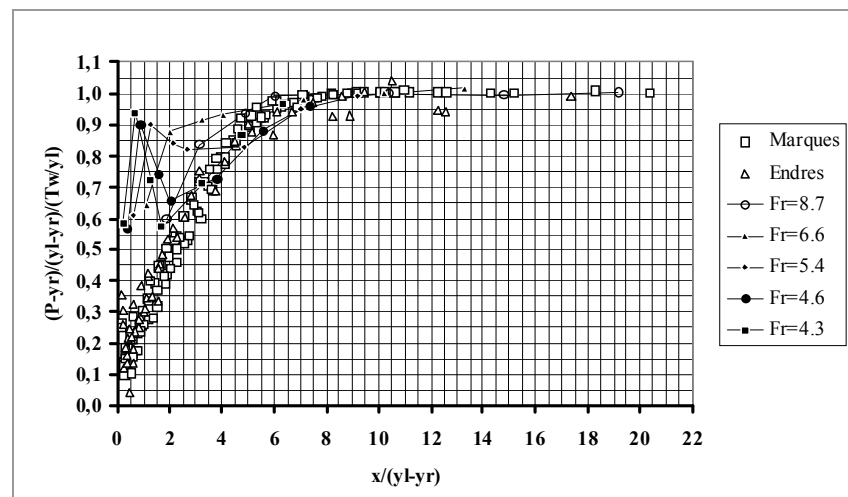


Figura 4.25 – Pressão média adimensionalizada conforme Marques et al (1999)

Trierweiler *et al* (2005) fazem uma comparação entre as medições de ressalto afogados de modelo e de protótipo da UHE Porto Colômbia. Utilizando os valores de Pressão Média ( $P_x$ ) e Desvio Padrão ( $\sigma_x$ ), os autores analisaram os efeitos de escala de maneira preliminar e verificaram que em geral as diversas vazões medidas apresentaram valores

coerentes entre as diferentes escalas das estruturas, condizentes com a dispersão natural esperada e o erro dos equipamentos de medição.

O estabelecimento de pressões extremas resultantes do ressalto hidráulico afogado é proposto por Wiest *et al* (2005), através da utilização de dados do modelo reduzido na escala 1:100 da UHE Porto Colômbia. A partir da utilização da metodologia determinada por Teixeira (2003) para o ressalto livre, os pesquisadores estabeleceram o comportamento do parâmetro  $N$  no caso de ressalto afogado. O estudo aponta que, de maneira diversa ao ressalto livre, os valores de  $N$  tendem a permanecer constantes ao longo do ressalto, sendo que foram estabelecidas faixas de variação de acordo com a posição adimensional das tomadas de pressão.

Cerezer (2008) verificou o ajuste da distribuição generalizada de valores extremos (GEV) e da distribuição de pareto generalizada (GPD) aos dados de pressão instantânea registrados no protótipo do dissipador de energia por ressalto hidráulico da UHE de Porto Colômbia. Entre os principais resultados obtidos pode-se destacar que a GEV é considerada adequada para o estudo de pressões máximas e mínimas para todas as vazões medidas, enquanto que a GPD não descreveu de modo satisfatório os dados analisados.

Müller (2008) apresenta uma análise das distribuições de pressões junto ao fundo da bacia de dissipação por ressalto hidráulico da UHE Porto Colômbia através da Teoria de Valores Extremos Multivariada. O trabalho possibilitou a identificação do comportamento das séries em relação a dependência e ocorrência dos eventos extremos. Verificou-se a existência de correlação entre as séries (dependência) no trecho curvo. Os dados resultantes da aplicação da metodologia apresentaram erro médio de cerca de 12 % em relação aos valores de protótipo.

O trabalho de Mees (2008) avaliou o campo de forças atuantes sobre lajes de bacias de dissipação, analisando a força média, a flutuação e esforços extremos, destacando as situações críticas quanto ao levantamento de lajes. O autor aponta que existe uma região do ressalto em que as flutuações de pressão comportam-se de forma diferenciada quando comparadas as situações de ressalto livre e submergido. O pesquisador propõe uma nova metodologia de dimensionamento da espessura de lajes de bacias de dissipação quando sujeitas a esforços de levantamento.

#### **4.3 ESCOAMENTO SOBRE CURVAS VERTICAIS**

Nos escoamentos a superfície livre a pressão em qualquer ponto da massa líquida é aproximadamente proporcional à profundidade, obedecendo à Lei de Stevin, relativa à

distribuição hidrostática de pressões. Entretanto, esta hipótese ocorre apenas quando não ocorrem componentes de aceleração no sentido longitudinal, quando ocorre o chamado escoamento paralelo. Nos escoamentos bruscamente variados, com uma curvatura significativa das linhas de corrente no sentido vertical, caracterizando uma alteração na distribuição hidrostática de pressões ocorre o denominado escoamento curvilíneo.

A mudança na direção do escoamento geralmente implica em alterações do comportamento do fluxo, com acréscimo ou diminuição de alguns parâmetros resultantes do escoamento. No caso de curvas verticais, como em vertedouros (curva convexa) e na concordância das calhas vertentes com bacias de dissipação por ressalto hidráulico (curva côncava), pode-se observar a presença de forças inerciais, que correspondem às acelerações tangenciais e normais, que modificam a distribuição de pressões, como apresenta a Figura 4.26. Basicamente, os escoamentos desenvolvidos sobre curvas verticais, no que tange às pressões resultantes sobre a estrutura, levam a um decréscimo na pressão sobre curvas convexas e a um aumento em curvas côncavas, resultantes principalmente do efeito da velocidade do escoamento, conforme a Equação 4.3.2 (Baptista e Lara (2003) *apud* Graf (1993)).

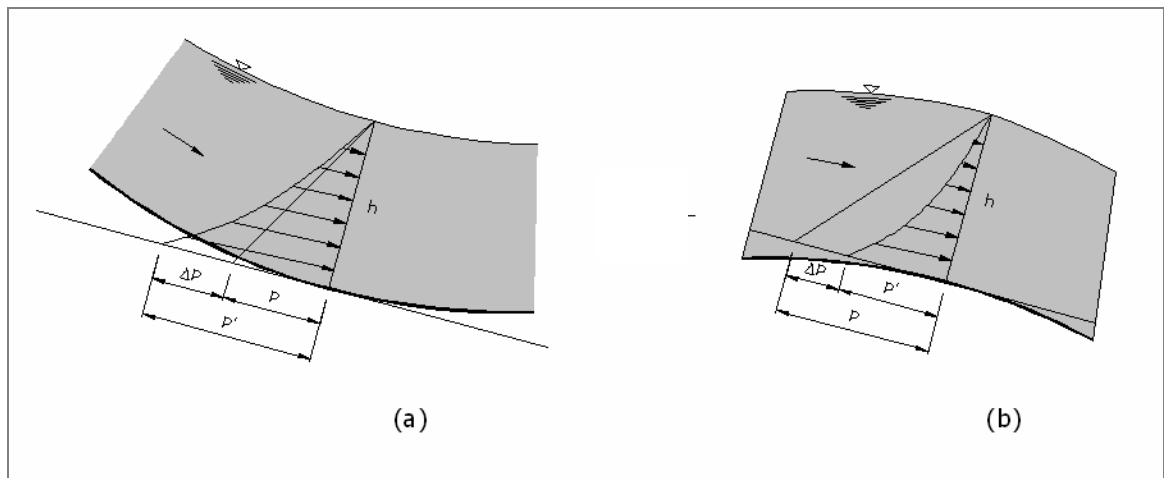


Figura 4.26 - Características das pressões em curvas verticais – (a) sobrepressão em curvas côncavas; (b) subpressão em curvas convexas; (Adaptado de Baptista e Lara, 2003)

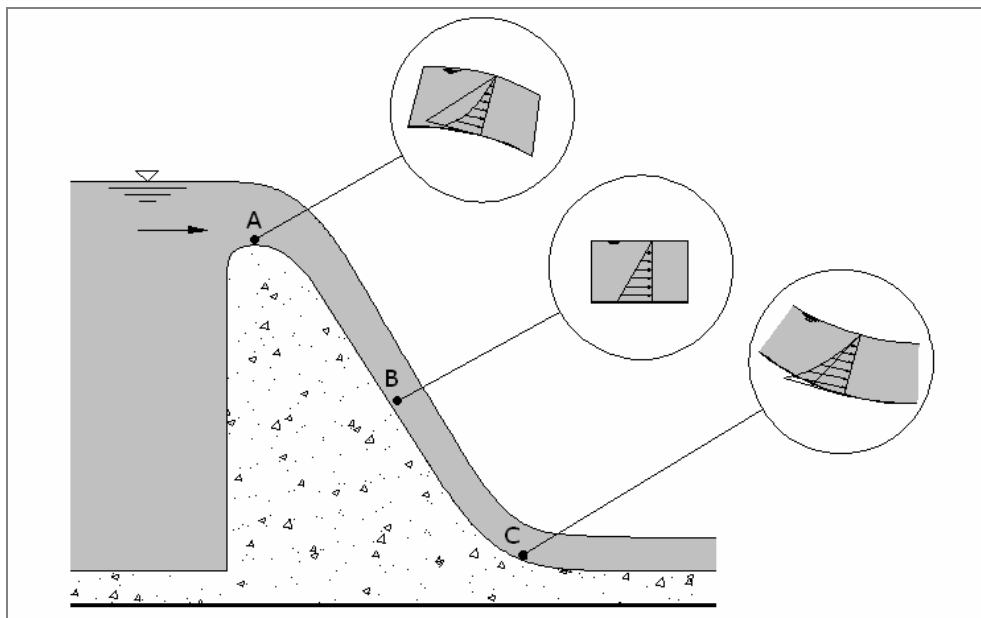
$$P' = P + \Delta P \quad \text{Equação 4.3.1}$$

$$\Delta P = \frac{\gamma \cdot h}{r} \cdot \frac{V^2}{g} \quad \text{Equação 4.3.2}$$

No caso específico de vertedouros, a subpressão observada na crista pode levar a valores de pressão efetiva inferiores a atmosférica, conduzindo a problemas de cavitação e, por conseguinte, ao desgaste da estrutura. No caso da região de concordância do vertedouro



com a bacia de dissipação, as sobrepressões observadas também podem conduzir a uma deterioração do local. A Figura 4.27 apresenta o comportamento característico da distribuição de pressões nesse tipo de estrutura.



*Figura 4.27 - Distribuição de pressões ao longo do escoamento sobre vertedouros*

Este trabalho, em seu objetivo de delinear os esforços resultantes em bacias de dissipação, atentar-se-á basicamente para os efeitos do escoamento na curva resultante da concordância entre o vertedouro e a bacia de dissipação. Como exposto, é sabido que o escoamento sobre curvas desse tipo leva a uma sobrepressão na estrutura. Entretanto, são raros os estudos que definem o comportamento das pressões ao longo da curva, com o delineamento das sobrepressões ao longo de seu desenvolvimento. Pesquisas realizadas na China na década de 80 indicam um comportamento variado ao longo da estrutura, a medida que o escoamento muda de direção, além de demonstrar que a influência resultante não se restringe à curva, mas prossegue um certo espaço até sua dissipação.

Henderson e Tierney (1963) apresentam uma análise teórica corroborada por dados experimentais que busca, essencialmente, o estabelecimento da distribuição de velocidades e pressões ao longo da superfície de uma curva vertical. De acordo com os autores, é possível uma solução a partir de métodos iterativos, com boa concordância com os dados experimentais. São apresentadas relações para a determinação da máxima lâmina d'água sobre a curva vertical e ábacos para o estabelecimento da distribuição de pressões ao longo da mesma. Os autores apresentam uma equação adimensional que, de acordo com os mesmos, detona com bom apuro a distribuição de pressões ao longo da estrutura – Equação 4.3.3.

$$\frac{dp'}{dn'} = \frac{2(1-p')}{R'}$$

Equação 4.3.3

onde:

$$p' = p / \frac{1}{2} \rho v_1^2 ;$$

$R' = R / a$  , com  $R$  = Raio da curva de concordância;

$n' = n / a$  , com  $n$  = comprimento da curva de concordância;

$a$  = lâmina d'água sobre a curva.

LinFu e Jie (1985) definem que escoamentos a grande velocidade em curvas verticais em vertedouros podem ser considerados escoamentos planos irrotacionais, de forma que, em um sistema de coordenadas curvilíneas ortogonais  $X$  e  $Y$ , segundo a Figura 4.28, em um ponto à distância  $y$  do fundo, o escoamento pode ser descrito pela Equação 4.3.4.

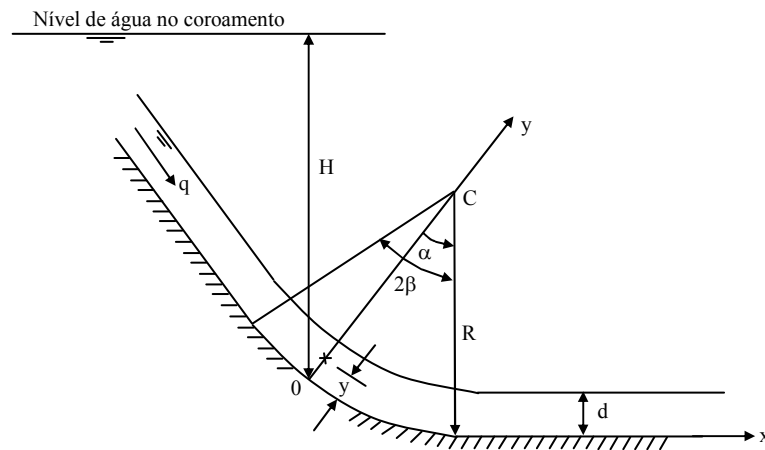


Figura 4.28 - Conjunto de parâmetros adotados por Lin Fu e Jie (1985)

$$\partial u / \partial y = u / r$$

Equação 4.3.4

onde:

$u$  é a velocidade na direção  $X$  no ponto considerado e;

$r$  é o raio de curvatura

De acordo com os pesquisadores, adotando-se a hipótese dos arcos concêntricos, a partir da qual a lâmina d'água sobre as curvas são arcos de circunferência com centro coincidente com o centro da curva, ao integrar-se a expressão de Bernoulli, tem-se expressão indicativa da pressão sobre a curva. LinFu e Jie, todavia, apresentam somente a parcela correspondente à força centrífuga, que denominaram em sua forma adimensional de coeficiente de pressão máxima devida à força centrífuga ( $C_{pCM}$ ), dado pela expressão 4.3.5.

$$C_{pCM} = \frac{p_{cM}/\gamma}{H-d} \quad \text{Equação 4.3.5}$$

onde:

$p_{cM}$  é o valor da pressão máxima no ponto considerado;  
 $H$  é a carga na soleira correspondente a esse ponto;  
 $d$  é a altura da lâmina d'água sobre a estrutura e  
 $\gamma$  é o peso específico da água

De acordo com os pesquisadores e a partir da expressão acima, a pressão na soleira curva é máxima junto ao ponto central, diminuindo gradualmente nos dois sentidos. Da mesma forma, os autores demonstram que a influência da força centrífuga ainda continua atuando, tanto a montante quanto a jusante. Segundo LinFu (1978) *apud* LinFu e Jie (1985), a expressão que indica o comprimento do que se pode chamar de zona de influência da força centrífuga, é dada pela expressão 4.3.6.

$$L = \frac{4}{C_{pCM}} d \sin \beta \quad \text{Equação 4.3.6}$$

onde:

$C_{pCM}$  é o coeficiente da pressão máxima devida à força centrífuga;  
 $d$  é a altura da lâmina d'água sobre a estrutura e  
 $\beta$  é o ângulo correspondente ao ponto de estimativa em relação ao centro da curva.

Baseados em dados experimentais, LinFu e Jie (1985) definem ainda de forma conclusiva, que a distribuição da pressão relativa à força centrífuga em estruturas curvas pode ser resumida na expressão 4.3.7.

$$\frac{C_{pC}}{C_{pCM}} = \frac{1}{2} \left[ 1 + \cos \left( \frac{\pi x}{L} \right) \right] \quad \text{Equação 4.3.7}$$

onde:

$C_{pC} = (p_c/g) \cdot (H-d)$   
 $C_{pC}$  é o coeficiente da pressão devida à força centrífuga em um ponto de coordenada  $x$  na curva.

Os autores abordam ainda aspectos relativos a distribuição das flutuações de pressão e da flutuação da velocidade ao longo da curva, bem como as características de cavitação da curva vertical. Entre as principais conclusões, pode-se destacar que os autores indicam o parâmetro crítico e cavitação como máximo no extremo de jusante da curva.

MuLan et al (1987), avaliaram a intensidade das flutuações de pressão, denotada por  $\overline{p'}$ , em 15 pontos ao longo do ressalto, incluindo pontos junto à curva de concordância com a bacia, a partir da utilização de microtransdutores de pressão. Os pesquisadores

relatam que no final da curva de concordância as flutuações de pressão ainda são relativamente altas, com valores máximos de até  $0,15 \cdot v_1^2 / 2g$  para  $\sqrt{p'^2}$ . Eles atribuem a flutuação de pressão no local à ação conjunta do ressalto em fundo plano e da parede da curva, em uma proporção aproximada, respectivamente, de 60 % e 40 %.

Conforme mencionado na parte inicial do capítulo, entretanto, são pouco numerosos os estudos que buscam descrever o comportamento do escoamento em curvas verticais. Neste contexto, foi possível identificar apenas o estudo dos pesquisadores chineses, na medida que as demais abordagens encontradas restringiam-se a abordagens mais genéricas do fenômeno, como em Baptista e Lara (2003).

## 5 INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL E METODOLOGIA

### 5.1 INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

As etapas experimentais do trabalho foram realizadas nas instalações do Laboratório de Hidráulica Experimental – LAHE, de Furnas Centrais Elétricas, na cidade do Rio de Janeiro. Foi utilizado o modelo bidimensional da UHE Porto Colômbia, em uma escala de redução de 1:50. O modelo, composto de estrutura vertente e bacia de dissipação em concreto, está instalado em um canal de 1,0 m de largura e comprimento de, aproximadamente, 17,0 m. Deste comprimento total, 8,7 m referem-se à parte de montante do modelo (aproximação) e cerca de 6,5 m representam a parte a jusante da estrutura vertente. A Figura 5.1 apresenta um panorama geral do canal de ensaios.



*Figura 5.1 - Panorama geral do canal de ensaios*

A estrutura do vertedouro possui um perfil do tipo Creager, desenvolvendo uma diferença de nível total de 0,36 m, equivalente a um desnível de 18,0 m na escala de protótipo. Tal como a estrutura real, o modelo conta com comportas do tipo setor, as quais permitem a regulação da vazão afluente à bacia de dissipação, que possui um comprimento total de 1,03 m (comprimento protótipo igual a 51,5 m), já contando com o *end sill* em seu final. As Figura 5.2 (a) e (b) apresentam de forma ilustrativa a estrutura estudada

A bacia de dissipação, assim como a parte de concordância entre o perfil do vertedouro e a estrutura de dissipação, conta com tomadas de pressão, que permitem a medição da pressão instantânea no fundo da bacia. Em um número total de 10 tomadas, elas

estão dispostas de acordo com a Figura 5.3. Ressalta-se que as dimensões apresentadas na Figura referem-se à estrutura real (protótipo).

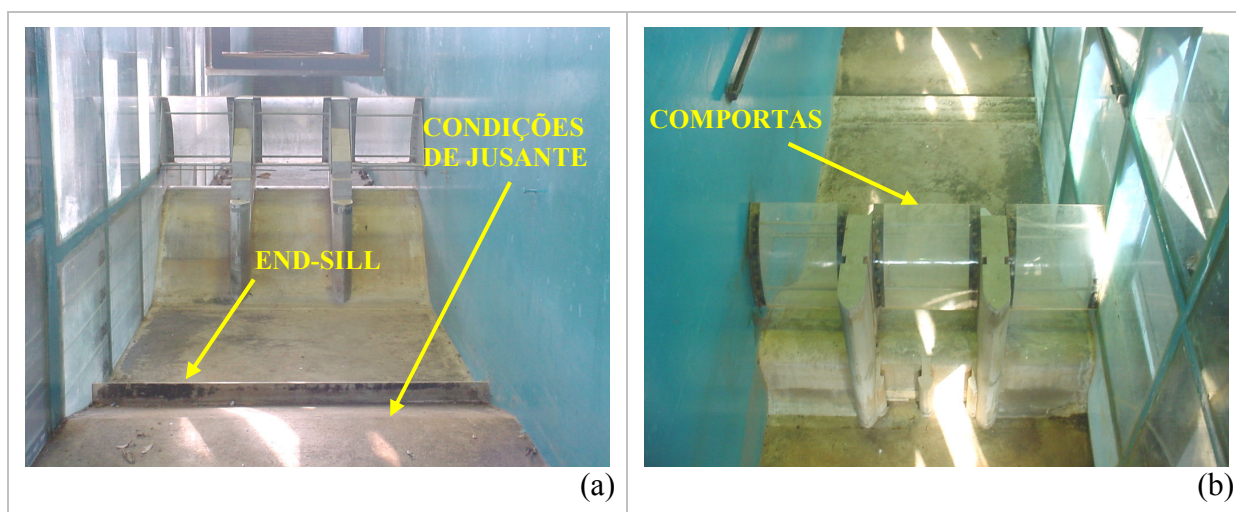


Figura 5.2 – (a) Vista frontal da estrutura estudada, com destaque para o end-sill e as condições de jusante; (b) Vista superior (montante para jusante), com destaque para as comportas.

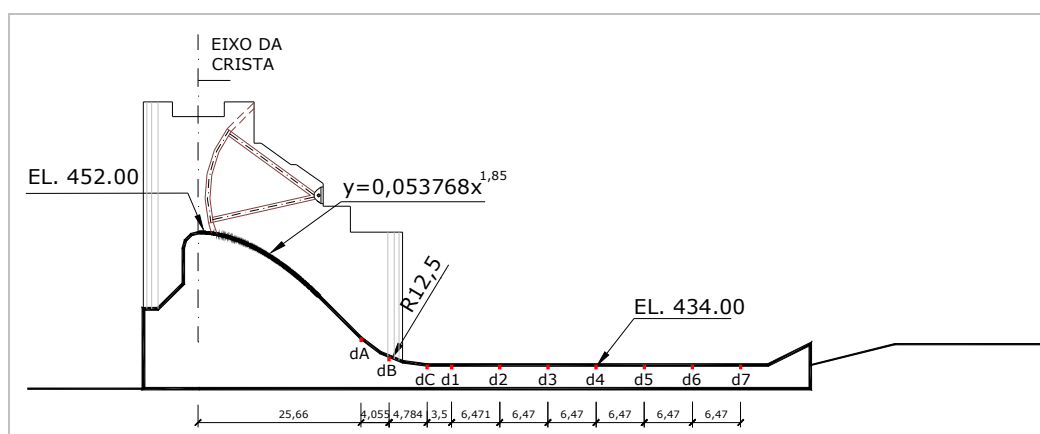


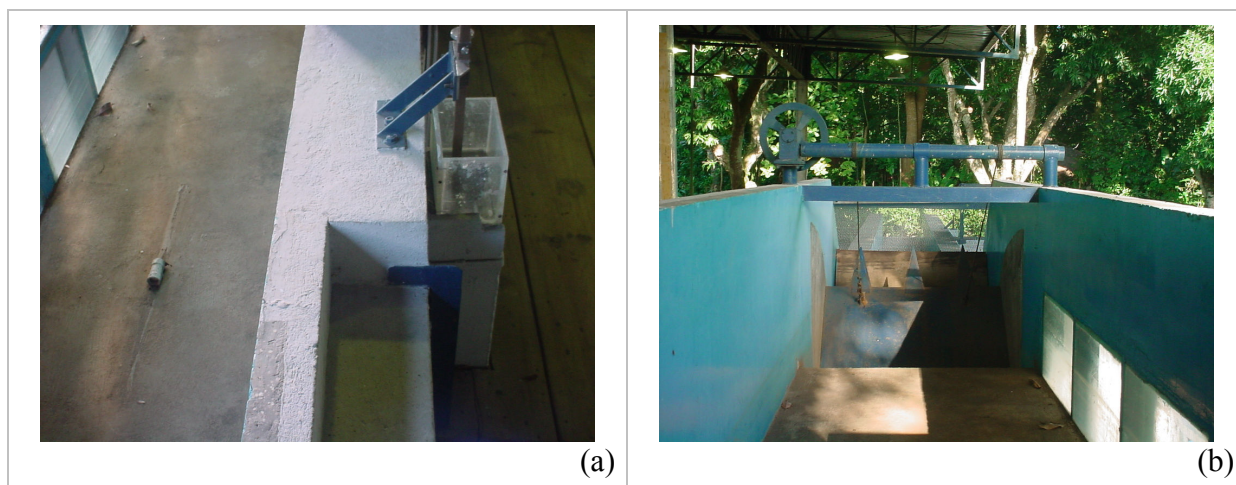
Figura 5.3 - Disposição das tomadas de pressão (distâncias em metros – protótipo)

Um aspecto importante a ser destacado com relação à estrutura experimental é o fato de conservar as características do protótipo, principalmente com relação à topografia a jusante da bacia. Em grande parte dos canais experimentais, o fundo do canal, tanto a montante como a jusante da estrutura, é horizontal. No caso específico deste canal, o fundo a jusante da bacia de dissipação possui as características relativas à topografia observada na UHE Porto Colômbia. No entanto, é importante ressaltar essa característica, uma vez que as medições efetuadas referem-se a este caso em particular, no sentido de comparar os resultados obtidos com o protótipo.

O circuito hidráulico do modelo consiste de um reservatório inferior de onde a água é recalçada por bombeamento para um reservatório superior mantido a nível constante. A partir

desse reservatório a água é conduzida por gravidade até a parte de montante do canal, por um sistema de tubulação em ferro fundido.

O nível de jusante é medido por uma ponta linimétrica situada a 4,0 m da parte final da estrutura de dissipação. O fluxo é controlado por uma comporta situada cerca de 6,5 m do fim da bacia. A seguir, o fluxo é direcionado a um canal dotado de um vertedouro do tipo Bazin, no qual é realizada a medição da vazão ao longo da estrutura.



*Figura 5.4 – (a) Medição de nível de jusante; (b) Comporta reguladora de nível (anterior ao vertedouro Bazin)*

## **5.2 METODOLOGIA EXPERIMENTAL**

A caracterização do escoamento macroturbulento desenvolvido em bacias de dissipação, principalmente com relação aos esforços resultantes do ressalto hidráulico, passa, entre outros, pela avaliação das pressões sobre o fundo da bacia, tanto com relação aos valores médios como os valores ditos “instantâneos”. Porém, uma vez que o presente trabalho encontra-se inserido em um projeto maior, qual seja o de avaliação de diversos aspectos inerentes ao ressalto, realizaram-se além de medições das pressões médias e “instantâneas” sobre a estrutura, medições de nível de água e de velocidade, além da visualização e registro em vídeo do escoamento.

Dado o objetivo de avaliar os efeitos da submergência no ressalto hidráulico formado a jusante da estrutura, foi necessário especificar uma série de ensaios que contemplassem uma gama de níveis diversos sobre a bacia de dissipação, variando assim o grau de submergência do escoamento. Da mesma forma, foi necessário manter a semelhança com as condições verificadas em protótipo. Entre os fatores que contribuíram na determinação das características dos ensaios pode-se destacar:

- A necessidade de ensaios com níveis e demais condições hidráulicas semelhantes às ocorridas no protótipo, já que esta pesquisa faz parte de uma pesquisa maior, que, resumidamente, fará a comparação dos escoamentos macroturbulentos em três estruturas diferentes.
- A necessidade de ter-se, pelo menos, três submergências diferentes, de modo a possibilitar o número mínimo de pontos para o traçado de curvas que representassem devidamente a sua influência, conforme a vazão avaliada.

Dessa maneira, foram realizados 20 ensaios diferentes distribuídos em seis vazões. Foram simuladas as vazões correspondentes ao protótipo de 1.000 m<sup>3</sup>/s, 2.000 m<sup>3</sup>/s, 3.000 m<sup>3</sup>/s, 4.000 m<sup>3</sup>/s, 6.000 m<sup>3</sup>/s e 8.000 m<sup>3</sup>/s, com o nível de jusante variando para cada ensaio de acordo com a Tabela 5.1, que apresenta as condições estabelecidas nas dimensões do protótipo. A Tabela 5.2 apresenta as medições realizadas, porém na escala do modelo reduzido. Dentre as situações apresentadas, as de número 1, 4, 8 e 12 correspondem àquelas medidas em escala real na UHE Porto Colômbia.

*Tabela 5.1 - Características Gerais dos ensaios realizados (dados em escala de protótipo)*

Situação	Q (m <sup>3</sup> /s) (equivalente protótipo)	Q (m <sup>3</sup> /s) (medida modelo)	Nível Montante (m)	Nível Jusante (m)	N <sub>1</sub> (m)	x (m)	Tw (m)	S	Fr	Re
<b>1</b>	1.000	997,64	465,780	442,915	0,41	12,909	8,92	2,12	10,50	5,2E+06
<b>2</b>		1.004,17	465,840	444,075	0,43	13,994	10,08	2,43	9,99	5,3E+06
<b>3</b>		1.005,80	465,800	447,790	(A)	(A)	13,79	-	-	-
<b>4</b>	2.000	2.000,00	465,670	444,260	0,84	13,379	10,26	1,76	7,25	1,0E+07
<b>5</b>		1.995,57	465,650	444,960	0,87	14,369	10,96	1,92	6,91	1,0E+07
<b>6</b>		1.995,57	465,690	445,920	0,90	15,261	11,92	2,11	6,52	1,1E+07
<b>7</b>		1.995,57	465,700	450,090	(A)	(A)	16,09	-	-	-
<b>8</b>	3.000	3.000,00	465,740	445,360	1,27	13,254	11,36	1,61	5,89	1,6E+07
<b>9</b>		3.005,05	465,710	445,765	1,32	14,049	11,77	1,70	5,58	1,6E+07
<b>10</b>		2.995,44	465,770	448,330	(A)	(A)	14,33	-	-	-
<b>11</b>		3.005,05	465,760	450,060	(A)	(A)	16,06	-	-	-
<b>12</b>	4.000	4.001,03	465,750	446,160	1,69	13,119	12,16	1,51	5,11	2,1E+07
<b>13</b>		4.006,36	465,770	446,340	1,73	13,469	12,34	1,55	4,94	2,1E+07
<b>14</b>		4.011,68	465,780	447,030	1,78	14,605	13,03	1,66	4,74	2,1E+07
<b>15</b>		4.019,68	465,770	450,050	(A)	(A)	16,05	-	-	-
<b>16</b>	6.000	5.995,32	465,707	447,820	2,57	13,624	13,82	1,43	4,08	3,1E+07
<b>17</b>		6.007,67	465,715	449,670	2,85	16,261	15,67	1,70	3,44	3,3E+07
<b>18</b>		6.020,03	465,720	459,320	(A)	(A)	16,32	-	-	-



<b>19</b>	8.000	7.998,56	465,730	449,545	3,44	13,679	15,55	1,42	3,53	4,2E+07
<b>20</b>		8.005,44	465,718	451,100	3,81	16,315	17,10	1,63	2,96	5,2E+06

(A) – Não foi realizada medição com ponta linimétrica, em função de restrições do aparato operacional. Estes dados posteriormente foram calculados e comparados com valores obtidos através de imagens dos ensaios.

Obs.: \* Largura do vertedouro: 9 vãos de 15 m = 135 m;

\* Largura da bacia de dissipação: 163 m;

*Tabela 5.2 – Características Gerais dos ensaios realizados (dados em escala de modelo)*

Situação	Q (m³/s) (equivalente protótipo)	q (m²/s) (modelo)	Nível Montante (m)	Nível Jusante (m)	N <sub>1</sub> (m)	x (m)	Tw (m)	S	Fr	Re
<b>1</b>	1.000	0,021	0,636	0,178	0,008	0,258	0,178	2,12	10,50	1,5E+04
<b>2</b>		0,021	0,637	0,202	0,009	0,280	0,202	2,43	9,99	1,5E+04
<b>3</b>		0,021	0,636	0,276	(A)	(A)	0,276	-	-	-
<b>4</b>	2.000	0,042	0,633	0,205	0,017	0,268	0,205	1,76	7,25	3,0E+04
<b>5</b>		0,042	0,633	0,219	0,017	0,287	0,219	1,92	6,91	3,0E+04
<b>6</b>		0,042	0,634	0,238	0,018	0,305	0,238	2,11	6,52	3,0E+04
<b>7</b>		0,042	0,634	0,322	(A)	(A)	0,322	-	-	-
<b>8</b>	3.000	0,063	0,635	0,227	0,025	0,265	0,227	1,61	5,89	4,4E+04
<b>9</b>		0,063	0,634	0,235	0,026	0,281	0,235	1,70	5,58	4,5E+04
<b>10</b>		0,063	0,635	0,287	(A)	(A)	0,287	-	-	-
<b>11</b>		0,063	0,635	0,321	(A)	(A)	0,321	-	-	-
<b>12</b>	4.000	0,084	0,635	0,243	0,034	0,262	0,243	1,51	5,11	5,9E+04
<b>13</b>		0,084	0,635	0,247	0,035	0,269	0,247	1,55	4,94	5,9E+04
<b>14</b>		0,084	0,636	0,261	0,036	0,292	0,261	1,66	4,74	5,9E+04
<b>15</b>		0,084	0,635	0,321	(A)	(A)	0,321	-	-	-
<b>16</b>	6.000	0,126	0,634	0,276	0,051	0,272	0,276	1,43	4,08	8,9E+04
<b>17</b>		0,126	0,634	0,313	0,057	0,325	0,313	1,70	3,44	9,3E+04
<b>18</b>		0,126	0,634	0,506	(A)	(A)	0,506	-	-	-
<b>19</b>	8.000	0,168	0,635	0,311	0,069	0,274	0,311	1,42	3,53	1,2E+05
<b>20</b>		0,168	0,634	0,342	0,076	0,326	0,342	1,63	2,96	1,2E+05

(A) – Não foi realizada medição com ponta linimétrica, em função de restrições do aparato operacional. Estes dados posteriormente foram calculados e comparados com valores obtidos através de imagens dos ensaios.

Obs.: \* Largura do vertedouro (modelo): 1 vão de 0,30 m + 2 faixas laterais = 0,66 m;

\* Largura da bacia de dissipação: 0,80 m;

onde:

N<sub>1</sub> = Lâmina d'água perpendicular à estrutura no início do ressalto;

x = Distância entre o início do ressalto e o início da bacia de dissipação;

$T_w$  = Lâmina d'água no final do ressalto hidráulico submerso;

$S$  = grau de submersão do escoamento, correspondente à relação da lâmina d'água no final do ressalto submerso e a altura conjugada livre relativa ao ressalto livre;

$Fr$  = número de Froude na entrada do ressalto;

$Re$  = número de Reynolds na entrada do ressalto

É importante destacar que todas as medições eram realizadas já nas dimensões do protótipo, no sentido de facilitar a comparação com as medidas na estrutura real.

A medição da vazão sobre a estrutura deu-se a partir de um vertedouro do tipo Bazin, a jusante do modelo. Inicialmente, era estabelecida uma determinada abertura da comporta e avaliada a vazão sobre o modelo no vertedouro Bazin. Sucessivamente, realizavam-se ajustes na abertura da comporta de forma a permitir a passagem apenas da vazão pretendida para o ensaio. Alcançado o valor pretendido, aguardava-se a estabilização do escoamento.

Um importante fator a ser destacado é que, em certos períodos do dia nos quais ocorria maior insolação sobre o modelo, notava-se um efeito da temperatura na leitura da ponta linimétrica utilizada para a medição da altura da lâmina de água sobre o vertedouro Bazin. A leitura do nível da água era realizada indiretamente, através de um recipiente acoplado ao canal e unido por uma mangueira ao fundo do mesmo. Dado o pequeno volume presente no recipiente, a insolação intensa resultava em uma alteração na leitura da ponta linimétrica quando comparada a medições prévias, sem a mesma insolação, resultante da temperatura mais elevada do fluido no recipiente. O problema foi sanado a partir da cobertura do local nos períodos de maior insolação ao longo do dia.

### **5.2.1 Medição de Pressão**

As medições de pressão foram realizadas em três pontos na curva de concordância entre o vertedouro e a bacia de dissipação e em outros sete pontos ao longo da bacia. A disposição das tomadas de pressão pode ser avaliada na Figura 5.5

As medições do campo de pressões ocorreram em duas etapas: inicialmente identificou-se a pressão média em cada tomada, com a utilização de piezômetros. Em um segundo momento, utilizou-se transdutores de pressão para a avaliação da pressão dita “instantânea” originada pelo escoamento.

Na medição da pressão “instantânea” foram utilizados transdutores piezoresistivos, da marca Hytronic, modelo TM01, com faixa de trabalho de  $-50$  mbar ( $-0,50$  m.c.a.) até  $+100$  mbar ( $1,00$  m.c.a.) e erro relativo de  $0,10\%$  do fundo de escala, correspondente, neste caso, a  $1,5$  mm.c.a. Os transdutores foram instalados junto ao fundo do canal através de um sistema

roscável que permitia sua fixação e a eliminação das mangueiras normalmente necessárias para a medição.

Todos os transdutores de pressão foram submetidos, previamente à execução dos ensaios, a um processo de calibração. Foi utilizado um calibrador marca Fluke, modelo 718 100G, que imprime diversas pressões conhecidas e pré-programada ao equipamento que está sendo calibrado, restando a medição da resposta emitida pelo aparelho. Relacionando-se as pressões a que os aparelhos foram submetidos e sua resposta (em Volts), tem-se a curva de calibração de cada aparelho. Resumidamente, o calibrador funciona como um “fornecedor de pressão” aos transdutores e não é utilizada água para a sua calibração.

A conversão do sinal medido (tensão em Volts) foi realizada através da utilização de uma placa de aquisição de dados da marca LYNX, modelo CAD12/36, com uma resolução de 12 bits e 16 canais de entrada, ligada a um micro computador. A Tabela 5.3 apresenta resumidamente as características dos equipamentos utilizados:

*Tabela 5.3 - Equipamentos: características principais*

<b>Equipamento</b>	<b>Marca</b>	<b>Modelo</b>	<b>Faixa de Trabalho</b>	<b>Outras características</b>
Transdutor de pressão	HYTRONIC	TM 01	-50 mbar a +100 mbar	Saída 4 – 20 mA, Precisão de $\pm 0,10\%$ FE, Temperatura de operação 0 – 70 °C
Calibrador	FLUKE	718 100G	-827,4 mbar a 6895,0 mbar	Precisão de $\pm 0,05\%$ FE, Entrada CC 24mA, Resolução 0,001 mA
Conversor A/D	LYNX	CAD 12/36	-	16 Canais, 12 bits de resolução, 16 entradas digitais TTL, 16 saídas digitais TTL suporte a DMA e IRQ, 3 contadores para base de tempo e uso geral, memória de sequenciamento de canais memória FIFO 2 a 4 saídas analógicas

Foram realizados ensaios sucessivos de 15 minutos cada, o primeiro para uma frequência de aquisição de dados de 100 Hz e o seguinte com frequência de 500 Hz, uma vez que o trabalho estava enquadrado dentro de uma pesquisa mais ampla e a mesma previa estas medições. Os dados deste trabalho utilizam somente as medidas realizadas a uma frequência de 100 Hz, uma vez que os dados de protótipo tiveram esta frequência de amostragem e a mesma atende a frequência mínima indicada por Lopardo (1986) e Trierweiler (2006), de 50Hz.

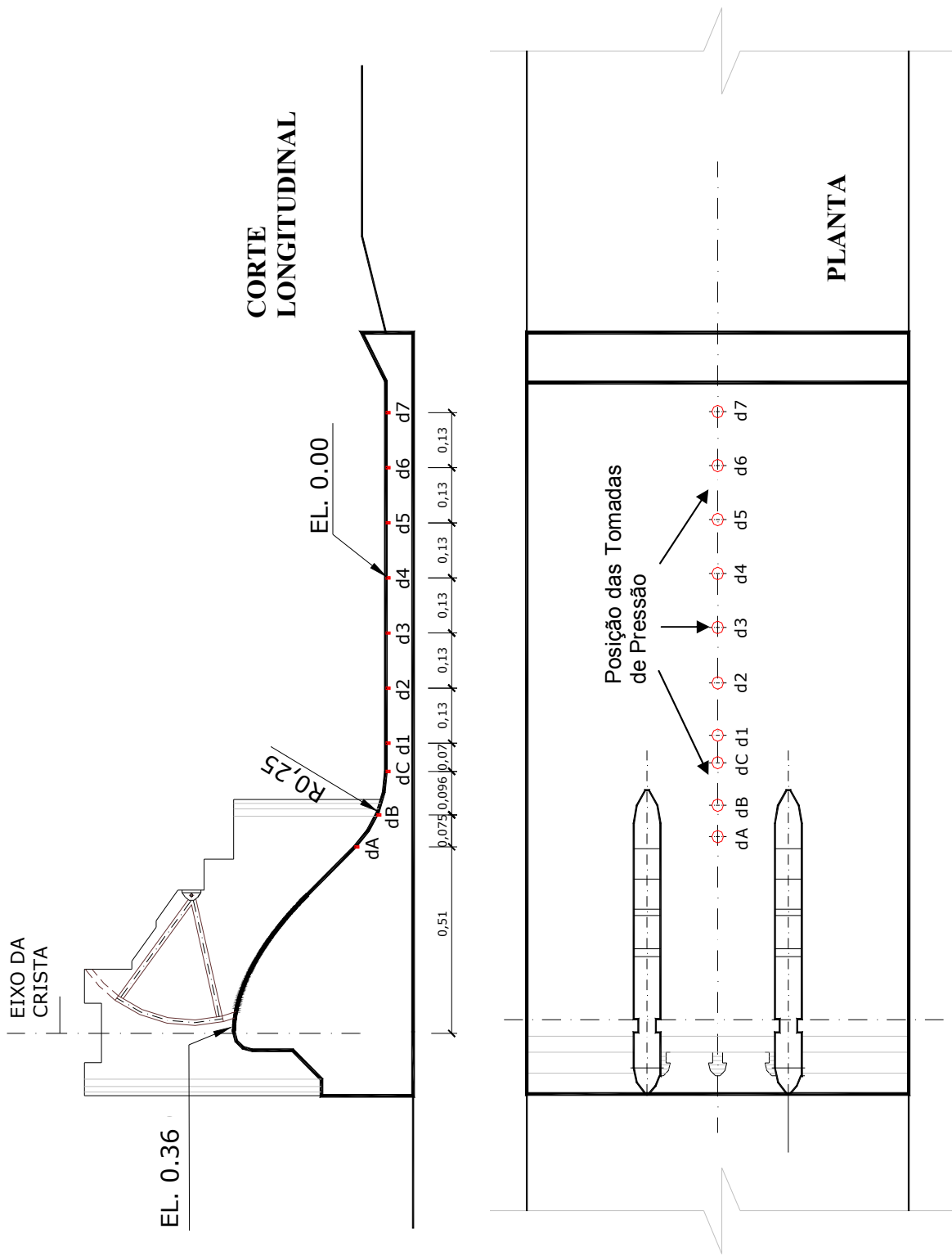


Figura 5.5 - Disposição das tomadas de pressão (medidas em metros –modelo)

### 5.2.2 Visualização do Escoamento

Dada o elevado número de ensaios realizados nas medições de pressão e níveis, foi necessário sistematicamente repetir as vazões a fim de realizar os ensaios de visualização do escoamento e também as medições de velocidade. Assim, uma vez estabilizado o escoamento sobre a estrutura, isto é, quando havia a garantia de repetição das características observadas no ensaio anterior, realizavam-se estes ensaios. Devido ao tempo necessário à estabilização do escoamento e a duração dos ensaios de medição de pressão e velocidade do escoamento, não era possível a realização da totalidade das medições em apenas uma campanha de medições.

Os ensaios aqui denominados de visualização do escoamento têm por objetivo permitir a avaliação visual do comportamento das macro-estruturas desenvolvidas no escoamento, como posição de formação do rolo, formação de grandes vórtices, identificação da posição de início do ressalto e aspectos relativos à aeração do escoamento. O conjunto de ensaios consistia, basicamente, de cinco tomadas em vídeo do escoamento: uma geral, englobando toda a estrutura, e três tomadas de imagens em partes específicas do escoamento (parte inicial do ressalto, terço médio e final do ressalto) e uma tomada superior, com enfoque no início do ressalto hidráulico. As Figuras abaixo identificam estas condições.

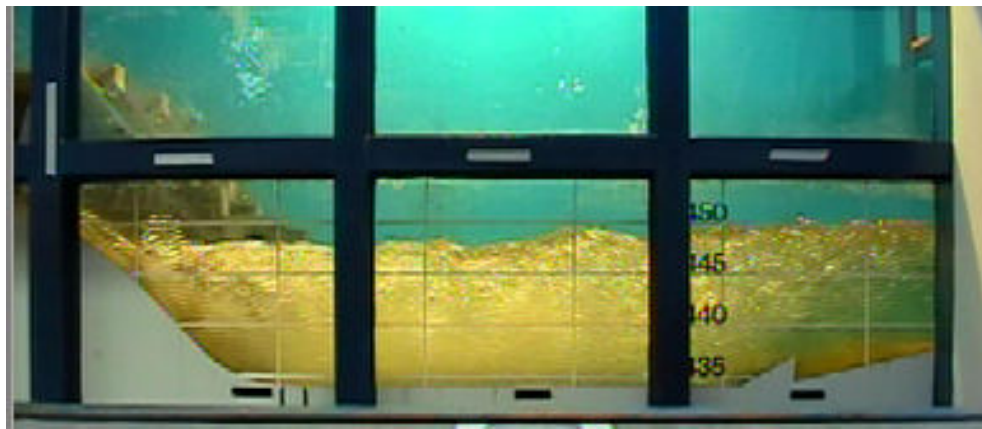


Figura 5.6 - Vista geral do escoamento ( $Q_p=4.000 \text{ m}^3/\text{s} - S=1,61$ ).

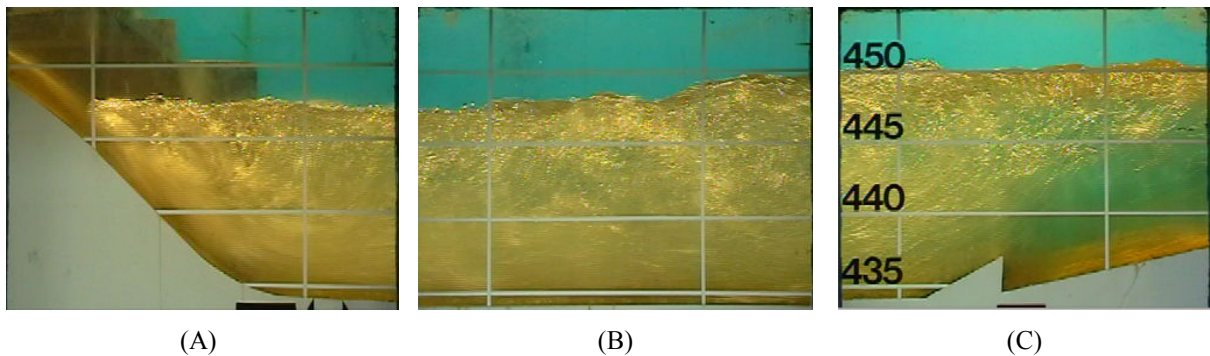


Figura 5.7 - Conjunto de tomadas de imagens: (A) Região da curva vertical de concordância e início do ressalto; (B) Parte intermediária do ressalto; (C) Parte final da bacia (end-sill) ( $Q_p=4.000 \text{ m}^3/\text{s} - S=1,61$ )



*Figura 5.8 - Vista superior do ressalto ( $Q_p = 4.000 \text{ m}^3/\text{s} - S = 1,61$ ).*

As imagens foram adquiridas a partir de Câmera Digital, com a utilização de iluminação artificial disposta sobre o escoamento, de forma a garantir uma melhor nitidez, principalmente no que se refere à aeração do escoamento. Para cada uma das posições destacadas acima, foram realizadas medições de três minutos, totalizando quinze minutos de ensaio para cada submergência avaliada. Por tratar-se de uma pesquisa mais ampla, grande parte destas imagens constitui um banco de imagens que serão analisadas durante o desenvolvimento da pesquisa, principalmente com referência à influência da escala de redução do modelo na estrutura do fenômeno e no que se refere à aeração do escoamento.

### **5.3 METODOLOGIA DE ANÁLISE**

Esse trabalho, em linhas gerais, tem por objetivo definir a influência da variação da submergência no campo de pressões resultante ao longo do ressalto hidráulico a jusante de um vertedouro, estabelecendo relações entre parâmetros como a média, a flutuação e os valores extremos de pressão desenvolvidos a partir da alteração do grau de afogamento da estrutura. Assim, foram feitas diversas medições ao longo do escoamento, de maneira a destacar, com o método empregado, os fenômenos intrínsecos ao escoamento, com destaque para a pressão instantânea no desenvolvimento longitudinal do ressalto. Podem ser destacadas duas linhas principais de análise do fenômeno: a avaliação da submergência sobre o comportamento do campo de pressões e a questão da previsão dos valores de pressão para diferentes probabilidades de ocorrência, a partir de diversos níveis de afogamento da estrutura.

Outro aspecto importante diz respeito à determinação da posição de início do ressalto junto ao perfil do vertedouro. Com auxílio de mecanismos de visualização do escoamento, buscou-se o estabelecimento de uma estimativa da posição de início do ressalto, de acordo com o grau de afogamento submetido à estrutura vertente.

### **5.3.1 Posição de início do ressalto junto ao perfil do vertedouro**

Entre as medições realizadas nas campanhas de ensaios deste trabalho estava a determinação da posição de início do ressalto. Esta característica decorre do tipo de análise utilizada, que prevê a descrição das diversas características do escoamento ao longo de seu desenvolvimento longitudinal a partir da adimensionalização apresentada por Marques et al (1997), conforme equação 5.3.1.

$$\Gamma = \frac{x}{(y_l - y_r)} \quad \text{Equação 5.3.1}$$

onde:

$\Gamma$  = posição relativa do ressalto adimensionalizada;

$x$  = medida entre o ponto avaliado e o início do ressalto;

$y_l$  = altura conjugada lenta do ressalto hidráulico e;

$y_r$  = altura conjugada rápida do ressalto hidráulico.

Todavia, dependendo das condições do escoamento estabelecido, como a vazão e principalmente o grau de afogamento a que o fluxo encontrava-se submetido, a posição de início do ressalto resultava demasiadamente sobre o vertedouro. Devido a restrições da estrutura montada para as medições, parâmetros como a altura rápida do ressalto e a posição de início do ressalto restaram impossibilitadas. Tal característica levou, portanto, à necessidade de estabelecimento de uma relação que exprimisse a posição de início para estas condições.

De um total de 20 ensaios diferentes, 06 apresentaram algum problema quanto à definição da posição de início. A partir do comportamento apresentado pelos dados disponíveis, procurou estabelecer-se uma expressão que descrevesse a influência da submergência sobre a posição de início do ressalto.

### **5.3.2 Avaliação do efeito da submergência sobre as pressões em um ressalto hidráulico a jusante de vertedouro.**

Um importante aspecto a ser considerado na avaliação da influência da submergência sobre o escoamento é a necessidade de averiguação, em um primeiro momento, das diferenças do ressalto submergido e do ressalto livre. Alvo de sucessivos estudos, o comportamento do ressalto livre é extensamente conhecido, principalmente em escoamento a jusante de comportas. Todavia, são raros os estudos que apresentam o comportamento do escoamento ao

longo de estruturas como a deste trabalho, inclusive com a identificação do comportamento ao longo da curva de concordância entre a estrutura e a bacia.

Neste contexto, ganha importância a indicação das condições de ressalto livre para este tipo de situação. Um agravante a este cenário refere-se à impossibilidade de serem realizados ensaios em modelo para esta condição, já que, por tratar-se de um modelo da UHE Porto Colômbia e o trabalho seguir a linha de pesquisa de um projeto maior, as condições de topografia de jusante, repetidas no modelo, impossibilitavam a simulação de um ressalto livre. A Figura 5.9 apresenta um detalhe da porção mais a jusante do modelo, que restringia os ensaios a um nível mínimo de 440 m (Protótipo), 6 m acima da cota da bacia de dissipação.

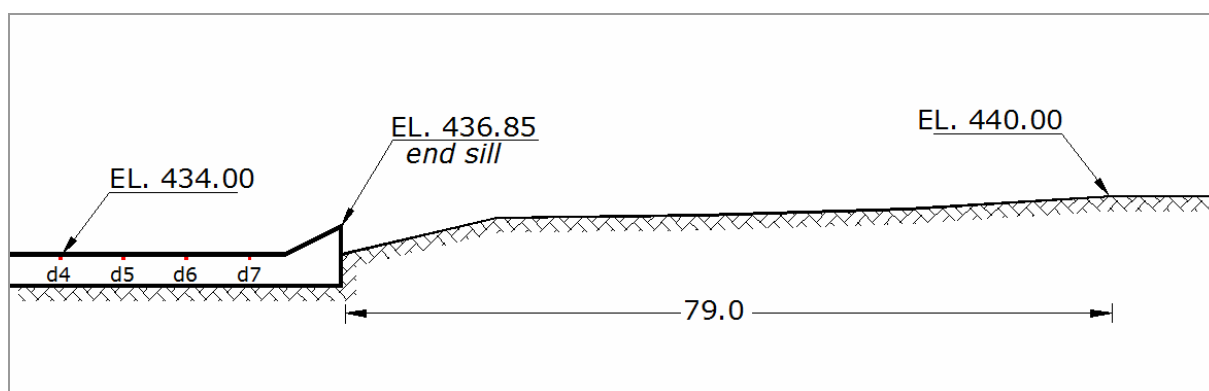


Figura 5.9 - Características de jusante da estrutura ensaiada, com destaque para topografia diferenciada a jusante da bacia de dissipação (dimensões da UHE Porto Colômbia – Protótipo)

Dessa maneira partiu-se para a análise teórica do fenômeno. Um dos principais enfoques foi delinear o comportamento do ressalto ao longo da curva vertical, uma vez que, ao contrário dos casos submergidos, não havia dados disponíveis para o caso do ressalto livre na estrutura em estudo. É importante destacar que uma das principais características dos ressaltos ditos submergidos é a sua atuação na zona de concordância do vertedouro com a estrutura de dissipação. Trabalhos desenvolvidos na China (LinFu e Jie (1985) e MuLan *et al* (1988)) apresentam a distribuição de pressões médias e a flutuação de pressão ao longo de curvas verticais com escoamento livre, apresentando, entre outros, a figura da zona de influência da curva, que é uma zona de sobrepressão ao longo da parte inicial da bacia após a passagem do escoamento sobre a curva. A Equação 5.3.2 apresenta a relação estabelecida por LinFu e Jie.

$$L = \frac{4}{C_{pCM}} d \sin \beta \quad \text{Equação 5.3.2}$$

onde:



$L$  = distância do ponto médio da curva aos pontos de montante e jusante onde se anula a influência da curva;

$d$  = lâmina d'água sobre a curva (neste caso, igual a altura rápida do escoamento);

$\beta$  = ângulo correspondente ao trecho curvo;

$C_{pCM}$  = coeficiente de pressão máxima devido à força centrífuga, calculado pela relação  $C_{pCM} = \frac{p_{CM}/\gamma}{H-d}$  onde  $p_{CM}$  = é o valor da pressão máxima.

Com relação ao ressalto hidráulico a jusante de vertedouros, Endres (1990) e Marques (1997) realizaram diversos estudos, sendo os dados de Endres objeto de estudo por Teixeira (2003). Por tratar-se de situações muito semelhantes às estabelecidas neste trabalho, utilizaram-se esses dados para o traçado do comportamento do ressalto livre para cada condição de ensaio e diferentes valores do número de Froude. A partir das relações estabelecidas por LinFu e Jie (1985) estabeleceu-se o comportamento teórico das pressões sobre a zona diretamente sobre a curva e também sob sua influência. Em um segundo momento, uma vez mensurada a zona de influência da curva, foram suprimidos os dados do ressalto livre medidos por Endres, de maneira a permitir o traçado do comportamento das pressões originadas exclusivamente pelo ressalto hidráulico. Finalmente, adotou-se como comportamento final ao longo da estrutura o somatório das partes avaliadas pelos diversos pesquisadores, isto é, desenvolvimento da curva, zona de influência do trecho curvo e o ressalto hidráulico. Dessa maneira, pode-se definir o comportamento do ressalto livre para cada uma das condições de escoamento estudadas e realizar a comparação entre as medições com o intuito de verificar a influência que o afogamento resulta no âmbito das pressões médias, da flutuação de pressão e das pressões extremas.

A fim de possibilitar a comparação dos dados com os de outro pesquisadores, adotou-se a adimensionalização proposta por Marques *et al* (1999) que faz uso das seguintes variáveis:

- $y_r$  = altura rápida do escoamento
- $y_l$  = altura lenta do escoamento
- $Tw$  = altura da lâmina d'água sobre a bacia no caso do ressalto afogado
- $Ht$  = Perda de energia no ressalto hidráulico dada pela diferença entre energias de jusante e montante.

Assim, a pressão média pode ser adimensionalizada pela expressão 5.3.3:

$$\Psi = \frac{(P - y_r)}{(y_l - y_r)} \cdot \frac{y_l}{Tw} \quad \text{Equação 5.3.3}$$

Já as flutuações de pressão deverão ser avaliadas a partir da expressão 5.3.4:

$$\Omega = \frac{(\sigma \cdot y_l)}{(Ht \cdot y_r)} \cdot \frac{y_l}{Tw} \quad \text{Equação 5.3.4}$$

É importante notar que tais expressões são uma evolução das expressões adotadas por Marques (1997), uma vez que adicionam o grau de submergência do escoamento na avaliação do desenvolvimento do fenômeno ( $S = Tw/Y_2$ )

### ***5.3.3 Previsão de valores de pressão para diferentes probabilidades de ocorrência e fatores de submergência.***

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

A determinação das pressões para diferentes probabilidades de ocorrência e níveis de submergência seguiu a proposta de Teixeira (2003), que valeu-se de 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. Dessa maneira, a partir do conhecimento da distribuição ao longo do ressalto da pressão média, do desvio padrão e do coeficiente de distribuição de probabilidade (N) pode se criar uma metodologia para estabelecer os valores de pressão para diversas probabilidades de ocorrência. A expressão adotada por Teixeira (2003) é apresentada pela Equação 5.3.5

$$P_{\%} = P_x \pm N \cdot \sigma_x \quad \text{Equação 5.3.5}$$

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.

Esta metodologia foi desenvolvida utilizando ajustes de dados de pressão média e desvio padrão para o ressalto hidráulico livre. A fim de avaliar a influência da submergência sobre os parâmetros ajustados (pressão média e desvio padrão) este estudo deverá desenvolver uma metodologia específica, contemplando a influência do grau de afogamento do escoamento.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo propõe-se a apresentar os resultados relativos às medições experimentais realizadas, norteadas pelos objetivos inicialmente estabelecidos. Dessa forma aborda-se, de maneira geral, a seguinte seqüência de resultados:

- Estimativa da posição de início do ressalto hidráulico junto ao perfil do vertedouro, segundo o grau de afogamento submetido à estrutura vertente.
- Caracterização do campo de pressões resultante do ressalto hidráulico desenvolvido em bacias de dissipação a jusante de vertedouros, com destaque para a pressão média e a flutuação de pressão.
- Metodologia de previsão de pressões extremas junto ao fundo da bacia, em função da submergência a que a mesma encontra-se submetida.

### 6.1 POSIÇÃO DE INÍCIO DO RESSALTO HIDRÁULICO CONFORME O GRAU DE SUBMERGÊNCIA

A definição da posição de início do ressalto revela-se importante principalmente quanto à necessidade de comparação do comportamento da distribuição longitudinal das pressões e suas flutuações junto à laje de fundo da bacia de dissipação. À medida que ocorre um incremento no grau de submergência do ressalto, a tendência é de que o mesmo inicie mais para montante, o que de certa forma é impedido pela estrutura vertente, fazendo com que o escoamento busque uma outra situação de equilíbrio.

Através dos ensaios realizados no modelo reduzido na escala 1:50 da UHE Porto Colômbia, foi possível, de um número total de 20 condições diferentes, obter-se pelo menos 14 medições do início do ressalto, abrangendo todas as vazões ensaiadas e diferentes submergências. A impossibilidade da medição do início do ressalto nos ensaios restantes deve-se a restrições relativas à ponta linimétrica utilizada, dado que o seu movimento longitudinal era limitado, algumas vezes não alcançando a posição desejada. A partir dos dados medidos no modelo, foi feita uma análise teórica a fim de determinar os parâmetros característicos do ressalto desenvolvido, entre eles as alturas rápida ( $Y_1$ ) e lenta ( $Y_2$ ) e o número de Froude no início do ressalto ( $Fr_1$ ), permitindo o cálculo do grau de afogamento ( $S$ ) a que a estrutura estava submetida. A Tabela 6.1 apresenta a relação dos ensaios realizados, com a respectiva posição de início do ressalto. O cálculo dos diversos parâmetros avaliados, incluindo a estimativa da perda de carga na comporta, é apresentado no Anexo I.

Tabela 6.1 - Parâmetros relativos à posição de início do ressalto afogado (dados em escala de protótipo)

Q (m³/s)	Nm (m)	Nj (m)	CIRA (m)	PIRA (m)	Z (m)	$\alpha$ (°)	Y <sub>1</sub> (m)	Fr <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub> (m)	S
997,64	465,78	442,92	441,94	12,91	7,73	45,00	0,29	10,50	4,21	2,12
1.004,17	465,84	444,08	443,01	13,99	8,82	45,00	0,30	9,99	4,15	2,43
1.005,80	465,80	447,79	(445,97)	(16,57)	(11,28)	(41,61)	(0,35)	(8,43)	(4,05)	(3,40)
2.000,00	465,67	444,26	442,68	13,38	8,20	45,00	0,60	7,25	5,83	1,76
1.995,57	465,65	444,96	443,66	14,37	9,19	45,00	0,62	6,91	5,72	1,92
1.995,57	465,69	445,92	444,60	15,26	10,07	43,93	0,65	6,52	5,66	2,11
1.995,57	465,70	450,09	(446,75)	(17,41)	(12,00)	(40,11)	(0,75)	(5,57)	(5,54)	(2,91)
3.000,00	465,74	445,36	442,83	13,25	8,08	45,00	0,90	5,89	7,05	1,61
3.005,05	465,71	445,77	443,92	14,05	8,87	45,00	0,93	5,58	6,91	1,70
2.995,44	465,77	448,33	(445,66)	(15,86)	(10,63)	(42,80)	(1,03)	(4,98)	(6,75)	(2,12)
3.005,05	465,76	450,06	(446,74)	(16,97)	(11,63)	(40,91)	(1,11)	(4,59)	(6,68)	(2,41)
4.001,03	465,75	446,16	443,06	13,12	7,94	45,00	1,20	5,11	8,07	1,51
4.006,36	465,77	446,34	443,76	13,47	8,29	45,00	1,23	4,94	7,97	1,55
4.011,68	465,78	447,03	444,55	14,61	9,43	45,00	1,26	4,74	7,85	1,66
4.019,68	465,77	450,05	(446,72)	(16,57)	(11,28)	(41,61)	(1,45)	(4,07)	(7,66)	(2,10)
5.995,32	465,71	447,82	444,02	13,62	8,45	45,00	1,82	4,08	9,64	1,43
6.007,67	465,72	449,67	446,78	16,26	11,00	42,41	2,10	3,44	9,23	1,70
6.020,03	465,72	450,32	(446,81)	(15,95)	(10,72)	(42,66)	(2,10)	(3,44)	(9,22)	(1,77)
7.998,56	465,73	449,55	444,68	13,68	8,50	45,00	2,43	3,53	10,97	1,42
8.005,44	465,72	451,10	447,47	16,32	11,05	42,18	2,82	2,96	10,48	1,63

Obs.: Entre parênteses os dados estimados a partir da metodologia proposta

Onde:

Nm = Nível de Montante;

Nj = Nível de Jusante;

CIRA = Cota de Início do Ressalto Afogado (lâmina d'água);

PIRA = Posição de Início do Ressalto Afogado (lâmina d'água);

Z = Diferença entre a cota de início do Ressalto Afogado (na estrutura) e a cota de fundo da bacia (434,00);

N<sub>1</sub> = lâmina d'água perpendicular ao vertedouro no início do ressalto;

$\alpha$  = ângulo de inclinação do vertedouro no ponto de início do ressalto;

Y<sub>1</sub> = componente vertical da lâmina d'água no início do ressalto ( $Y_1 = N_1 \cdot \cos(\alpha)$ );

Fr<sub>1</sub> = número de Froude na posição de início do ressalto;

Y<sub>2</sub> = altura lenta, segundo Belanger, a partir da altura rápida Y<sub>1</sub> (Eq. 4.1.1);

S = grau de submergência do escoamento.

A Figura 6.1 apresenta os parâmetros destacados:

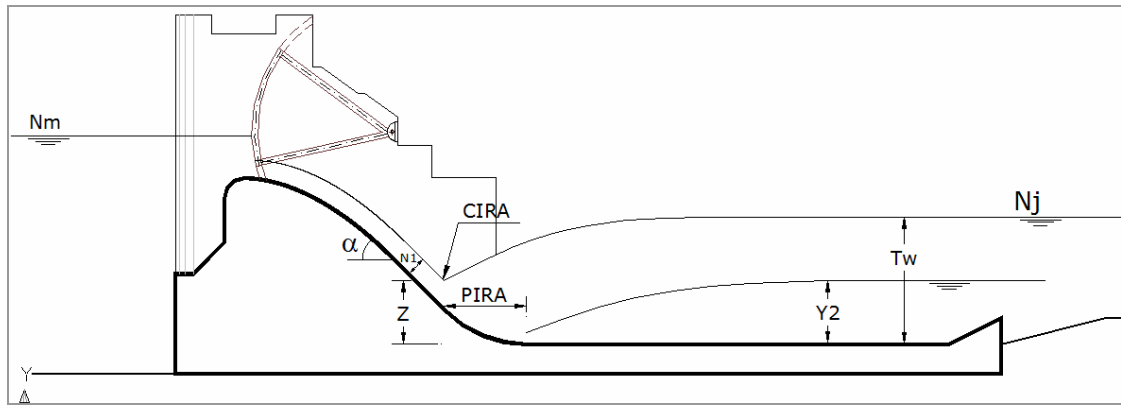


Figura 6.1 - Conjunto de parâmetros descritivos do ressalto

A partir do exame dos diversos parâmetros estabelecidos em função da análise teórica, foi possível o estabelecimento de diversas relações adimensionais a fim de representar o comportamento da posição de início do ressalto afogado, neste caso, o ressalto a jusante de um vertedouro. A Figura 6.2 apresenta a relação que melhor descreveu o comportamento do ressalto, relacionando em linhas gerais a posição vertical de início do ressalto ( $Z_{calc}$ ) e a submergência do escoamento ( $S$ ). Pode-se notar um ajuste bastante eficiente, de forma que com o conhecimento de parâmetros gerais do escoamento como sua altura crítica ( $h_c$ ), tem-se a posição de início do ressalto. Com um incremento no produto do número de Froude com a Submergência, ocorre um incremento na posição vertical de início do ressalto.

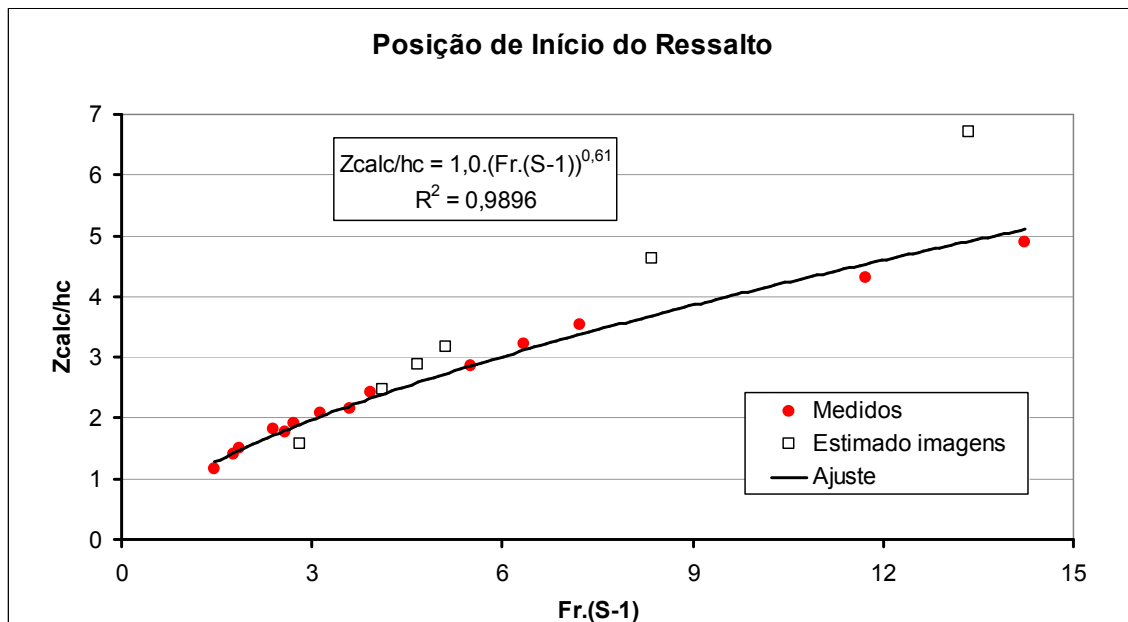


Figura 6.2 - Posição de início do ressalto a partir do estabelecimento do parâmetro  $Z$ , correspondente a elevação da estrutura no início do ressalto

Os pontos vazados na Figura 6.2 representam os ensaios em que não foi possível realizar a medição no modelo, de forma que foi realizada uma estimativa em função das

imagens registradas do ressalto. Nota-se que o comportamento é similar ao ajuste estabelecido. No entanto, é visível que com o incremento no número de Froude do escoamento, ou seja, nas situações de menor vazão, ocorre um aumento na dispersão dos dados. Verifica-se, por exemplo, que para vazões de protótipo entre 3.000 m³/s e 6.000 m³/s (produto  $Fr_1(S-1)$  entre 3,0 e 6,0) a dispersão dos dados é bastante reduzida em relação aos outros dois pontos, que correspondem às vazões de protótipo de 2.000 m³/s e 1.000 m³/s. Este comportamento decorre possivelmente da metodologia adotada, com um maior erro nas medições realizadas para as menores vazões, que apresentam também as menores dimensões a serem mensuradas. De qualquer sorte, as medições indicam que o ajuste estabelecido descreve satisfatoriamente os pontos não medidos diretamente no modelo.

Assim, pode-se dizer que a posição de início do ressalto varia de acordo com a evolução da relação  $Fr_1(S-1)$  do escoamento, a partir da Equação 6.1.1:

$$Z_{calc}/h_c = (Fr_1.(S-1))^{0,61} \quad \text{Equação 6.1.1}$$

onde:

$Z_{calc}$  = posição vertical teórica do início do ressalto

$h_c$  = altura crítica do escoamento

$Fr_1$  = número de Froude na posição de início do ressalto

$S$  = submergência do escoamento

Analisando-se de forma comparativa os resultados obtidos do ajuste estabelecido e os dados das medições em campo, são verificadas diferenças relativamente pequenas. A Tabela 6.2 apresenta o erro relativo entre os resultados teóricos a partir da relação acima e os dados dos ensaios no modelo. Pode-se notar que quanto maior o número de Froude do escoamento, menor o erro relativo entre os resultados, em função, provavelmente da menor variabilidade dos dados para Froudes maiores. O erro relativo médio resultou em menos de 1,5%, sendo que o máximo foi de 9,10%.

*Tabela 6.2 - Erro relativo entre o ajuste e os dados de campo*

<b>Q (m³/s)</b>	<b>Fr<sub>1</sub></b>	<b>S</b>	<b>ER (%)</b>	<b>Q (m³/s)</b>	<b>Fr<sub>1</sub></b>	<b>S</b>	<b>ER (%)</b>
997,64	10,50	2,12	3,79	4.001,03	5,11	1,51	1,44
1.004,17	9,99	2,43	2,99	4.006,36	4,94	1,55	0,02
2.000,00	7,25	1,76	-1,86	4.011,68	4,74	1,66	-3,95
1.995,57	6,91	1,92	-4,91	5.995,32	4,08	1,43	-0,95
1.995,57	6,52	2,11	-6,16	6.007,67	3,44	1,70	-9,10
3.000,00	5,89	1,61	0,77	7.998,56	3,53	1,42	6,01
3.005,05	5,58	1,70	-3,34	8.005,44	2,96	1,63,	-5,45

Conforme mencionado anteriormente, devido a limitações da estrutura experimental, em uma parte dos ensaios não foi possível realizar as medições referentes à posição de início do ressalto. Entretanto, a partir da utilização do método acima e dispondo de parâmetros “macro” do escoamento foi possível estabelecer de forma teórica essas posições através de um processo iterativo de cálculo.

A Tabela 6.3 apresenta os resultados obtidos para os 6 ensaios cujas medições não puderam ser realizadas, de maneira a permitir a utilização dos dados na continuação do estudo. O Anexo I apresenta o conjunto total de dados medidos e calculados.

*Tabela 6.3 - Parâmetros calculados a partir da análise teórica estabelecida*

<b>Q (m³/s)</b>	<b>Nm (m)</b>	<b>Nj (m)</b>	<b>CIRA (m)</b>	<b>x (m)</b>	<b>Z (m)</b>	<b>S</b>
1.005,80	465,80	447,79	445,63	16,57	11,28	3,40
1.995,57	465,70	450,09	446,75	17,41	12,00	2,91
2.995,44	465,77	448,33	445,66	15,86	10,63	2,12
3.005,05	465,76	450,06	446,74	16,97	11,63	2,41
4.019,68	465,77	450,05	446,72	16,57	11,28	2,10
6.020,03	465,72	450,32	446,81	15,95	10,72	1,77

## **6.2 CAMPO DE PRESSÕES EM BACIAS DE DISSIPACÃO A JUSANTE DE VERTEDOUROS.**

A caracterização do comportamento do campo de pressões desenvolvido sobre a bacia de dissipação a jusante do vertedouro, com enfoque no projeto deste tipo de estrutura, passa pelo delineamento das pressões médias e das flutuações de pressão ocasionadas pelo escoamento. Este capítulo tem por objetivo apresentar o comportamento dessas variáveis e estabelecer relações que possam auxiliar no projeto desse tipo de estrutura hidráulica.

### **6.2.1 Caracterização da Pressão Média do escoamento sobre bacias de dissipação a jusante de vertedouro**

O conhecimento da distribuição longitudinal das pressões médias ao longo da bacia de dissipação é sobremaneira importante, uma vez que permite o estabelecimento dos esforços que em linhas gerais atuam sobre a estrutura. Conjugado com os valores das flutuações de pressão e também os seus extremos, o valor médio das pressões pode funcionar como subsídio para o estabelecimento de condições mais próximas o possível da realidade a que são submetidas as bacias de dissipação.

Através da Figura 6.3 pode-se notar o comportamento característico da pressão média através da utilização da metodologia estabelecida por Marques (1999). É apresentado também o ajuste estabelecido por Teixeira (2003) para o ressalto livre, em função de dados de diversos pesquisadores. Ressalta-se a grande dispersão dos dados.

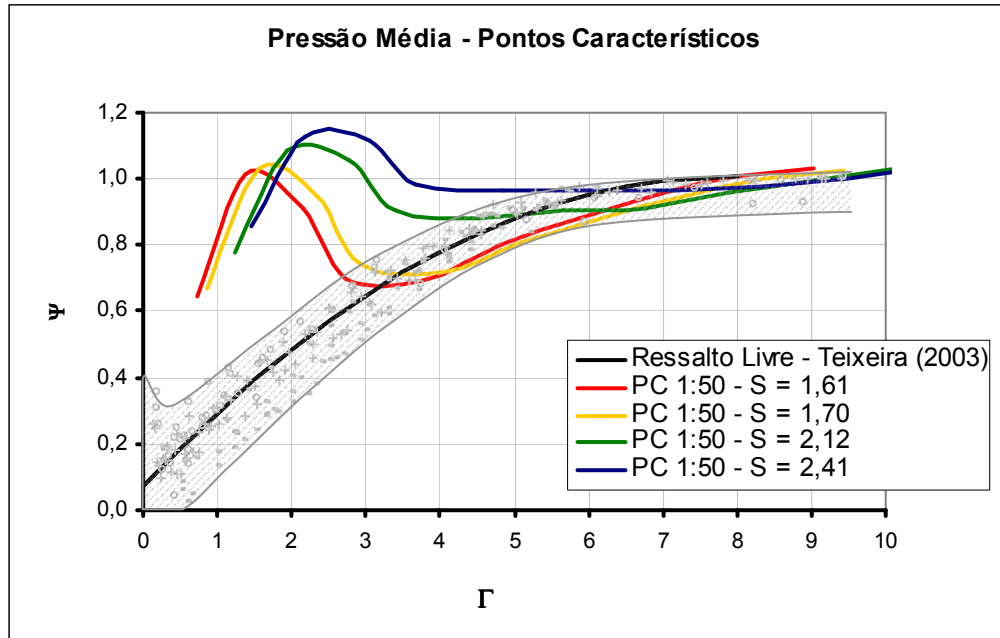


Figura 6.3 - Comportamento característico da distribuição das pressões média com relação ao ressalto livre

$$\Psi = \frac{P - y_1}{y_2 - y_1} \cdot \frac{Tw}{y_2} \quad \text{Pressão Média adimensionalizada} \quad \text{Equação 6.2.1}$$

$$\Gamma = \frac{x}{y_2 - y_1} \quad \text{Posição adimensionalizada} \quad \text{Equação 6.2.2}$$

onde:

$P$  = Pressão média medida em cada ponto;

$y_1$  = altura conjugada rápida do escoamento (início do ressalto);

$y_2$  = altura conjugada lenta do escoamento (fim do ressalto);

$Tw$  = lâmina d'água a jusante do ressalto;

$x$  = comprimento correspondente entre o início do ressalto e o início da bacia.

Analisando tal comportamento, notam-se duas características importantes: um comportamento bastante diverso do habitual (em se tratando de ressalto livre), principalmente nas primeiras tomadas de pressão submetidas ao ressalto (pontos sob a curva e adjacências) e a dependência do comportamento a partir da submergência submetida. Neste sentido, a linha de pesquisa seguiu no intuito de que fosse identificado um comportamento padrão do ressalto



submergido, a partir da definição de pontos críticos que pudessem demonstrar satisfatoriamente a evolução do ressalto a partir da submergência submetida.

Entre os pontos críticos identificados tiveram destaque aqueles situados junto à curva de concordância do vertedouro com a bacia, de maneira que era imperativo que os mesmos fossem utilizados na descrição do ressalto. Da mesma forma, era necessária a utilização de pontos representativos do ressalto livre, uma vez que esta é a situação limite, isto é, o grau de submergência igual a unidade.

Optou-se pela utilização dos dados de Endres (1990) para o ressalto livre, repetindo o que foi realizado por Teixeira (2003). Todavia, não se encontravam disponíveis dados de pressão relativos à curva de concordância, o que fez com que fosse necessária uma definição teórica dos esforços atuantes nesse local.

Nesse sentido, utilizou-se a abordagem teórica estabelecida por LinFu e Jie (1985) que, em linhas gerais, indica um distribuição de pressão a partir do centro da curva vertical de concordância entre o vertedouro e a bacia de dissipação, com a existência de uma zona de influência da curva, a jusante do encontro com a bacia. A partir desta abordagem foi possível estabelecer o comportamento das pressões ao longo da curva vertical. A Figura 6.4 apresenta o resultado para o escoamento de número de Froude igual a 5,8. É importante destacar que, devido ao pequeno número de trabalhos na área, esta foi a única metodologia identificada para descrição do fenômeno. O conjunto de curvas traçadas para cada um dos escoamentos ensaiados é apresentado no Anexo II.

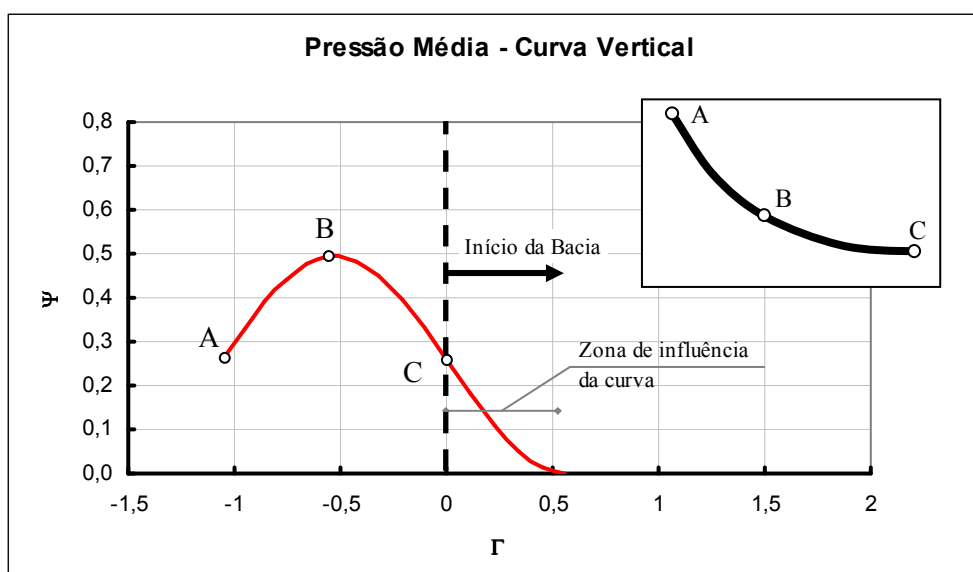


Figura 6.4 - Ajuste teórico para a distribuição da pressão média ao longo da curva vertical

Ao mesmo tempo em que era estabelecido o comportamento das pressões ao longo da curva e na sua zona de influência, foi necessário o traçado de um ajuste que representasse

apenas o escoamento sobre a bacia de dissipação, isto é, sem qualquer influência das sobrepressões ocasionadas pela curva vertical. Optou-se então, utilizando os dados de Endres (1990) e Marques (1997), por retirar-se do ajuste aqueles pontos que se encontrassem dentro da zona de influência da curva. Isto se explica uma vez que, apesar de não haver medições na curva, admite-se que as tomadas logo a jusante estão sob sua influência. Dessa forma, foi traçado um ajuste para dados teoricamente resultantes exclusivamente do ressalto hidráulico sobre a bacia de dissipação, isto é, sem qualquer influência da mudança de direção resultante do encontro do vertedouro com a bacia. A

Figura 6.5 apresenta esse novo ajuste, comparado ao estabelecido por Teixeira (2003), que considera todos os pontos, inclusive aqueles sujeitos à influência da curva.

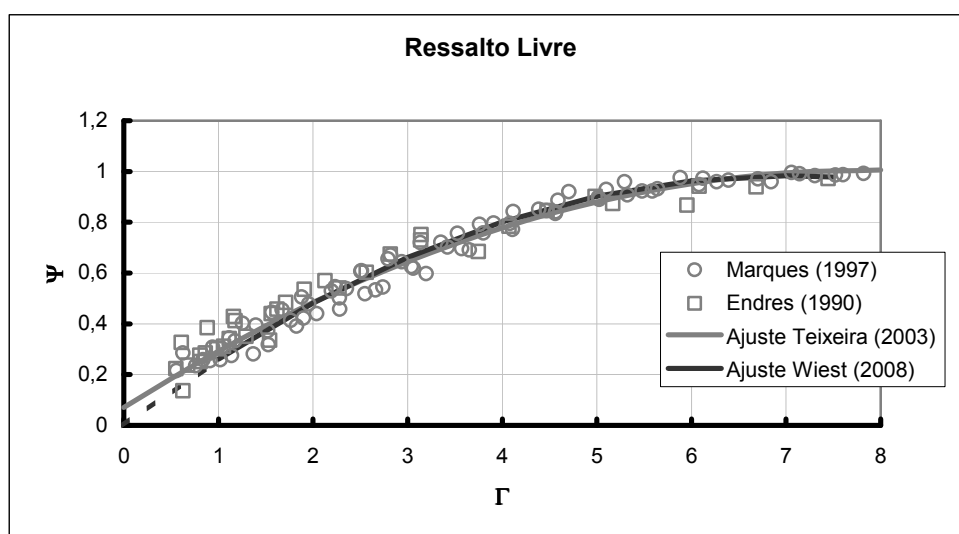


Figura 6.5 - Ajuste para a pressão média, descartados os pontos sob influência da curva vertical.

Estabelecidos os dois ajustes, a somatória dos valores correspondentes ao efeito da curva com os valores exclusivamente resultantes do ressalto hidráulico representa o fenômeno na estrutura em estudo. A Figura 6.6 apresenta o ajuste da pressão média na zona de influência da curva para a vazão equivalente ao protótipo de 4.000 m<sup>3</sup>/s ( $Fr = 5,8$ ). Os demais ajustes são apresentados no Anexo II. De forma geral, tomando os dados de cada pesquisador isoladamente, esta metodologia mostrou-se condizente com a realidade. Os ajustes encontrados para os dados de Endres (1990) e Marques (1997) são apresentados no Anexo II.

Sanada a dificuldade com relação à influência da região da curva, partiu-se para a análise comparativa do efeito da submersão com relação ao comportamento da pressão média ao longo do ressalto. Em linhas gerais, à medida que cresce o fator de submersão do ressalto, pode-se notar um crescimento das pressões médias na parte inicial do ressalto e também um deslocamento do mesmo ao longo da bacia, conforme apresentado na Figura 6.3.

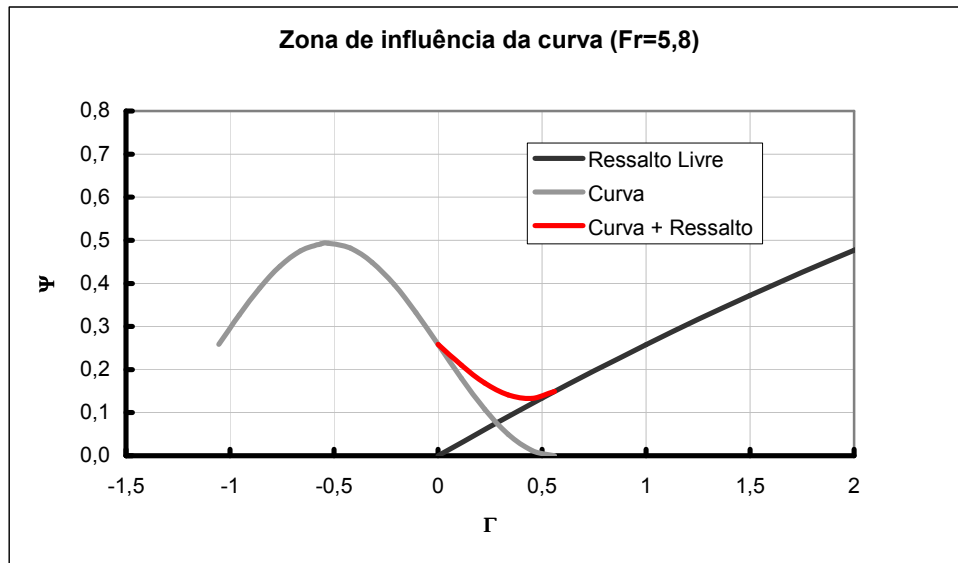


Figura 6.6 - Distribuição das pressões médias na zona de influência da curva

A partir da identificação desse comportamento do ressalto hidráulico, optou-se pela análise de pontos singulares ao longo de seu desenvolvimento, a fim de possibilitar o traçado de ajustes que descrevessem da melhor forma possível o ressalto e a sua dependência com relação à variação da submergência. Foi possível a identificação de cinco pontos principais ao longo do ressalto, quais sejam:

- Ponto 1: correspondente ao início da curva;
- Ponto 2: representativo do ponto médio da curva, onde teoricamente ocorrem as maiores pressões médias;
- Ponto 3: correspondente ao início da bacia de dissipação;
- Ponto 4: relativo à intersecção entre as curvas do ressalto submergidos com o ajuste médio do ressalto livre e;
- Ponto 5: o comportamento do ressalto submergido passa a ser idêntico ao do ressalto livre.

A Figura 6.7 apresenta, para o escoamento com número de Froude igual a 6,7, cada um dos pontos listados. Nota-se que o comportamento do ressalto submergido entre os pontos 4 e 5 encontra-se dentro do intervalo médio relativo às medições do ressalto livre.

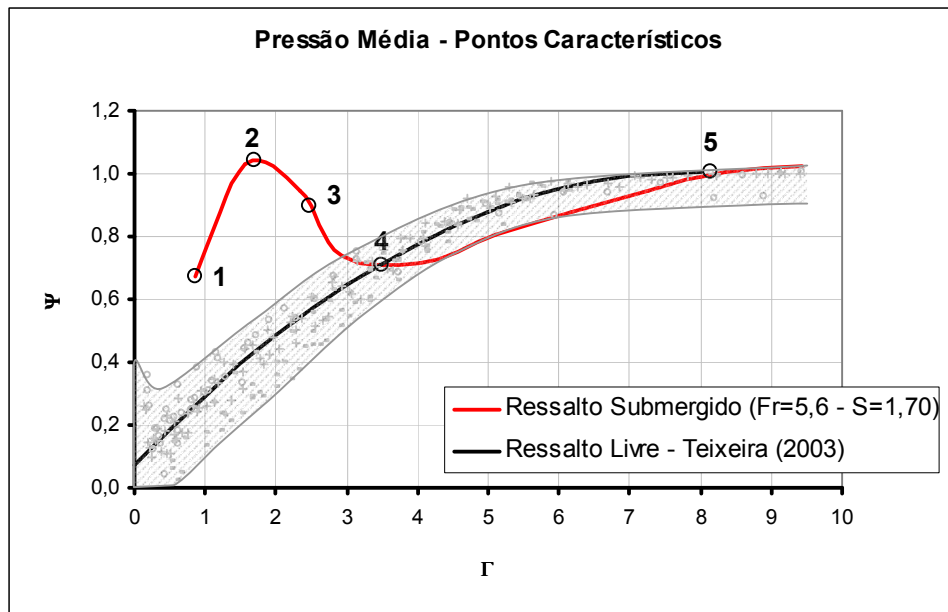


Figura 6.7 - Pontos característicos da distribuição de pressão média do ressalto submergido

Foram propostos diversos ajustes para cada um dos pontos, não obstante ficou claro que os mesmos deveriam incluir tanto a submergência quanto o número de Froude do escoamento. Com relação ao Ponto 1, correspondente ao início da curva, é possível notar essa influência, uma vez que o aumento da pressão média é, de certa maneira, proporcional ao aumento da submergência. A Figura 6.8 apresenta o ajuste encontrado. Cabe destacar que, em função dos ensaios realizados, que não incluíram o caso do ressalto livre, a curva foi extrapolada até o ponto de abscissa igual a zero (linha pontilhada), correspondente ao caso de submergência igual à unidade (Ressalto Livre). Conforme se verifica no ajuste proposto, o valor resultante para o parâmetro relativo à pressão média é igual a zero neste ponto, uma vez que a pressão média reflete apenas a pressão no início do ressalto, correspondente a  $y_1$ , anulando a Pressão Média adimensionalizada ( $\Psi = (y_1 - y_1)/(y_2 - y_1) = 0$ ). Pesquisas complementares deverão contemplar a faixa que foi extrapolada (Tracejado).

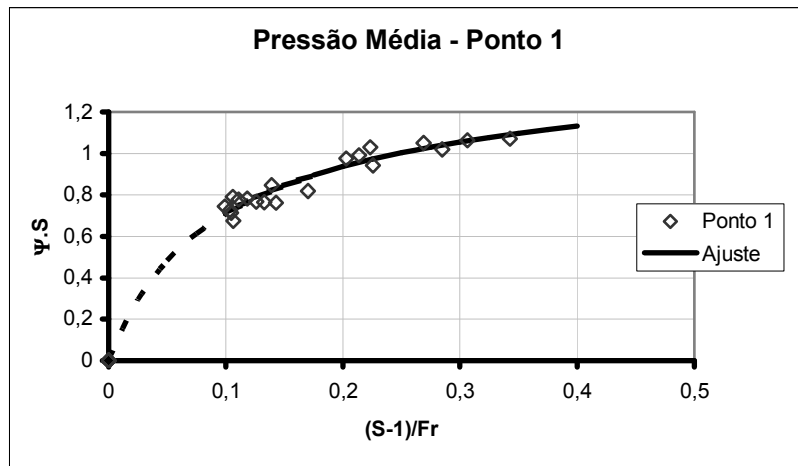


Figura 6.8 - Ajuste para a pressão média no ponto de início da curva.

O Ponto 2, correspondente ao ponto central da curva vertical de concordância entre o vertedouro e a bacia de dissipação, apresentou comportamento semelhante, com uma influência bastante pronunciada da submergência imposta ao escoamento. A Figura 6.9 apresenta o ajuste obtido a partir dos dados experimentais. Um aspecto a ser ressaltado na análise da figura refere-se aos pontos relativos ao ressalto livre ( $(S-1)/Fr = 0$ ), que apresentam uma dispersão um tanto acentuada. Esse comportamento deve-se ao fato de que, para o ressalto livre, não foi possível obter-se dados experimentais, sendo os valores estimados a partir da metodologia de Lin Fu e Jie (1985). A linha pontilhada refere-se a essa faixa estabelecida de forma teórica.

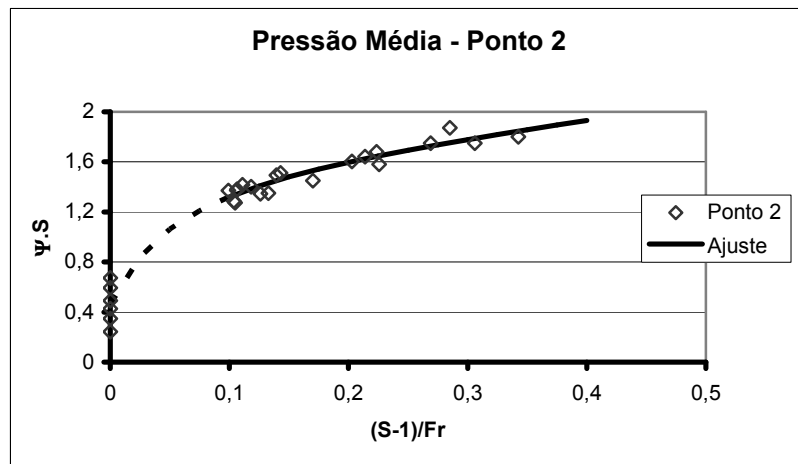


Figura 6.9 - Ajuste para a pressão média na tomada B

Avaliando-se o ponto de encontro da curva com a bacia de dissipação, aqui denominado Ponto 3, nota-se que os dados apresentam um comportamento bastante semelhante aos valores dos demais pontos avaliados, quando analisado o seu comportamento com relação à submergência e o inverso do número de Froude do escoamento. Assim como no caso do Ponto 2, foi utilizada a metodologia de Lin Fu e Jie (1986) para o estabelecimento

das pressões neste ponto com relação ao ressalto livre, uma vez que não foi possível obter dados experimentais nestas condições. Nota-se que há uma maior dispersão dos dados também neste ponto. A Figura 6.10 apresenta o ajuste proposto. A linha pontilhada expressa o comportamento estabelecido a partir de dados teóricos.

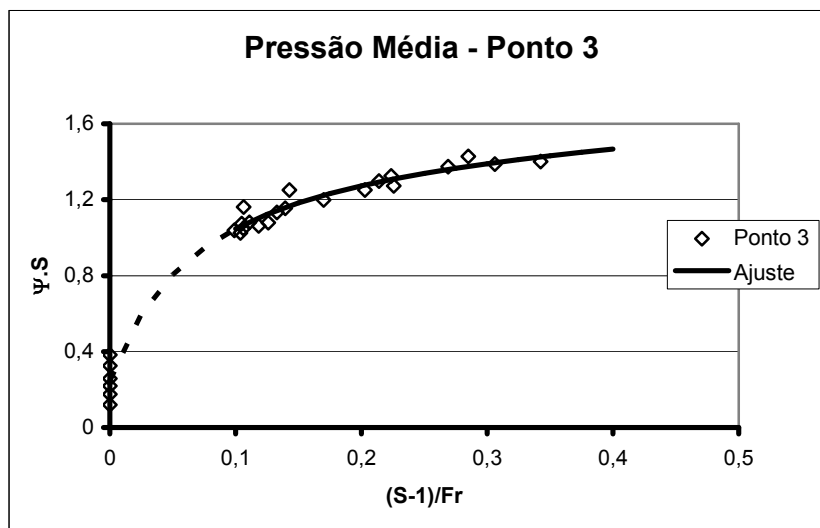


Figura 6.10 – Ajuste para a pressão média no final da curva

Para todos os casos apresentados, isto é, os três primeiros pontos em análise, pode se observar uma significativa influência da submergência do escoamento. Os ajustes obtidos seguem invariavelmente a relação expressa pela Equação 6.2.3. A Tabela 6.4 apresenta os parâmetros para cada ponto.

$$\Psi.S = \frac{(a + b.(S - 1)/Fr)}{(1 + c.(S - 1)/Fr + d((S - 1)/Fr)^2)} \quad \text{Equação 6.2.3}$$

Tabela 6.4 – Parâmetros de ajuste definidos para a distribuição da pressão média ao longo da curva vertical

	a	b	c	d	R <sup>2</sup>
Pressão Média – Ponto 1 (Tomada A)	0,00143	15,045	11,363	-1,4017	0,972
Pressão Média – Ponto 2 (Tomada B)	0,46291	27,545	15,044	-6,7244	0,968
Pressão Média – Ponto 3 (Tomada C)	0,24700	22,159	13,709	-1,6911	0,984

Com relação ao Ponto 4, que corresponde à intersecção das curvas relativas aos ressaltos submergidos e o ressalto livre, é possível verificar uma influência bastante acentuada da submergência do escoamento. A distribuição dos pontos apresenta uma tendência logarítmica, como pode ser visualizado na Figura 6.11.

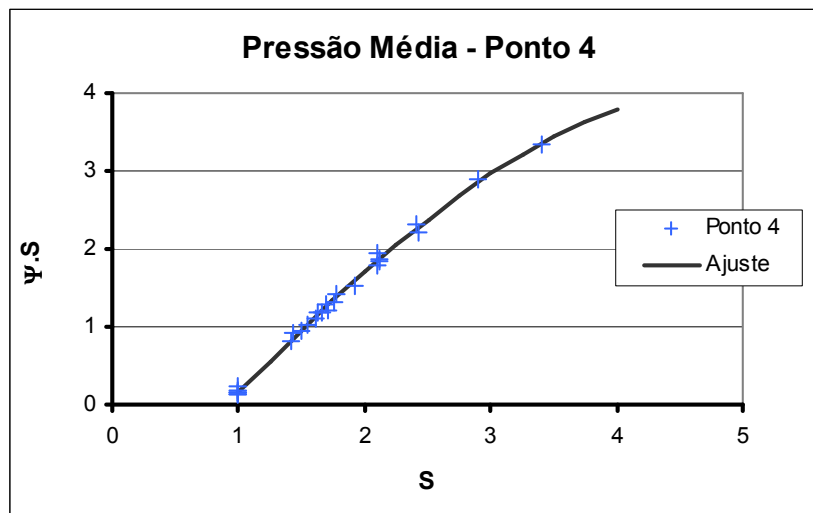


Figura 6.11 - Ajuste para a pressão média no ponto 4

Já a posição do ponto de intersecção com o ressalto livre (Ponto 4) depende diretamente da submergência do escoamento. A partir do ajuste mostrado na Figura 6.12 nota-se que com o aumento da submergência faz com que as pressões médias do ressalto submerso e do ressalto livre encontrem-se em uma posição mais avançada ao longo do ressalto.

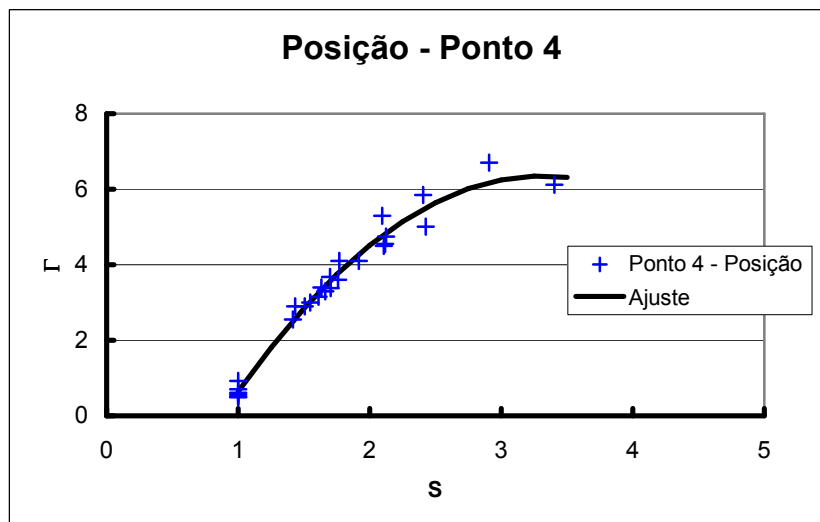


Figura 6.12 - Ajuste para a determinação da posição do ponto 4

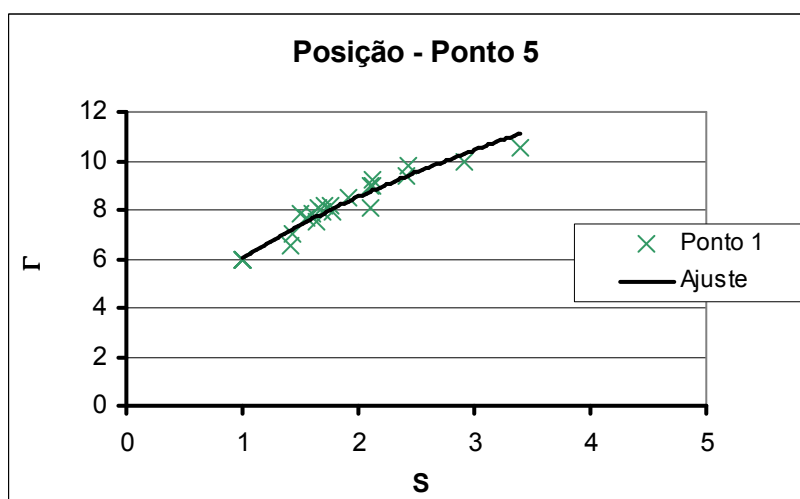
Um aspecto bastante interessante com relação ao ponto de intersecção é que na maioria dos ensaios realizados ele coincide com o ponto de mínima pressão média do escoamento. No traçado do comportamento do ressalto submerso esse fato ganha importância na medida em que apresenta tanto um comportamento similar ao ressalto livre como a mínima pressão média resultante do escoamento. Além disso, sempre em termos médios, no projeto de estruturas similares poderia ser adotado o comportamento do ressalto livre com uma margem reduzida de erro, enquanto o comportamento do ressalto submerso

nessa região não se encontrar perfeitamente delineado. A Tabela 6.5 apresenta de forma resumida os ajustes estabelecidos.

*Tabela 6.5 - Ajustes para o ponto de intersecção entre o ressalto submergido e o ressalto livre*

Posição – Ponto 4 (Intersecção)	$\Gamma = 1,0686.S^2 + 7,0784.S - 5,3693$	$R^2=0,980$	(6.2.4)
Pressão Média – Ponto 4 (Intersecção)	$\Psi.S = \frac{-1,337 + 1,499.S}{1 - 0,0812.S + 0,0345.S^2}$	$R^2=0,997$	(6.2.5)

Avaliando o comportamento do ressalto submergido através das diversas submergências ensaiadas é possível notar ainda que o seu comportamento em certo momento é o mesmo que a evolução do ressalto livre. Normalmente isso ocorre apenas após a sequência de pontos já descritos, isto é, em posições já bastante próximas do fim do ressalto. A Figura 6.13 apresenta o comportamento do chamado Ponto 5, que é o ponto no qual o comportamento do ressalto submergido passa a ser idêntico ao do ressalto livre.



*Figura 6.13 - Ajuste para a posição do ponto 5*

Posição – Ponto 5 (Idêntico ao ressalto livre)	$\Gamma = 6,030.S^{0,500}$	$R^2=0,955$	(6.2.6)
--	----------------------------	-------------	---------

Nota-se a partir das curvas apresentadas que o comportamento do ressalto submergido apresenta uma dependência acentuada do grau de submergência submetido ao escoamento. Através da metodologia utilizada é possível estabelecer-se o desenvolvimento do ressalto hidráulico ao longo da bacia de dissipação a partir do conhecimento de dados básicos do escoamento, como as alturas conjugadas e nível de jusante. A Figura 6.14 apresenta um exemplo da utilização dessa metodologia, desenvolvida para um modelo em escala reduzida



1:50 da UHE Porto Colômbia, comparada com a medição na estrutura real ( $Q_p = 4.000 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $S = 1,44$ ).

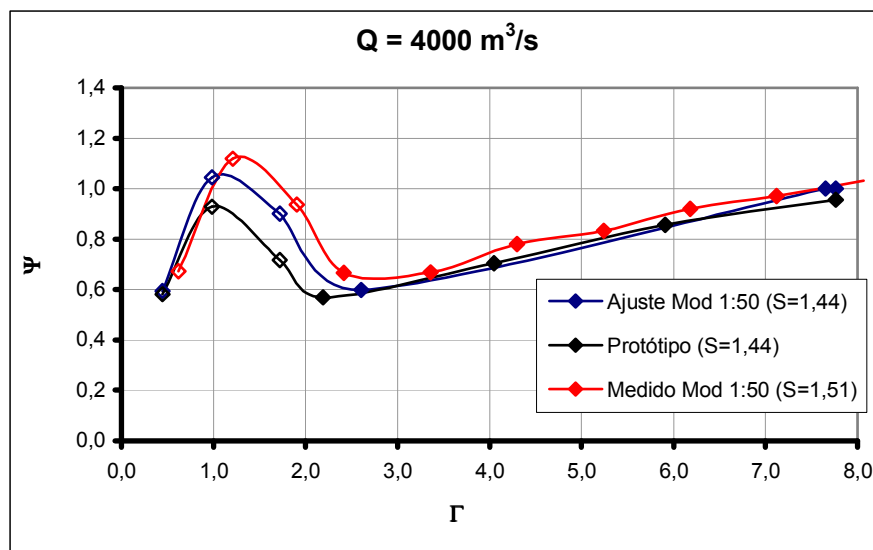


Figura 6.14 - Comparação entre o ajuste estabelecido para a pressão média e a medição em protótipo ( $Q_p = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$ )

Através da análise da Figura 6.14 observa-se que o método desenvolvido descreve de forma satisfatória o comportamento do ressalto submerso quando comparado com as medições em escala real e também no modelo reduzido. É possível verificar, entretanto, que o modelo sugerido apresenta algumas discrepâncias, principalmente no trecho curvo. Isso se deve possivelmente à maior dispersão dos dados neste local, que está sujeito tanto a sobrepressões resultantes da mudança de direção do fluxo como aos esforços resultantes da macroturbulência do ressalto hidráulico. Cabe destacar ainda os efeitos da aeração do escoamento nas medições, uma vez que modelo e protótipo apresentam uma significativa diferença quando se considera essa característica. Teixeira (2008) sugere que há um efeito da escala nas medições em modelo reduzido, resultante, possivelmente, das condições de aeração. Contudo, os resultados apresentaram na maioria dos casos comportamento, em se tratando de projetos desse tipo de estrutura, a favor da segurança.

Não obstante, este cenário ensejou uma análise estatística mais apurada, na qual foram definidas curvas envoltórias aos ajustes médios estabelecidos, de forma a ter-se uma idéia do grau de dispersão natural dos dados. Utilizando-se a distribuição estatística de Student, com um nível de significância de 95%, estabeleceu-se uma envoltória superior e uma curva envoltória inferior referente ao ajuste médio utilizado. A Figura 6.15 apresenta as envoltórias estabelecidas. Nota-se que, com exceção do ponto de início do ressalto (Tomada dc, conforme Figura 5.5), a curva referente às medições de protótipo enquadra-se satisfatoriamente no ajuste definido.

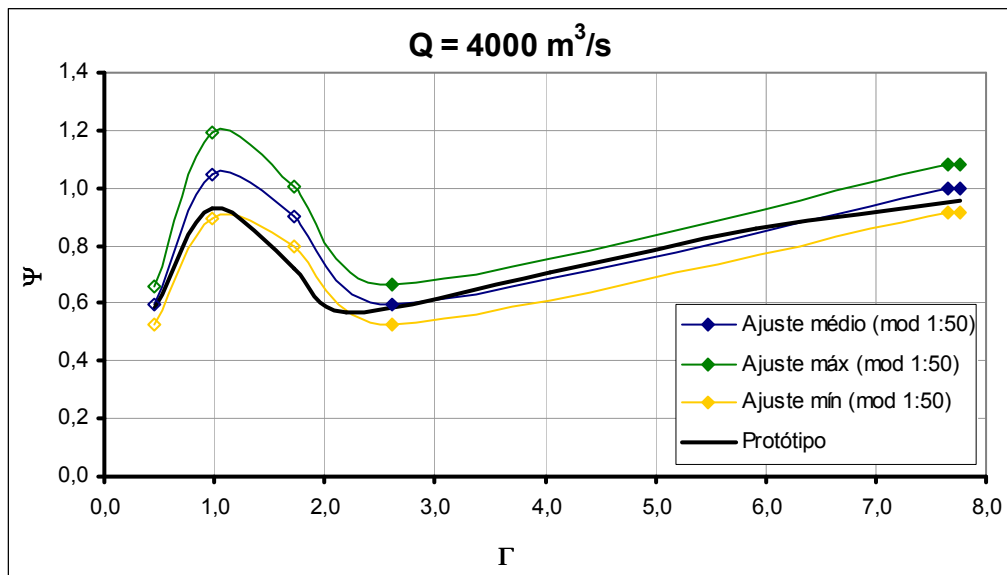


Figura 6.15 - Intervalo de confiança para o ajuste da pressão média ( $Q_p = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$ )

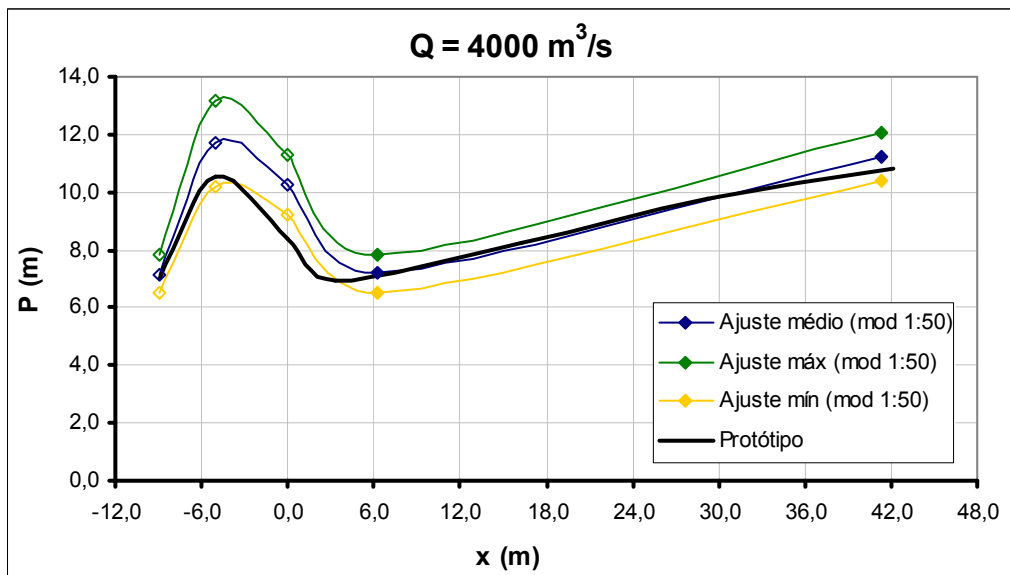


Figura 6.16 - Intervalo de confiança para o ajuste da pressão média ( $Q_p = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$  - Dados de protótipo).

A Figura 6.16 apresenta a comparação entre os dados medidos no protótipo e o intervalo de confiança ajustado. É possível notar que as principais diferenças, conforme esperado, encontram-se na região próxima à curva. A Tabela 6.6 apresenta a diferença relativa resultante da aplicação do ajuste para cada uma das tomadas medidas no protótipo. É possível verificar que as maiores diferenças relativas situam-se na região do trecho curvo (Tomadas da, db e dc). No entanto, é importante destacar que, frente à energia de entrada no ressalto, isto é, a energia a ser dissipada na bacia, estas diferenças podem ser consideradas de pequena monta.

Tabela 6.6 - Erro relativo entre as medidas do ajuste e a medição de protótipo.

	$Q_p$ 1.000 m <sup>3</sup> /s Ht=13,64		$Q_p$ 2.000 m <sup>3</sup> /s Ht=13,82		$Q_p$ 3.000 m <sup>3</sup> /s Ht=13,91		$Q_p$ 4.000 m <sup>3</sup> /s Ht=13,67	
Tomada	$\Delta P$ (m.c.a.)	Diferença relativa (%)	$\Delta P$ (m.c.a.)	Diferença relativa (%)	$\Delta P$ (m.c.a.)	Diferença relativa (%)	$\Delta P$ (m.c.a.)	Diferença relativa (%)
da	0,70	11,13	0,51	7,82	0,63	9,88	0,14	1,98
db	0,99	11,68	1,19	12,85	1,50	15,64	1,16	11,05
dc	0,74	8,41	1,09	12,60	1,84	22,81	1,84	21,87
d1	0,59	6,57	0,58	6,87	0,99	13,77	0,79	11,50
d3	0,30	3,23	0,30	3,51	0,36	4,51	-0,22	-2,64
d5	0,33	3,47	0,45	4,57	0,60	6,38	0,06	0,57
d7	0,20	2,03	0,04	0,42	0,51	5,03	0,44	4,07

As figuras apresentadas a seguir demonstram o comportamento do ajuste estabelecido quando comparado com os dados de protótipo (medições para vazão de 1.000 m<sup>3</sup>/s, 2.000 m<sup>3</sup>/s, 3.000 m<sup>3</sup>/s e 4.000 m<sup>3</sup>/s). É possível notar que, com uma significância de 95 %, os dados estimados a partir do modelo situam-se levemente acima do intervalo máximo definido no estudo.

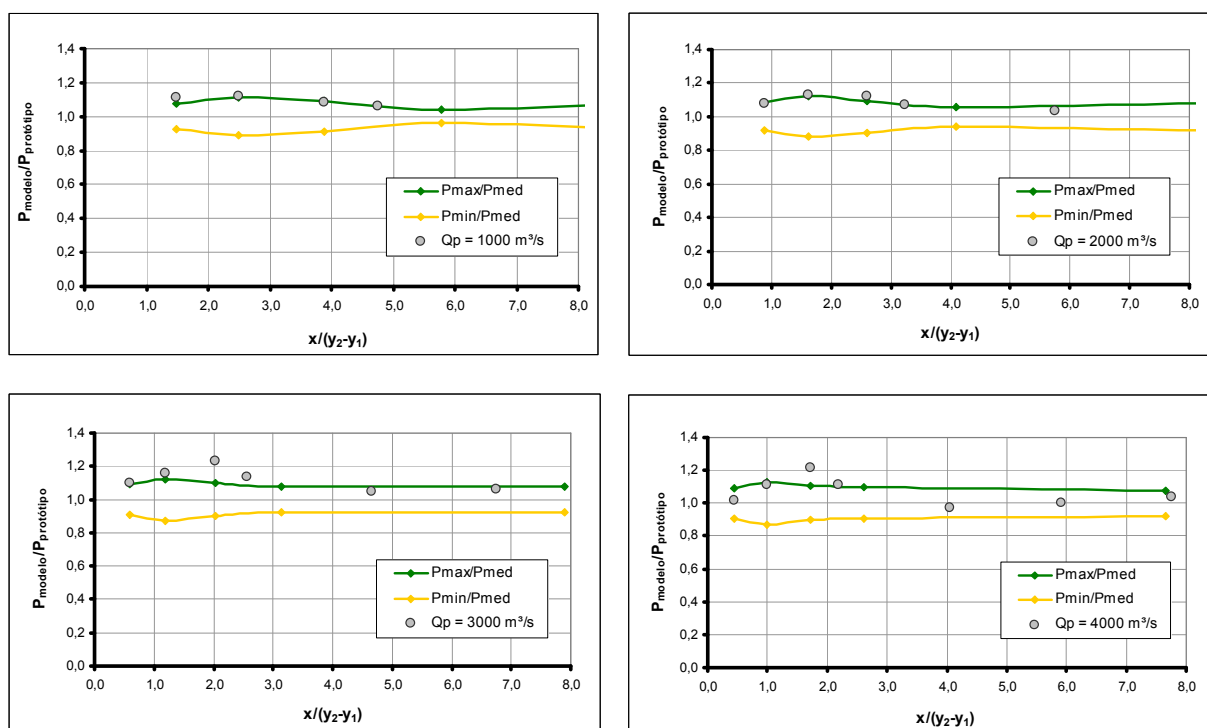


Figura 6.17 - Intervalo de confiança para a pressão média.

Pelo exposto, pode-se concluir que a metodologia descreve de maneira satisfatória o comportamento da pressão média ao longo do ressalto. Nota-se que há uma influência significativa da submergência do ressalto e que a dispersão dos dados é consideravelmente maior junto à curva de concordância. Em comparação com o ressalto livre, a pressão média no

ressalto submerso apresenta um comportamento bastante diverso, uma vez que há um incremento nas pressões principalmente na parte inicial da bacia. Isso implica na necessidade de uma maior atenção quando do projeto deste tipo de estrutura, uma vez que, como ficou claro a partir dos ajustes demonstrados, o afogamento da estrutura leva ao aumento das pressões no início da bacia.

A partir da análise dos resultados, depreende-se que o grau de afogamento do ressalto exerce considerável influência sobre o comportamento da pressão média, de maneira que o aumento da submersão resulta em um acréscimo da pressão, em termos médios, sobre a bacia. Da mesma forma, os efeitos cinemáticos do escoamento exercem influência inversamente proporcional ao comportamento da submersão, uma vez que, para um mesmo grau de afogamento, quanto maior o número de Froude, menores as pressões médias resultantes. Cabe salientar também que na região da curva vertical de concordância as incertezas são maiores, o que fica evidenciado a partir da maior dispersão dos dados nesta parte da estrutura, dada a dificuldade de análise do escoamento no local. Avaliando-se os valores de erros relativos quando da comparação com a estrutura em escala real, verifica-se, de qualquer sorte, que há uma concordância satisfatória entre o ajuste proposto e as medições realizadas.

### **6.2.2 Comportamento da Flutuação de Pressão**

O conhecimento do comportamento das flutuações de pressão ao longo do ressalto hidráulico é imprescindível para a descrição fiel do fenômeno e também como subsídio para o projeto confiável de estruturas de dissipação de energia em obras hidráulicas. Através da identificação de zonas de maior atuação das sobrepressões ao longo da bacia, é possível estabelecer importantes cenários de projeto desse tipo de estrutura.

De maneira bastante similar ao relato quanto à distribuição de pressões médias ao longo do ressalto submerso, são um tanto escassos os dados relativos a este tipo de estrutura, com destaque para trabalhos como de Pinto *et al* (1988), Marques *et al* (1999) e Teixeira (2003). Utilizando a adimensionalização apresentada por Marques *et al* (1999), no qual adota-se o coeficiente de submersão  $S$ , o comportamento para o modelo em estudo é apresentado pela Figura 6.18. Os pontos vazados referem-se às tomadas de pressão dispostas na curva vertical de concordância entre o vertedouro e a bacia de dissipação e o ajuste traçado é o definido por Teixeira (2003), utilizando dados de Endres (1990) de ressaltos do tipo livre. A parte sombreada refere-se à faixa de dispersão dos valores de flutuação determinados por outros pesquisadores.

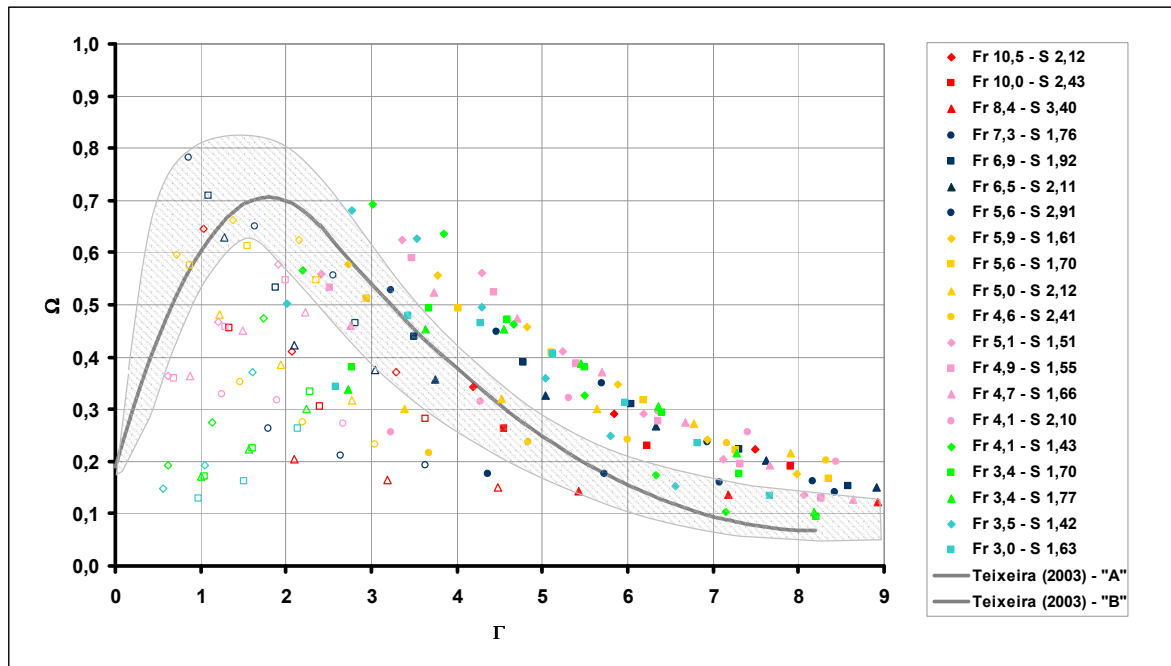


Figura 6.18 - Flutuação de pressão adimensionalizada conforme proposição de Marques (1999), utilizada por Teixeira (2003).

Avaliando a figura é possível identificar um comportamento bastante diverso daquele apresentado analisando-se apenas o ressalto livre, o que de certa forma torna visível a influência da submersão do escoamento da distribuição das flutuações de pressão ao longo do ressalto. Outro aspecto importante refere-se ao comportamento peculiar dos pontos dispostos na curva vertical, dado que os mesmos não apresentam, em uma análise visual, um ajuste definido.

A partir dessas constatações, optou-se pela reavaliação da utilização da adimensionalização proposta por Marques *et al* (1999) e utilizada por Teixeira (2003), destacando que os pesquisadores contavam somente com medições correspondentes a ressalto livres. Assim, avaliando os dados das medições realizadas, concluiu-se por utilizar o quadrado do inverso da submersão, conforme segue:

$$\Omega_s = \left( \frac{\sigma}{Ht} \right) \cdot \left( \frac{y_2}{y_1} \right) \cdot \left( \frac{y_2^2}{T_w} \right)^2 \quad \text{Equação 6.2.7}$$

$$\Gamma = \frac{x}{y_2 - y_1} \quad \text{Equação 6.2.8}$$

onde:

$\Omega_s$  = desvio padrão adimensionalizado para o ressalto hidráulico submerso;  
 $\sigma$  = desvio padrão da amostra na posição x;  
 $Ht$  = perda de carga no ressalto;  
 $y_2$  = altura conjugada lenta;  
 $y_1$  = altura conjugada rápida;

Tw = altura de água no fim do ressalto;  
x = distância a partir do início do ressalto;  
 $\Gamma$  = posição relativa no ressalto;

A Figura 6.19 apresenta o comportamento dos dados deste estudo em comparação com o ajuste estabelecido por Teixeira (2003).

De maneira geral, apesar da adimensionalização apresentada favorecer um comportamento mais homogêneo dos dados, tem-se ainda uma extensa região na qual os pontos não apresentam uma tendência definida, principalmente nas posições mais próximas da curva de concordância. Da mesma forma que ocorreu em relação à distribuição das pressões médias, entendeu-se por avaliar pontos característicos do comportamento das flutuações de pressão ao longo do ressalto, já que se mostrou inviável a determinação de um ajuste para o conjunto de dados obtidos dos ensaios.

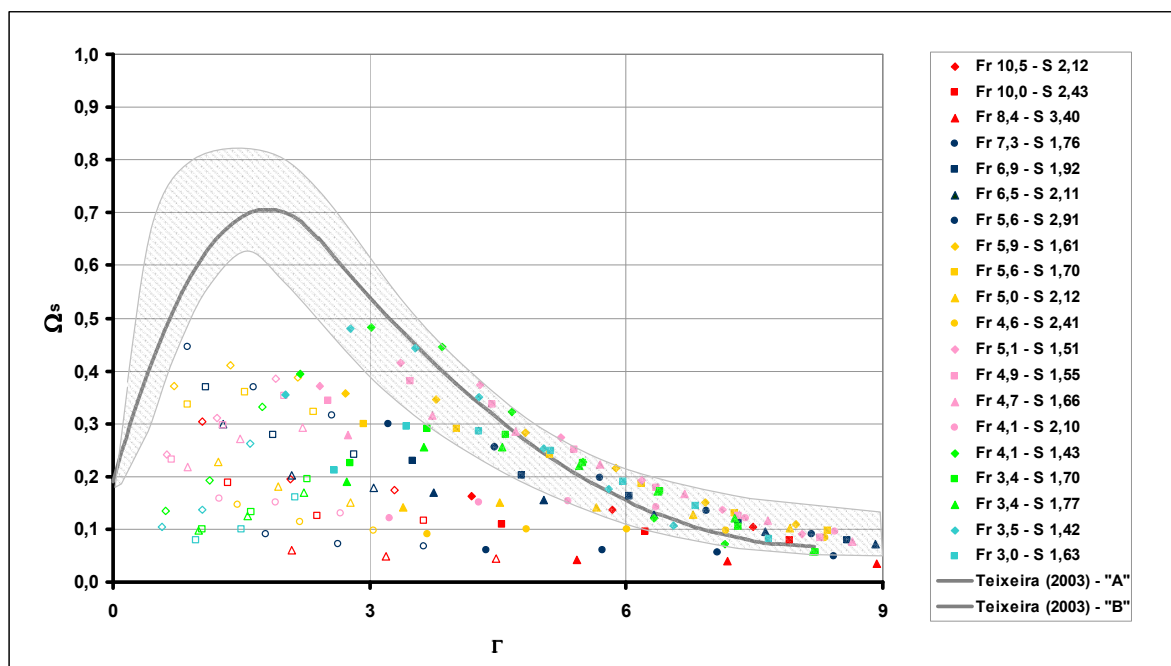


Figura 6.19 - Comportamento das flutuações de pressão com relação ao ressalto livre adotando-se a adimensionalização proposta.

Avaliando o cenário descrito, qual seja a maior dispersão dos dados na região inicial do ressalto, supõe-se que este comportamento está relacionado à ocorrência da curva vertical de concordância do vertedouro com a bacia de dissipação, conforme já visualizado no caso das pressões médias. De forma semelhante ao ocorrido com a média, fez-se necessária a identificação do comportamento das flutuações para o caso do ressalto livre, uma vez que o modelo contava com a restrição de permitir a simulação apenas de ressaltos afogados, possibilitando o traçado do comportamento do ressalto a partir do incremento da

submergência. No entanto, devido à pequena quantidade de estudos semelhantes, isto é, que abordassem a distribuição e pressões na curva vertical, não foi possível realizar uma análise teórica do comportamento da flutuação de pressão nessa região para o caso do ressalto livre.

De forma análoga à utilizada no caso das pressões médias, estabeleceu-se um ajuste particular relativo ao ressalto livre sem a utilização de dados que teoricamente estariam sob efeito da curva vertical, isto é, retirando os mesmos pontos já desconsiderados na avaliação da pressão média. A Figura 6.20 apresenta o conjunto de dados utilizados.

$$\Omega = 0,1918.\Gamma^2 + 0,6062.\Gamma + 0,2219 \quad \text{para } 0 < \Gamma < 2,2 \text{ e} \quad \text{Equação 6.2.9}$$

$$\Omega = 0,0139.\Gamma^2 + 0,2339.\Gamma + 1,0738 \quad \text{para } 2,2 < \Gamma < 8,0 \quad \text{Equação 6.2.10}$$

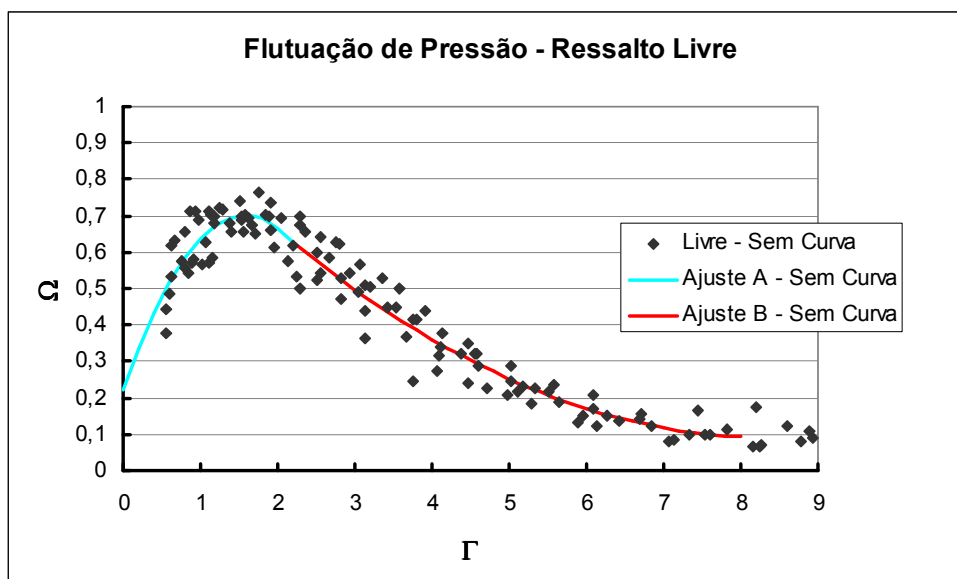


Figura 6.20 - Comportamento da flutuação de pressão do ressalto livre (excluídos os pontos sob influência da curva)

Uma vez estabelecido o comportamento característico do ressalto livre para este tipo de estrutura, iniciou-se a análise de pontos peculiares na distribuição das flutuações. Utilizou-se uma metodologia muito similar à adotada no caso das pressões médias. A Figura 6.21 identifica o comportamento do desvio padrão dos dados obtidos nos ensaios realizados e aquele considerando o ressalto livre para uma vazão equivalente de protótipo igual a 4000 m<sup>3</sup>/s. Os gráficos representativos da gama de números de Froude ensaiados são apresentados no Anexo IV.

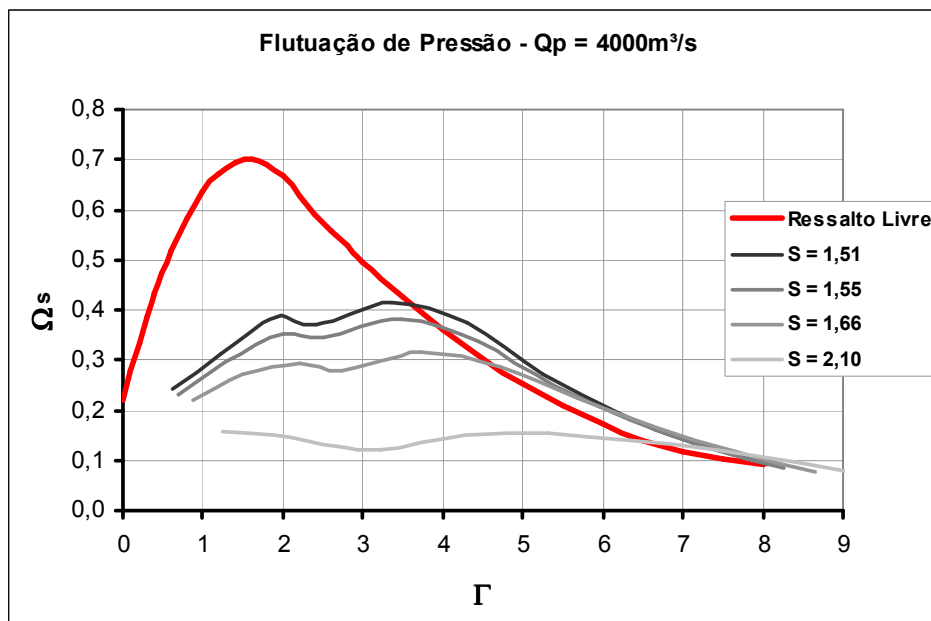


Figura 6.21 - Variação da flutuação de pressão do ressalto hidráulico de acordo com a submergência ( $Q_p = 4000\text{m}^3/\text{s}$ )

Assim como ocorreu com a pressão média, consideraram-se os pontos da curva como pontos característicos do comportamento da flutuação, de maneira que se observou cada um desses pontos, segundo seu posicionamento na estrutura:

- Ponto 1: correspondente ao início da curva (Tomada da – Figura 5.5);
- Ponto 2: representativo do ponto médio da curva, onde teoricamente ocorrem as maiores pressões médias (Tomada db);
- Ponto 3: correspondente ao início da bacia de dissipação (Tomada dc);

Destaca-se, entretanto, que estes pontos não foram avaliados para o caso do ressalto livre, em função das restrições do modelo e da ausência de uma metodologia teórica apurada para a sua mensuração.

A partir da análise da Figura 6.21 é possível notar pelo menos mais três pontos característicos do comportamento da flutuação de pressão:

- Ponto de Intersecção (d): onde ocorre o encontro das curvas correspondentes aos ressaltos submergidos com a curva do ressalto livre;
- Ponto de Máximo (e): onde fica caracterizada a máxima flutuação de pressão; e
- Ponto de Inflexão (f): onde é possível visualizar uma mudança na orientação da concavidade da curva.

Devido à distribuição bastante diversa da flutuação de pressão em função do número de Froude do escoamento, o que pode ser visualizado no Anexo IV, foi desenvolvida uma metodologia de análise dos pontos listados. Uma vez identificados os pontos característicos para cada ensaio realizado, optou-se pelo traçado de uma linha média que identificasse o



comportamento de cada ponto. Assim, para cada submergência retirou-se um ponto característico, conforme exemplifica a Figura 6.22. A linha tracejada refere-se ao ajuste médio. Pode-se verificar ainda que extrapolando as linhas de tendência para o caso do ressalto livre, tanto o ponto de máximo como o de inflexão tendem a um valor máximo comum.

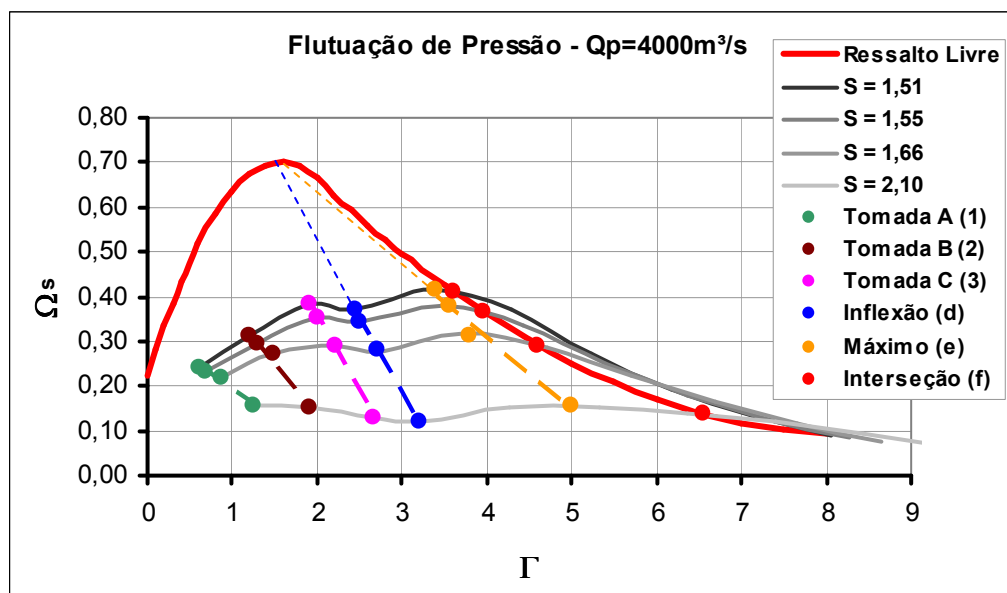


Figura 6.22 - Pontos característicos da flutuação de pressão do ressalto submergido.

Da mesma forma que a abordagem adotada para a descrição da distribuição das pressões médias, esses pontos permitem o traçado de curvas de ajustes que determinam o comportamento de pontos característicos da flutuação de pressão, possibilitando a estimativa de seus valores sobre a estrutura. Entretanto, é importante notar que o comportamento geral do desvio padrão, quando avaliado o ressalto livre, é diverso da evolução da pressão média, onde os valores das pressões excedem aqueles correspondentes ao livre. No caso do desvio, os valores são, na totalidade das submergências ensaiadas, menores que aqueles desenvolvidos na pressão média.

No que tange aos pontos situados na curva, a partir da análise do conjunto de dados medidos, conforme Figura 6.19, verifica-se uma intensa variabilidade nas flutuações nesses pontos, com uma grande dispersão dos dados. Isso se deve, principalmente, à presença do rolo sobre a curva, uma vez que com o aumento da submergência o ressalto passa a iniciar sobre a estrutura vertente. Entretanto, pode-se constatar que os pontos apresentam em sua totalidade um valor adimensionalizado menor do que os do ressalto livre. Essa redução na amplitude das flutuações deve-se, possivelmente, à lâmina d'água sobre a estrutura, acarretando no amortecimento das pressões no local.

As figuras a seguir apresentam os ajustes estabelecidos para a determinação do comportamento das flutuações de pressão na curva vertical. É importante destacar que não foram utilizados dados relativos ao ressalto livre para estes pontos, uma vez que não se dispunha de dados relativos a essa condição, frente às limitações do modelo, conforme já apresentado, e nem mesmo uma abordagem teórica que possibilitasse inferir com apuro o comportamento das flutuações de pressão nessa região. De maneira geral, fica caracterizada a influência tanto do número de Froude do escoamento como da submergência a que o mesmo encontra-se submetido. Pela análise dos ajustes efetuados observa-se que a influência do número de Froude é diferente ao longo da curva, o que pode ser observado através da potência à qual o número de Froude está elevado em cada um dos ajustes. No início da curva (1) a potência é 2, na parte central da curva (2) o valor de Froude segue uma potência de 1,5 e na parte final (3) a potência corresponde a 1. Apesar disso, cabe destacar que ainda assim os pontos no início da curva, possivelmente em função do fato de a energia de entrada ser maior, estão mais dispersos. A Tabela 6.7 apresenta um resumo dos ajustes definidos. Neste caso, as posições das tomadas foram determinadas geometricamente, isto é, a partir do projeto da instalação. Os pontos característicos identificados conforme a evolução do ressalto ao longo da bacia encontram-se listados na Tabela 6.8.

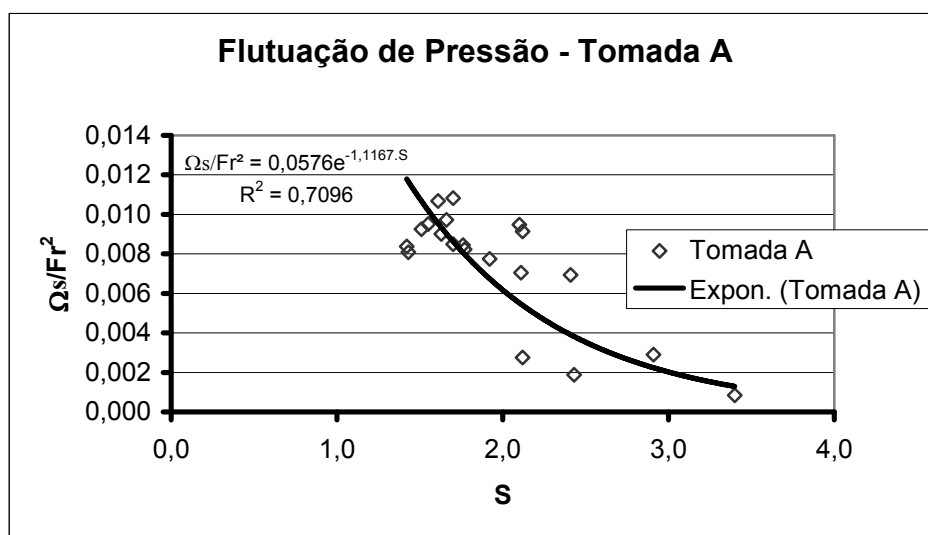


Figura 6.23 - Ajuste para a flutuação de pressão no ponto de início da curva vertical (1) em função da submergência do escoamento.

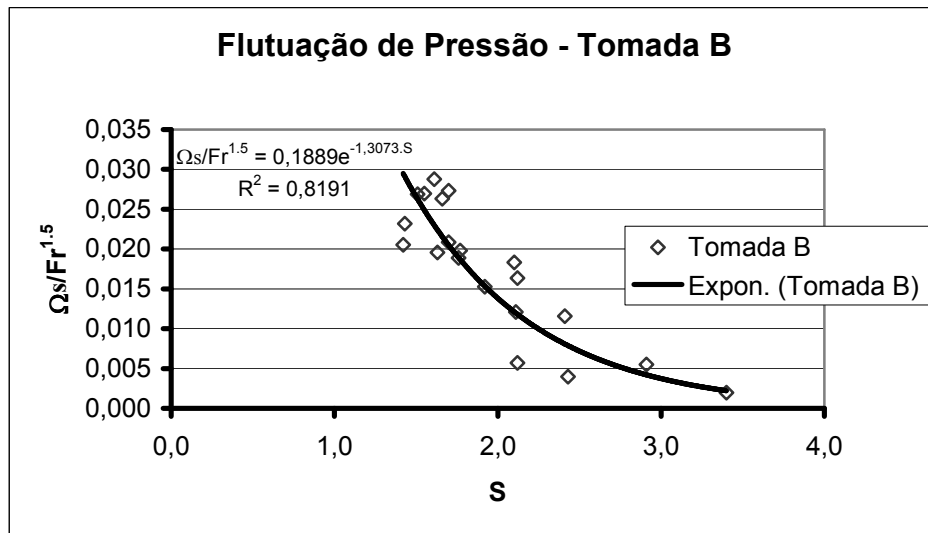


Figura 6.24 - Ajuste para a flutuação de pressão no ponto próximo ao centro da curva vertical em função da submergência do escoamento.

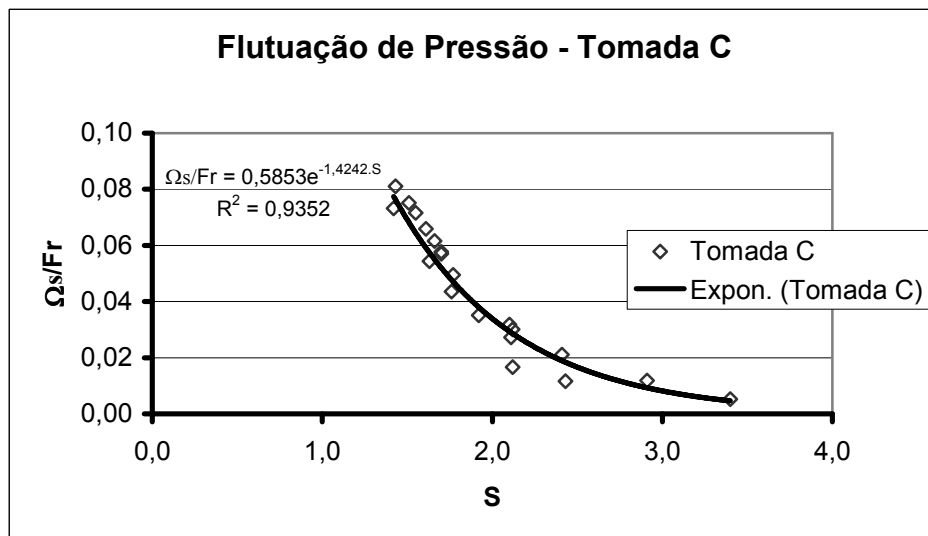


Figura 6.25 - Flutuação de pressão no final da curva vertical em função da submergência do escoamento.

Tabela 6.7 - Ajustes para determinação da flutuação de pressão na curva vertical

Flutuação de Pressão – Tomada A	$\frac{\Omega s}{Fr^2} = 0,0576 \cdot e^{-1,1176 \cdot S}$	(6.2.11)
Flutuação de Pressão – Tomada B	$\frac{\Omega s}{Fr^{1,5}} = 0,1889 \cdot e^{-1,3073 \cdot S}$	(6.2.12)
Flutuação de Pressão – Tomada C	$\frac{\Omega s}{Fr} = 0,5853 \cdot e^{-1,4242 \cdot S}$	(6.2.13)

Tabela 6.8 - Pontos característicos da flutuação de pressão para o ressalto submergido

Q (m³/s)	S	Inflexão		Máximo		Intersecção	
		$\Gamma$	$\Omega_s$	$\Gamma$	$\Omega_s$	$\Gamma$	$\Omega_s$
997,64	1,00	(1,75)	(0,710)	1,75	0,710		
997,64	2,12	3	0,180	4,80	0,155	7,10	0,1150
1004,17	2,43	3,2	0,118	5,60	0,100	-	-
1005,80	3,40	4	0,048	7,15	0,040	-	-
2000,00	1,00	(1,75)	(0,710)	1,75	0,710		
2000,00	1,76	2,56	0,316	3,90	0,275	5,45	0,2100
1995,57	1,92	2,82	0,242	4,15	0,215	6,30	0,1550
1995,57	2,11	3,05	0,178	4,40	0,165	7,50	0,1000
1995,57	2,91	3,64	0,066	5,00	0,060	-	-
3000,00	1,00	(1,75)	(0,710)	1,75	0,710		
3000,00	1,61	2,75	0,360	3,60	0,350	4,45	0,3050
3005,05	1,70	2,9	0,300	3,95	0,290	5,20	0,2350
2995,44	2,12	3,45	0,140	4,90	0,150	6,70	0,1300
3005,05	2,41	3,6	0,090	6,00	0,100	7,80	0,0950
4001,03	1,00	(1,75)	(0,710)	1,75	0,710		
4001,03	1,51	2,75	0,360	3,40	0,415	3,60	0,4100
4006,36	1,55	2,9	0,300	3,55	0,380	3,95	0,3675
4011,68	1,66	3,45	0,140	3,80	0,315	4,60	0,2925
4019,68	2,10	3,6	0,090	5,00	0,155	6,55	0,1400
5995,32	1,00	(1,75)	(0,710)	1,75	0,710		
5995,32	1,43	2,05	0,375	3,15	0,485	3,10	0,4825
6007,67	1,70	2,5	0,21	3,95	0,295	4,85	0,2700
6020,03	1,77	2,6	0,18	4,10	0,260	5,20	0,2350
7998,56	1,00	(1,75)	(0,710)	1,75	0,710		
7998,56	1,42	1,9	0,325	2,90	0,485	3,15	0,4750
8005,44	1,63	2,4	0,19	3,70	0,300	4,93	0,2550

- Entre parênteses os valores correspondentes ao ponto de máximo do ressalto livre, considerados idênticos ao ponto de inflexão, conforme Figura 6.2.2.;
- Os espaços vazios referem-se ao próprio ressalto livre, não caracterizando a intersecção das curvas;
- Células marcadas com hífen (-) referem-se às maiores submergências ensaiadas, nas quais não restou visível a intersecção das curvas.

Com relação ao ponto de inflexão, este geralmente ocorre ligeiramente após o final da curva. Através da metodologia utilizada para a identificação dos pontos, foi possível o traçado de dois ajustes que permitem a avaliação da posição de ocorrência e também a amplitude da flutuação de pressão em função da submergência do escoamento. Através da análise do conjunto de dados, pode-se notar que com o crescimento da submergência, ocorre um deslocamento do ponto de inflexão para a esquerda, isto é, tendendo em direção à parte central da bacia. Já com relação aos valores do desvio padrão neste ponto, a tendência identificada é de um decréscimo do valor das flutuações correspondente a um aumento da submergência. A Figura 6.26 e a Figura 6.27 apresentam os ajustes alcançados. As equações correspondentes são apresentadas na Tabela 6.9.

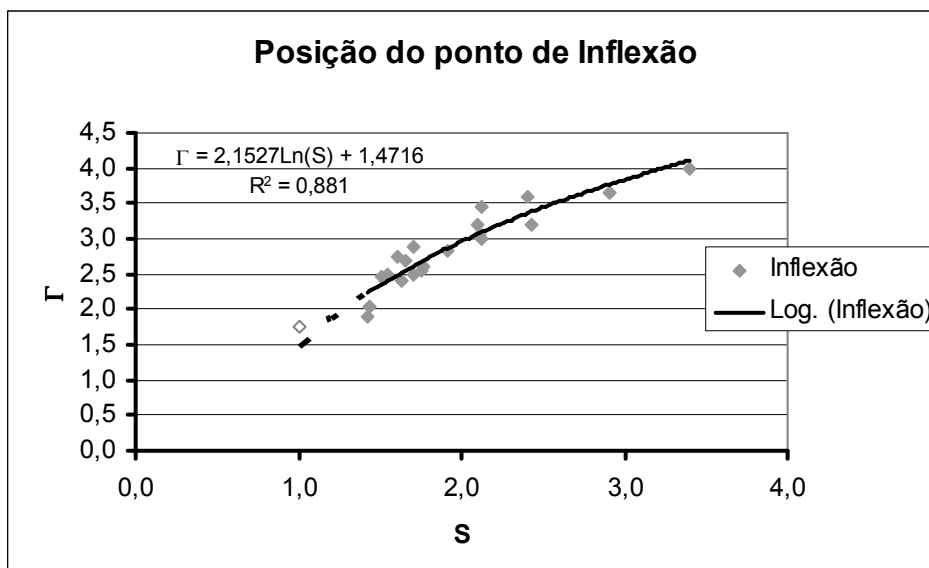


Figura 6.26 - Ajuste para o estabelecimento da posição do ponto de inflexão (d)

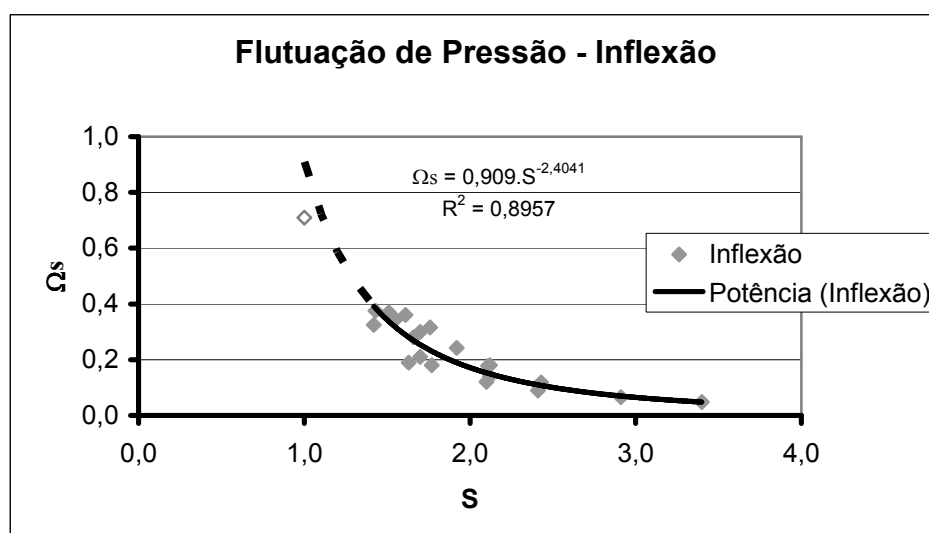


Figura 6.27 - Ajuste para o estabelecimento da flutuação de pressão no ponto de inflexão (d)

A análise do comportamento do ponto de inflexão no caso do ressalto submergido quando comparado ao comportamento geral da flutuação no ressalto livre, indica que esse ponto tende ao ponto de máximo quando da redução da submergência do escoamento. O ponto vazado nas figuras acima corresponde ao ponto de máximo no ajuste estabelecido para o caso livre. Nota-se que ao extrapolar a curva ajustada (linha tracejada), tanto para a posição quanto para a flutuação de pressão (Figura 6.26 e Figura 6.27, respectivamente), os pontos seguem a tendência ajustada para o ponto de inflexão. Cabe destacar que, em decorrência de limitações do modelo, não foi possível realizar ensaios na faixa de submergência próxima à unidade, de forma que este comportamento deveria ser confirmado a partir de dados experimentais.

Tabela 6.9 - Ajustes para o ponto de inflexão da flutuação de pressão

Posição do ponto de inflexão (d)	$\Gamma = 2.1527 \cdot \ln(S) + 1.4716$	(6.2.14)
Flutuação de pressão no ponto de inflexão (d)	$\Omega_s = 0,909 \cdot S^{-2.4041}$	(6.2.15)

Com relação ao ponto de máximo, é possível notar um comportamento bastante semelhante ao apresentado pelo ponto de inflexão. A Figura 6.28 e a Figura 6.29 apresentam o comportamento avaliado. A Tabela 6.10 apresenta os ajustes determinados.

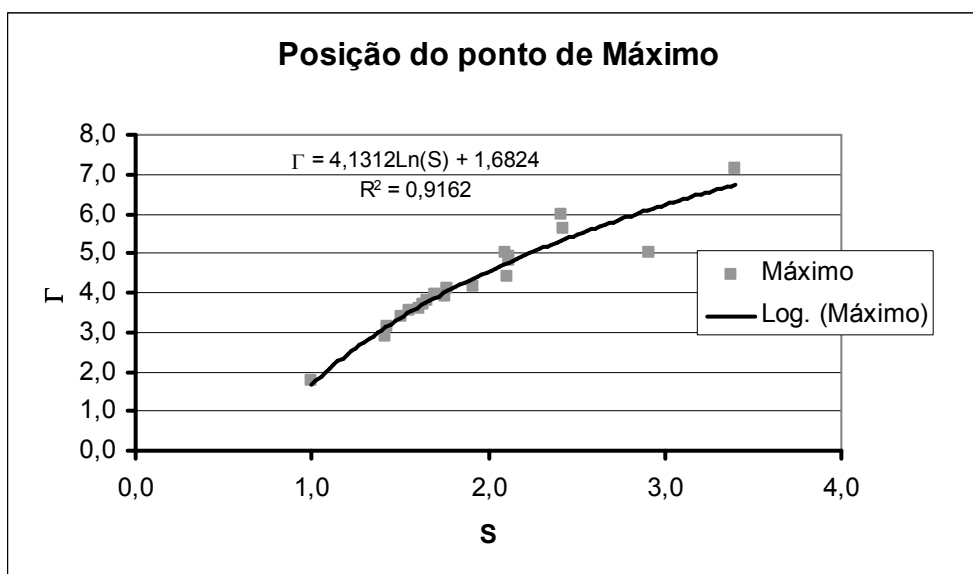


Figura 6.28 - Ajuste para o estabelecimento da posição do ponto de máximo

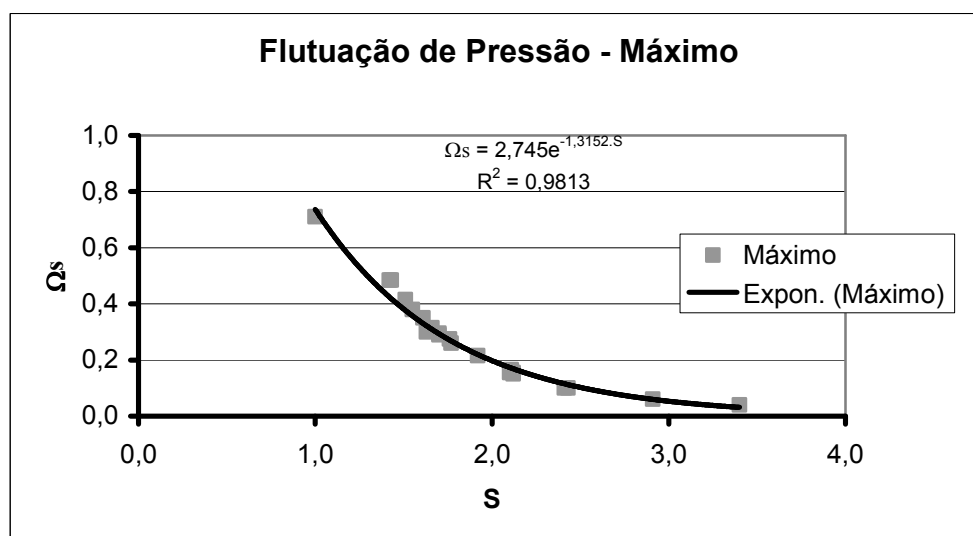


Figura 6.29 - Ajuste para o estabelecimento da flutuação de pressão no ponto de máximo

Tabela 6.10 - Ajustes para o ponto de máximo da flutuação de pressão

Posição do ponto de máximo	$\Gamma = 4,1312 \cdot \ln(S) + 1.6824$	(6.2.16)
Flutuação de pressão no ponto de máximo	$\Omega_s = 2,745 \cdot e^{-1,3152 \cdot S}$	(6.2.17)

Comportamento semelhante ocorre com relação ao ponto de intersecção com o ressalto livre. É importante notar que após estes pontos, a distribuição da flutuação de pressão segue o comportamento conhecido do ressalto livre. A Figura 6.30 e a Figura 6.31 apresentam o comportamento do ponto de intersecção. Os ajustes determinados estão resumidos na Tabela 6.11.

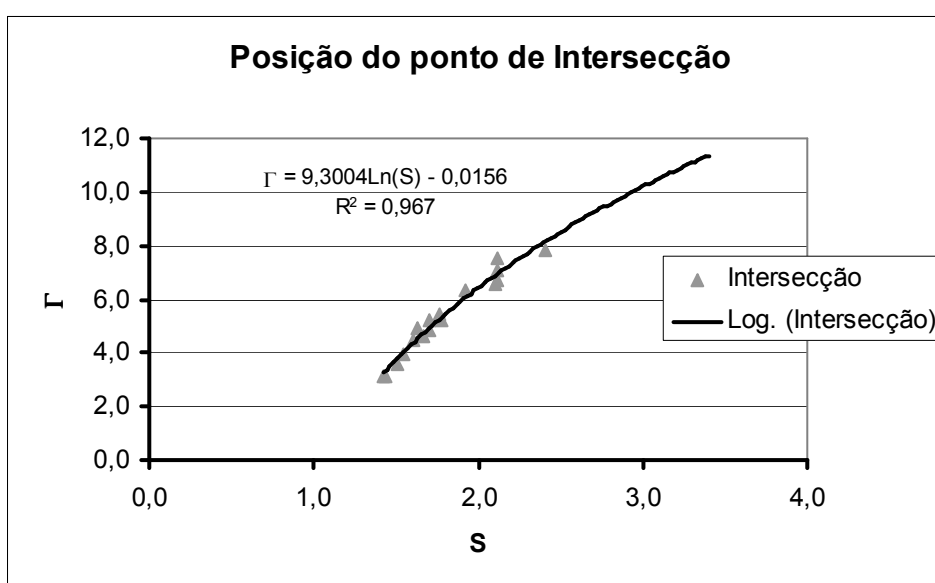


Figura 6.30 - Ajuste para o estabelecimento da posição do ponto de intersecção

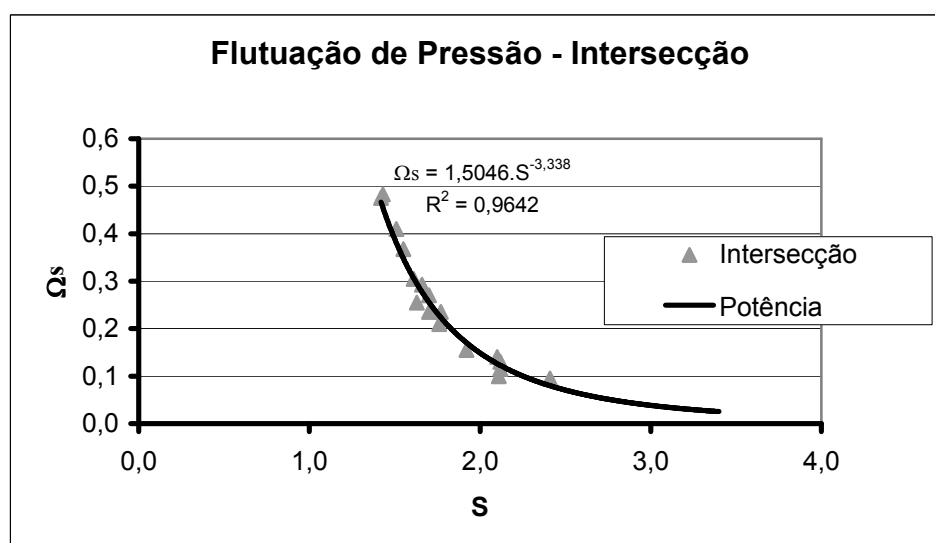


Figura 6.31 - Ajuste para o estabelecimento da flutuação de pressão no ponto de intersecção.

Tabela 6.11 - Ajustes para o ponto de intersecção com a curva correspondente ao ressalto livre

Posição do ponto de intersecção	$\Gamma = 9,3004 \cdot \ln(S) - 0,0156$	(6.2.18)
Flutuação de pressão no ponto de intersecção	$\Omega S = 1,5046 \cdot S^{-3,338}$	(6.2.19)

Assim como ocorre com a pressão média, pode-se notar a partir das curvas apresentadas que o comportamento do ressalto submerso com relação à flutuação de pressão apresenta uma dependência significativa do grau de submergência do escoamento. Além disso, pode-se destacar a influência tanto dos efeitos da velocidade do fluxo como da profundidade do escoamento, representados pelo número de Froude, nos ajustes das tomadas da curva vertical. Isto é visível a partir dos ajustes apresentados, onde a potência à qual o número de Froude encontra-se elevado reduz-se ao longo do desenvolvimento da curva. Através de utilização da metodologia apresentada é possível o estabelecimento do comportamento da flutuação de pressão ao longo do ressalto. A Figura 6.32 apresenta um exemplo da utilização dessa metodologia, desenvolvida para um modelo em escala reduzida (1:50), comparada com medição em protótipo ( $Q_p = 4.000 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $S = 1,44$ ).

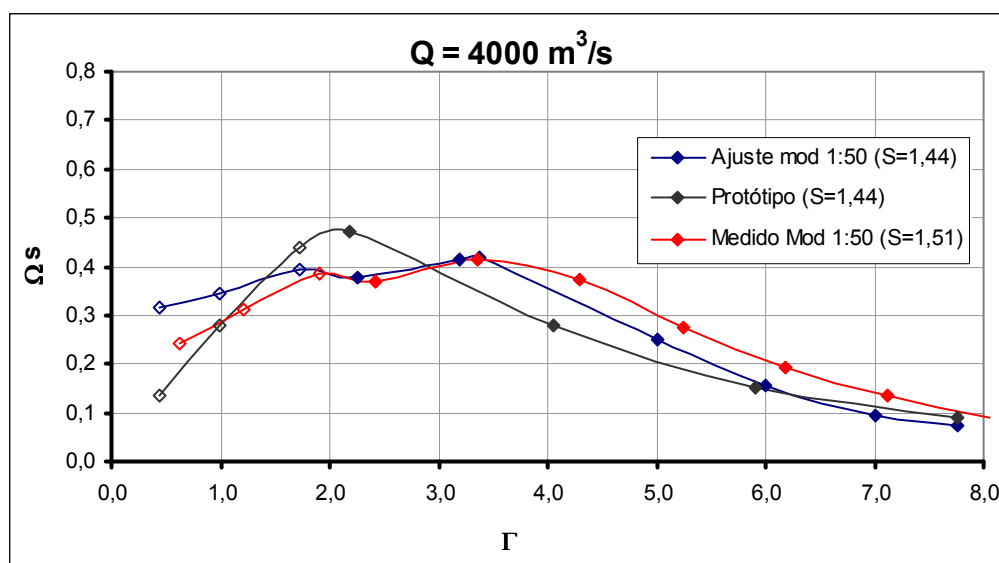


Figura 6.32 - Comparação entre o ajuste estabelecido para a flutuação de pressão e a medição em protótipo ( $Q_p = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$ )

Analisando-se a Figura 6.32 é possível observar que a metodologia estabelecida descreve de maneira eficiente o comportamento das flutuações de pressão ao longo do ressalto submerso, com discrepâncias maiores nos valores ajustados para as posições ao longo da curva de concordância, principalmente quando comparado com o protótipo. Entretanto, julga-se que esta dispersão é aceitável, em função das condições de contorno e das próprias



características do fenômeno, caracterizadas por grande variabilidade, conforme pode ser visualizado na Figura 6.33.

De forma diversa ao que foi verificado no caso da pressão média, em alguns casos os valores podem resultar contra os critérios de segurança quando do projeto deste tipo de estrutura. Contudo, a análise estatística dos valores resultantes dessa metodologia indica que os resultados apresentaram-se, na maioria dos casos, dentro de um intervalo de confiança estabelecido como condizente à dispersão dos dados. Utilizando-se a mesma metodologia já adotada na análise do ajuste da pressão média, foram estabelecidas curvas envoltórias aos ajustes médios definidos para a flutuação de pressão, de maneira a possibilitar a afirmação com um nível de certeza pré-definido de uma faixa de valores aceitáveis para este caso. Foi utilizada a distribuição estatística de Student, com um nível de significância de 95%, estabelecendo-se uma envoltória superior e uma curva envoltória inferior em relação ao ajuste médio determinado. A Figura 6.33 apresenta as envoltórias estabelecidas utilizando-se os valores adimensionalizados. A Figura 6.34 apresenta o mesmo cenário, no entanto visualiza-se os dados de pressão resultante sobre a bacia. Nota-se que, com exceção do ponto de início da curva (Tomada dA), o comportamento relativo às medidas de protótipo enquadram-se de maneira satisfatória ao ajuste definido.

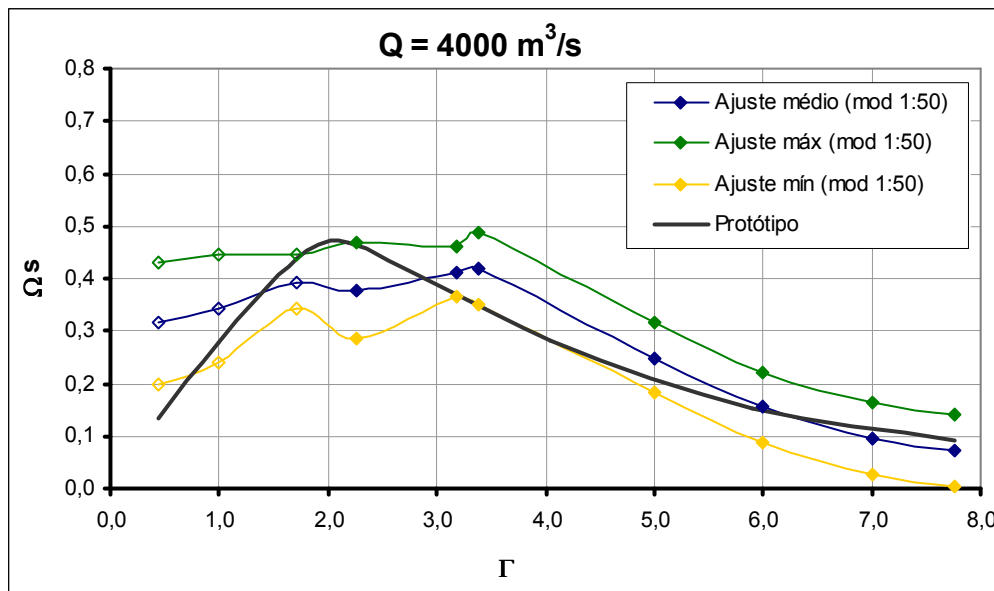


Figura 6.33 - Intervalo de confiança para o ajuste da flutuação de pressão adimensionalizada ( $Q_p = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$ )

Analisando as curvas resultantes do ajuste proposto e avaliando a dispersão esperada (com uma significância de 95 %) é possível vislumbrar que a metodologia expressa as condições desenvolvidas no protótipo. É claro que, conforme extensivamente abordado ao longo do trabalho, a grande dispersão dos dados em algumas regiões, principalmente na zona

de influência da curva, implica em comportamento um tanto desfavorável quando da comparação ajuste-protótipo, porém em todos os casos esses valores são a favor da segurança. Cabe destacar ainda que Teixeira (2008) verificou haver uma influência da escala do modelo nas medições deste tipo de parâmetro o que pode explicar esse comportamento diverso.

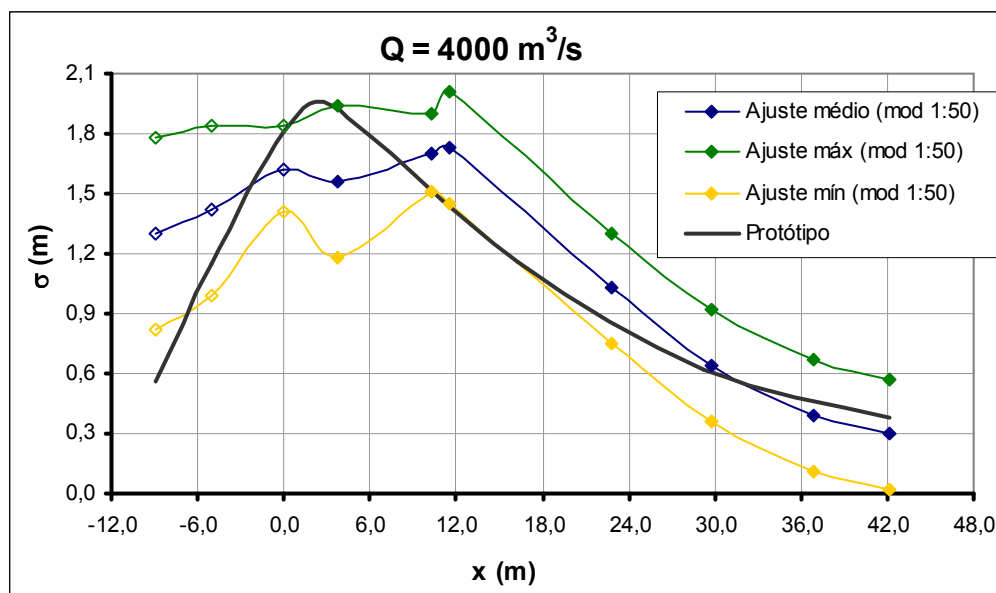


Figura 6.34 - Intervalo de confiança para o ajuste da flutuação de pressão ( $Q_p = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$  - Dados de protótipo).

Outro aspecto que deve ser ressaltado é a posição algumas vezes divergente da posição de máximo e de intersecção do ajuste proposto para o desvio padrão. Ocorre que para algumas vazões ensaiadas o ponto de máximo se confunde com o ponto de intersecção entre as curvas do ressalto livre e submergido. Analisando a Figura 6.33 observa-se que entre as posições  $\Gamma = 3$  e  $\Gamma = 4$  os pontos oriundos dos ajustes encontram-se bastante próximos, resultando quase que em uma descontinuidade na curva. O caso mais importante pode ser visto no Anexo V e refere-se aos ensaios que correspondem à vazão de protótipo  $Q_p = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$ . Para contornar esta peculiaridade resultante da metodologia utilizada, optou-se pelo traçado de uma linha média entre os pontos, o que mostrou ser eficaz para a descrição do parâmetro.

As figuras apresentadas a seguir demonstram o comportamento do ajuste estabelecido quando comparado com os dados de protótipo (medições para vazão de  $1.000 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $2.000 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $3.000 \text{ m}^3/\text{s}$  e  $4.000 \text{ m}^3/\text{s}$ ). É possível notar que, com uma significância de 95 %, os dados estimados a partir do modelo situam-se levemente acima do intervalo máximo definido no estudo. No entanto, destaca-se que tal comportamento indica que a utilização da metodologia resulta em valores a favor da segurança, implicando, portanto, na pior situação para este tipo de estrutura.

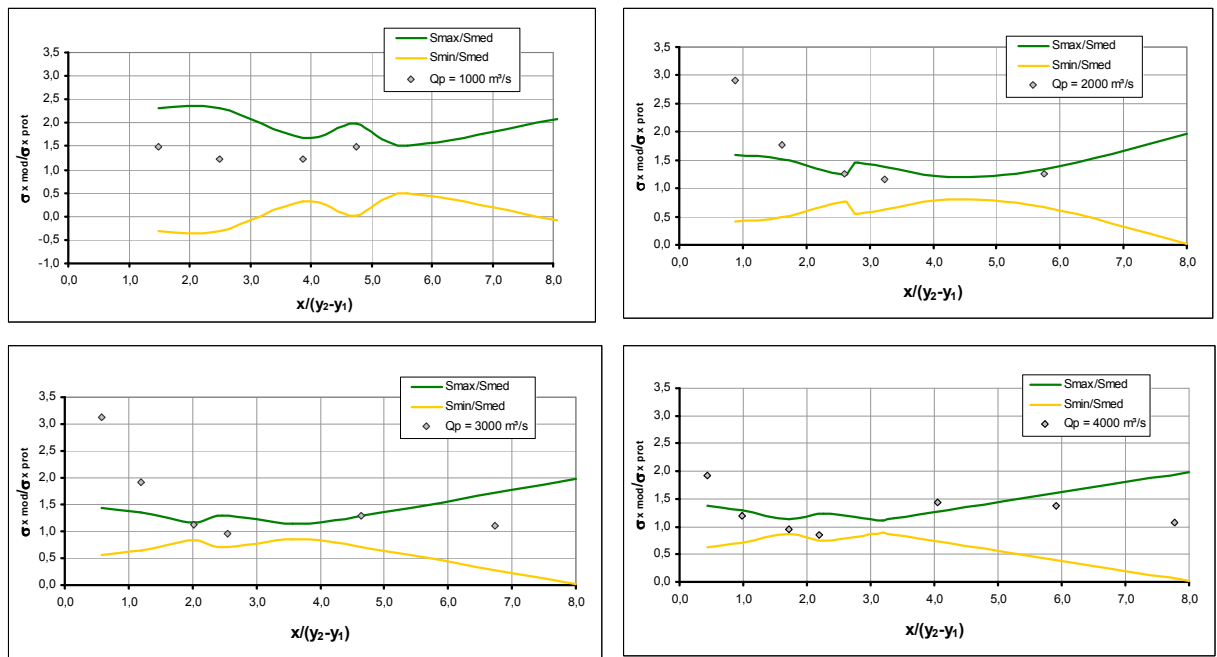


Figura 6.35 - Intervalos de confiança para a flutuação de pressão

Pelo exposto, pode-se concluir que a metodologia descreve de maneira satisfatória o comportamento da pressão média ao longo do ressalto. Nota-se que há uma influência significativa da submergência do ressalto, com a redução da flutuação de pressão junto à bacia à medida que ocorre um incremento no afogamento do fluxo. Verificou-se também que os valores da flutuação de pressão no ressalto submergido divergem daquele normalmente descrito pela bibliografia para o ressalto livre, sendo imprescindível sua consideração em termos de projeto. Também é necessário destacar que, apesar dos resultados satisfatórios encontrados, é visível a grande dispersão dos dados coletados.

### 6.2.3 Coeficiente de Assimetria

A análise do comportamento do coeficiente de assimetria permite o estabelecimento de pontos de interesse ao projetista de estruturas de dissipação por ressalto hidráulico. O ponto onde ocorre a mudança de sinal do coeficiente de assimetria ( $A_d$ ), conforme Lopardo (1987), corresponde ao ponto de descolamento, isto é, o local onde a velocidade começa a apresentar uma componente vertical mais significativa. Teixeira (2003) estabelece este ponto como sendo correspondente à  $L_d \cong 4,0.(Y_2 - Y_1)$ . Marques et al (1997) cita que o valor mínimo da assimetria ao longo do ressalto corresponde à posição do final do rolo situada na posição  $L_r \cong 6,0.(Y_2 - Y_1)$ .

Através da avaliação da Figura 6.36 é possível verificar um comportamento bastante distinto quando comparados os dados medidos (ressalto submergido) e os dados de diversos

pesquisadores para o ressalto livre. Verifica-se uma redução nos valores absolutos da assimetria junto à parte inicial do ressalto, com valores variando em uma faixa de -0,5 até 0,5, frente a um valor máximo próximo a 2,0 para o caso livre. De maneira geral, os dados mostram-se bastante dispersos, sem uma tendência bem definida ao longo do desenvolvimento do ressalto. Pode-se notar ainda que o ponto onde os valores mudam de sinal, caracterizado como ponto de descolamento, desloca-se a jusante, entre as posições 6 e 8. Avaliando-se a influência da submergência é possível notar um acréscimo no valor da assimetria com um aumento da submergência. Não foi realizada, entretanto, uma análise mais aprofundada destes comportamentos, uma vez não se enquadrar dentre os objetivos propostos pelo trabalho, de forma que estas características devem ser ainda melhor analisadas. Os pontos vazados são os correspondentes à parte curva de concordância entre o vertedouro e a bacia.

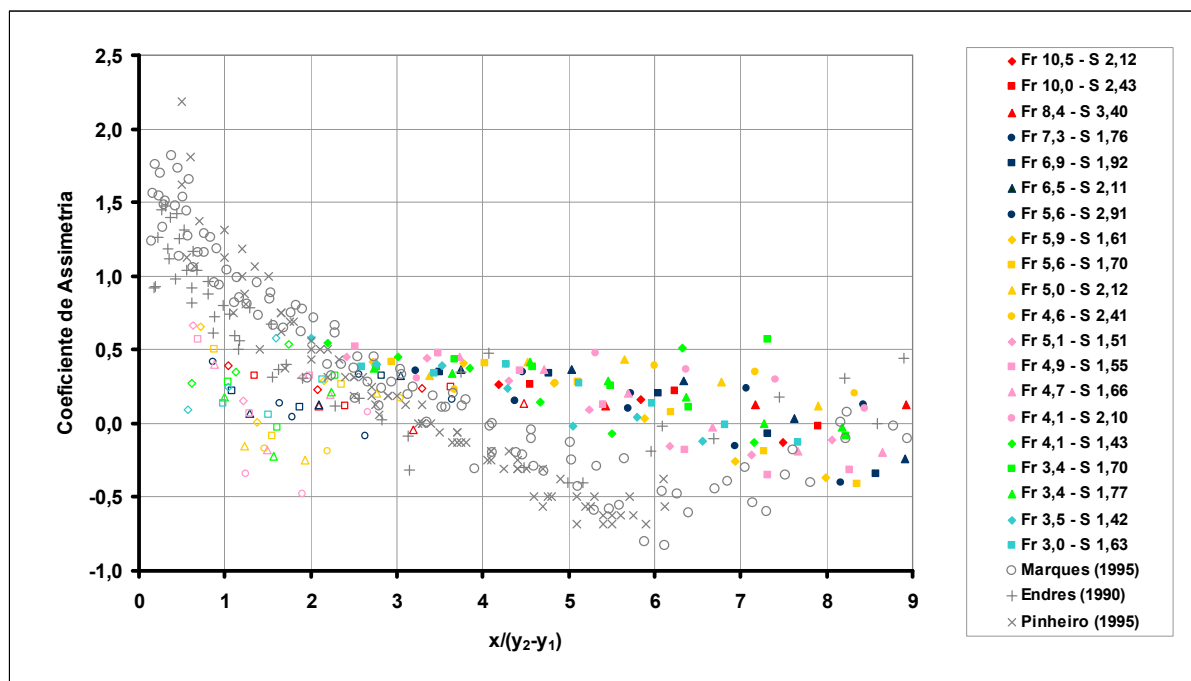


Figura 6.36 - Distribuição do coeficiente de Assimetria, comparada com dados de ressalto livre – Marques (1995), Endres (1990) e Pinheiro (1995).

#### 6.2.4 Coeficiente de Curtose

O coeficiente de curtose de uma distribuição de dados indica o seu grau de achatamento, considerando-se em relação a uma distribuição normal. Para a distribuição normal, a curtose é igual a 3 (Spiegel, 1993). A Figura 6.37 apresenta o comportamento do coeficiente de curtose dos dados medidos no modelo 1:50 da UHE Porto Colômbia (Ressalto Submergido) e também dados de outros pesquisadores, porém para a hipótese do ressalto livre. A partir da análise dos dados é flagrante a diferença quando comparados os ressalto

submergido e livre. Enquanto na região inicial do ressalto os valores relativos ao caso livre são bastante acentuados, no ressalto submergido ocorre uma queda significativa nesses valores. Para valores de posição adimensional maiores que 2, os dados apresentam uma tendência muito semelhante ao que ocorre com o ressalto livre. Os pontos vazados referem-se àqueles situados na curva vertical. Da mesma forma que ocorreu para a distribuição da assimetria, não foi realizada uma análise mais aprofundada do comportamento da curtose, sendo necessária uma análise complementar no futuro.

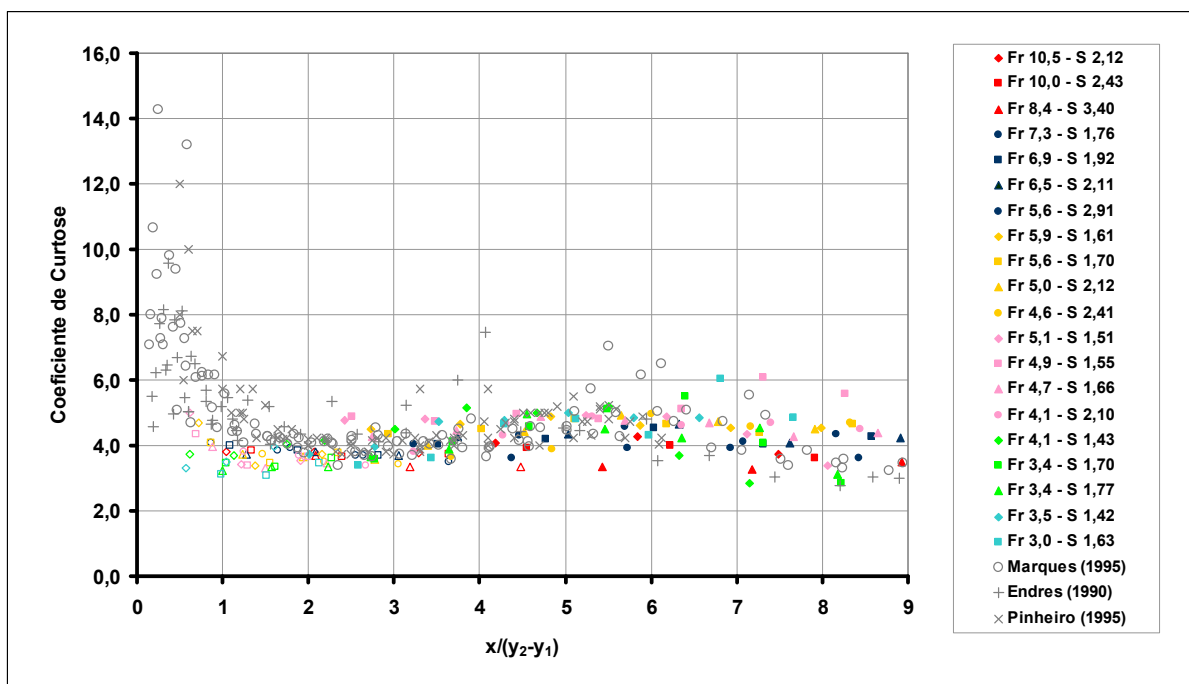


Figura 6.37 - Distribuição do coeficiente de Curtose comparada com dados de ressalto livre – Marques (1995), Endres (1990) e Pinheiro (1995).

### 6.2.5 Coeficiente Estatístico de Distribuição de Probabilidades

O projeto de estruturas de dissipação vale-se normalmente de estimativas médias de pressão resultantes do escoamento sobre as mesmas. Comumente adota-se como prerrogativa básica o estabelecimento de distribuições lineares de pressão, variando desde a altura rápida do escoamento em sua parte inicial até a altura conjugada lenta no seu final. No entanto, de forma correspondente às flutuações de pressão, tem-se uma intensa variação ao longo do ressalto hidráulico das pressões extremas, que ocorrendo de forma sucessiva podem ocasionar danos representativos nas estruturas de dissipação.

Outro fator característico das pressões resultantes do ressalto hidráulico é o fato de não seguirem uma distribuição normal. Devido principalmente a grande variação da assimetria e também da curtose ao longo do ressalto é difícil definir uma única distribuição estatística que

descreva todo o comportamento do ressalto. Resultados obtidos por Cerezer (2008) indicam que as pressões extremas estimadas pela distribuição generalizada de valores extremos (GEV) podem fornecer valores dentro de uma margem de erro aceitável para este tipo de estrutura. Teixeira (2003) estabeleceu uma metodologia para o cálculo das pressões extremas no ressalto livre, através do emprego da pressão média, das flutuações de pressão e de um coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades (N), conforme equação abaixo, procurando definir uma lei para este coeficiente ao longo do ressalto.

$$P_{x\%} = \overline{P_x} \pm N \cdot \sigma_{s_x} \quad \text{Equação 6.2.20}$$

onde:

$P_{x\%}$  = Pressão com probabilidade de ser inferior ou igual a um determinado valor em um determinado ponto do ressalto hidráulico (X).

$\overline{P_x}$  = Pressão média em um determinado ponto do ressalto hidráulico (X)

$\sigma_{s_x}$  = Desvio padrão da amostra de pressão em um determinado ponto do ressalto hidráulico (X).

Este trabalho propõe-se a avaliar a metodologia de Teixeira (2003) na situação de ressalto submerso, de forma a estabelecer uma relação específica para esta situação, que normalmente ocorre em escala real. Dessa forma, dispondo dos dados de pressão média, flutuação de pressão e os valores de pressão com diferentes probabilidades de ocorrência, 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%. A Figura 6.38 apresenta a distribuição longitudinal de parte dos coeficientes calculados.

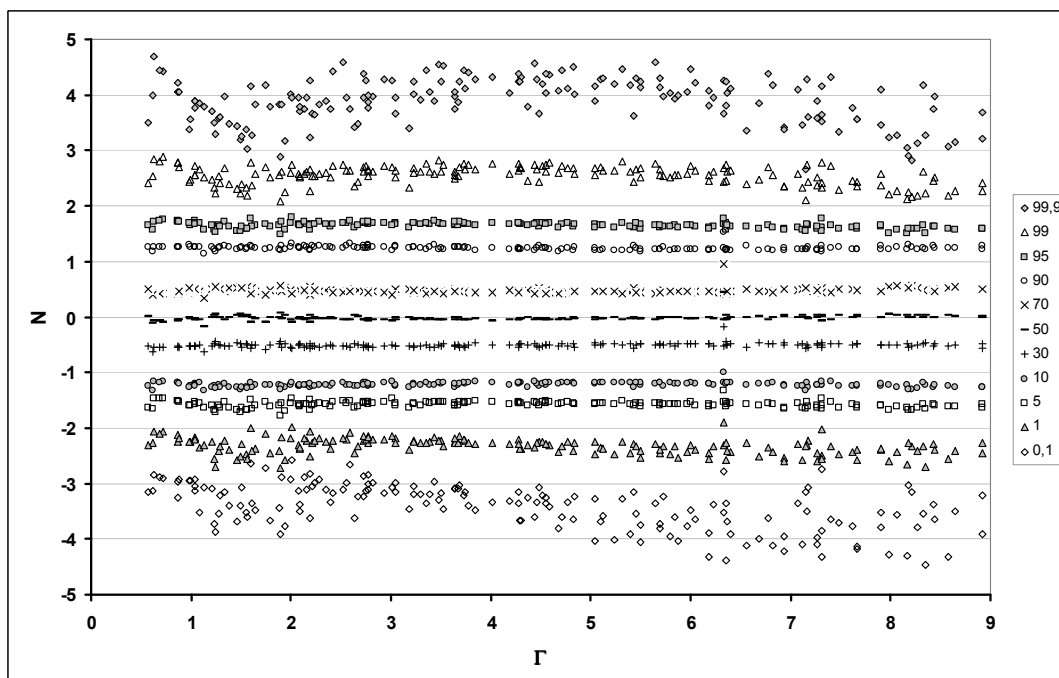


Figura 6.38 - Distribuição do coeficiente N

A partir da análise da Figura 6.38 pode-se verificar uma maior dispersão dos pontos nas probabilidades extremas, isto é, tanto nas pressões mínimas e máximas. Da mesma forma, verifica-se uma maior dispersão também nas posições iniciais do ressalto, as quais correspondem à curva vertical de concordância do vertedouro com a estrutura de dissipação. Outra característica bastante visível refere-se à forma constante com que o coeficiente N desenvolve-se ao longo do ressalto, no caso principalmente das pressões de 10% a 90%.

No caso do ressalto livre, os estudos de Teixeira (2003) demonstram que a distribuição longitudinal do coeficiente N segue o comportamento de um polinômio de segundo grau, conforme Equação 6.2.21. Tal comportamento é confirmado nos estudos de Trierweiler (2006), que apresenta dados experimentais para ressaltos de diversas submergências a jusante de comporta. Trierweiler (2006) relata que as diferenças entre os resultados encontrados e aqueles apresentados por Teixeira (2003) são bastante pequenas, restringindo-se quase que exclusivamente ao comportamento do coeficiente “a” da equação, que resultou menor nas pressões extremas e um pouco mais elevado nas probabilidades em torno de 50%.

$$N = a \cdot \left( \frac{x}{y_2 - y_1} \right)^2 + b \cdot \left( \frac{x}{y_2 - y_1} \right) + c \quad \text{Equação 6.2.21}$$

Os dados deste estudo, entretanto, apresentaram um comportamento diverso daquele identificado pelos pesquisadores citados. Verificou-se que, em função da probabilidade a ser identificada, os valores do coeficiente N apresentam uma tendência a um valor médio único para cada probabilidade, independente da submergência e do número de Froude. Do mesmo modo, verificou-se que não ocorre uma influência significativa da submergência do escoamento, o que pode indicar haver uma espécie de compensação em termos de valores absolutos mediante um acréscimo na pressão média e uma redução na flutuação de pressão, originários da maior lâmina d’água sobre a estrutura decorrente da submergência.

De maneira a desenvolver uma metodologia de estabelecimento de um coeficiente de previsão das pressões extremas para o caso do ressalto afogado, que de maneira geral é um dos objetivos do trabalho, optou-se pela criação de uma curva que refletisse a variação desse coeficiente em função da probabilidade a ser identificada. Desse modo, optou-se por utilizar o valor médio de N para cada probabilidade, uma vez que, como já comentado, não há uma influência sensível da submergência e os valores mantêm-se praticamente constantes ao longo do desenvolvimento longitudinal do ressalto. As Figuras 6.39 até 6.44 apresentam o conjunto de valores de N para os ensaios deste trabalho, relativos às probabilidades de ocorrência de 0,1% até 5% e de 95% a 99,9% e o valor médio identificado para cada submergência. A Tabela 6.12 apresenta o conjunto de dados medidos.

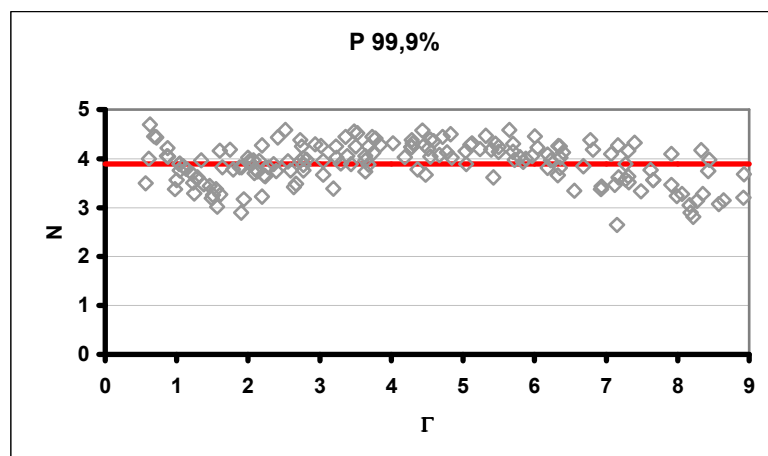


Figura 6.39 - Coeficiente  $N$  para uma pressão com probabilidade menor ou igual a 99,9% de ocorrência. ( $\Gamma = x/(y_2 - y_1)$ )

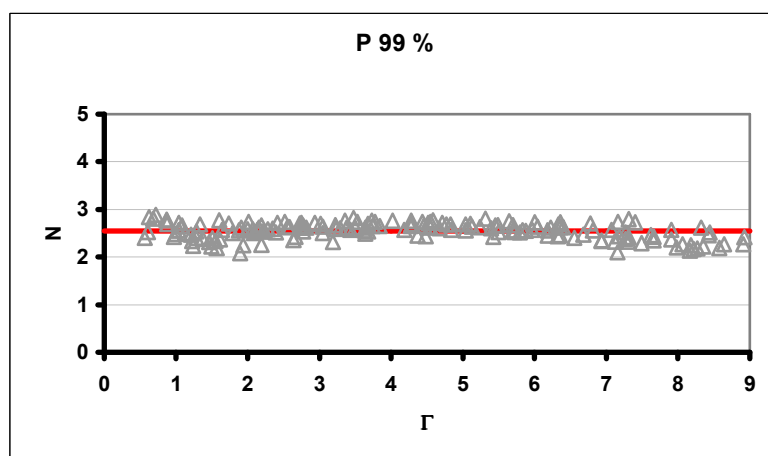


Figura 6.40 – Coeficiente  $N$  para uma pressão com probabilidade menor ou igual a 99% de ocorrência ( $\Gamma = x/(y_2 - y_1)$ )

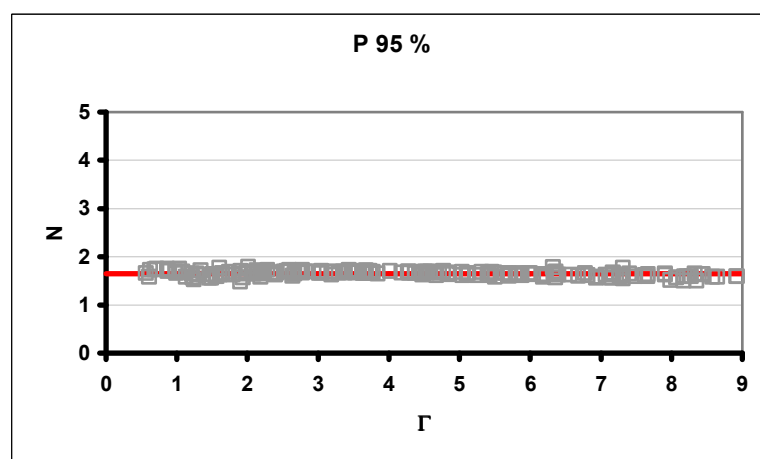


Figura 6.41 - Coeficiente  $N$  para uma pressão com probabilidade menor ou igual a 95% de ocorrência ( $\Gamma = x/(y_2 - y_1)$ )



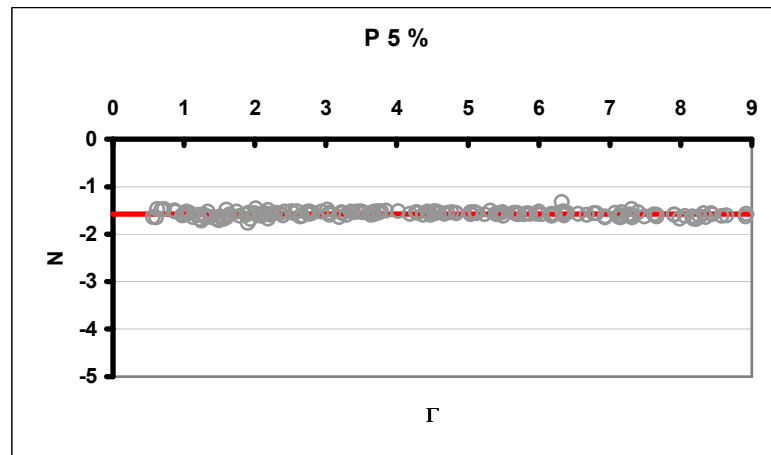


Figura 6.42 - Coeficiente  $N$  para uma uma pressão com probabilidade menor ou igual a 5% de ocorrência ( $\Gamma=x/(y_2-y_1)$ )

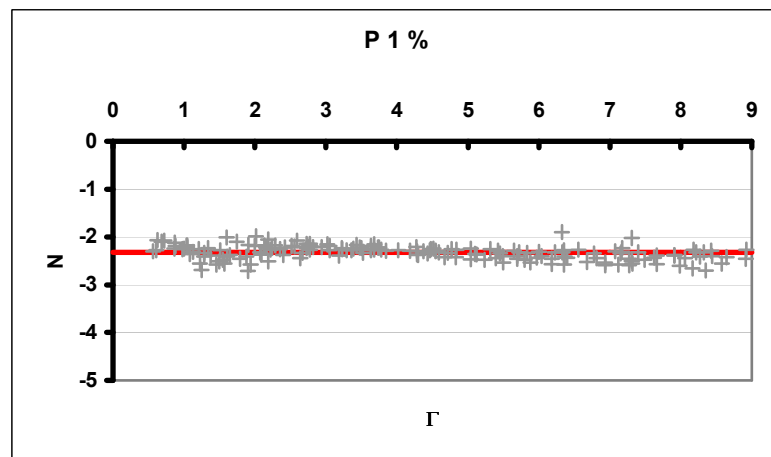


Figura 6.43 - Coeficiente  $N$  para uma pressão com probabilidade menor ou igual a 1% de ocorrência ( $\Gamma=x/(y_2-y_1)$ )

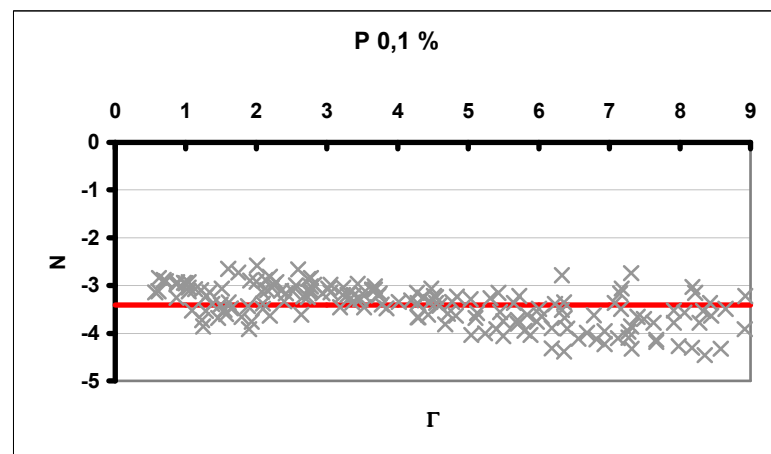


Figura 6.44 - Coeficiente  $N$  para uma pressão com probabilidade menor ou igual a 0,1% de ocorrência ( $\Gamma=x/(y_2-y_1)$ )

Tabela 6.12 - Dados de N calculados para o ressalto submergido

P%	N	P%	N	P%	N
0,1%	-3,415	30%	-0,522	80%	0,808
1%	-2,327	40%	-0,264	90%	1,243
5%	-1,575	50%	-0,017	95%	1,650
10%	-1,217	60%	0,233	99%	2,550
20%	-0,818	70%	0,499	99,9%	3,891

A Figura 6.45 apresenta os valores médios para cada uma das probabilidades e o ajuste proposto. Pode-se verificar que os pontos seguem um ajuste quadrático, sendo possível o estabelecimento de uma curva que relaciona a probabilidade requerida e o seu respectivo coeficiente N. A equação 6.2.22 refere-se ao ajuste aos pontos apresentados.

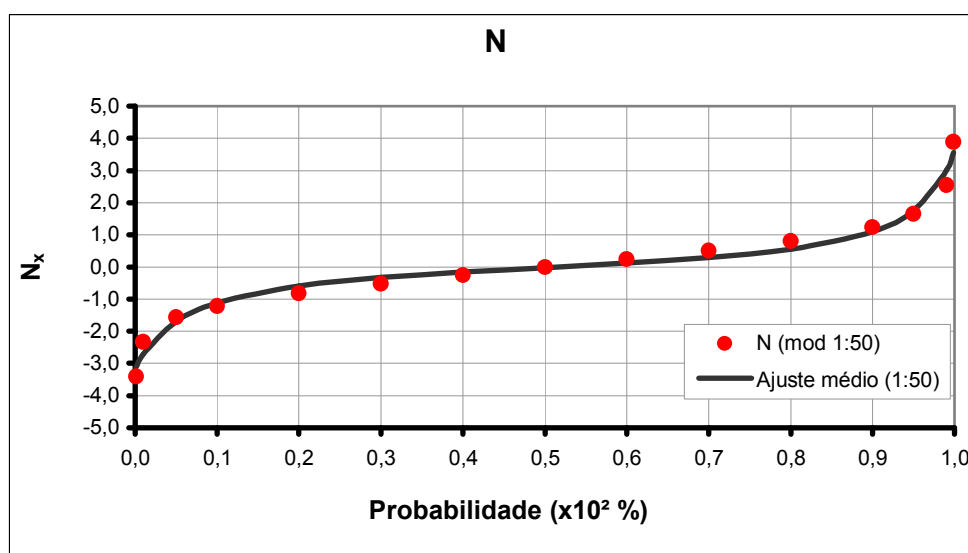


Figura 6.45 - Ajuste proposto para o cálculo do coeficiente de distribuição de probabilidade (N) para o ressalto submergido ( $R^2=0,983$ )

$$N = \frac{p + q.k}{(1 + r.k + s.k^2)} \quad \text{Equação 6.2.22}$$

onde:

$$\begin{aligned} p &= -3,161 \\ q &= 6,150 \\ r &= 14,351 \\ s &= -14,526 \text{ e} \\ k &= \text{o valor da probabilidade desejada (em valores decimais: } 90\%=0,90) \end{aligned}$$

A Tabela 6.13 apresenta a comparação entre os valores calculados a partir do ajuste e aqueles calculados a partir das medições realizadas no modelo reduzido de escala 1:50 da UHE Porto Colômbia. É possível notar pequenas diferenças entre os dois valores. Entretanto,

os valores estimados a partir da metodologia apresentada tendem a se apresentar a favor da segurança quando comparados com os valores obtidos em protótipos, ou seja, os valores mínimos estimados tendem a serem menores que os reais e os valores máximos estimados apresentam-se maiores que no protótipo. Para o trecho curvo ora os valores estão a favor da segurança ora não, mas não resultam em diferenças significativas em termos absolutos.

*Tabela 6.13 - Comparativo entre os valores de N medidos e calculados através do ajuste estabelecido*

P%	N	N (ajuste)	P%	N	N (ajuste)	P%	N	N (ajuste)
0,1%	-3,415	-3,110	30%	-0,522	-0,329	80%	0,808	0,552
1%	-2,327	-2,714	40%	-0,264	-0,159	90%	1,243	1,104
5%	-1,575	-1,697	50%	-0,017	-0,019	95%	1,650	1,759
10%	-1,217	-1,112	60%	0,233	0,121	99%	2,550	3,016
20%	-0,818	-0,587	70%	0,499	0,291	99,9%	3,891	3,551

De maneira geral, portanto, percebe-se que o coeficiente N para o cálculo das pressões extremas não depende da submergência imposta ao escoamento, podendo ser considerado constante para cada probabilidade avaliada. Tal comportamento diverge significativamente daquele apresentado por Teixeira (2003), no qual o coeficiente apresentava inclusive uma variação ao longo do desenvolvimento do ressalto, porém bastante similar ao comportamento identificado por Wiest (2005) com dados do modelo tridimensional na escala 1:100 da UHE Porto Colômbia. Esse comportamento deve-se, possivelmente, ao efeito da submergência do escoamento, já que Teixeira (2003) utilizou dados de ressalto livre.

Conforme pode ser notado através da análise das Figuras 6.39 a 6.44, ocorre uma maior dispersão dos valores em se tratando do coeficiente N tanto no extremo inferior como no extremo superior de probabilidades avaliadas (0,1% e 99,9%). Nas probabilidades restantes é visível a concentração dos valores ao redor da média, com uma redução da dispersão dos dados. A partir da análise estatística mais apurada dos dados, da mesma forma àquela realizada para a pressão média e a flutuação de pressão, é possível traçar curvas envoltórias que exprimem a variabilidade dos dados ao longo de um valor máximo e outro mínimo estatisticamente aceitáveis (95% de significância). A Figura 6.46 apresenta a curva estabelecida para a variação do coeficiente N. Nota-se que, como já mencionado, a variabilidade é mais acentuada junto às pressões extremas.

Assim, a partir do estabelecimento de ajustes para a pressão média, a flutuação de pressão e o coeficiente N, pode-se partir para o cálculo das pressões extremas.

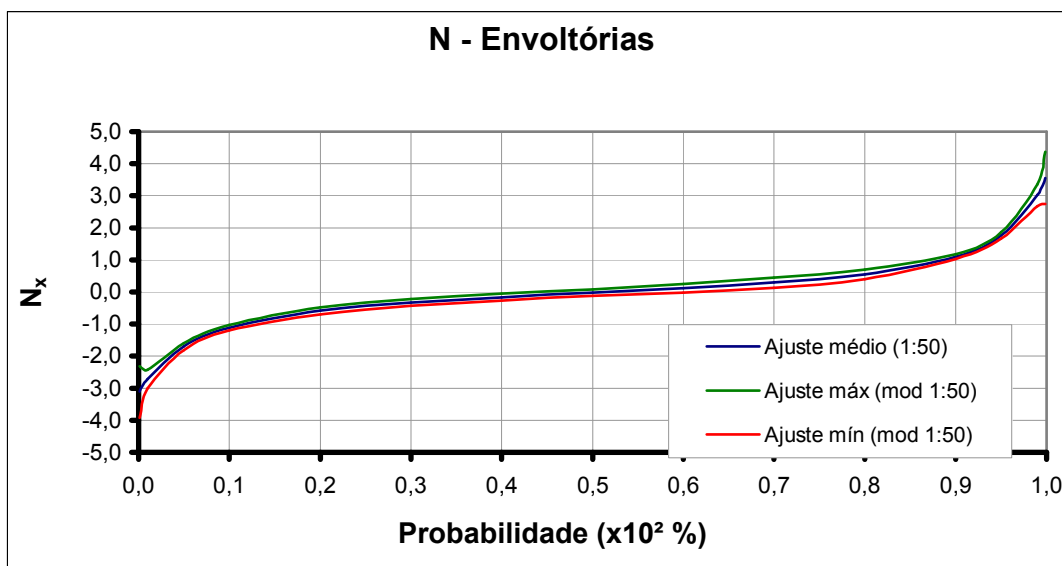


Figura 6.46 - Curvas envoltórias do Coeficiente N

### 6.2.6 Pressões Extremas

Do ponto de vista de projeto de estruturas similares ao caso em estudo, além do conhecimento dos esforços médios e também da flutuação de pressão, é importante a avaliação das pressões extremas atuantes sobre a estrutura, principalmente do ponto de vista dos valores de probabilidade mínima de ocorrência, relacionados com a possibilidade de cavitação e carregamentos mínimos sobre a laje, como quanto aos valores máximos, que dão origem a intensos esforços de compressão e de transmissão sob a laje. (esforço de elevação) (Mees, 2008). Este trabalho propõe-se, a partir do delineamento de propostas para o cálculo da pressão média, flutuação das pressões e coeficiente de distribuição de probabilidade em modelo reduzido, permitir o estabelecimento de uma estimativa confiável para as pressões extremas atuantes sobre a estrutura.

Através da utilização da relação  $P_{x\%} = \overline{P}_x \pm N \cdot \sigma_{s_x}$  e a partir dos ajustes definidos para cada um dos parâmetros apresentados, é possível calcular as pressões extremas para diversas condições de escoamento. Conforme apresentado, dispondo-se de dados como as alturas conjugadas e, por conseguinte, o número de Froude do escoamento e o grau de submergência do mesmo, calcula-se a pressão sobre a estrutura em qualquer ponto de seu desenvolvimento.

Por valer-se de dados experimentais do modelo na escala 1:50 da UHE Porto Colômbia, avaliou-se a metodologia de cálculo a partir da comparação com os dados medidos no protótipo. As Figuras 6.47 até 6.50 apresentam os resultados obtidos para diversas probabilidades de ocorrência das pressões. É importante notar que se tratam de valores absolutos de pressão em função da evolução do escoamento ao longo da bacia (pressão em m.c.a.- metros de coluna d'água e x em metros).

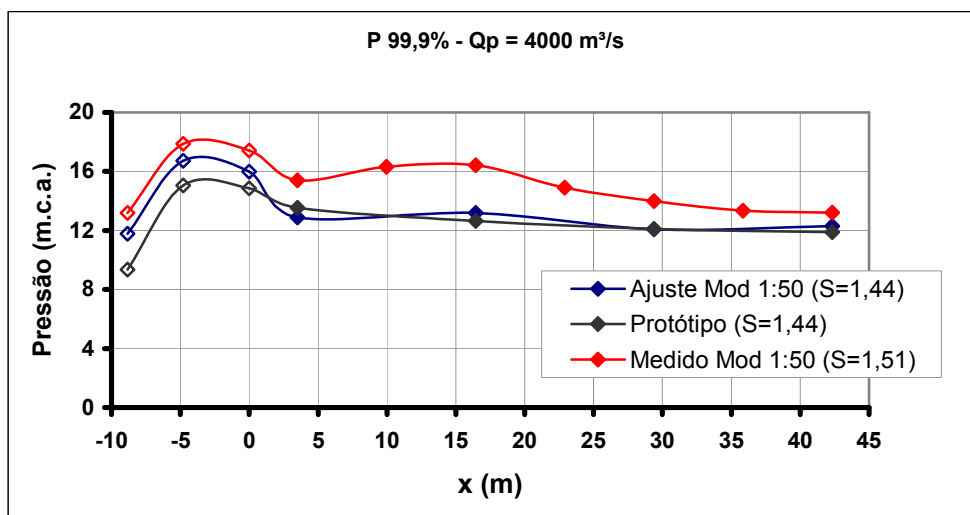


Figura 6.47 - Comparativo entre a metodologia de cálculo apresentada e os valores medidos em protótipo

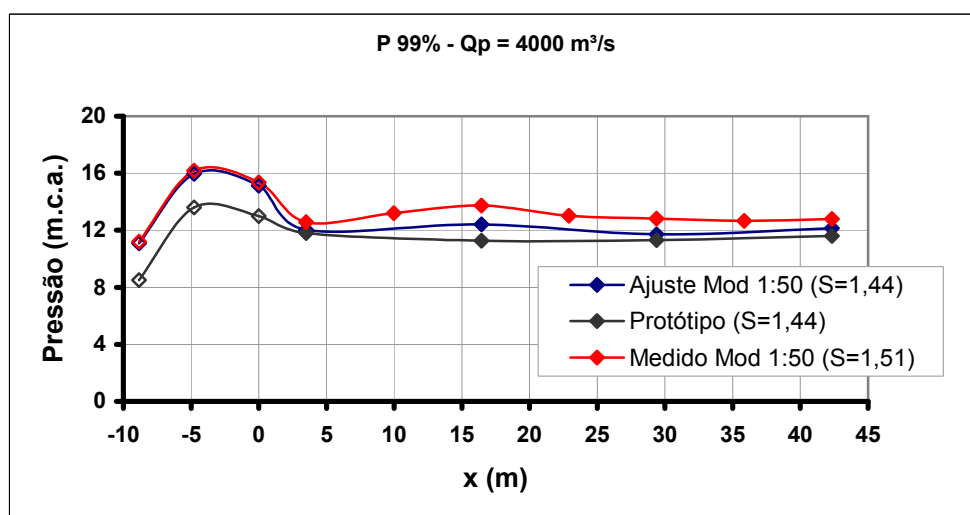


Figura 6.48 - Comparativo entre a metodologia de cálculo apresentada e os valores medidos em protótipo

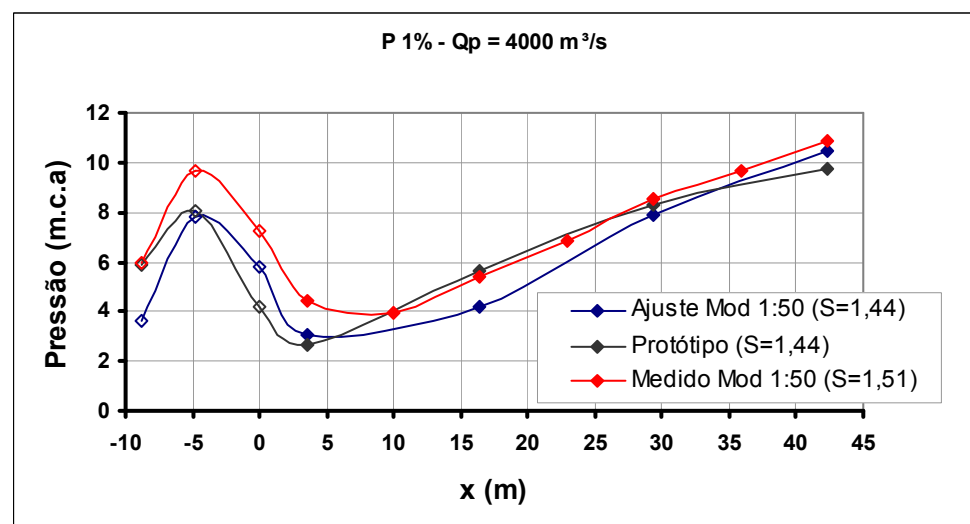


Figura 6.49 - Comparativo entre a metodologia de cálculo apresentada e os valores medidos em protótipo

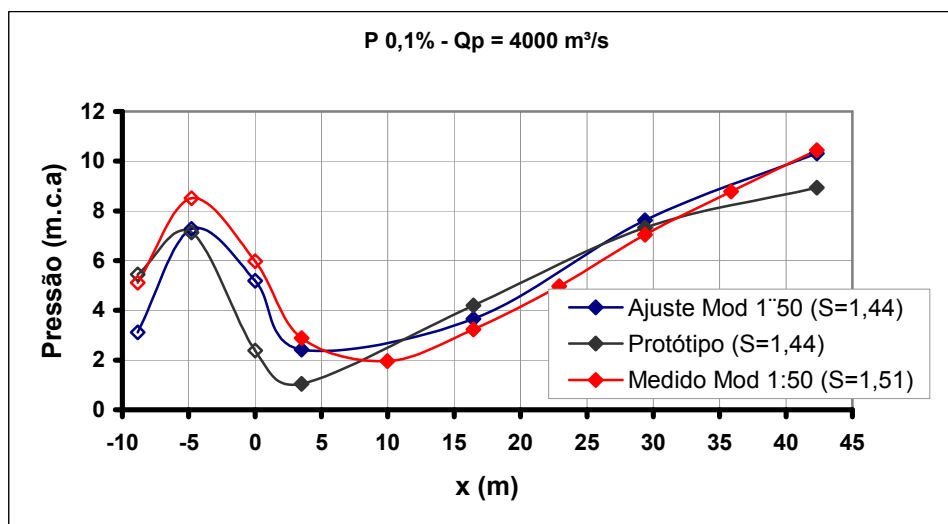


Figura 6.50 - Comparativo entre a metodologia de cálculo apresentada e os valores medidos em protótipo

Nota-se pela análise das figuras, segundo poderia supor-se a partir da utilização de ajustes empíricos, uma certa discrepância entre os valores medidos no protótipo e os valores calculados a partir da metodologia. Entretanto, na maior parte das vezes os valores calculados são bastante similares aos medidos, além de apresentarem uma estimativa a favor da segurança.

Valendo-se novamente de critérios estatísticos, optou-se pela verificação das envoltórias de pressão extrema máxima e mínima, de forma a validar o ajuste estabelecido. Porém, uma vez que o cálculo das pressões extremas depende da composição expressa pela equação  $P_{x\%} = \overline{P}_x \pm N \cdot \sigma_{s_x}$ , julgou-se necessária a avaliação dos intervalos para cada uma das variáveis, isto é,  $\overline{P}_x$ ,  $N$  e  $\sigma_{s_x}$ . Dessa forma, foram simuladas diversas situações de cálculo, avaliando-se sistematicamente a influência de cada um dos parâmetros no cálculo das pressões extremas.

A partir dos estudos realizados, verificou-se que o parâmetro que exerce a maior influência no cálculo das pressões extremas é a pressão média. Isso ocorre em razão de a dispersão dos dados tanto do parâmetro  $N$  como da flutuação de pressão apresentar-se com uma amplitude menor, conforme pode ser verificado nos itens 6.2.2 e 6.2.3. De forma diversa, os dados de pressão média apresentam um comportamento cuja dispersão acentua-se significativamente, apresentando, portanto, uma maior influência do cálculo das pressões extremas.

Finalmente, estabeleceu-se a seguinte relação para a determinação do intervalo de confiança relativo às pressões extremas:

$$(P_{x\%} + \Delta P_{x\%}) = (P_x \pm \Delta P_x) \pm (N_{x\%} \pm \Delta N_{x\%}) \cdot \sigma_x \quad \text{Equação 6.2.23}$$

onde:

$\Delta P_x$  = variação absoluta da pressão média no ressalto submergido;

$\Delta N_{x\%}$  = variação absoluta do coeficiente N;

$\Delta P_{x\%}$  = variação absoluta da pressão com uma determinada probabilidade de ocorrência.

Esta expressão resultou da análise da dispersão das medidas dos parâmetros envolvidos no cálculo das pressões extremas. Conforme já mencionado, a variável preponderante no estabelecimento das pressões atuantes sobre a estrutura é a pressão média, cuja dispersão, portanto, altera significativamente os valores das pressões extremas.

Entretanto, como já extensamente relatado, as pressões extremas dependem ainda do produto entre o parâmetro N e a flutuação de pressão, de forma que naturalmente depreende-se que deve haver uma influência também da dispersão destes parâmetros quando do estabelecimento das pressões extremas. De maneira geral, entretanto, se forem consideradas as dispersões dos parâmetros conjuntamente, haverá uma sobreposição de efeitos que não refletirá a realidade, dado que existe uma relação de dependência entre “N” e “ $\sigma$ ”.

Dessa forma, de maneira que não fossem considerados parâmetros em duplicidade, foi necessária a avaliação da melhor metodologia a ser seguida. Avaliando os dados calculados, tanto para a dispersão do desvio padrão como do coeficiente N, verificou-se que a utilização da dispersão do coeficiente N no cálculo das pressões extremas mostrou-se um método mais conservador (com menor dispersão), resultando, portanto, em uma metodologia a favor da segurança.

As Figuras 6.51 até 6.54 apresentam o intervalo de confiança estabelecido para as pressões de 99,9%, 99%, 1% e 0,1% de probabilidade de ocorrência. Cabe destacar que as figuras apresentam as pressões brutas estimadas para cada uma das probabilidades ao longo da bacia de dissipação, comparadas com as pressões efetivamente medidas na UHE Porto Colômbia, protótipo do modelo ensaiado. As figuras referem-se à vazão de protótipo igual a 4.000 m<sup>3</sup>/s.

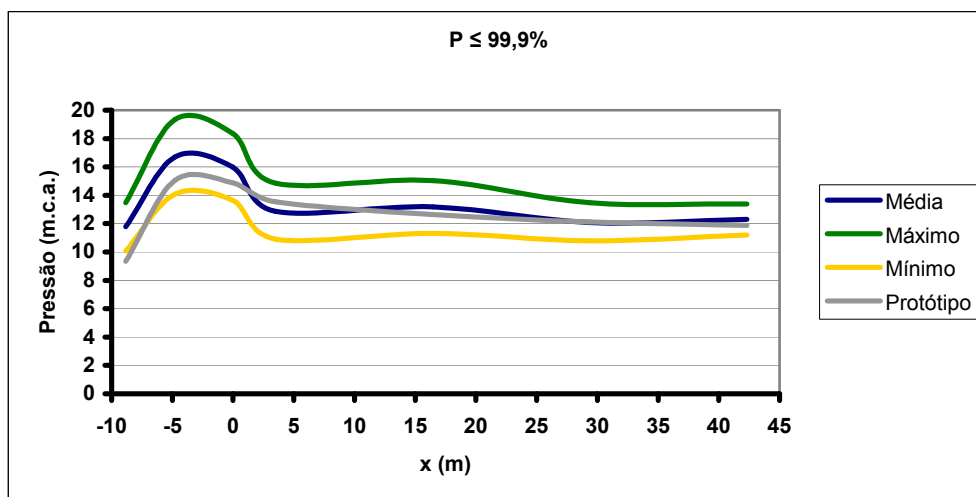


Figura 6.51 - Envoltória de Pressão Extrema – Máxima ( $P \leq 99,9\%$ )

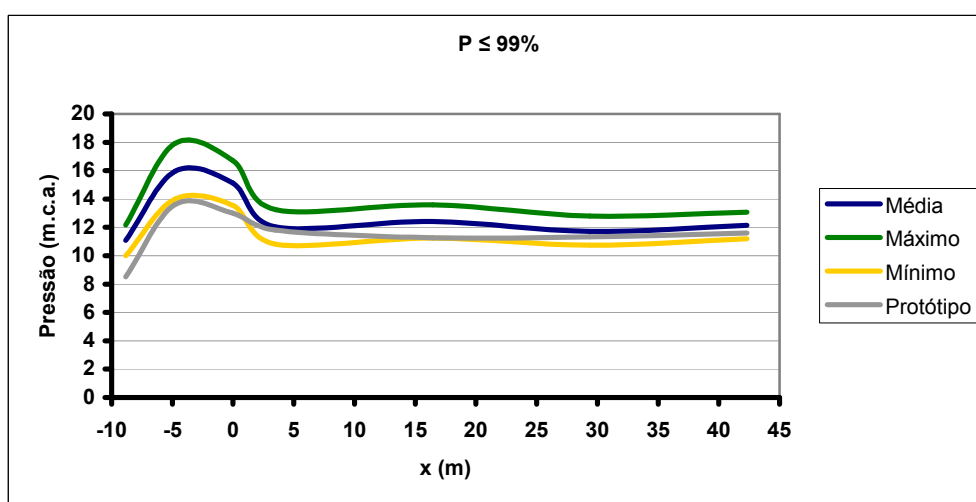


Figura 6.52 - Envoltória de Pressão Extrema – Máxima ( $P \leq 99\%$ )

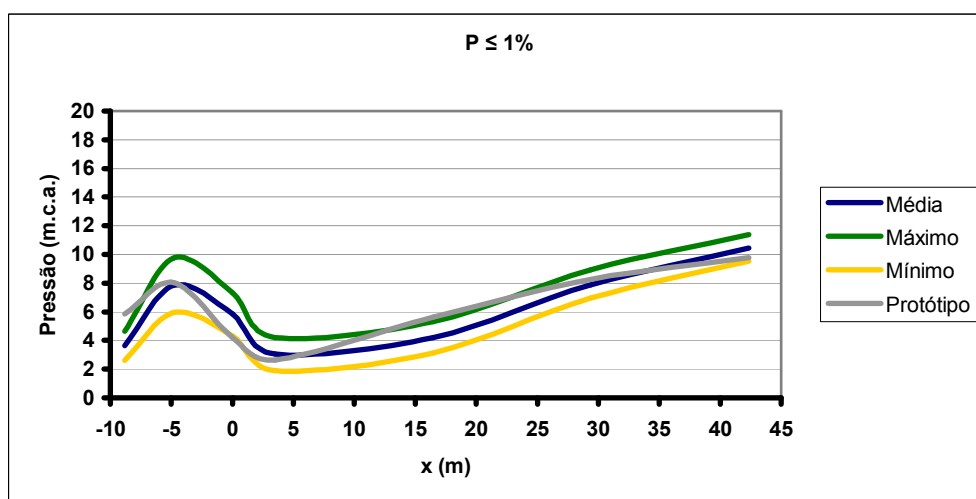


Figura 6.53 - Envoltória de Pressão Extrema - Mínima ( $P \leq 1\%$ )



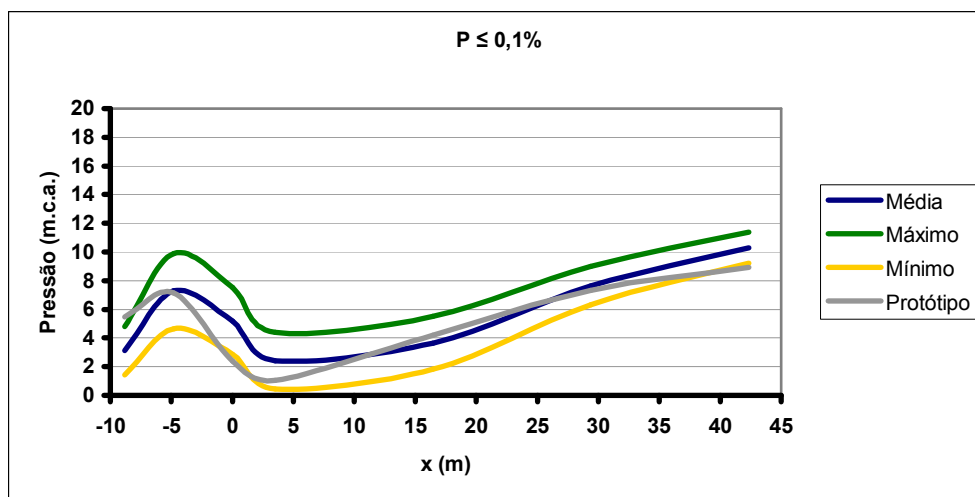


Figura 6.54 - Envoltória de Pressão Extrema - Mínima ( $P < 0,1\%$ )

Através da análise dos gráficos das pressões extremas verifica-se que, com exceção de algumas tomadas, os valores medidos em protótipo encontram dentro de uma dispersão aceitável do ajuste proposto (intervalo de confiança para  $\alpha = 95\%$ ). Conforme extensamente comentado ao longo do desenvolvimento deste trabalho, os locais onde também as pressões extremas apresentam a maior dispersão são as tomadas na curva vertical ou sob sua influência. Este comportamento deve-se, entre outros fatores, à variabilidade natural dos dados nesta área, uma vez que o ressalto submerso tem a formação do rolo iniciada, a maior parte das vezes, nesta região da estrutura, e também em razão da metodologia adotada, que reflete dados empíricos de modelo reduzido.

O ajuste apresentado, quando avaliadas as posições mais a jusante ao longo do desenvolvimento do ressalto, mostra-se bastante similar ao comportamento medido no protótipo. No caso das pressões cuja probabilidade de ocorrência é menor ou igual a 99% e 99,9%, o ajuste resulta em valores de pressão levemente superiores quando comparados com as medições de protótipo, mostrando-se a favor da segurança para o caso de projetos deste tipo de estrutura. Quando avaliadas as pressões com probabilidade de ocorrência de 0,1% e 1%, este comportamento se repete, ou seja, obtêm-se valores conservadores em relação ao medido no protótipo, sendo os valores relativos ao ajuste menores do que os medidos na estrutura real. Nota-se, entretanto, que no caso das pressões com probabilidade de serem menores ou iguais a 0,1% os valores aproximam-se do valor nulo quando avaliado o intervalo de confiança inferior do ajuste. De maneira geral, este comportamento é um indicativo da possibilidade de ocorrência de pressões bastante reduzidas nestas regiões, podendo estar relacionadas ao processo de cavitação junto ao fundo da bacia.

Conforme já descrito, as diferenças encontradas apresentam-se na quase totalidade dos casos a favor da segurança para condições de projeto e dentro de uma faixa estatisticamente significativa. Da mesma forma é importante notar que os dados utilizados como comparativo também possuem uma dispersão associada, reflexo da metodologia utilizada quando da medição na estrutura real e também do tipo de equipamento utilizado. Em outras palavras, é importante conhecer claramente que as medições em protótipo são importantes balizadores do comportamento dos ajustes propostos, todavia não são verdade irrefutável do comportamento do fenômeno. Outro aspecto que merece destaque e que é abordado no trabalho de Teixeira (2008) é a influência que a escala da estrutura em que ocorrem as medições exerce sobre os resultados, com efeito, entre outros, no grau de aeração do fluxo.

As Tabelas 6.14 até 6.17 apresentam a comparação entre os dados resultantes da aplicação do ajuste proposto e os valores medidos em escala real para uma vazão  $Q_p = 4.000 \text{ m}^3/\text{s}$ , incluindo a avaliação do erro relativo resultante da comparação dos valores. Também se apresenta a comparação quando tomada como balizadora a energia do escoamento na entrada do ressalto, função principalmente da velocidade do fluxo. Nota-se que, quando avaliada a energia a ser dissipada no ressalto, a diferença resultante da aplicação do ajuste não é significativa.

*Tabela 6.14 - Valores relativos às pressões cuja probabilidade de ocorrência é menor ou igual a 99,9%*

$P \leq 99,9\%$ Ht = 13,67 (m.c.a.)	UHE Porto Colômbia (m.c.a.)	Presente Estudo (m.c.a.)	$\Delta P$ (m.c.a.)	ER (%)	ER (%) (ref. Ht)
da	9,35	11,78	2,43	25,94%	17,75%
db	15,05	16,71	1,66	11,02%	12,14%
dc	14,87	15,99	1,12	7,54%	8,20%
d1	13,54	12,88	-0,67	-4,91%	-4,87%
d3	12,65	13,18	0,53	4,20%	3,88%
d5	12,11	12,08	-0,03	-0,29%	-0,26%
d7	11,88	12,30	0,42	3,51%	3,05%

*Tabela 6.15 - Valores relativos às pressões cuja probabilidade de ocorrência é menor ou igual a 99%*

$P \leq 99\%$ Ht = 13,67 (m.c.a.)	UHE Porto Colômbia (m.c.a.)	Presente Estudo (m.c.a.)	$\Delta P$ (m.c.a.)	ER (%)	ER (%) (ref Ht)
da	8,50	11,08	2,58	30,33%	18,86%
db	13,61	15,96	2,34	17,22%	17,15%
dc	12,99	15,12	2,13	16,39%	15,58%
d1	11,80	12,03	0,24	2,00%	1,73%
d3	11,26	12,41	1,15	10,19%	8,40%
d5	11,32	11,72	0,40	3,53%	2,92%
d7	11,61	12,14	0,52	4,52%	3,84%

Tabela 6.16 - Valores relativos às pressões cuja probabilidade de ocorrência é menor ou igual a 1%

$P \leq 1\%$ Ht = 13,67 (m.c.a.)	UHE Porto Colômbia (m.c.a.)	Presente Estudo (m.c.a.)	$\Delta P$ (m.c.a.)	ER (%)	ER (%) (ref. Ht)
da	5,84	3,63	-2,21	-37,85%	-16,18%
db	8,02	7,84	-0,18	-2,24%	-1,31%
dc	4,19	5,83	1,64	39,10%	11,98%
d1	2,62	3,04	0,42	15,95%	3,06%
d3	5,62	4,22	-1,40	-24,88%	-10,22%
d5	8,27	7,88	-0,39	-4,66%	-2,82%
d7	9,77	10,43	0,67	6,81%	4,87%

Tabela 6.17 - Valores relativos às pressões com probabilidade de ocorrência menor ou igual a 0,1%

$P \leq 0,1\%$ Ht = 13,67 (m.c.a.)	UHE Porto Colômbia (m.c.a.)	Presente Estudo (m.c.a.)	$\Delta P$ (m.c.a.)	ER (%)	ER (%) (ref Ht)
da	5,45	3,12	-2,34	-42,83%	-17,08%
db	7,13	7,28	0,15	2,06%	1,07%
dc	2,38	5,18	2,81	117,99%	20,53%
d1	1,04	2,42	1,38	132,30%	10,07%
d3	4,20	3,65	-0,54	-12,98%	-3,98%
d5	7,33	7,62	0,29	3,97%	2,13%
d7	8,93	10,32	1,38	15,46%	10,11%

## 7 EXEMPLO DE DIMENSIONAMENTO

Entre os objetivos do presente trabalho pode-se destacar a delimitação de uma metodologia que contribua para o dimensionamento de estruturas de dissipação. Este capítulo apresenta um exemplo da aplicação dos ajustes estabelecidos para o cálculo de uma estrutura hipotética.

### Condições de contorno:

- Vazão = 8000 m<sup>3</sup>/s
- Cota de Fundo (CF) = 150,00
- Cota do Vertedouro (CV) = 168,00
- Vazão específica máxima (q) = 59,3 m<sup>3</sup>/s/m
- Nível de Montante (Nm) = 181,70
- Nível de Jusante (Nj) = 165,55
- Inclinação do vertedouro ( $\alpha$ ) = 45°

### Variáveis calculadas (considerando o ressalto livre)

- Lâmina d'água sobre o vertedouro = 13,70 m
- Velocidade no pé da barragem ( $V_1$ ) = 22,49 m/s
- Altura rápida do escoamento ( $h_1$ ) = 2,63 m
- Número de Froude rápido ( $Fr_1$ ) = 4,43
- Altura lenta do escoamento ( $h_2$ ) = 15,22 m
- Altura da lâmina d'água a jusante ( $Tw$ ) = 15,55 m
- Submergência ( $S=Tw/h_2$ ) = 1,02
- Altura crítica ( $hc$ ) = 7,10 m

### Metodologia estabelecida:

- Posição de Início do Ressalto: iniciando o cálculo a partir do estabelecimento de Z em função dos dados calculados para o ressalto livre ( $Z_{calc}/hc = (Fr_1 \cdot (S - 1))^{0,61}$ ) obtém-se o valor aproximado de 1,70 m. Após sucessivas iterações, resulta no valor de Z = 9,17 m.

Uma vez calculada a cota de início do ressalto, pode ser estabelecida graficamente a posição horizontal ( $x$ ) de início do ressalto, correspondente à distância entre o início do ressalto e o início da bacia de dissipação. No caso em tela, o valor de  $x$  resultou igual a 14,33 m. A submergência do escoamento é de  $S = 1,45$ .

- Pressão Média do Ressalto Hidráulico Submergido: A metodologia apresentada para a descrição da pressão média ao longo do ressalto vale-se do estabelecimento de 5 pontos característicos. A Tabela abaixo apresenta os valores calculados para o caso em questão.

*Tabela 7.1 - Dados relativos à pressão média*

Pressão Média			$S = 1,45$	$Fr = 3,35$
	$\Gamma$		$\Psi$	
Ponto 1	0,66	Definido <sup>1</sup> Geometricamente	0,74	Eq. 6.2.3 Tabela 6.4
Ponto 2	1,12	Definido <sup>1</sup> Geometricamente	1,19	Eq. 6.2.3 Tabela 6.4
Ponto 3	1,74	Definido <sup>1</sup> Geometricamente	1,05	Eq. 6.2.3 Tabela 6.4
Ponto 4	2,65	Eq 6.2.4	0,60	Eq 6.2.5
Ponto 5	7,67	Eq 6.2.6	1,00	Premissa do Ponto

<sup>1</sup>Foi adotado o mesmo perfil geométrico da UHE Porto Colômbia

- Flutuação de Pressão no Ressalto Hidráulico Submergido: A metodologia apresentada para a descrição da pressão média ao longo do ressalto vale-se do estabelecimento de 6 pontos característicos. A Tabela abaixo apresenta os valores calculados para o caso em questão. A partir do ponto “f” segue-se a tendência do ressalto livre.

*Tabela 7.2 - Dados referentes à flutuação de pressão*

Flutuação de Pressão			$S = 1,45$	$Fr = 3,35$
	$\Gamma$		$\Omega_s$	
Ponto 1	0,66	Definido <sup>2</sup> Geometricamente	0,13	Eq. 6.2.11 Tabela 6.7
Ponto 2	1,12	Definido <sup>2</sup> Geometricamente	0,17	Eq. 6.2.12 Tabela 6.7
Ponto 3	1,74	Definido <sup>2</sup> Geometricamente	0,25	Eq. 6.2.13 Tabela 6.7
Ponto d	2,27	Eq 6.2.14 Tabela 6.9	0,37	Eq 6.2.15 Tabela 6.9
Ponto e	3,22	Eq 6.2.16 Tabela 6.10	0,41	Eq 6.2.17 Tabela 6.10
Ponto f	3,44	Eq 6.2.18 Tabela 6.11	0,41	Eq 6.2.19 Tabela 6.11

<sup>2</sup>Foi adotado o mesmo perfil geométrico da UHE Porto Colômbia

- Pressões Extremas: Utilizando a distribuição estimada para o coeficiente N calcula-se através da utilização da relação  $P_{x\%} = \bar{P}_x \pm N \cdot \sigma_{s_x}$  das pressões com uma certa probabilidade de ocorrência. Neste caso será apresentado o cálculo para probabilidades de 1% e 99%.

Conforme demonstrado no trabalho, o coeficiente N segue uma tendência bem definida em função da probabilidade que se deseja avaliar.

$$N = \frac{p + q.k}{(1 + r.k + s.k^2)} \quad \text{Equação 6.2.22}$$

onde:

$$p = -3,161$$

$$q = 6,150$$

$$r = 14,351$$

$$s = -14,526$$

$$k = \text{o valor da probabilidade desejada (em valores decimais: 90\%=0,90)}$$

Assim, para  $k=1\%$ ,  $N = -2,714$  e para  $k=99\%$ ,  $N = 3,016$ .

Em resumo, têm-se os seguintes parâmetros para o estabelecimento das pressões extremas:

*Tabela 7.3 - Resumo dos parâmetros obtidos (Dados não adimensionalizados)*

Pressão Média (m.c.a.)			Flutuação de Pressão (m.c.a.)			N	
	x	$\bar{P}_x$		x	$\sigma_{s_x}$	N 1%	N 99%
Ponto 1	-8,87	11,29	Ponto 1	-8,87	0,89	-2,714	3,016
Ponto 2	-5,10	16,71	Ponto 2	-5,10	1,21		
Ponto 3	0,00	14,96	Ponto 3	0,00	1,73		
Ponto 4	7,42	9,71	Ponto d	4,33	2,59		
Ponto 5	48,68	14,42	Ponto e	12,10	2,84		
			Ponto f	13,93	2,87		

Dispondo destes valores e traçando a sua distribuição ao longo da bacia de dissipação têm-se os elementos necessários ao cálculo das pressões extremas. Gráficamente, são estabelecidos os pontos de interesse e retirados os parâmetros que deverão compor o seu cálculo. Neste caso, optou-se por descrever o comportamento a partir da divisão do ressalto em intervalos de 10 metros, contemplando ainda, conforme o caso, pontos importantes tanto na distribuição da pressão média como da flutuação de pressão. A Tabela 7.4 apresenta os dados retirados dos ajustes as pressões extremas resultantes.

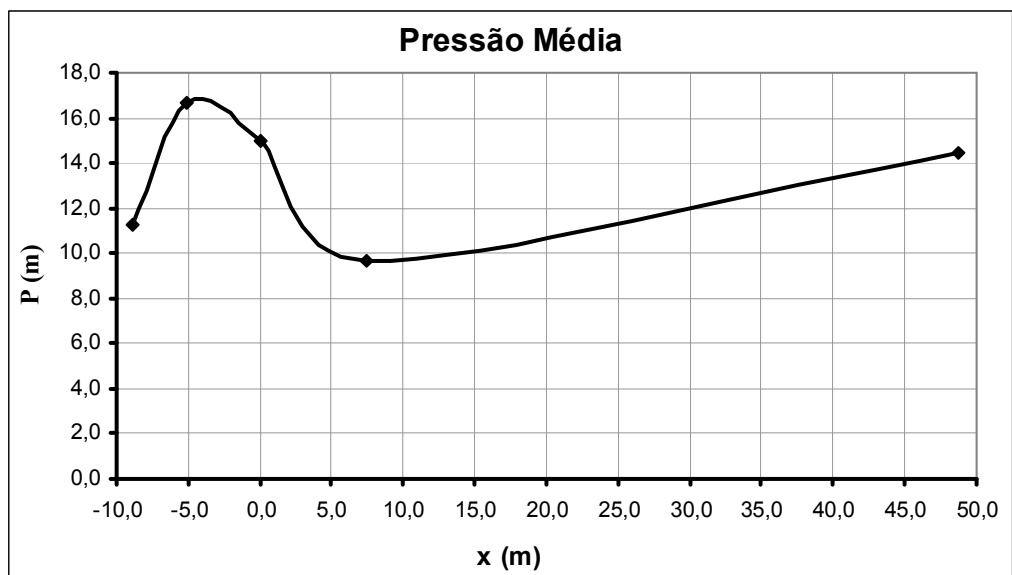


Figura 7.1 - Distribuição da Pressão Média ( $q=59,3 \text{ m}^2/\text{s}$ )

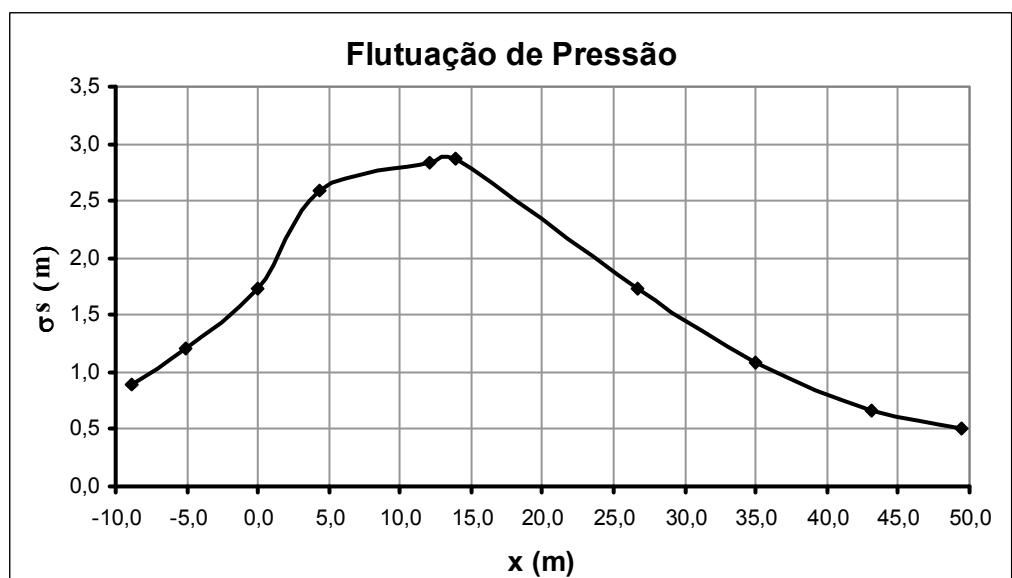


Figura 7.2 - Distribuição da Flutuação de Pressão ( $q=59,3 \text{ m}^2/\text{s}$ )

Tabela 7.4 - Valores das pressões extremas calculadas a partir da metodologia proposta

X (m)	$\bar{P}_x$ (m)	$\sigma_{s_x}$ (m)	P 1% (m)	P 99% (m)
-8,87	11,29	0,89	8,87	13,97
-5,10	16,71	1,21	13,43	20,36
0,00	14,96	1,73	10,26	20,18
4,33	10,25	2,59	3,22	18,06
7,42	9,71	2,73	2,30	17,94
10,00	9,80	2,81	2,17	18,27

X (m)	$\bar{P}_x$ (m)	$\sigma_{s_x}$ (m)	P 1% (m)	P 99% (m)
13,92	10,05	2,87	2,26	18,71
20,00	10,70	2,33	2,50	18,54
30,00	11,90	1,45	4,38	17,73
40,00	13,40	0,80	7,96	16,27
45,00	14,00	0,60	11,23	15,81

A Figura 7.3 apresenta o comportamento das pressões extremas calculadas (P1% e P99%), e sua comparação com relação à pressão média:

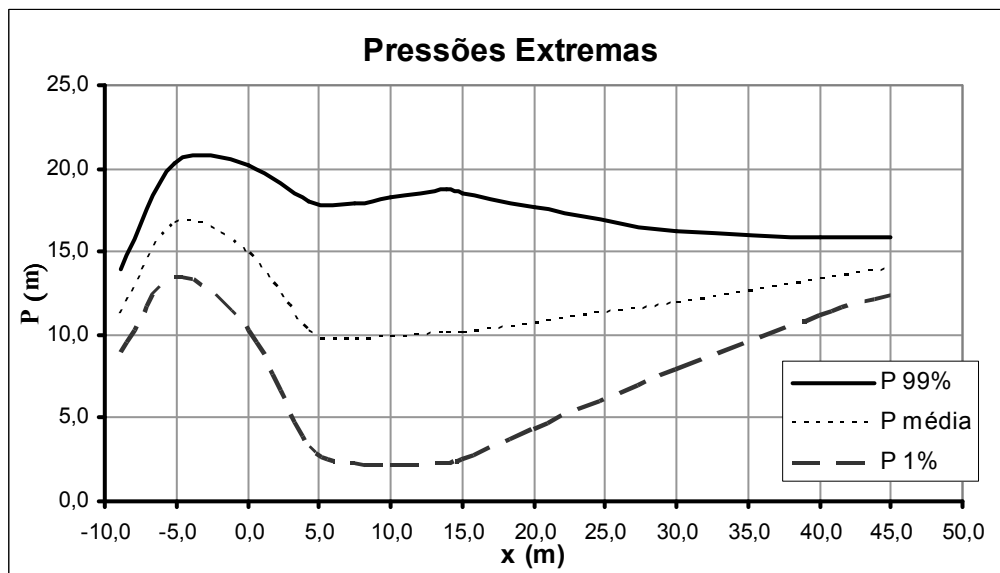


Figura 7.3 - Comportamento das Pressões Extremas - aplicação da metodologia proposta

Percebe-se o comportamento bastante peculiar de cada distribuição de pressão dependendo da probabilidade avaliada. Da mesma forma, verifica-se que as pressões calculadas quando comparadas com os valores médios podem apresentar diferenças da ordem de 10 m.c.a. em alguns pontos do ressalto. Demonstra-se, assim, a importância da avaliação destes esforços quando do dimensionamento da estrutura.



## 8 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O estudo do ressalto hidráulico remonta, principalmente, aos séculos XIX e XX, com o advento de novas técnicas experimentais e a difusão dos estudos em modelo reduzidos. Este trabalho procurou colaborar com o desenvolvimento do conhecimento desse interessante fenômeno, cuja utilização como mecanismo de dissipação de energia hidráulica se multiplica em um país cuja principal matriz energética é a hidroeletricidade.

O ressalto submergido, apesar de bastante comum em estruturas de dissipação de energia, não apresenta um número de trabalhos significativo, principalmente quando comparado com o ressalto livre e, particularmente, quanto à influência da submergência nas pressões desenvolvidas. Assim, este trabalho procurou apresentar a caracterização do campo de pressões resultante do ressalto submergido em bacias de dissipação a jusante de vertedouros, através da caracterização dos parâmetros atuantes sobre a estrutura, como as pressões médias e a flutuação de pressão. Procurou-se estabelecer uma metodologia que permitisse a descrição do fenômeno, no tocante principalmente aos esforços sobre a bacia, contribuindo para o estabelecimento de diretrizes de projeto, com destaque ainda para a descrição das pressões extremas resultantes do ressalto.

O trabalho desenvolveu-se tendo por base as seguintes premissas:

- Medições em modelo reduzido: A parte experimental do trabalho foi desenvolvida através de ensaios em modelo reduzido na escala 1:50 da UHE Porto Colômbia, de forma a permitir a caracterização do comportamento do ressalto hidráulico ao longo da bacia e a sua posterior transposição às condicionantes do protótipo.
- Definição de ajustes que descrevessem o fenômeno: A partir da análise do conjunto de dados medidos, obteve-se uma série de ajustes matemáticos a fim de melhor definir o comportamento dos diversos parâmetros inerentes ao ressalto e de importância singular no projeto de estruturas de dissipação.
- Comparação com dados de protótipo: Uma vez estabelecidos os ajustes das variáveis resultantes do ressalto, tanto os valores ajustados como também aqueles resultantes das medições em modelo foram avaliados conjuntamente e comparados de forma a validar os resultados encontrados.

Segundo estes preceitos, destacam-se as principais conclusões resultantes do trabalho:

- **Posição de Início do ressalto submerso:** o estabelecimento da posição de início do ressalto assume importância do ponto de vista prático, uma vez que pode indicar o quanto a estrutura deverá ficar afogada quando da formação do ressalto, e do ponto de vista teórico, pois é imprescindível à utilização da adimensionalização dos dados adotada no trabalho. Não obstante podermos considerar o estabelecimento dessa característica como parte da descrição do fenômeno, a necessidade de estudar uma metodologia para o cálculo da posição do início do ressalto resultou de uma limitação do modelo reduzido e da instrumentação utilizada, conforme mencionado ao longo do estudo. A partir das medições realizadas no modelo reduzido, pode-se traçar um ajuste que descreve a variação do início do ressalto em função, principalmente, da submersão e do número de Froude do escoamento.

- **Pressão Média:** Através da análise dos dados obtidos em laboratório é visível a influência do grau de afogamento do escoamento no desenvolvimento das pressões médias sobre a bacia. De maneira geral, ocorre um acréscimo das pressões na parte inicial do ressalto, decorrente principalmente das sobrepressões resultantes da curva vertical de concordância. Através da implementação de uma metodologia caracterizada pelo estabelecimento de pontos característicos da pressão média, alcançou-se uma forma eficiente de estabelecimento dessa grandeza para o caso do ressalto submerso, sobretudo quando comparado com o fenômeno em escala real (protótipo).

- **Flutuação de Pressão:** Os dados de flutuação de pressão e os ajustes numéricos definidos permitem que se verifique a considerável influência da submersão na oscilação da pressão ao longo do ressalto. Através dos ajustes estabelecidos, grande parte destes em função exclusivamente da submersão do escoamento, pode-se traçar o comportamento das flutuações no desenvolvimento do ressalto, permitindo a obtenção de dados que contribuam como subsídio para o projeto das estruturas de dissipação.

- **Coefficiente Estatístico de Distribuição de Probabilidades:** Entre as principais conclusões pode-se destacar a característica diferenciada do coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades ( $N$ ) quando avaliado o ressalto submerso. Diferente da relação estabelecida por Teixeira (2003), a distribuição do coeficiente  $N$  ao longo do desenvolvimento do ressalto mostrou-se com uma tendência de ser constante, de forma independente inclusive do número de Froude do escoamento ou do grau de submersão do mesmo. Dessa forma admite-se que o coeficiente  $N$ , para o caso do ressalto submerso, pode ser considerado constante, dependendo exclusivamente da probabilidade que se deseja avaliar. De forma complementar observou-se que o coeficiente  $N$  segue uma tendência bem definida

em função da probabilidade a ser avaliada, de maneira que foi possível a definição de um ajuste que reflete este comportamento.

- Pressões Extremas: A partir dos dados obtidos em laboratório e das curvas ajustadas para a previsão das pressões verificou-se que, valendo-se da mesma metodologia utilizada por Teixeira (2003), na qual a pressão extrema é calculada através da soma da pressão média da amostra com o produto do seu desvio padrão e um coeficiente de distribuição de probabilidades (N), é possível estimar satisfatoriamente os valores de pressão extrema. Da mesma forma, quando da transposição das variáveis às condições de protótipo verifica-se que os valores estimados são condizentes com aqueles medidos na estrutura real. De maneira geral os valores estimados apresentaram comportamento a favor da segurança, sendo que as maiores diferenças entre os ajustes e o protótipo foram verificadas no trecho curvo e na zona de influência da curva.

Destaca-se ainda uma série de recomendações no sentido de contribuir na continuação do estudo do fenômeno:

- Estudo da influência da curva: particularmente no que se refere às flutuações de pressão ao longo de curvas verticais, dada a dificuldade na avaliação desses parâmetros neste estudo. Verificou-se através da distribuição global dos dados da flutuação que o comportamento da flutuação de pressão difere significativamente com relação ao ressalto livre, uma vez que parte do ressalto desenvolve-se sobre o canal inclinado e também na parte curva. Sugere-se, portanto, que próximos estudos contemplem uma avaliação mais aprofundada da influência da curva nas flutuações de pressão resultantes do ressalto.

- Ensaios que contemplem o ressalto livre: por uma limitação da estrutura utilizada não foi possível a simulação de ressaltos com submergência igual à unidade (livre), de forma que grande parte dos ajustes estabelecidos foram extrapolados para esta condição. Da mesma forma, faz-se necessário o estudo de submergências intermediárias entre o ressalto livre e as mínimas simuladas ( $S \sim 1,40$ ). Estes estudos poderiam permitir a definição de uma metodologia única e condizente com as diversas facetas apresentadas pelo fenômeno.

- Medição em protótipo: De extrema valia seria também um maior número de medições em estruturas reais, que, apesar de não constituírem a verdade absoluta, uma vez sujeitas a uma grande variabilidade de condições, denotam o comportamento a ser simulado quando do projeto desse tipo de estrutura, refletindo peculiaridades possíveis de mensuração apenas quando já instalada uma condição extrema.

- Avaliar a utilização da metodologia para outras estruturas: Em função de se tratar de uma situação específica, onde se dispunha de dados de protótipo, foi utilizado um modelo reduzido que refletia as condições reais da estrutura. Nesse sentido, principalmente as condições de jusante do modelo, com a presença de um *end sill* e uma topografia peculiar após a estrutura de dissipação, remetem à necessidade de avaliação da metodologia proposta considerando também outras estruturas.

- Avaliar assimetria e curtose: Este estudo não se aprofundou na análise do terceiro e quarto momentos estatísticos, que podem levar à identificação de pontos característicos do ressalto, conforme ocorre com o caso livre. Sugere-se que um estudo mais apurado seja realizado em função desse dois parâmetros.

- Estudar efeito de escala: Grande parte dos projetos das estruturas de proteção e de geração de energia de uma usina hidrelétrica de grande ou médio porte passa por estudos prévios em modelo reduzido. Quase a totalidade desses modelos possui similitude em relação à estrutura real condicionada aos parâmetros cinemáticos do escoamento (Froude), desconsiderando os efeitos viscosos (Reynolds), que em linhas gerais não resultam em erros significativos. Entretanto, fenômenos como a distribuição de pressões podem sofrer interferências de variáveis que não são completamente simuladas em modelos com estas premissas, principalmente em modelos de sistemas aerados, como é o caso do ressalto hidráulico, de forma que, dependendo da escala do modelo utilizado, podem haver alterações nos resultados, seja a favor ou contra a segurança. Dessa forma, destaca-se a importância de estudos que descrevam as possíveis interferências da escala do modelo nos resultados.

- Estudar a influência da aeração do escoamento: Uma das possíveis causas de efeitos de escala significativos e, conseqüentemente, de resultados discrepantes quando comparados modelo e protótipo refere-se à aeração do fluxo, inerente à formação do ressalto hidráulico. Além disso, o conhecimento de como se processa a incorporação de ar no ressalto hidráulico, que pode ser considerada como um dos mecanismos de dissipação de energia do ressalto, é de importância significativa no estudo do fenômeno e também como critério de projeto de estruturas de dissipação.

De maneira geral, acredita-se que o presente trabalho tenha estabelecido satisfatoriamente metodologias e parâmetros para o dimensionamento de estruturas de dissipação por ressalto hidráulico, atendendo os objetivos propostos e colaborando no trabalho de Pesquisa e Desenvolvimento no qual se encontra inserido. Em que pese as limitações do modelo utilizado ou até mesmo dos ajustes criados, foi possível vislumbrar os

efeitos da submergência nos diversos parâmetros avaliados. Acredita-se que este estudo possa contribuir para o dimensionamento econômico e, por que não, mais seguro de estruturas de dissipação de energia a jusante de vertedouros, possibilitando, além disso, um conhecimento crescente dos fenômenos inerentes ao ressalto hidráulico e do processo de dissipação de energia.

## 9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDUL-KHADER, M.H.; ELANGO, K. 1974. Turbulent pressure field beneath a hydraulic jump. **Journal of Hydraulic Research**, Delft, v. 12, n. 4, p. 469-489.
- AKBARI, M. E.; MITTAL, M. K.; PANDE, P. K. 1982. Pressure fluctuations on the floor of free and forced hydraulic jumps. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE HYDRAULIC MODELLING OF CIVIL ENGINEERING STRUCTURES, 1982, Coventry. **Papers...** Cranfield: BHRA Fluid Engineering. C1, p. 87-96.
- ARMENIO, V.; TOSCANO, P; FIOROTTO, V. 2000. On the effects of a negative step in pressure fluctuations at the bottom of a hydraulic jump. **Journal of Hydraulic Research**, Delft, v. 38, n. 5, p. 359-368.
- BAPTISTA, M.B.; LARA, M.M. 2003. **Fundamentos de Engenharia Hidráulica**. Belo Horizonte: UFMG. 437p.
- BENDAT, J.S.; PIERSON, A.G. 1971. **Random data: analysis and measurement procedures**. New York: Wiley-Interscience. 497 p.
- BENJAMIN, J. R.; CORNELL, C. A. 1970. **Probability, statistics and decision for civil engineers**. New York: McGraw-Hill.
- BHUTTO, H.B.G; MIRANI, S.N.; CHANDIO, S. N. 1989. Characteristics of free hydraulic jump in rectangular channel. **Mehran University Research Journal of Engineering and Technology**, Jamshoro, v. 8, n. 2, p. 34-44.
- CEREZER, S.M., 2008. **Uso da Teoria de Valores Extremos para estimar Valores Extremos de Pressões Hidrodinâmicas no Dissipador de Energia por Ressalto Hidráulico do vertedouro da UHE de Porto Colômbia**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 179 p.
- CHANSON, H. 1995. **Air Entrainment in Two-Dimensional turbulent shear flows with partially developed inflow conditions**, International Journal of Multiphase Flow, Vol. 21, No. 6, 1995, pg 1107-1121.
- CHOW, V.T. 1959. **Open-channel hydraulics**. New York: McGraw-Hill. p. 393-438.

- DAI PRÁ, M. 2006. **Análise da Macroturbulência em Ressalto Hidráulico**. Plano de Trabalho para o Exame de Qualificação de Doutorado. Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 108 p.
- ELEVATORSKY, E.A. 1959. **Hydraulic energy dissipators**. New York: McGraw-Hill. 214 p.
- ENDRES, L.A.M. 1990. **Contribuição ao desenvolvimento de um sistema para aquisição e tratamento de dados de pressões instantâneas em laboratório**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 104 f.
- ESTADOS UNIDOS. Bureau of Reclamation. 1987. **Design of small dams**. 3<sup>rd</sup> ed. Denver: Government Printing Office. 860 p.
- FAVRE, A.; KOVAZNAY, L.; DUMAS, R.; CAVIGLIO, J.; COANTIC, M. 1976. **La turbulence en mécanique des fluides**. Paris: Gauthier-Villars. 411 p.
- FIOROTTO, V.; RINALDO, A. 1982. Fluctuating uplift and lining in spillway stilling basins. **Journal of Hydraulic Engineering**, New York, v. 118, n. 4, p. 578-595.
- FIOROTTO, V.; RINALDO, A. 1992. Turbulent pressure fluctuations under hydraulic jumps. **Journal of Hydraulic Research**, Delft, v. 30, n. 4, p. 499-520.
- FRAGOSO, M. M., ALDAPE, G. E., *Perfil de um Salto Hidráulico Tridimensional y comportamiento de la Velocidad*, XXI Congresso Latinoamericano de Hidráulica, 2004, 10 pg.
- FRENCH, R. A. 1985. **Open-channel hydraulics**, New York: McGraw-Hill, 705 p.
- FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS. Usina Hidrelétrica de Porto Colômbia. 1996. **Estudos hidráulicos em modelo reduzido – modelo de conjunto – escala 1:100 – memória conceitual do modelo**. Rio de Janeiro. 16 p.
- FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS. Usina Hidrelétrica de Canabrava. 1999. **Relatório final de estudos – dec.t.012.2000**. Rio de Janeiro. 16 p.
- GOMES, J.F. 2000. **Visualização de escoamento macroturbulento: ressalto hidráulico a jusante de uma comporta**. [110] f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) –

Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

GOVINDA RAO, N.S.; RAJARATNAM, N. 1963. The submerged Hydraulic Jump. **Journal of the Hydraulic Division**, New York, v. 89, n. HY1, p. 139-162.

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

HAGER, W. H.; BREMEN, R.; KAWAGOSHI, N.T. 1989. Classical hydraulic jump: lenght of roller. **Journal of Hydraulic Research**, Delft, v. 28, n. 5, p. 591-608.

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

HAGER, W.H. 1992a. **Energy dissipators and hydraulic jump**. Dordrecht: Kluwer Academic. p. 83.

HAGER, W.H. 1992b. **Energy dissipators and hydraulic jump**. Dordrecht: Kluwer Academic. 289 p.

HENDERSON, F. M.; TIERNEY, D. G. 1963. Flow at the toe of a spillway – II. The “Solid Toe” Spillway. **La Houille Blanche**, Grenoble, n. 1, p. 42-50.

INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. Brazilian Committee on Dams (Org.). 2002. **Large Brazilian spillways: overview of Brazilian practice and experience in designing and building spillways for large dams**. Rio de Janeiro.

KAWAGOSHI, N.; HAGER, W.H. 1990. B-jump in sloping channel: part II. **Journal of Hydraulic Research**, Delft, v. 28, n. 4, p. 461-480.

LENAU, C. W.; CASSIDY, J. J. 1969. Flow through spillway flip bucket. **Journal of the Hydraulics Division**, New York, v. 95, n. HY2, p. 633-648.

LEUTHEUSSER, H. J., KARTHA, V. C. 1972. Effects of inflow condition on hydraulic flow. **Journal of the Hydraulic Division**, New York, v. 98, n. HY8, p. 1367-1385.

LINFU, Z.; JIE, X. 1984. Estudo das Características Hidráulicas e de Cavitação de Curvas Verticais em Canais, considerando o Escoamento Bidimensional, *Shuili xuebao*, n. 6, p. 19-27. (Traduzido do chinês por J. A. Pinto de Campos, LNEC, Lisboa, 1985)



- LONG, D.; RAJARATNAM, N.; STEFFLER, P.M.; SMY, P.R. 1991. Structure of flow in hydraulic jumps. **Journal of Hydraulic Research**, Delft, v. 29, n. 2, p. 207-218.
- LOPARDO, R.A.; SOLARI, H.G. 1980. Flutuaciones de presión en la base de resalto libre. In: CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, 9., Mérida, 1980. **Memórias. I.A.H.R.** p. 69-78.
- LOPARDO, R.A.; VERNET, G.F.; HENNING, R.E. 1984. Correlacion de Presiones Instantaneas inducidas por un Resalto Hidraulico Libre y Estable. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE HIDRAULICA, 11., Buenos Aires, 1984. **Anales. I.A.H.R.**
- LOPARDO, R.A. 1986. **Apunte sobre fluctuaciones macroturbulentas de presión, medición, análisis y aplicación al resalto hidráulico.** São Paulo: Escola Politécnica. 44 p.
- LOPARDO, R.A. 1987. Notas sobre fluctuaciones macroturbulentas de presión, medición, análisis y aplicación al resalto hidráulico. **Revista Latino Americana de Hidráulica**, São Paulo, n. 2, set., p. 109-154.
- LOPARDO, R. A, 1992, Presiones Fluctuantes em Disipadores a Resalto Forzado, In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, 15, 1992, 11 pg.
- LOPARDO, R.A. 1996. Modelación física de flujo macroturbulento en estructuras hidráulicas. **Apuntes de Ingeniería**, Santiago de Chile, v.19, n. 2, p. 5-20.
- LOPARDO, R.A.; DE LIO, J.C.; LOPARDO, M.C. 1999. Physical modelling and design estimation of instantaneous pressures in stilling basins. In: INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR HYDRAULIC RESEARCH, 28., 1999, Graz. **Hydraulic engineering for sustainable water resources management at the turn of the millennium.** Graz: Institute for Hydraulics and Hydrology. 1 CD-ROM.
- LOPARDO, R.A.; FATTOR, C.A.; CASADO, J.M.; LOPARDO, M.C. 2004a. Una aproximación por turbulencia remanente de la longitud del resalto sumergido. In: CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, 21., 2004, São Pedro. **Anales.** São Paulo: Asociación Internacional de Investigaciones Hidráulicas. 1 CD-ROM.

- LOPARDO, R.A.; FATTOR, C.A.; LOPARDO, M.C.; CASADO, J.M. 2004b. Instantaneous pressure field on a submerged jump stilling basins. In: YAZDANDOOST, F.; ATTARI, J. (Ed.). **Hydraulics of dams and river structures**. London: A. A. Balkema. p. 133-138.
- LOPARDO, R.A. 2005. Una aproximación al estudios de flujos macroturbulentos en resalto hidráulico. In: ESCOAMENTOS Macroturbulentos Porto Alegre: Departamento de Obras Hidráulicas, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 40 p. Extensão Universitária modalidade “Curso Presencial”.
- MARQUES, M.G.; ENDRES, L.A.M.; ALMEIDA, L.E.S.B.; REZENDE, B.S. 1991. Caracterização do campo de pressões instantâneas em bacia de dissipação planas a jusante de descarregadores. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 9., 1991, Rio de Janeiro [e] SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 5., 1991, Rio de Janeiro. **Anais**. Rio de Janeiro: ABRH. v. 3, p. 344-353.
- MARQUES, M.G. 1995. **Nouvelle approche pour le dimensionnement des dissipateurs à auge**. [299] f. Tese (Doutorado) - Université Laval. Faculté des Sciences et de Génie, Québec.
- MARQUES, M.G.; DRAPEAU, J.; VERRETTE, J. L. 1996. Análise da flutuação de pressão provocada pela formação de um ressalto hidráulico a jusante de vertedouro. In: CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, 17., 1996, Guayaquil. **Memorias**. Guayaquil: Asociación Internacional de Investigaciones Hidráulicas. p. 1-11.
- MARQUES, M.G.; DRAPEAU, J.; VERRETE, J.L. 1997. Flutuação de Pressão em um Ressalto Hidráulico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 2, n. 2, p. 45-52.
- MARQUES, M.G.; OLLERMANN G.; WEILLER C.; ENDRES L.A.M. 1998. Perda de carga no interior de um ressalto hidráulico a jusante de vertedouro. In: CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, 18, 1998, Oaxaca. **Memorias**. Oaxaca: Asociación Internacional de Investigaciones Hidráulicas. p. 1-6.
- MARQUES, M.G.; ALMEIDA, F.M.; ENDRES, L.A.M. 1999. Adimensionalização de pressões médias em bacias de dissipação por ressalto hidráulico. In: SIMPÓSIO

- BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 13., 1999, Belo Horizonte. **Anais...**  
Belo Horizonte: ABRH. 1 CD-ROM.
- MARQUES, M.G.; TEIXEIRA, E.D.; MARTINEZ, D.B.; GOMES, J.F.; ENDRES, L. A. M.  
2004a. Análise da macroturbulência em estruturas de dissipação de energia através do estudo de variação de pressões e níveis. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 9, n. 1, p. 127-153.
- MARQUES, M.G.; TRIERWEILER NETO, E.F.; ENDRES, L.A.M. ; TEIXEIRA, E.D.  
2004b. Determinação analítica da linha de separação de escoamentos para o ressalto hidráulico. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, 21., 2004, São Pedro. **Anales**. São Paulo: IAHR. 1 CD-ROM, G214.
- MARQUES, M.G.; ENDRES, L.A.M.; TEIXEIRA, E.D.; TRIERWEILER NETO, E.F.  
2004c. Previsão de Pressões Extremas junto ao fundo de uma Bacia de Dissipação por Ressalto Hidráulico – Estudo de Caso. In: SIMPÓSIO SOBRE PEQUENAS E MÉDIAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS, 4., 2004, Recife.
- MARQUES, M.G.; TRIERWEILER, E.F.; TEIXEIRA, E.D.; WIEST, R.A. 2006.  
Contribuição ao dimensionamento de estruturas de dissipação através do estudo da flutuação de pressão em ressalto hidráulico formado a jusante de comporta. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE PEQUENAS E MÉDIAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS, 5., 2006, Florianópolis. **Temas**. Florianópolis: Tractebel Energia. 1 CD-ROM.
- MATLAB: the language of technical computing. 1998. Natick: MathWorks, c1984-1988.  
(5.3.0.29215A (R11)).
- MEES ALVES, A.A. 2008, **Caracterização das solicitações hidrodinâmicas em Bacias de Dissipação por Ressalto Hidráulico com baixo número de Froude**. 157 fls. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- MOK, K. M. 2004, Relation of surface roller eddy formation and surface fluctuation in hydraulic jump, **Journal of Hydraulic Research**, Vol. 4, No. 2, pg. 270-212.

- MULAN, W.; CHUANFENG, J.; BAOLIAN, X.; SHUANGLIN, S. 1987 Flutuações de Pressão debaixo de um Ressalto Afogado a jusante de Barragem. *Shuili xuebao*, n. 4, p. 56-59. (Traduzido do chinês por J. A. Pinto de Campos, LNEC, Lisboa, 1988)
- MÜLLER, D. 2003. **Análise de pressões junto ao fundo no ressalto hidráulico formado a jusante de um vertedouro através da distribuição bivariada de valores extremos.** 84 f. (Tese de Doutorado) – Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- NARAYANAN, R. 1978. Pressure Fluctuations beneath Submerged Jump. **Journal of Hydraulics Division**, v. 104, n. HY9, p. 1331-1342.
- OHTSU, I.; YASUDA, Y. 1991. Hydraulic jump in sloping channels. **Journal of Hydraulic Engineering**, New York, v. 117, n. 7, p. 905-921.
- ORTIZ, J.P.; ALMEIDA, F.M.; CARVALHO, E.; BORSARI, R.D. 1998. Medições em protótipo de flutuações de pressão na bacia de dissipação da Usina de Porto Colômbia. In: ESCOLA DE PRIMAVERA EM TRANSIÇÃO E TURBULÊNCIA, 1., 1998, Rio de Janeiro. **Anais.** Rio de Janeiro: ABCM. v. 1, p. 293-320.
- PETERKA, A J. 1974. **Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators.** Washington: U.S. Govt. Print. Off. 222 p.
- PINHEIRO, A.A.N. 1995. **Acções hidrodinâmicas em soleiras de bacia de dissipação de energia por ressalto hidráulico.** 353 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Técnica de Lisboa.
- PINTO, L.C.D.S.; VASCONCELLOS, J.E.D.; SEYSSEL, R.L. 1988. Análise experimental da flutuação de pressão na base de um ressalto livre e afogado. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, 13., 1988, Habana. **Memorias.** Habana: Asociación Internacional de Investigaciones Hidráulicas. v. 2, p. 182-194.
- RAJARATNAM, N. 1965a. Submerged hydraulic jump. **Journal of the Hydraulics Division**, New York, v. 91, n. 4, p. 71-96.
- RAJARATNAM, N. 1965b. The hydraulic jump as wall jet. **Journal of the Hydraulics Division**, New York, v. 91, n. 5, p. 107-132.

- RAJARATNAM, N. 1967. Hydraulic jumps. **Advances in Hydrosience**, New York, v. 4, p. 197-280.
- RAJARATNAM, N., SUBRAMANYA, K., Profile of the Hydraulic Jump, **Journal of the Hydraulics Division**, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 94, NO. HY3, 1968, pg 663 – 673.
- RAJARATNAM, N.; MURAHARI, V. 1974. Flow Characteristics of Sloping Channel Jumps. **Journal of the Hydraulics Division**, New York, v. 100, n. 6, p. 731-740.
- RESCH, F.J.; LEUTHEUSSER, H.J. 1971. Mesures de turbulence dans le ressaut hydraulique. **La Houille Blanche**, Grenoble, v. 26, n. 1, p. 17-32.
- RODRIGUES, R.C. 2002. **Estudo numérico experimental de bacia de dissipação**. 124 p. Dissertação (Mestrado) - Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro.
- ROUSE, H.; SIAO, T.T.; NAGARATNAM, S. 1959. Turbulence characteristics of the hydraulic jump. **Transactions of the American Society of Civil Engineers**, New York, v. 124, p. 926-950.
- SAUMA HADDAD, J.C.; DE LIO, J.C.; LOPARDO, R.A. 1992. Una aproximación analítica para la superficie libre del resalto hidraulico. In: CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, 15., 1992, Cartagena. **Memorias**. Cartagena: Asociación Internacional de Investigaciones Hidráulicas. 11 p.
- SENTURK, F. 1998. **Hydraulics of dams and reservoirs**. Highlands Ranch: Water Resources Publications.
- SPIEGEL, M. R. 1993. **Estatística**. São Paulo: Makron Books - Coleção Schaum. p. 136–152.
- TEIXEIRA, E.D. 2003. **Previsão dos valores de pressão junto ao fundo em bacias de dissipação por ressalto hidráulico**. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- TEIXEIRA, E.D.; TRIERWEILER NETO, E.F.; ENDRES, L.A.M.; MARQUES, M. G. 2003a. Determinação do coeficiente estatístico de distribuição de probabilidade para valores extremos de pressões no ressalto hidráulico. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 15, 2003, Curitiba. **Anais**. Curitiba: ABRH., T 310.

- TEIXEIRA, E.D.; TRIERWEILER NETO, E.F.; ENDRES, L.A.M.; MARQUES, M. G. 2003b. Análise das flutuações de pressão junto ao fundo em bacias de dissipação por ressalto hidráulico. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 25., 2003, Salvador. **Anais**. Rio de Janeiro: Comitê Brasileiro de Barragens. v. 1, T91-A14, p. 188-198.
- TENNEKES, H.; LUMLEY, J.L. 1972. **A first course in turbulence**. Cambridge: MIT. 300 p.
- TOSO, J. W.; BOWERS, C. E. 1988. Extreme pressures in hydraulic-jump stilling basins. **Journal of Hydraulic Engineering**, New York, v. 114, n. 8, p. 829-843, Aug.
- TRIERWEILER NETO, E.F.; AMANTE, R.C.R.; TEIXEIRA, E.D.; MARQUES, M. G. 2005a. Comparação das medições de pressão em bacia de dissipação por ressalto hidráulico no protótipo e nos modelos reduzidos da UHE Porto Colômbia. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 26., 2005, Goiânia. **Anais**. Rio de Janeiro: Comitê Brasileiro de Barragens. 1 CD-ROM, T97, A04.
- TRIERWEILER NETO, E.F.; ENDRES, L.A.M.; MEES, A.A.A.; PRÁ, M.D.; TEIXEIRA, E.D.; WIEST, R.A.; CANELLAS, A.V.B.; FERAUDY FILHO, R.P.; MARQUES, M.G. 2005b. Influência da utilização de condutos flexíveis em medições de flutuação de pressão em ressalto hidráulico. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 16., 2005, João Pessoa. **Anais ABRH**. 1 CD-ROM, Trabalhos Técnicos.
- TRIERWEILER NETO, E.F. 2006. **Avaliação do campo de pressões em ressalto hidráulico formado à jusante de uma comporta com diferentes graus de submersão**. 174 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- WIEST, R.A.; MARQUES, M.G.; TEIXEIRA, E. D.; TRIERWEILER NETO, E.F.; MEES, A. A. A.; PRÁ, M.D.; ENDRES, L.A.M.; CANELLAS, A.V.B.; FERAUDY FILHO, R.P. 2005. Influência da submersão na determinação do coeficiente estatístico de distribuição de probabilidade para pressões extremas em bacias de dissipação por ressalto hidráulico. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 16., 2005, João Pessoa. **Anais**. [João Pessoa]: ABRH. 1 CD-ROM, Trabalhos Técnicos.
- WILSON, E. H.; TURNER, A. A. 1972. Boundary layer effects on hydraulic jump location, v. 98, n. HY7, p. 1127-1142.

## **ANEXOS**

## ANEXO I

### Metodologia de estabelecimento da Posição de Início do Ressalto

Tabela 1 – Conjunto de parâmetros dos ensaios realizados (dimensões de protótipo)

Q (m³/s)	q (m²/s)	Hc (m)	Nm (m)	Nj (m)	Tw (m)	Hm (m)	a (m)	Go	PGo	β (°)	Σh (m)
997,64	7,390	1,772	465,780	442,915	8,92	13,780	0,535	0,685	0,195	63	7,65
1004,17	7,438	1,780	465,840	444,075	10,08	13,840	0,535	0,685	0,195	63	7,64
<b>1005,80</b>	<b>7,450</b>	<b>1,782</b>	<b>465,800</b>	<b>447,790</b>	<b>13,79</b>	<b>13,800</b>	<b>0,535</b>	<b>0,685</b>	<b>0,195</b>	<b>63</b>	<b>7,58</b>
2000,00	14,815	2,818	465,670	444,260	10,26	13,670	1,275	1,389	0,5873	66	7,28
1995,57	14,782	2,814	465,650	444,960	10,96	13,650	1,275	1,389	0,5873	66	7,29
1995,57	14,782	2,814	465,690	445,920	11,92	13,690	1,275	1,389	0,5873	66	7,33
<b>1995,57</b>	<b>14,782</b>	<b>2,814</b>	<b>465,700</b>	<b>450,090</b>	<b>16,09</b>	<b>13,700</b>	<b>1,275</b>	<b>1,389</b>	<b>0,5873</b>	<b>66</b>	<b>7,34</b>
3000,00	22,222	3,692	465,740	445,360	11,36	13,740	2,065	2,153	0,994	70	7,32
3005,05	22,260	3,696	465,710	445,765	11,77	13,710	2,065	2,153	0,994	70	7,27
<b>2995,44</b>	<b>22,188</b>	<b>3,689</b>	<b>465,770</b>	<b>448,330</b>	<b>14,33</b>	<b>13,770</b>	<b>2,065</b>	<b>2,153</b>	<b>0,994</b>	<b>70</b>	<b>7,36</b>
<b>3005,05</b>	<b>22,260</b>	<b>3,696</b>	<b>465,760</b>	<b>450,060</b>	<b>16,06</b>	<b>13,760</b>	<b>2,065</b>	<b>2,153</b>	<b>0,994</b>	<b>70</b>	<b>7,32</b>
4001,03	29,637	4,474	465,750	446,160	12,16	13,750	2,835	2,9036	1,3904	74	7,05
4006,36	29,677	4,478	465,770	446,340	12,34	13,770	2,835	2,9036	1,3904	74	7,06
4011,68	29,716	4,482	465,780	447,030	13,03	13,780	2,835	2,9036	1,3904	74	7,05
<b>4019,68</b>	<b>29,775</b>	<b>4,488</b>	<b>465,770</b>	<b>450,050</b>	<b>16,05</b>	<b>13,770</b>	<b>2,835</b>	<b>2,9036</b>	<b>1,3904</b>	<b>74</b>	<b>7,02</b>
5995,32	44,410	5,858	465,707	447,820	13,82	13,707	4,44	4,4908	2,2198	81	6,50
6007,67	44,501	5,866	465,715	449,670	15,67	13,715	4,44	4,4908	2,2198	81	6,49
<b>6020,03</b>	<b>44,593</b>	<b>5,874</b>	<b>465,720</b>	<b>450,320</b>	<b>16,32</b>	<b>13,720</b>	<b>4,44</b>	<b>4,4908</b>	<b>2,2198</b>	<b>81</b>	<b>6,47</b>
7998,56	59,249	7,100	465,730	449,545	15,55	13,730	6,08	6,1301	3,04	92	5,93
8005,44	59,300	7,104	465,718	451,100	17,10	13,718	6,08	6,1301	3,04	92	5,91

Tabela 2 – Conjunto de parâmetros relativos ao início do ressalto (dimensões de protótipo)

Q (m³/s)	CIRA (m)	HmCIRA (m)	H1 (m)	v1 (m)	N1 (m)	Alfa (°)	h1 (m)	Fr	h2 (m)	Zcal (m)	TW/h2	Fr(s-1)	Zcal/hc
997,64	441,940	23,84	16,19	17,82	0,41	45,00	0,29	10,50	4,21	7,65	2,12	<b>11,73</b>	<b>4,31</b>
1004,17	443,010	22,83	15,19	17,26	0,43	45,00	0,30	9,99	4,15	8,71	2,43	<b>14,24</b>	<b>4,89</b>
<b>1005,80</b>							<b>0,35</b>	<b>8,43</b>	<b>4,05</b>		<b>3,40</b>		
2000,00	442,680	22,99	15,71	17,55	0,84	45,00	0,60	7,25	5,83	8,08	1,76	<b>5,51</b>	<b>2,87</b>
1995,57	443,660	21,99	14,70	16,98	0,87	45,00	0,62	6,91	5,72	9,04	1,92	<b>6,34</b>	<b>3,21</b>
1995,57	444,600	21,09	13,76	16,43	0,90	43,93	0,65	6,52	5,66	9,95	2,11	<b>7,22</b>	<b>3,54</b>
<b>1995,57</b>							<b>0,75</b>	<b>5,57</b>	<b>5,54</b>		<b>2,91</b>		
3000,00	442,830	22,91	15,59	17,49	1,27	45,00	0,90	5,89	7,05	7,93	1,61	<b>3,60</b>	<b>2,15</b>
3005,05	443,920	21,79	14,52	16,88	1,32	45,00	0,93	5,58	6,91	8,99	1,70	<b>3,92</b>	<b>2,43</b>
<b>2995,44</b>							<b>1,03</b>	<b>4,98</b>	<b>6,75</b>		<b>2,12</b>		
<b>3005,05</b>							<b>1,11</b>	<b>4,59</b>	<b>6,68</b>		<b>2,41</b>		
4001,03	443,060	22,69	15,64	17,51	1,69	45,00	1,20	5,11	8,07	7,86	1,51	<b>2,59</b>	<b>1,76</b>
4006,36	443,760	22,01	14,95	17,13	1,73	45,00	1,23	4,94	7,97	8,53	1,55	<b>2,71</b>	<b>1,91</b>
4011,68	444,550	21,23	14,18	16,68	1,78	45,00	1,26	4,74	7,85	9,29	1,66	<b>3,13</b>	<b>2,07</b>
<b>4019,68</b>							<b>1,45</b>	<b>4,07</b>	<b>7,66</b>		<b>2,10</b>		
5995,32	444,020	21,69	15,18	17,26	2,57	45,00	1,82	4,08	9,64	8,20	1,43	<b>1,77</b>	<b>1,40</b>
6007,67	446,780	18,94	12,44	15,62	2,85	42,41	2,10	3,44	9,23	10,68	1,70	<b>2,40</b>	<b>1,82</b>
<b>6020,03</b>							<b>2,10</b>	<b>3,44</b>	<b>9,22</b>		<b>1,77</b>		
7998,56	444,680	21,05	15,12	17,22	3,44	45,00	2,43	3,53	10,97	8,25	1,42	<b>1,47</b>	<b>1,16</b>
8005,44	447,470	18,25	12,34	15,56	3,81	42,18	2,82	2,96	10,48	10,65	1,63	<b>1,87</b>	<b>1,50</b>



## ANEXO II

### Comportamento da Pressão Média ( $Q_p$ = Vazão do protótipo)

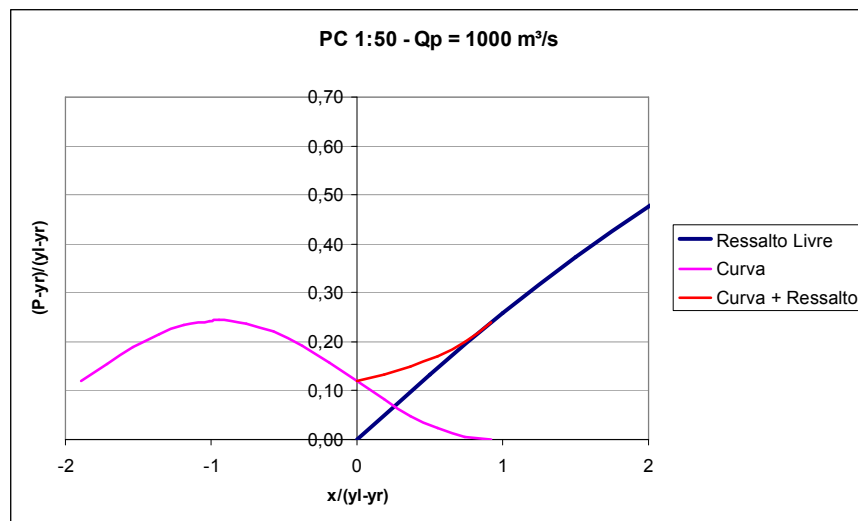


Gráfico 1 - Comportamento da pressão média junto à curva ( $Q_p=1000 \text{ m}^3/\text{s}$ )

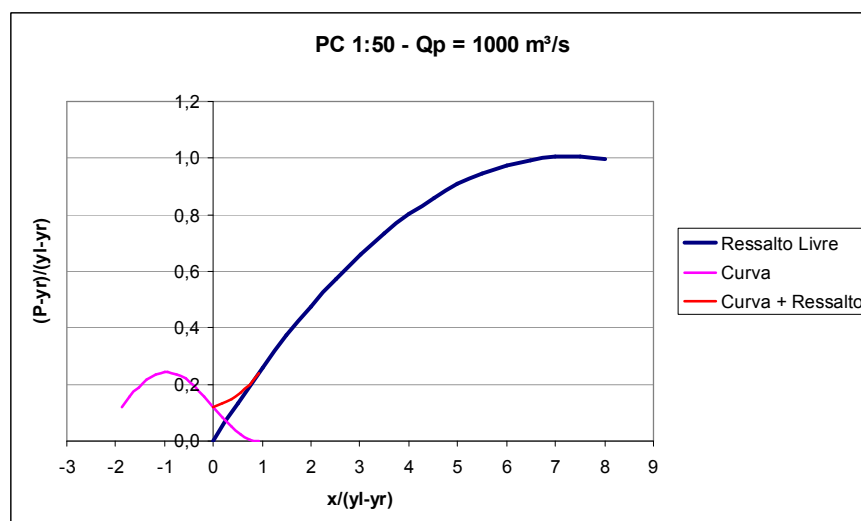


Gráfico 2 - Pressão Média ao longo do ressalto ( $Q_p=1000 \text{ m}^3/\text{s}$ )

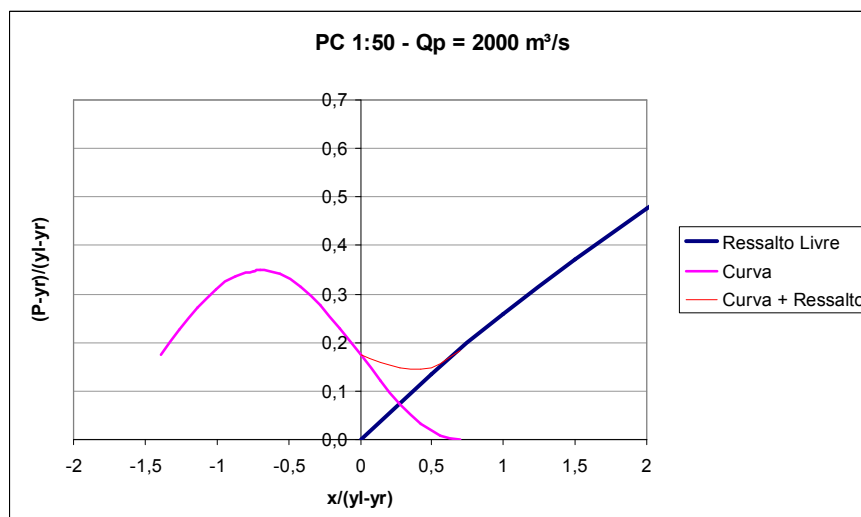
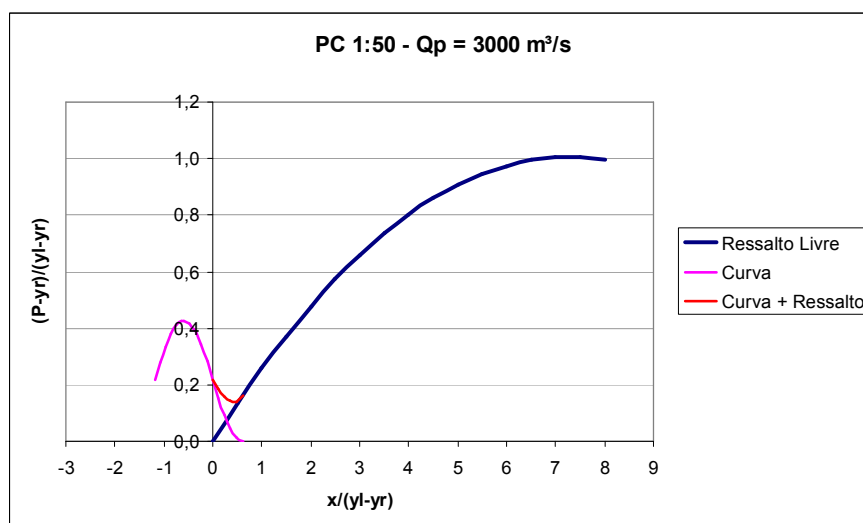
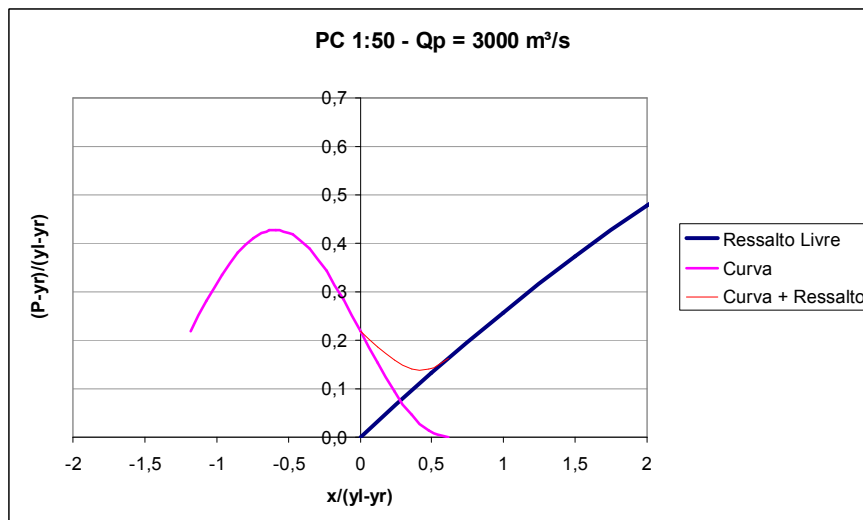
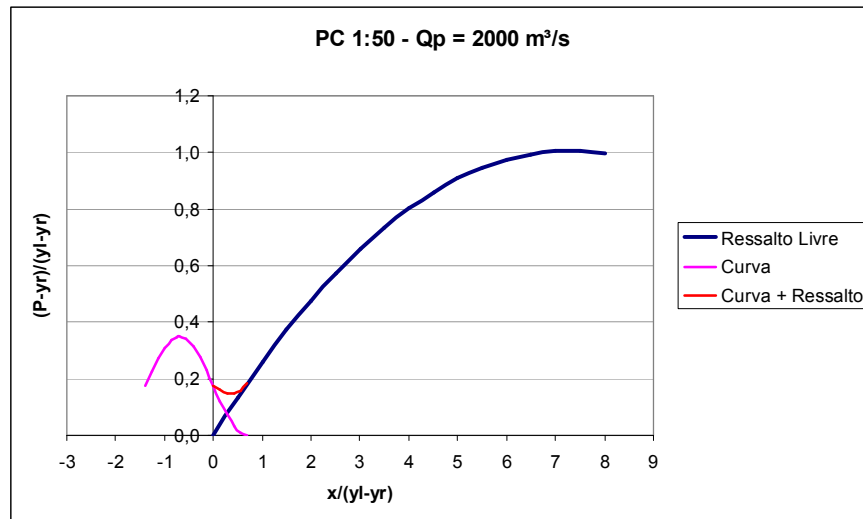


Gráfico 3 - Comportamento da pressão média junto à curva ( $Q_p=2000 \text{ m}^3/\text{s}$ )



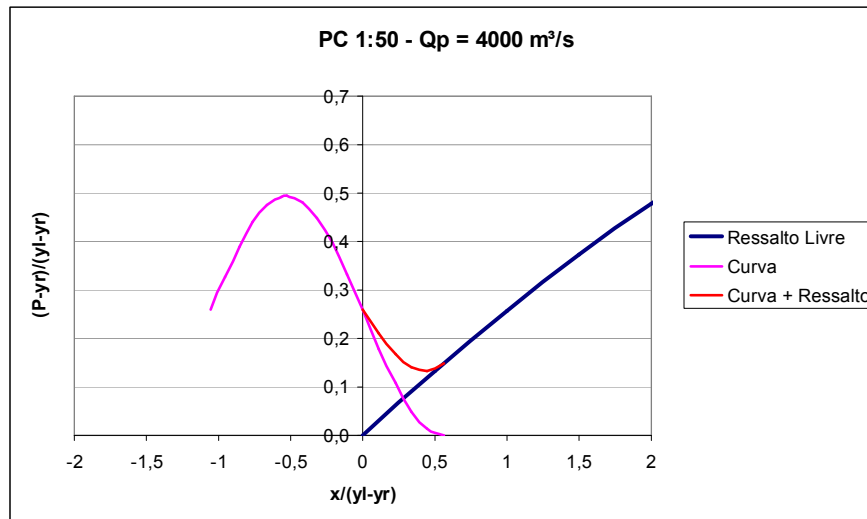


Gráfico 7 - Comportamento da pressão média junto à curva ( $Q_p=4000 \text{ m}^3/\text{s}$ )

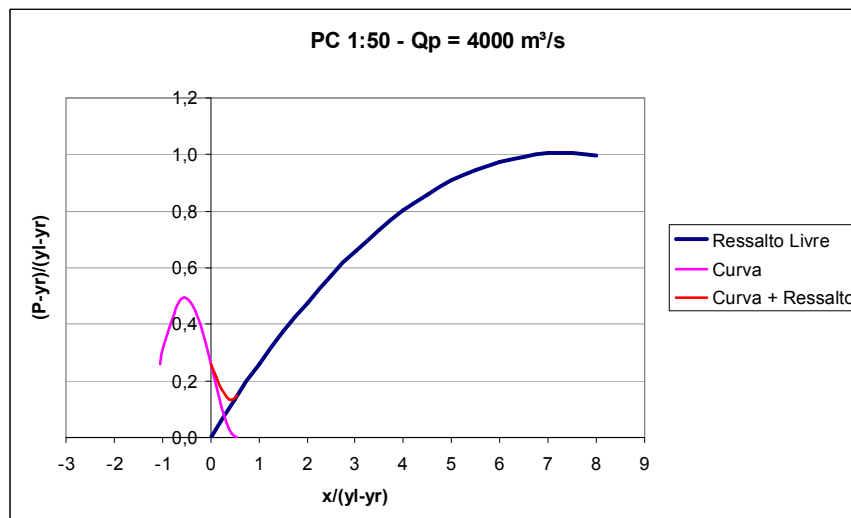


Gráfico 8 - Pressão Média ao longo do ressalto ( $Q_p=4000 \text{ m}^3/\text{s}$ )

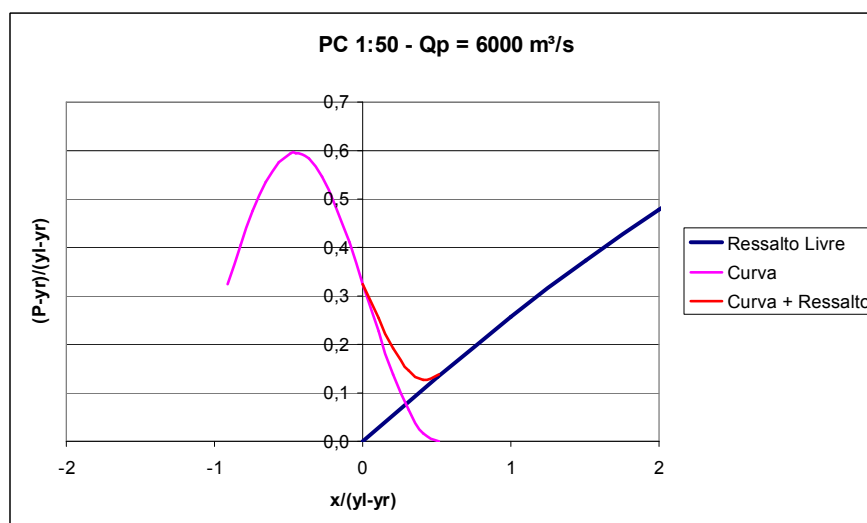


Gráfico 9 - Comportamento da pressão média junto à curva ( $Q_p=6000 \text{ m}^3/\text{s}$ )

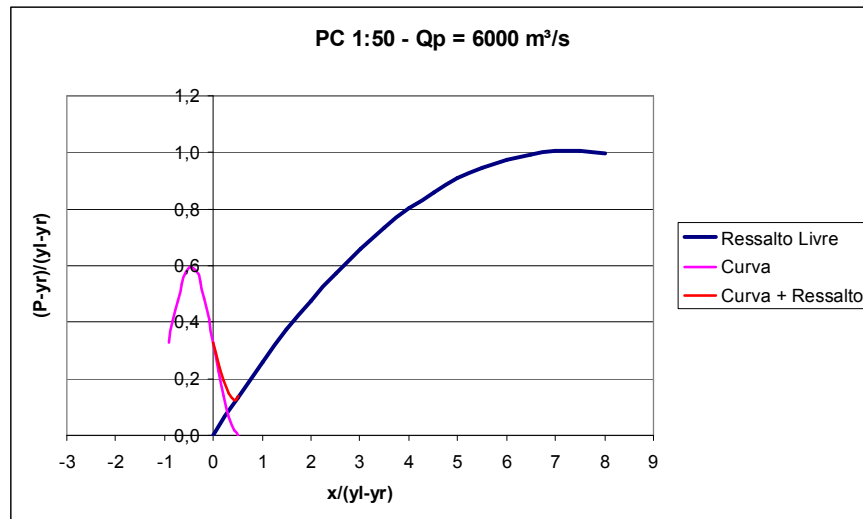


Gráfico 10 - Pressão Média ao longo do ressalto ( $Q_p=6000 \text{ m}^3/\text{s}$ )

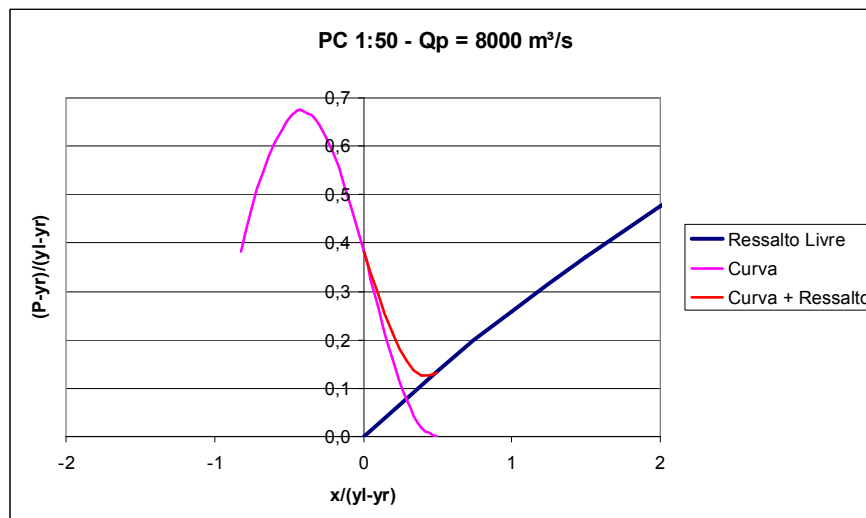


Gráfico 11 - Comportamento da pressão média junto à curva ( $Q_p=8000 \text{ m}^3/\text{s}$ )

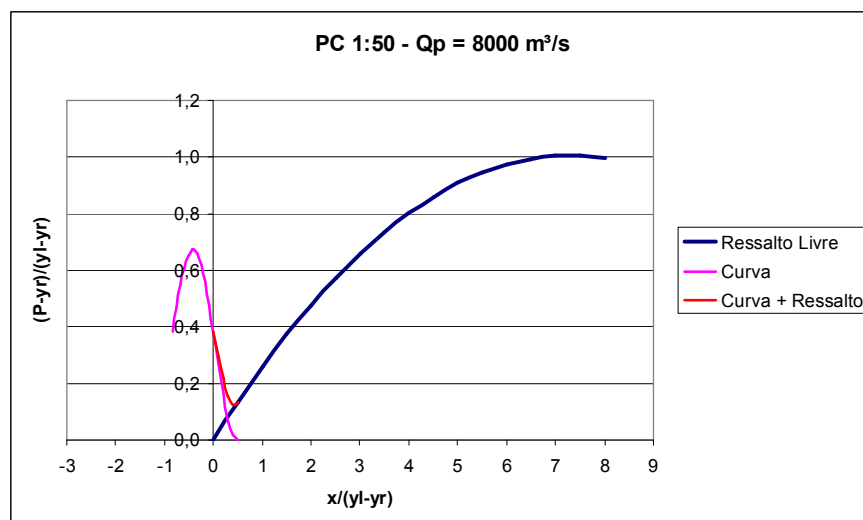


Gráfico 12 - Pressão Média ao longo do ressalto ( $Q_p=8000 \text{ m}^3/\text{s}$ )

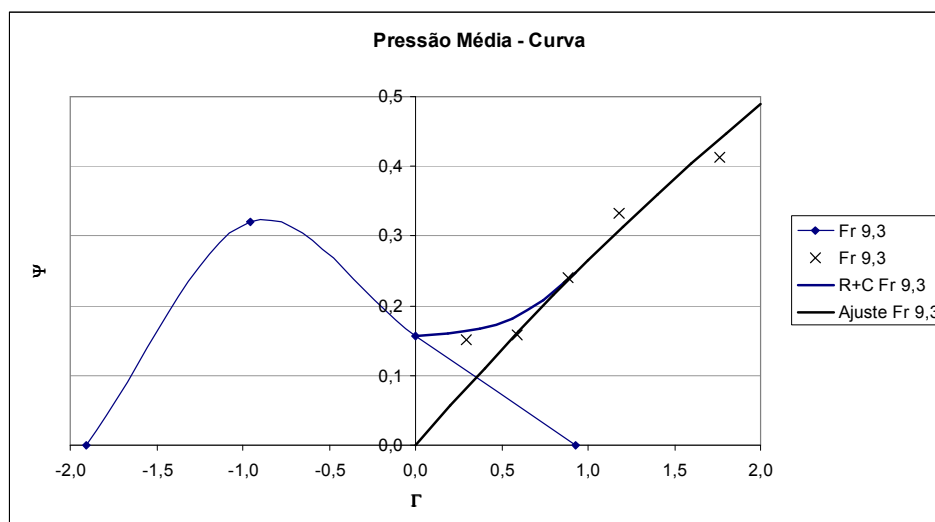


Gráfico 13 – Comparação da metodologia de cálculo das pressões na região da curva em relação às medições de Marques et al (1997)

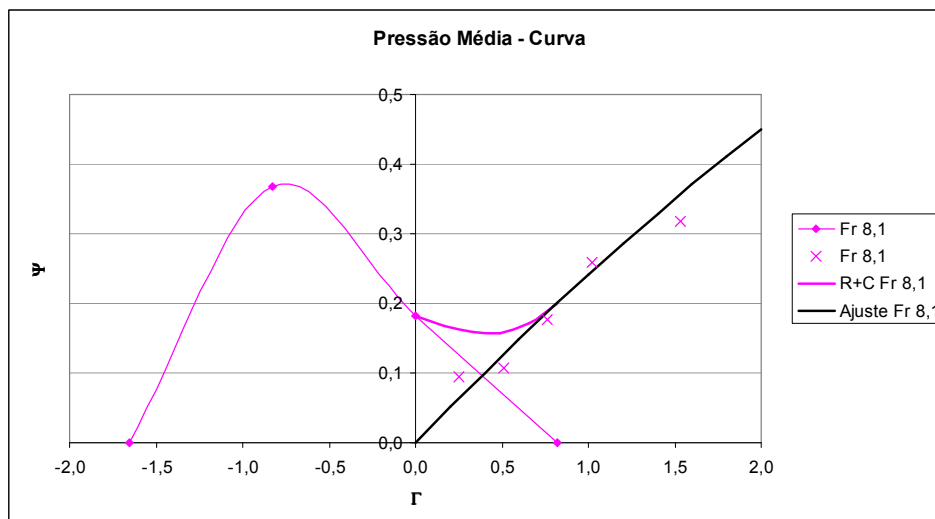


Gráfico 14 - Comparação da metodologia de cálculo das pressões na região da curva em relação às medições de Marques et al (1997)

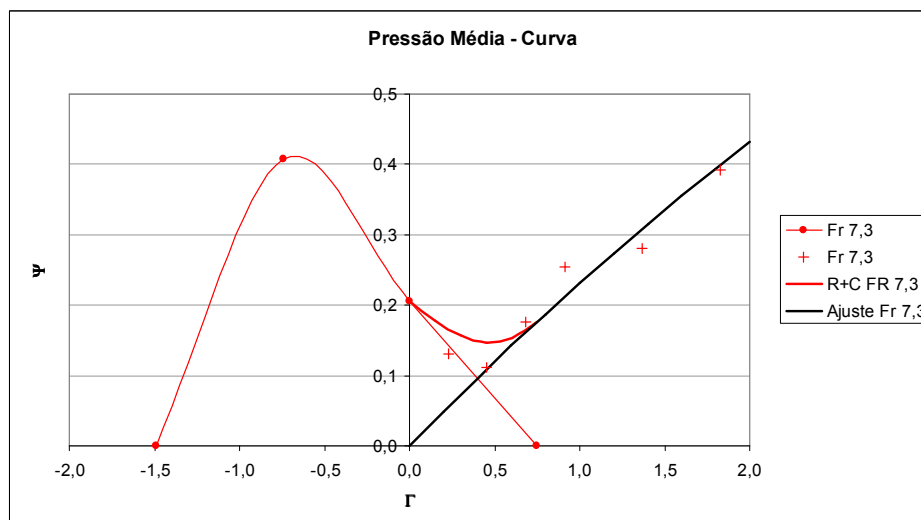


Gráfico 15 - Comparação da metodologia de cálculo das pressões na região da curva em relação às medições de Marques et al (1997)

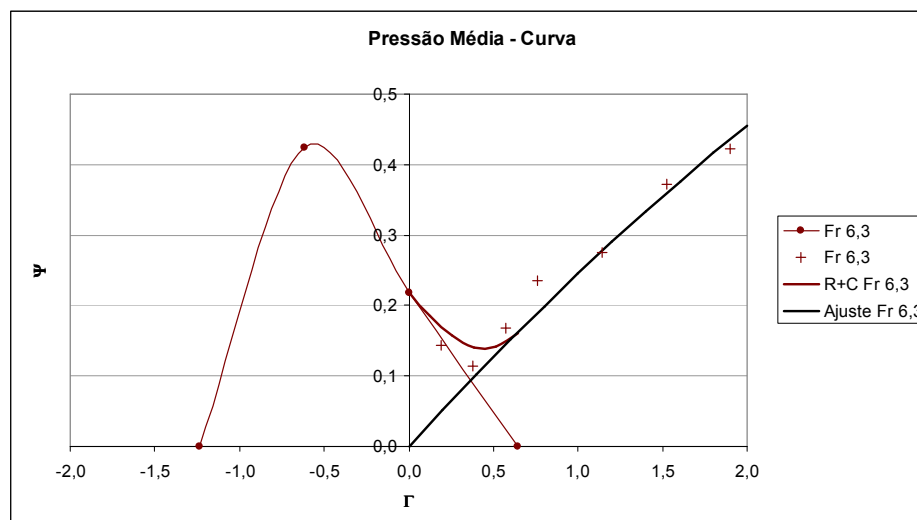


Gráfico 16 - Comparação da metodologia de cálculo das pressões na região da curva em relação às medições de Marques et al (1997)

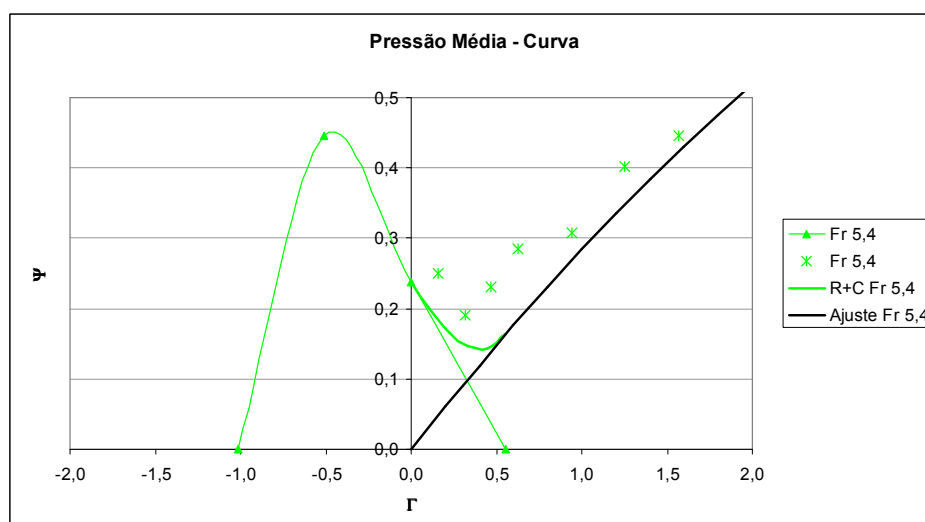


Gráfico 17 - Comparação da metodologia de cálculo das pressões na região da curva em relação às medições de Marques et al (1997)

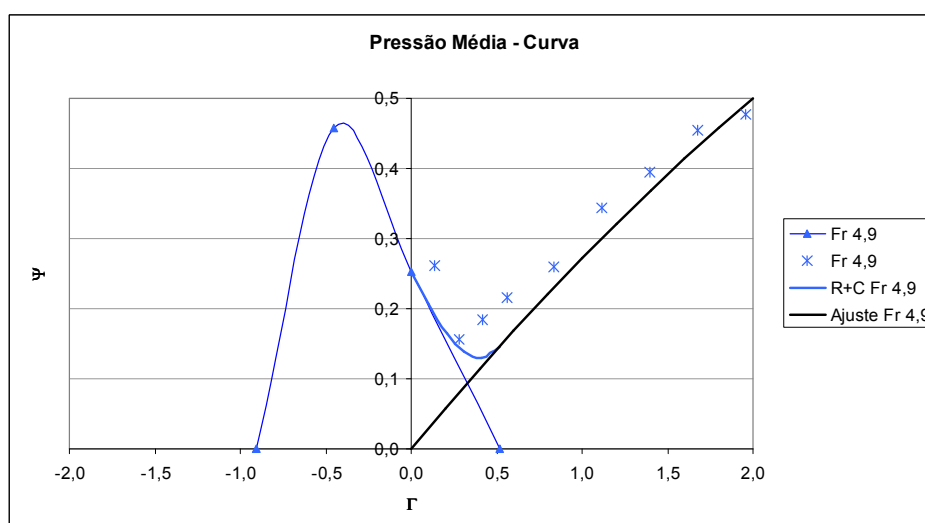


Gráfico 18 - Comparação da metodologia de cálculo das pressões na região da curva em relação às medições de Marques et al (1997)

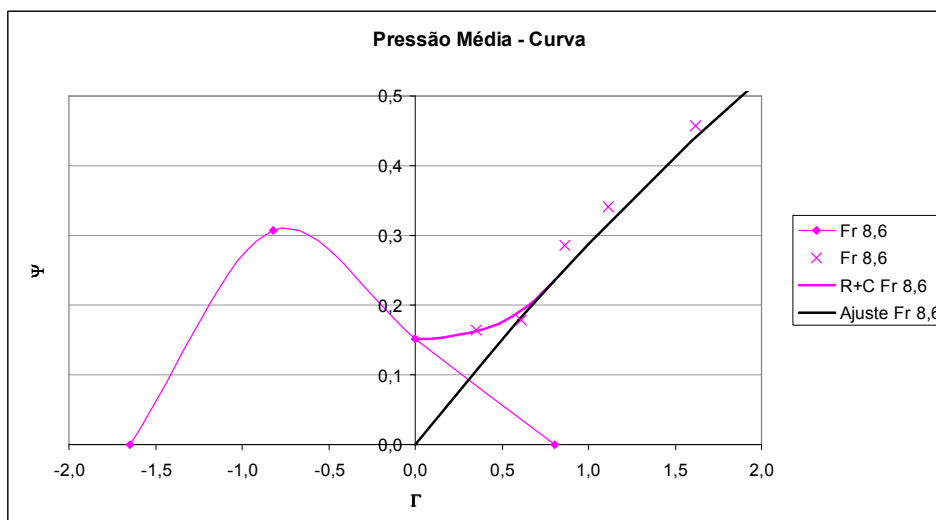


Gráfico 19 - Comparação da metodologia de cálculo das pressões na região da curva em relação às medições de Endres (1990)

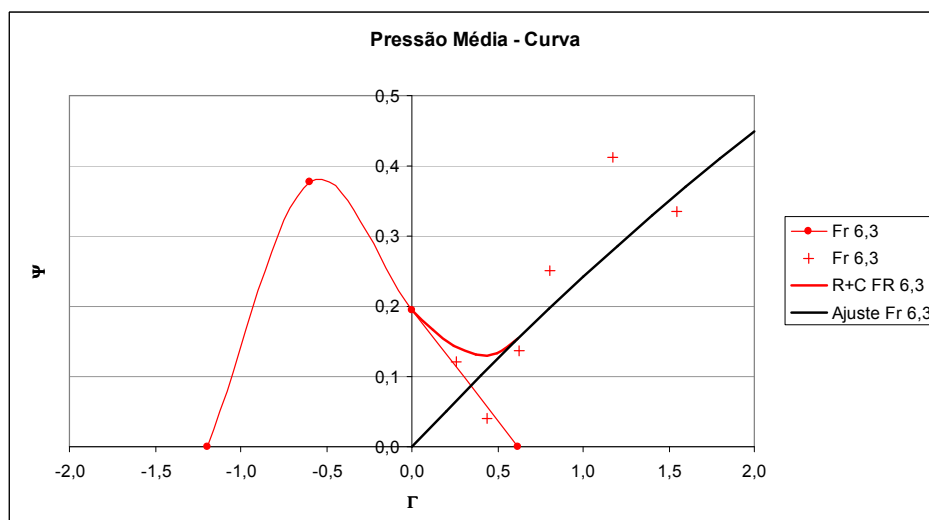


Gráfico 20 - Comparação da metodologia de cálculo das pressões na região da curva em relação às medições de Endres (1990)

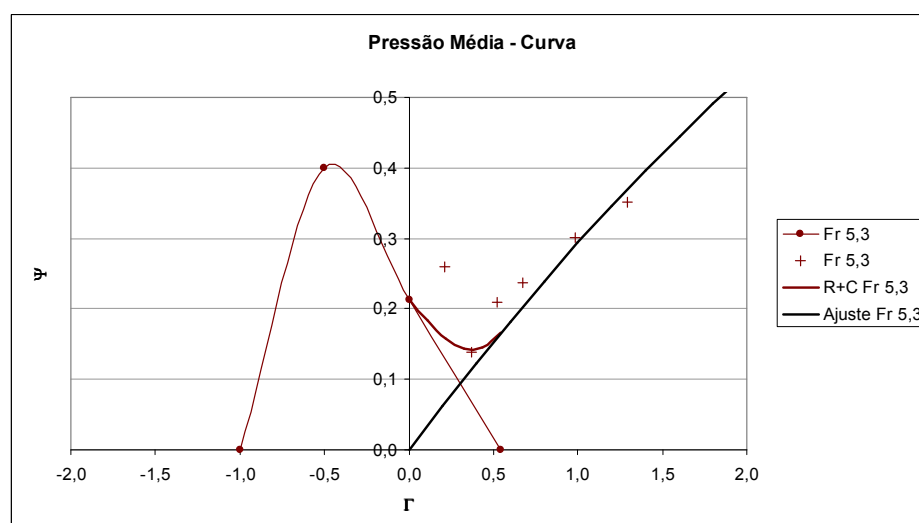


Gráfico 21 - Comparação da metodologia de cálculo das pressões na região da curva em relação às medições de Endres (1990)

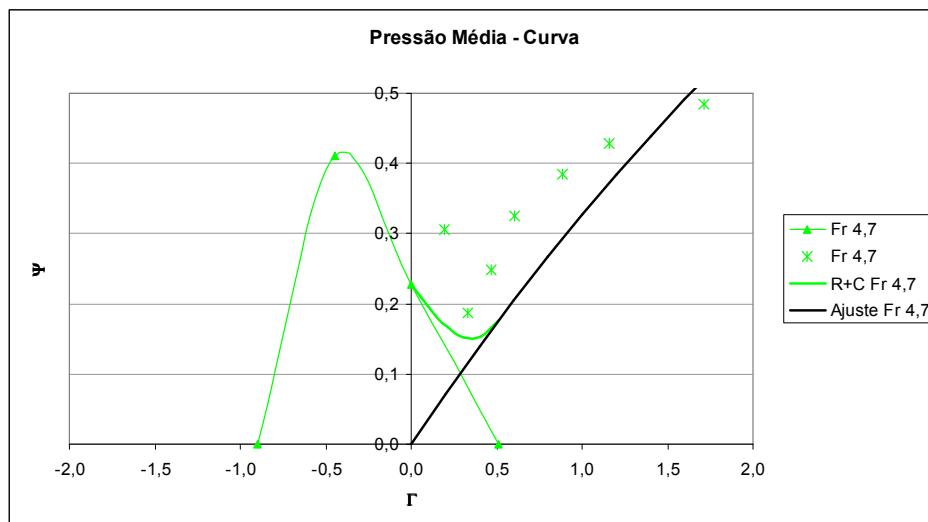


Gráfico 22 - Comparação da metodologia de cálculo das pressões na região da curva em relação às medições de Endres (1990)

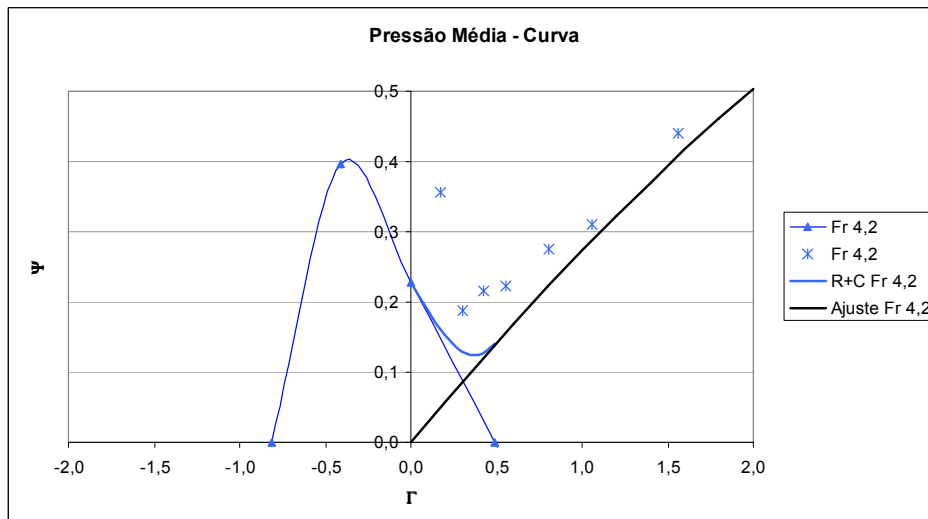


Gráfico 23 - Comparação da metodologia de cálculo das pressões na região da curva em relação às medições de Endres (1990)



### ANEXO III

Intervalo de confiança para a pressão média ( $Q_p$  = vazão do protótipo)

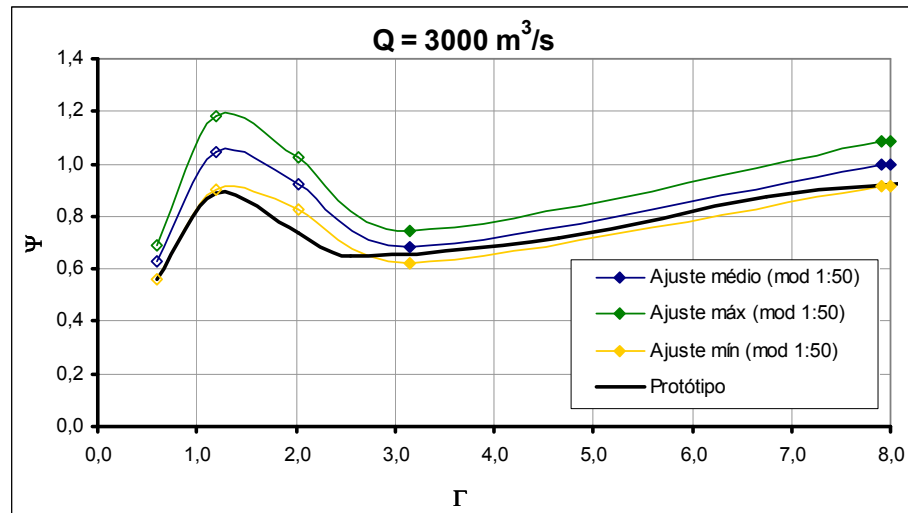


Gráfico 24 - Intervalo de confiança para a vazão média ( $Q_p=3000 \text{ m}^3/\text{s}$ )

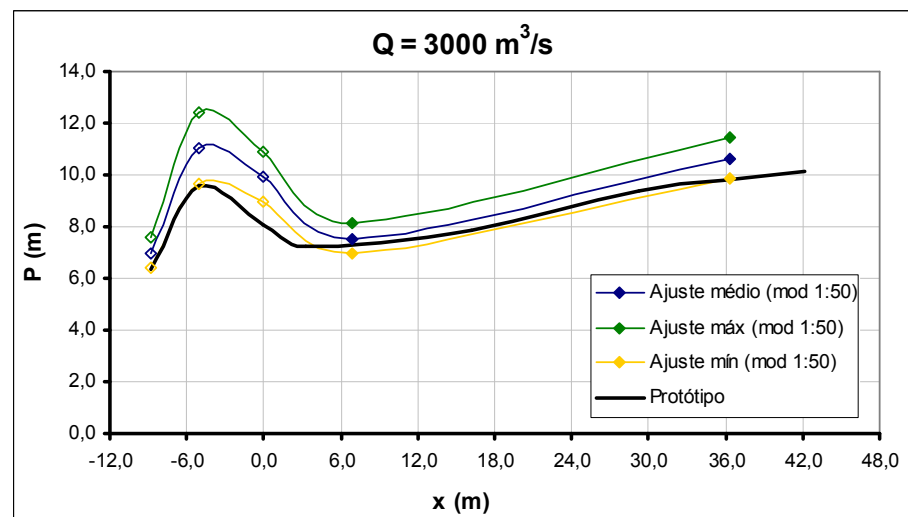


Gráfico 25 - Intervalo de confiança para a vazão média ( $Q_p=3000 \text{ m}^3/\text{s}$  – Dados brutos)

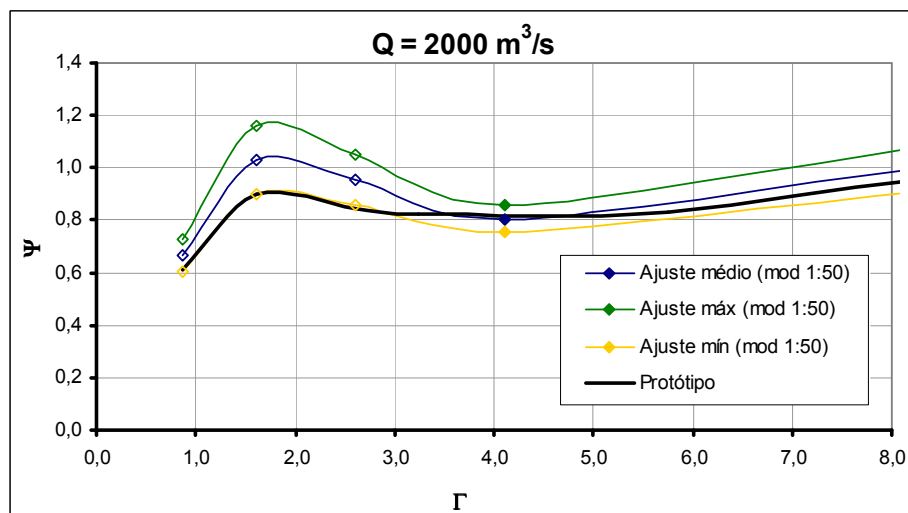


Gráfico 26 - Intervalo de confiança para a vazão média ( $Q_p=2000 \text{ m}^3/\text{s}$ )

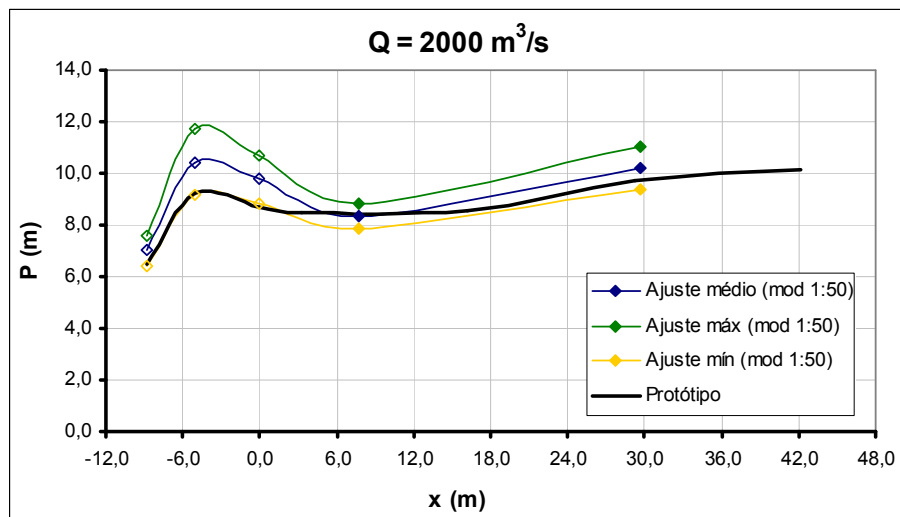


Gráfico 27 - Intervalo de confiança para a vazão média ( $Q_p=2000 \text{ m}^3/\text{s}$  – Dados brutos)

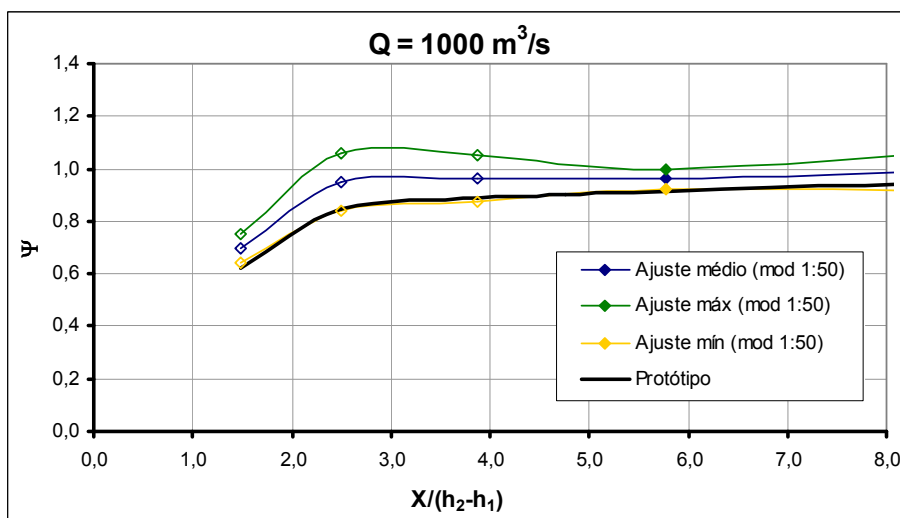


Gráfico 28 - Intervalo de confiança para a vazão média ( $Q_p=1000 \text{ m}^3/\text{s}$ )

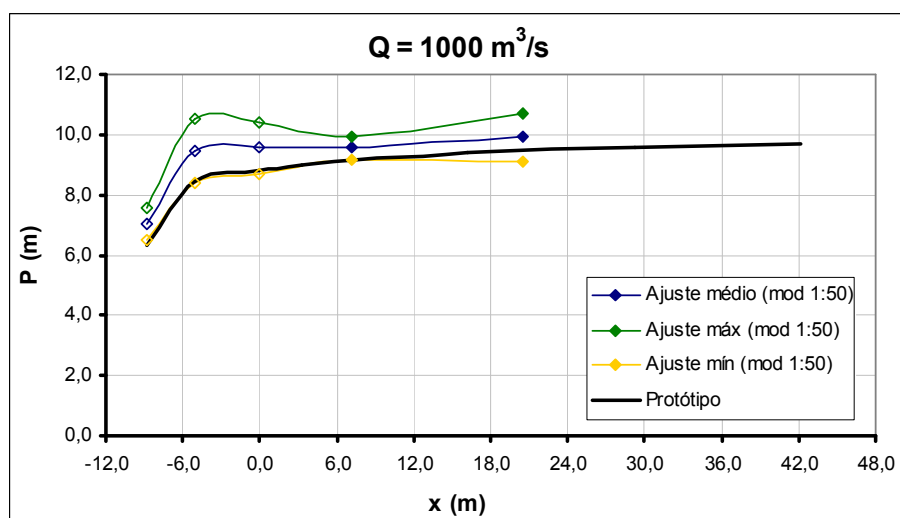


Gráfico 29 - Intervalo de confiança para a vazão média ( $Q_p=1000 \text{ m}^3/\text{s}$  – Dados brutos)

## ANEXO IV

Avaliação da flutuação de pressão ( $Q_p$  = vazão do protótipo)

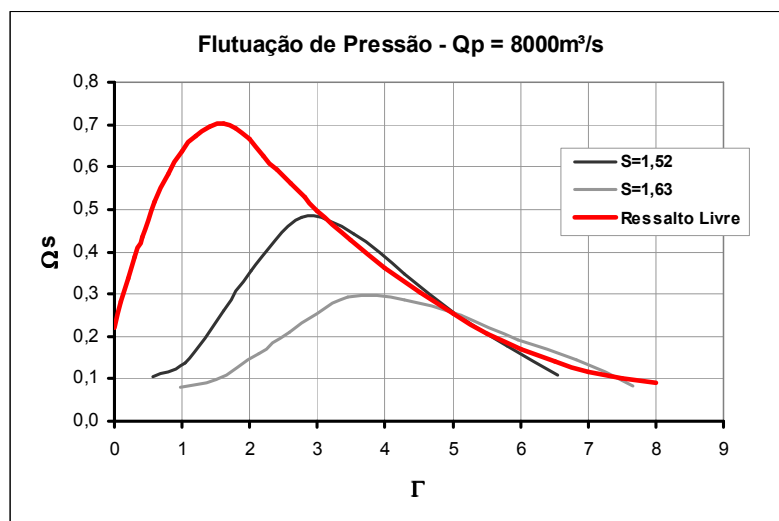


Gráfico 30 – Distribuição da flutuação de pressão ( $Q_p=8000 \text{ m}^3/\text{s}$ )

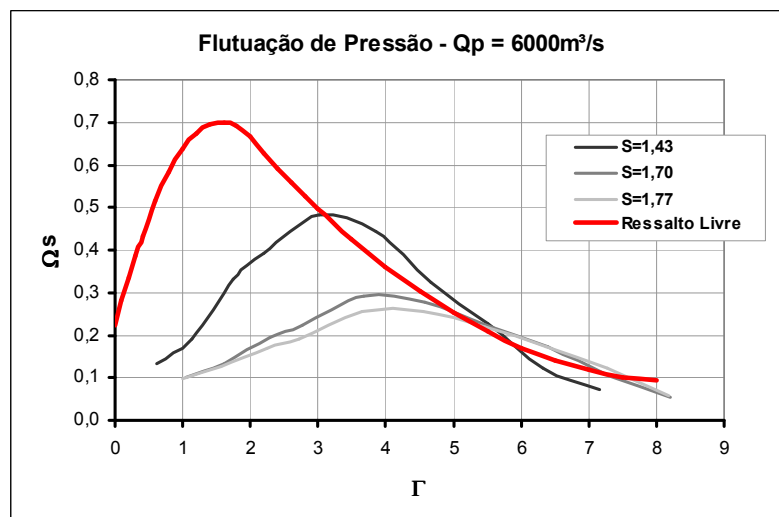


Gráfico 31 - Distribuição da flutuação de pressão ( $Q_p=6000 \text{ m}^3/\text{s}$ )

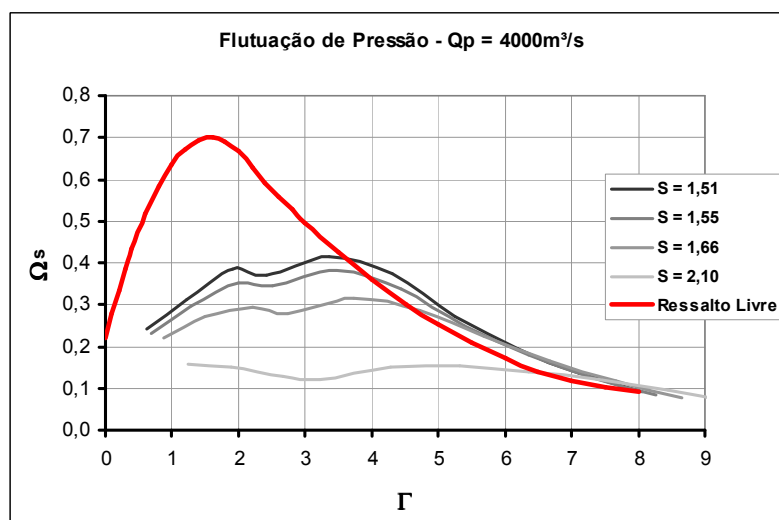


Gráfico 32 – Distribuição da flutuação de pressão ( $Q_p=4000 \text{ m}^3/\text{s}$ )

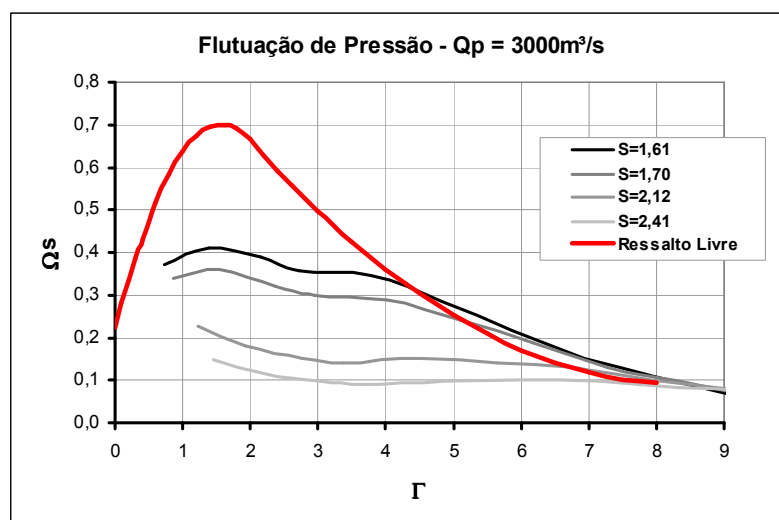


Gráfico 33 - Distribuição da flutuação de pressão ( $Q_p=3000\text{m}^3/\text{s}$ )

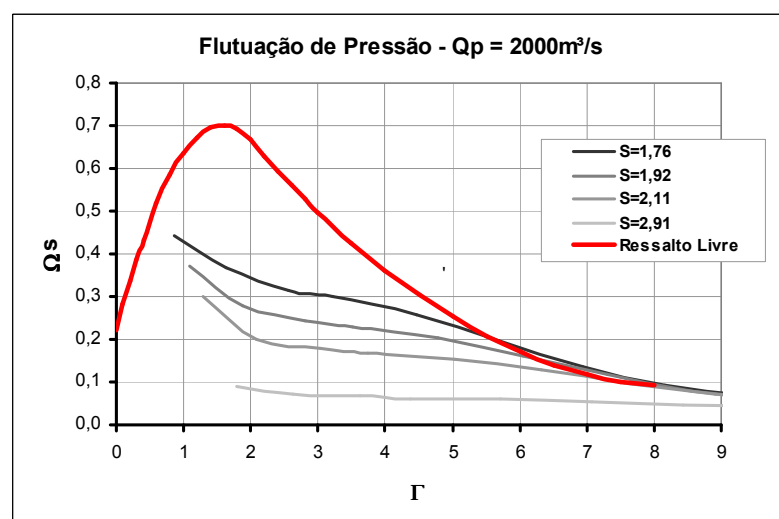


Gráfico 34 - Distribuição da flutuação de pressão ( $Q_p=2000\text{m}^3/\text{s}$ )

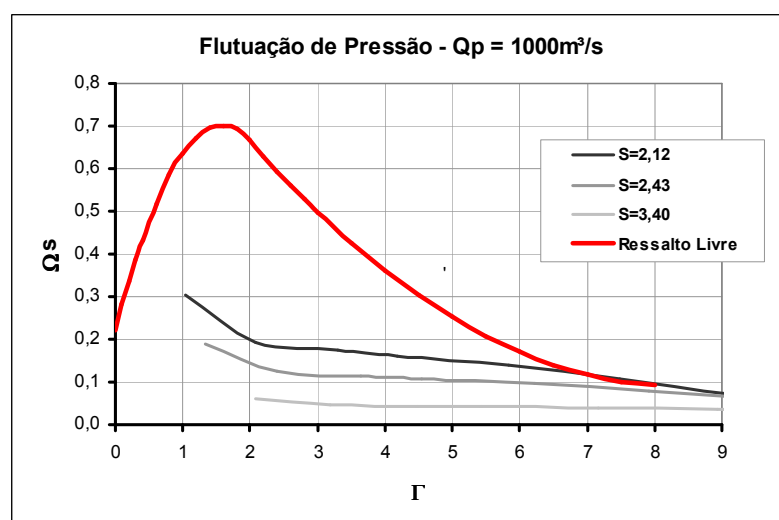


Gráfico 35 - Distribuição da flutuação de pressão ( $Q_p=1000\text{m}^3/\text{s}$ )

## ANEXO V

Intervalos de confiança para a flutuação de pressão ( $Q_p$  = vazão do protótipo)

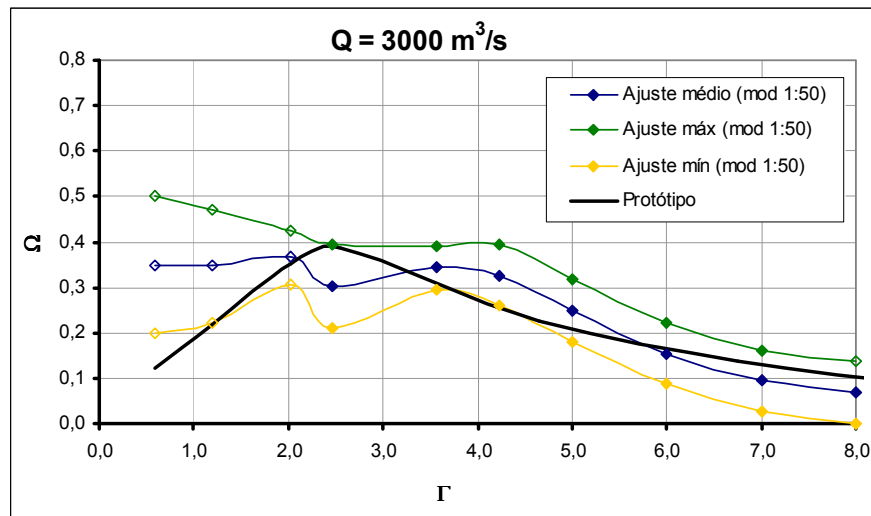


Gráfico 36 - Intervalo de confiança para a flutuação de pressão ( $Q_p=3000 \text{ m}^3/\text{s}$ )

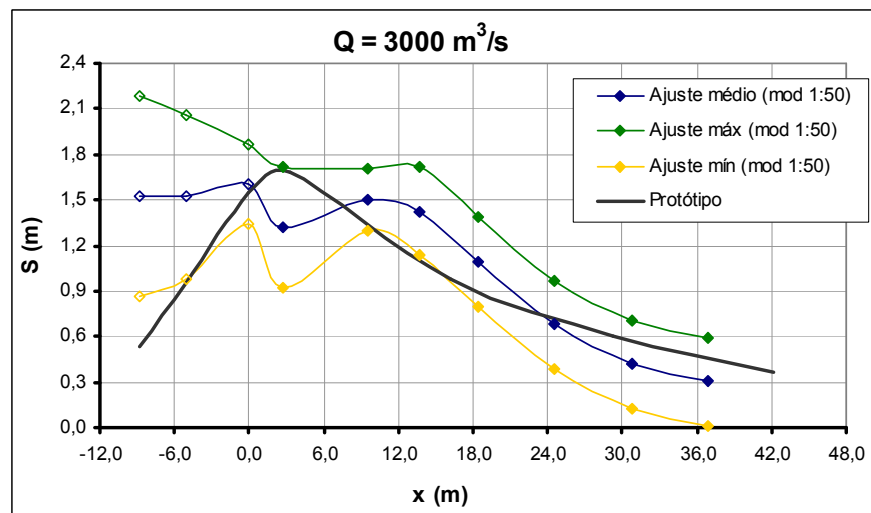


Gráfico 37 - Intervalo de confiança para a flutuação de pressão ( $Q_p=3000 \text{ m}^3/\text{s}$  – Dados brutos)

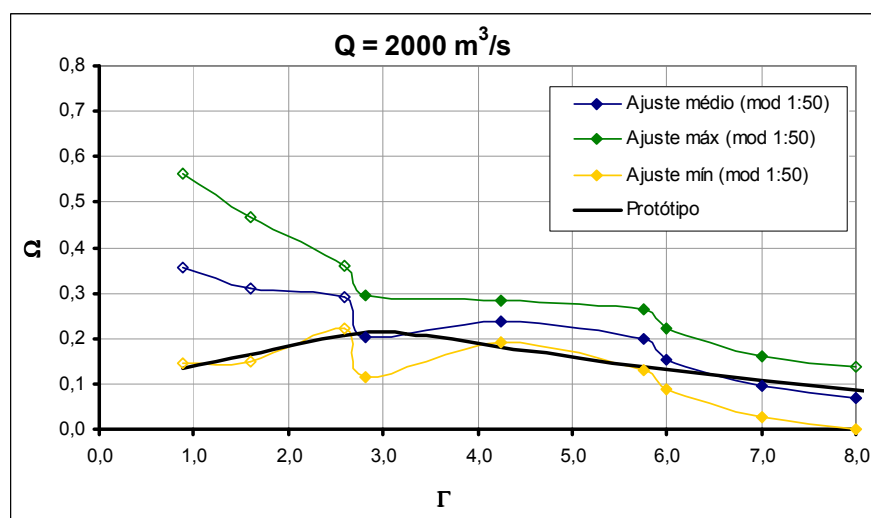


Gráfico 38 - Intervalo de confiança para a flutuação de pressão ( $Q_p=2000 \text{ m}^3/\text{s}$ )

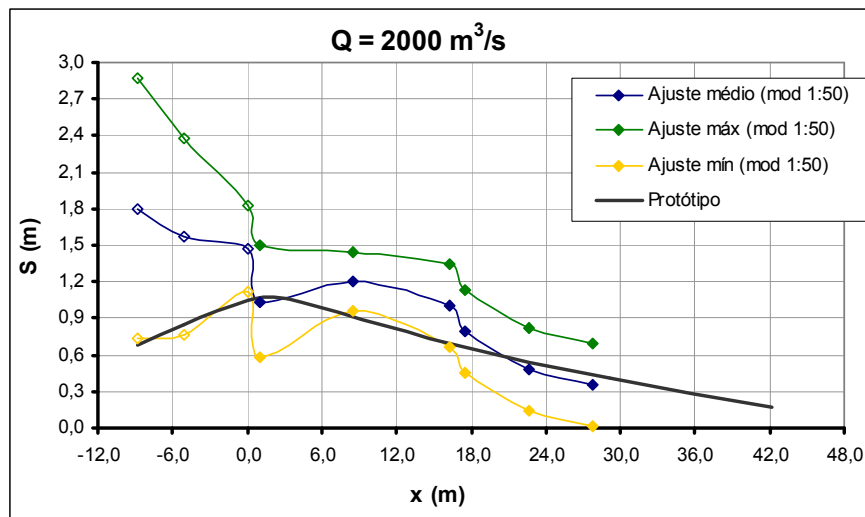


Gráfico 39 - Intervalo de confiança para a flutuação de pressão ( $Q_p=2000 \text{ m}^3/\text{s}$  – Dados brutos)

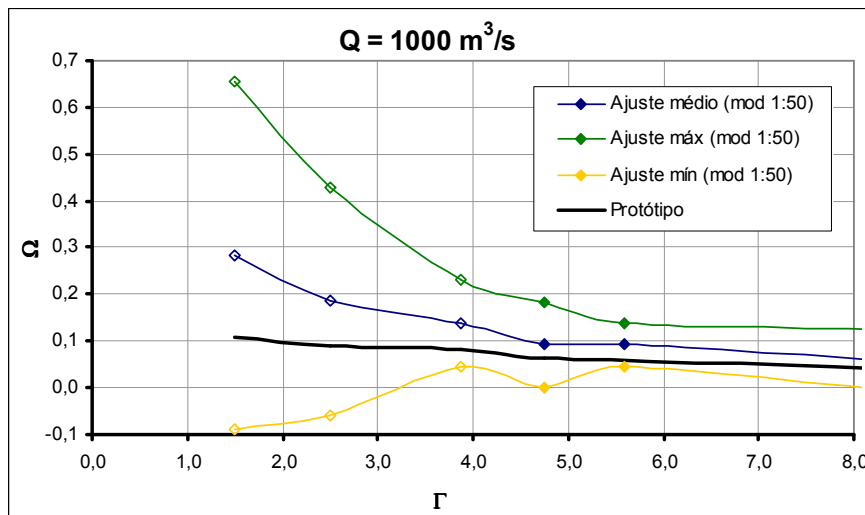


Gráfico 40 - Intervalo de confiança para a flutuação de pressão ( $Q_p=1000 \text{ m}^3/\text{s}$ )

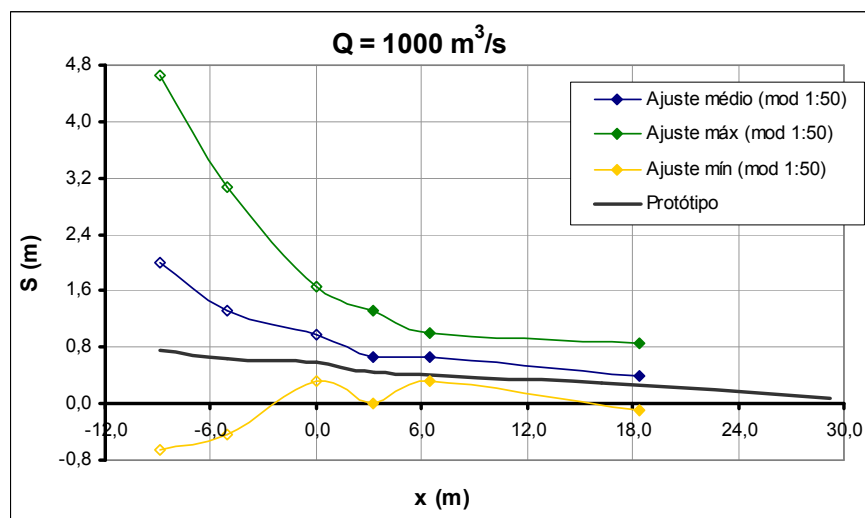


Gráfico 41 - Intervalo de confiança para a flutuação de pressão ( $Q_p=1000 \text{ m}^3/\text{s}$  – Dados brutos)