

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

Mauricio Dai Prá

UMA ABORDAGEM PARA DETERMINAÇÃO DAS
PRESSÕES JUNTO AO FUNDO DE DISSIPADORES
DE ENERGIA POR RESSALTO HIDRÁULICO

Porto Alegre

2011

Mauricio Dai Prá

UMA ABORDAGEM PARA DETERMINAÇÃO DAS
PRESSÕES JUNTO AO FUNDO DE UM DISSIPADOR
DE ENERGIA POR RESSALTO HIDRÁULICO

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

Orientador: Prof. Marcelo Giulian Marques

Porto Alegre

2011

À minha querida e amada Márcia.

APRESENTAÇÃO

Este trabalho foi desenvolvido no Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (PPGRHSA) do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), sob a orientação do professor Doutor Marcelo Giulian Marques da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

O presente estudo foi desenvolvido a partir de uma parceria firmada entre o IPH/UFRGS e a ELETROBRÁS FURNAS, na forma de um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica – P&D Análise da Macroturbulência em Dissipadores de Energia por Ressalto Hidráulico – firmado de acordo com a Lei Federal nº. 9.991, de 24 de julho de 2000, que dispõe sobre a realização de investimentos em pesquisa e desenvolvimento e em eficiência energética por parte das empresas concessionárias, permissionárias e autorizadas do setor de energia elétrica.

A partir deste projeto de P&D, então, foi possível a condução das análises experimentais apresentadas neste trabalho, as quais foram desenvolvidas integralmente no Laboratório de Hidráulica Experimental e Recursos Hídricos do Departamento de Engenharia Civil da ELETROBRÁS FURNAS.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pela oportunidade e pelos ensinamentos ao longo do curso de doutorado e ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Ao Laboratório de Hidráulica Experimental e Recursos Hídricos (LAHE) da Eletrobrás-Furnas pela disponibilização das instalações, instrumentação e corpo técnico para as investigações experimentais.

Ao CNPq, pela concessão da bolsa no período inicial do curso de doutorado.

Ao Prof. Dr. Marcelo Giulian Marques pela amizade e confiança e pelo exemplo de seriedade e responsabilidade que norteia suas ações.

Aos engenheiros Marcos da Rocha Botelho e Alba Valéria Brandão Canellas do LAHE pela amizade, pela acolhida profissional e pela constante atitude pró-ativa viabilizando o estreitamento das relações Universidade x Empresa.

Aos amigos do IPH diretamente envolvidos no projeto: eng. Edgar Fernando Trierweiler Neto, eng. Rafael André Wiest e eng. Eder Daniel Teixeira, e em especial ao eng. Alexandre Augusto Mees Alves que com suas posições firmes colaborou imensamente para o desenvolvimento deste trabalho.

A todos os amigos do LAHE pelo imenso aprendizado ao longo de 4 anos de convivência diária, em especial ao Engenheiro Roger Pierre Feraudy Filho pela amizade e companheirismo. Um agradecimento especial ao indispensável e qualificado trabalho dos técnicos e auxiliares Gílson Pereira Guias, Wellington Dantas de Oliveira e Felipe Vitor da Silva Santana.

Aos amigos e colegas da Universidade Federal de Pelotas especialmente àqueles que compreendem a importância da busca constante pelos objetivos de uma idéia coletiva.

A toda a minha família (Delvina, Mário, Alférde, Mônica, Rui, Cristina, Mauro, Lucas e Pedro) que sempre me apoiaram ao longo deste período.

RESUMO

O dimensionamento seguro e econômico de dissipadores de energia por ressalto hidráulico formado a jusante de vertedouros passa pela compreensão de como se processa a dinâmica do escoamento. Para que isso seja possível é necessário que sejam identificadas as características macroturbulentas do escoamento, tanto no que diz respeito aos valores médios quanto às parcelas flutuantes e extremas dos esforços de pressões atuantes junto ao fundo.

Este trabalho, então, propõe a análise dos esforços hidrodinâmicos atuantes na estrutura hidráulica a partir de uma nova abordagem que preconiza que os esforços atuantes junto ao fundo devem ser avaliados como um somatório dos efeitos hidrodinâmicos ocasionados pelas distintas condições do escoamento.

Dessa forma, foram avaliados individualmente os efeitos: (i) da curva de concordância vertical entre o perfil vertente e a bacia de dissipação e a sua influência sobre esta, (ii) do escoamento em regime rápido sobre um plano horizontal, (iii) da macroturbulência presente no ressalto hidráulico livre (tipo A) e (iv) do afogamento do ressalto hidráulico.

Essa avaliação individualizada proporciona, em última instância, a identificação global dos esforços atuantes junto à estrutura hidráulica, conferindo sensibilidade a esta análise global a partir da identificação da influência de cada um dos efeitos atuantes e das respectivas consequências sobre a bacia de dissipação.

O trabalho apresenta, assim, um método analítico de previsão de pressões médias, flutuantes e extremas atuantes ao longo de uma bacia de dissipação por ressalto hidráulico, quer este seja formado integralmente na bacia de dissipação, quer este seja formado parcialmente sobre o perfil vertente, condição predominante na operação de sistemas estruturais de dissipação de energia hidráulica.

Palavras-Chave: Estruturas Hidráulicas, Flutuações de Pressão, Ressalto Hidráulico.

ABSTRACT

To safely and economically design hydraulic jump energy dissipators downstream spillways the comprehension of the flow dynamics is needed. To achieve this it is needed to identify the macroturbulent characteristics of the flow, both the mean pressure values as well as the fluctuating and extreme pressures acting on the floor of the stilling basin.

The present work proposes to analyze the hydrodynamic forces acting on the structures by means of a new approach which states that the pressures acting on the basin floor can be evaluated as the sum of hydrodynamic effects caused by the distinct flow conditions.

The following effects were individually evaluated (i) transition from the spillway slope to the flat basin slope. (ii) supercritical flow over a flat slope, (iii) macroturbulence present in a classic hydraulic jump (type A jump) and (iv) jump submergence.

This individualized evaluation aims to identify the global forces acting on the spillway structure conferring sensitivity to the global analysis from the identification of each of the acting effects and its consequences.

The present work relates an analytical method for predicting of mean, fluctuating and extreme pressures acting on a hydraulic jump stilling basin, be it formed integrally on the structure or partially over the spillway, usual condition in the basin operation.

Key-words: hydraulic structures, fluctuating pressures, hydraulic jump.

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO.....	4
AGRADECIMENTOS	5
RESUMO.....	6
ABSTRACT	7
SUMÁRIO.....	8
LISTA DE TABELAS	11
LISTA DE SÍMBOLOS.....	17
1 INTRODUÇÃO.....	21
1.1 Apresentação do Tema	22
1.2 Justificativas.....	24
1.3 Apresentação do Problema Específico	26
1.4 Objetivos	27
1.5 Estrutura do Trabalho.....	28
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	30
2.1 Apresentação do Fenômeno	30
2.1.1 Definições e Simbologia Básica.....	30
2.1.2 Tipos de Ressalto Hidráulico	31
2.2 Aplicação do Ressalto Hidráulico	34
2.3 Casos Históricos de Falhas e Danos em Estruturas Hidráulicas	36
2.4 Antecedentes Históricos.....	38
2.5 Ressalto Hidráulico – Características Externas	40
2.5.1 Alturas Conjugadas	40
2.5.2 Comprimentos Característicos.....	42
2.5.2.1 Comprimento do Ressalto.....	42
2.5.2.2 Comprimento do Rolo	44
2.5.2.3 Comprimento de Turbulência.....	44
2.5.3 Linha Média D’água.....	45
2.6 Ressalto Hidráulico – Características Internas.....	45
2.6.1 Caracterização da Macroturbulência	45
2.6.2 Dissipação de Energia.....	47
2.6.3 Pressões Médias, Flutuantes e Extremas	49
2.6.4 Aeração	61
2.6.5 Linha de Separação.....	65

2.7	Escoamento sobre Curvas Verticais	65
3	METODOLOGIA	70
3.1	Instalação Experimental	70
3.2	Grandezas Físicas e Instrumentação Utilizada	73
3.2.1	Nível Médio da Superfície Livre D'água.....	74
3.2.2	Seções Transversais Características	77
3.2.2.1	Início do Ressalto Hidráulico.....	78
3.2.2.2	Final do Ressalto Hidráulico.....	78
3.2.2.3	Final do Rolo.....	79
3.2.3	Pressões Médias, Flutuantes e Extremas	79
3.2.3.1	Pressões Médias.....	80
3.2.3.2	Pressões Flutuantes e Extremas	80
3.3	Aferição dos Transdutores de Pressão	81
3.4	Sistema de Aquisição de Dados	82
3.5	Condições de Ensaio	83
3.5.1	Imposição e Controle das Vazões em Trânsito no Modelo.....	84
3.5.2	Imposição e Controle das Características do Ressalto hidráulico	85
4	APRESENTAÇÃO DOS DADOS EXPERIMENTAIS.....	88
4.1	Alturas Características do Ressalto Hidráulico	88
4.2	Comprimento do Rolo e do Ressalto	92
4.3	Posição do Início do Ressalto Hidráulico Afogado.....	98
4.4	Nível Médio da Superfície Livre D`água no Ressalto Hidráulico	99
4.5	Nível Médio da Superfície Livre D`água no Escoamento Livre	100
4.6	Pressões Médias.....	101
4.6.1	Escoamento Livre ao Longo da Curva de Concordância Vertical.....	101
4.6.2	Ressalto Hidráulico Livre (Tipo A)	103
4.7	Flutuações de Pressão.....	105
4.8	Coeficiente de Assimetria.....	107
4.9	Coeficiente de Curtose.....	108
4.10	Coeficiente Estatístico de Distribuição de Probabilidades (N)	109
4.11	Análise de Frequências.....	113
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	118
5.1	Escoamento ao Longo da Curva de Concordância Vertical e Respectiva Região de Influência.....	120
5.1.1	Avaliação das Pressões Médias.....	120
5.1.2	Avaliação das Flutuações de Pressão.....	126

5.2	Escoamento Livre ao Longo da Bacia de Dissipação	129
5.2.1	Avaliação das Pressões Médias	130
5.2.2	Avaliação das Flutuações de Pressão	133
5.3	Efeitos Macroturbulentos do Ressalto Hidráulico Tipo A.....	135
5.3.1	Avaliação das Pressões Médias	135
5.3.2	Avaliação das Flutuações de Pressão	137
5.4	Efeitos do Afogamento do Ressalto Hidráulico	139
5.4.1	Posição de Início do Ressalto Hidráulico Afogado	140
5.4.2	Avaliação das Pressões Médias	142
5.4.3	Avaliação das Flutuações de Pressão	144
5.5	Avaliação das Pressões Extremas Atuantes no Ressalto Hidráulico	147
6	RESUMO DA METODOLOGIA DE DISSOCIAÇÃO DE ESFORÇOS NA PREVISÃO DE PRESSÕES	152
6.1	Estimativa das Pressões Médias	152
6.2	Estimativa das Pressões Flutuantes	155
6.3	Estimativa das Pressões com Distintas Probabilidades de Ocorrência.....	158
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	161
7.1	Efeitos da Curva de Concordância Vertical.....	161
7.2	Efeitos do Escoamento Livre sobre a Bacia de Dissipação	162
7.3	Efeitos do Ressalto Hidráulico Livre (Tipo A)	162
7.4	Efeitos do Afogamento do Ressalto Hidráulico	163
7.5	Coeficiente Estatístico de Distribuição de Probabilidades (N).....	164
8	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	165
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	166
	ANEXOS	173
	Anexo A – Caracterização Técnica dos Transmissores de Pressão	174
	Anexo B – Caracterização Técnica do Calibrador de Pressões	177
	Anexo C – Caracterização Técnica do Sistema de Aquisição de Dados	179
	Anexo D – Coeficiente Estatístico de Distribuição de Probabilidades	186
	Anexo E – Valores Experimentais e Estimados para as Pressões Médias e Flutuantes.....	189
	Anexo F – Pressões com Distintas Probabilidades de Não Excedência – Comparativo entre os Resultados Experimentais e Estimados.....	200

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Alguns casos históricos de danos em obras hidráulicas por ação do ressalto hidráulico	37
Tabela 2 – Características do ressalto hidráulico tipo A (Marques <i>et al.</i> , 1996).....	55
Tabela 3 – Quantidade de ar incorporada ao ressalto hidráulico. Fonte: Chanson (1995a).	64
Tabela 4 – Resumo das características do modelo físico	74
Tabela 5 – Localização dos pontos de medição de níveis médios da superfície livre d'água.....	76
Tabela 6 – Condições de submersão impostas nas investigações experimentais.....	86
Tabela 7 – Alturas conjugadas dos ressaltos hidráulicos livres (tipo A)	89
Tabela 8 – Alturas conjugadas rápidas e níveis d'água no final dos ressaltos hidráulicos afogados.	90
Tabela 9 – Comprimentos dos rolos (L_r) e dos ressaltos hidráulicos livres (L_j).....	92
Tabela 10 – Comprimentos dos rolos e dos ressaltos hidráulicos submersos	95
Tabela 11 – Posições médias características no ressalto hidráulico livre (Tipo A)	104
Tabela 12 – Coeficientes de ajuste para definição do comportamento do coeficiente estatístico N em ressaltos hidráulicos livres e afogados.....	150
Tabela 13 – Determinação das pressões médias – resumo analítico.	153
Tabela 14 – Comparação entre as pressões médias (experimentais e estimadas) para o caso em análise.....	155
Tabela 15 – Determinação das flutuações de pressão – resumo analítico	156
Tabela 16 – Comparação entre as flutuações de pressão (experimentais e estimadas) para o caso em análise.....	157
Tabela 17 – Determinação das pressões com distintas probabilidades de ocorrência – resumo analítico	158
Tabela 18 – Comparativo entre as pressões extremas máximas e mínimas obtidas experimentalmente e estimadas segundo o método proposto.	160

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Simbologia básica do ressalto hidráulico formado a jusante de comportas, adaptado de Trierweiler (2006)	30
Figura 2 – Simbologia básica utilizada para ressalto formado a jusante de vertedouros, adaptado de Trierweiler (2006).	31
Figura 3 – Classificação do ressalto hidráulico em função do número de Froude na seção de entrada (Fr_1). Fonte: Peterka (1974).....	33
Figura 4 – Classificação do ressalto hidráulico formado a jusante de canais com mudança de declividade. Fonte: Hagger (1988)	33
Figura 5 – Ressalto hidráulico formado na bacia de dissipação da UHE de Porto Colômbia, vazão de $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ e número de Froude (Fr_1) igual a 3,88. Fonte: Marques <i>et al.</i> (1999).....	35
Figura 6 – Danos ocorridos em estruturas hidráulicas: a esquerda erosão por cavitação nos blocos de dissipação da UHE Porto Colômbia (ICOLD/CBDB, 2002) e a direita a bacia de dissipação da UHE Salto Grande (Lopardo <i>et al.</i> , 2006)).....	37
Figura 7 – Dissipação de energia no ressalto hidráulico, adaptado de Elevatorski (1959)	47
Figura 8 – Eficiência do ressalto hidráulico. Fonte: Peterka (1974)	48
Figura 9 – Dissipação de energia ao longo do ressalto hidráulico a partir da avaliação das flutuações de pressão junto ao fundo. Fonte: Marques <i>et al.</i> (1998).....	49
Figura 10 – Pressões médias adimensionalizadas segundo Marques <i>et al.</i> (1996).....	54
Figura 11 – Flutuações de pressão adimensionalizadas segundo Marques <i>et al.</i> (1996).....	55
Figura 12 – Tendência de comportamento dos máximos coeficientes de pressão (C_{pmax}) frente ao número de Froude. Fonte: Marques <i>et al.</i> (2004)	58
Figura 13 – Tendência de comportamento da posição de ocorrência dos máximos coeficientes de pressão (XC_{pmax}). Fonte: Marques <i>et al.</i> (2004)	58

Figura 14 – Comportamento do coeficiente de flutuação de pressão frente a diferentes fatores de submergência. Fonte: Lopardo <i>et al.</i> (2004b).....	59
Figura 15 – Metodologia proposta por Trierweiler (2006) para a previsão de pressões extremas em ressalto afogados a jusante de comportas. Fonte: Trierweiler (2006).....	60
Figura 16 – Incorporação de ar no ressalto hidráulico, adaptado de Gomes (2000).....	62
Figura 17 – Linha de separação do escoamento dividindo o ressalto em duas zonas distintas, adaptado de Hager.....	65
Figura 18 – Distribuição de pressões em curvas côncavas e convexas, adaptado de Baptista e Lara (2002).....	66
Figura 19 – Parâmetros utilizados por LinFu e Jie (1985) na avaliação de escoamentos em curvas de concordância vertical (adaptado).....	68
Figura 20 – Instalações experimentais do LAHE/FURNAS onde foram conduzidas as investigações experimentais (dimensões em metros).....	72
Figura 21 – Posição das tomadas de pressão ao longo da bacia de dissipação.	77
Figura 22 – Escoamento Livre ($q = 0,217\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$)	87
Figura 23 – Ressonância Hidráulica Livre (Tipo A) ($q = 0,130\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$).....	87
Figura 24 – Ressonância Hidráulica Afogada (Tipo B) ($q = 0,043\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$; $S = 1,26$).....	87
Figura 25 – Comparação entre as alturas conjugadas do ressalto hidráulico livre.	90
Figura 26 – Comparação entre as alturas conjugadas do ressalto hidráulico afogado	92
Figura 27 – Análise comparativa do comprimento do ressalto hidráulico tipo A.....	93
Figura 28 – Análise comparativa do comprimento do rolo no ressalto hidráulico livre.	94
Figura 29 – Comparações entre o comprimento do ressalto hidráulico afogado.	96
Figura 30 – Comparação entre o comprimento do rolo verificado no ressalto hidráulico afogado.....	97
Figura 31 – Análise comparativa da posição de início do ressalto hidráulico afogado.....	98

Figura 32 – Análise comparativa do perfil médio da superfície livre d'água no ressalto hidráulico livre.....	99
Figura 33 – Profundidade média do escoamento livre na curva de concordância vertical.....	100
Figura 34 – Pressões médias máximas atuantes no centro da curva de concordância.....	102
Figura 35 – Pressões médias devidas à força centrífuga na curva de concordância vertical entre o perfil vertente e a bacia de dissipação	103
Figura 36 – Pressões médias adimensionalizadas do ressalto hidráulico livre	104
Figura 37 – Flutuações de pressão adimensionalizadas do ressalto hidráulico livre.	105
Figura 38 – Análise comparativa do coeficiente de pressão.	106
Figura 39 – Coeficientes de Assimetria para o ressalto hidráulico livre	107
Figura 40 – Coeficientes de Curtose para o ressalto hidráulico livre.....	108
Figura 41 – Coeficiente estatístico do ressalto hidráulico livre (Tipo A): a) probabilidade de não excedência de 0,1% e b) probabilidade de não excedência de 1%.....	109
Figura 42 – Coeficiente estatístico do ressalto hidráulico livre (Tipo A) para probabilidades extremas de não excedência.....	110
Figura 43 – Coeficiente estatístico do ressalto hidráulico tipos A e B: a) probabilidade de não excedência de 0,1% e b) probabilidade de não excedência de 1%.....	111
Figura 44 – Coeficiente estatístico do ressalto hidráulico afogado (tipo B) para probabilidades extremas de não excedência.....	112
Figura 45 – Função de densidade espectral ao longo da bacia de dissipação – Ressalto Hidráulico tipo A - $Fr_1 = 6,90$	113
Figura 46 – Comparação das frequências dominantes do ressalto hidráulico tipo A.....	115
Figura 47 – Avaliação das frequências dominantes do ressalto hidráulico tipo A com a profundidade do escoamento	116

Figura 48 – Comparação das frequências dominantes em ressaltos hidráulicos tipos A e B.....	117
Figura 49 – Dissociação e sobreposição de efeitos: a) pressões médias e b) flutuações de pressão	119
Figura 50 – Adaptação da proposta de LinFu e Jie (1985) para a determinação das pressões médias máximas na curva de concordância vertical devida aos efeitos da força centrífuga.....	121
Figura 51 – Comprimento de influência da curva de concordância nas pressões médias	122
Figura 52 – Comprimento de influência da curva de concordância nas pressões médias	123
Figura 53 – Pressões médias atuantes na curva de concordância vertical.....	124
Figura 54 – Pressões médias atuantes na curva de concordância vertical corrigidas pelo fator K_C	125
Figura 55 – Comprimento da influência da curva de concordância nas flutuações de pressão	127
Figura 56 – Flutuação de pressão no ponto de central da curva de concordância.....	128
Figura 57 – Valores experimentais do coeficiente “n” de Manning.....	130
Figura 58 – Níveis d’água médios adimensionalizados adaptado da proposta de Marques <i>et al.</i> (1996).....	131
Figura 59 – Comparação adimensional entre as pressões médias e as profundidades do escoamento verificadas ao longo da bacia de dissipação, adaptado da proposta de Marques <i>et al.</i> (1996)	132
Figura 60 – Comportamento das flutuações de pressão identificadas ao longo da bacia de dissipação, longe da região de influência da curva de concordância vertical	133
Figura 61 – Comportamento dos coeficientes de pressão (C_p) identificadas ao longo da bacia de dissipação, longe da região de influência da curva de concordância vertical	134
Figura 62 – Influência da macroturbulência do ressalto hidráulico sobre as pressões médias.....	136

Figura 63 – Influência da macroturbulência do ressalto hidráulico sobre as flutuações de pressão.....	138
Figura 64 – Posição de início do ressalto hidráulico afogado (tipo B).....	141
Figura 65 – Influência do afogamento do ressalto hidráulico sobre as pressões médias	143
Figura 66 – Influência do afogamento do ressalto hidráulico sobre as flutuações de pressão	145
Figura 67 – Coeficientes de assimetria das amostras de pressão obtidas ao longo da curva de concordância vertical e da bacia de dissipação.....	147
Figura 68 – Coeficientes de curtose das amostras de pressão obtidas ao longo da curva de concordância vertical e da bacia de dissipação.....	148
Figura 69 – Coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades ($N_{0,1\%}$).....	149
Figura 70 – Coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades ($N_{99,9\%}$).	149
Figura 71 – Coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades ($N_{5\%}$) para as condições de ressalto hidráulico livre e afogado. A legenda corresponde àquela apresentada na Figura 69.	151
Figura 72 – Comparação entre as pressões médias estimadas e obtidas experimentalmente.....	154
Figura 73 – Comparação entre as flutuações de pressão estimadas e obtidas experimentalmente.....	157
Figura 74 – Distribuição longitudinal das pressões com probabilidade de não excedência de 0,1% e 1%.....	159
Figura 75 – Distribuição longitudinal das pressões com probabilidade de não excedência de 99% e 99,9%.....	159

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Abertura da comporta descarregadora de fundo
Ad	Coeficiente de assimetria
B	Largura do canal
C_{max}	Máxima concentração média de ar do ressalto hidráulico
C_p	Coeficiente de pressão
C_{pC}	Coeficiente de pressão devida à força centrífuga
C_{pCM}	Coeficiente de pressão máxima devida à força centrífuga
C_{pmax}	Máximo coeficiente de pressão
C_σ	Coeficiente de flutuação de pressão na curva de concordância vertical
$C_{\sigma M}$	Coeficiente de máxima flutuação de pressão na curva de concordância vertical
E_1	Energia na seção de entrada do ressalto hidráulico
E_2	Energia na seção de saída do ressalto hidráulico
f	Frequência dominante do fenômeno hidráulico
Fr	Número de Froude do escoamento na seção transversal em análise
Fr_1	Número de Froude do escoamento na entrada do ressalto hidráulico
g	Aceleração da gravidade
H	carga na soleira curva correspondente ao ponto em análise
Ht	Energia total dissipada ao longo do ressalto hidráulico
K	Coeficiente de curtose
K_A	Fator de proporcionalidade função da submergência S do ressalto hidráulico
K_C	Fator de correção das pressões médias atuantes na curva de concordância vertical
L	comprimento longitudinal a partir do centro da curva
L_C	comprimento longitudinal a partir do centro da curva ao longo do qual a força centrífuga influencia o escoamento

Ld	Ponto de descolamento do escoamento junto ao fundo
Lr	Comprimento do rolo
Lj	Comprimento do ressalto hidráulico livre
Lsj	comprimento do ressalto hidráulico submerso ou afogado.
$L\sigma_{\text{máx}}$	Posição de máxima flutuação de pressão
N	Coefficiente estatístico de distribuição de probabilidades
P	Pressão média junto ao fundo de uma curva vertical
Pc	Pressão média devida à força centrífuga em uma curva vertical
P_{CM}	Pressão máxima devida à força centrífuga
Pk	Valor da pressão num instante de tempo t
Ps	Pressão hidrostática média
P_X	Pressão média verificada em um ponto distante X unidades do início do ressalto hidráulico tipo A
P_{XA}	Pressão média verificada em um ponto distante X unidades do início do ressalto hidráulico tipo B
P_{XL}	Pressão média junto ao fundo da bacia de dissipação devida ao escoamento livre incluídos os efeitos da curva de concordância vertical.
$P_{X\%}$	Valor de pressão num ponto distante X unidades do início do ressalto com certa probabilidade de ocorrência
q	Vazão média específica do escoamento
Q	Vazão média do escoamento
Qa	Vazão de ar ingressante no ressalto hidráulico
Qw	Vazão de água ingressante no ressalto hidráulico
r	Raio de curvatura das linhas de corrente
R	Raio da curva vertical
Re_1	Número de Reynolds na entrada do ressalto hidráulico
S	Fator de submersão ($S = Tw/Y_2$)
S^*	Fator de submersão ($S^* = Tw - Y_2/Tw$)

S_1	Seção de entrada do ressalto hidráulico
S_2	Seção de saída do ressalto hidráulico
St	Número de Strouhal
t	Tempo
t_a	Tempo de aquisição de uma amostra
T_w	Altura d'água na saída do ressalto hidráulico submerso ou afogado
u	Componente horizontal da velocidade
V	Velocidade média do escoamento
V_1	Velocidade média do escoamento na entrada do ressalto hidráulico
V_2	Velocidade média do escoamento na saída do ressalto hidráulico
V_e	Velocidade de entrada de ar no escoamento
We_1	Número de Weber na entrada do ressalto hidráulico
X	Distância horizontal tomada a partir do início do ressalto hidráulico
X_{cpmax}	Posição longitudinal de ocorrência dos máximos coeficientes de pressão
Y	Altura d'água tomada perpendicularmente ao contorno sólido
Y_1	Altura d'água na entrada do ressalto hidráulico, altura conjugada rápida
Y_2	Altura d'água na saída do ressalto hidráulico, altura conjugada lenta
Y_3	Altura d'água na entrada do ressalto hidráulico submerso, desnível entre a superfície livre d'água e o piso da bacia de dissipação no ressalto hidráulico afogado
Y_a	Altura da região superior do ressalto hidráulico, ou zona de separação
Y_c	Altura crítica do escoamento
Y_p	Altura da região inferior do ressalto hidráulico, ou escoamento principal
Z_1	Desnível entre a cota da estrutura de descarga onde se identifica o início do ressalto hidráulico e a cota de fundo da bacia de dissipação

α	Ângulo com relação ao cetro da curva de concordância vertical
β	Ângulo da curva de concordância vertical
β_{\max}	Capacidade máxima de bombeamento de ar do ressalto (Q_a/Q_w)
ε	Constante de proporcionalidade que correlaciona a energia cinética do escoamento e as flutuações de pressão atuantes no ponto em análise.
γ	Peso específico da água
ρ	Massa específica da água
ν	Viscosidade cinemática da água
$\sigma_{C\max}$	Amplitude máxima da flutuação de pressão na curva de concordância vertical
σ_s	Tensão superficial
σ_X	Desvio padrão da amostra de pressões num ponto de coordenada X a jusante do início do ressalto, flutuação de pressão junto ao fundo da bacia de dissipação devida ao ressalto hidráulico tipo A
σ_{XA}	Flutuação de pressão junto ao fundo da bacia de dissipação devida ao ressalto hidráulico tipo B
σ_{XL}	Flutuação de pressão junto ao fundo da bacia de dissipação devida ao escoamento livre incluídos os efeitos da curva de concordância vertical
η	Eficiência do ressalto hidráulico, eficiência da bacia de dissipação
θ	Declividade do canal a montante da bacia de dissipação
Ψ	Parâmetro adimensional da pressão média
Ω	Parâmetro adimensional das flutuações de pressão
Γ	Parâmetro adimensional da posição ao longo da bacia de dissipação
ΔP	Amplitude média da flutuação de pressão

1 INTRODUÇÃO

De acordo com a IEA (2010), a partir de dados consolidados do ano de 2008, o Brasil é o terceiro maior produtor de energia elétrica a partir de fontes hídricas com produção anual de 370TWh, representando 11,2% da produção mundial, sendo superado apenas pela China (17,8%) e pelo Canadá (11,5%). A mesma fonte coloca o Brasil como a terceira nação no mundo em termos de capacidade instalada, com parque hidrelétrico de 77GW, atrás apenas da China (149GW) e dos Estados Unidos (100GW). Avaliando, agora, a matriz elétrica nacional, fica ainda mais evidente a importância da hidroeletricidade, uma vez que essa fonte é responsável por 79,8% de toda a produção de energia elétrica do Brasil.

Apesar desse excelente cenário do ponto de vista de disponibilidade em exploração desta fonte energética renovável, de acordo com EPE (2010) o país apresenta um potencial ainda maior, da ordem de 133,8GW, entre plantas em construção e operação e aproveitamentos em estudo nos níveis de inventário, viabilidade e projeto básico. Por fim, de acordo com MME (2007), cerca de apenas 30% do potencial hidrelétrico nacional já foi explorado, para um potencial total estimado da ordem de 261,4GW.

Neste contexto surge a necessidade do represamento de mananciais hídricos através da construção de barragens visando o armazenamento de volumes de água ou simplesmente adequando os desníveis presentes no curso d'água para a implantação de usinas de conversão de energia hidráulica (potencial e cinética) em energia elétrica.

As barragens, contudo, devem ser avaliadas num aspecto mais amplo quanto ao seu uso. As mesmas podem ser construídas visando o armazenamento de água para abastecimento urbano, para fins de irrigação, para a regularização de vazões e o respectivo controle de enchentes, para navegação interior ampliando o sistema hidroviário, para fins de recreação, dentre outros.

Dessa forma, um barramento pode ser concebido com um único objetivo, ou pode ser uma barragem de usos múltiplos quando, segundo ICOLD (2008), tornam-se projetos muito importantes e econômicos para países em desenvolvimento, pois a população recebe vários benefícios advindos de um único investimento, tornando-se

a base do desenvolvimento dos recursos hídricos das bacias hidrográficas desses países.

Por outro lado, a implementação de barreiras artificiais em cursos d'água trazem, implicitamente, impactos ao meio ambiente (de maior ou menor grau). Contudo a necessidade de desenvolvimento sócio-econômico que visa, em última instância, a qualidade de vida da população, faz com que as demandas hídricas sejam, a cada dia, fundamentais e imprescindíveis uma vez que a elas estão atreladas questões energéticas, sanitárias, logísticas e ambientais.

A necessidade, portanto, da construção de obras hidráulicas destinadas a reservação e controle, segue (e seguirá) sendo fundamental para o desenvolvimento humano. Contudo isso não pode servir como justificativa definitiva quando da avaliação dos impactos causados pela implantação de um barramento, em detrimento de todas as demais questões ambientais que cercam esse tipo de decisão.

1.1 Apresentação do Tema

A construção de barramentos ao longo dos rios traz preocupações de ordem técnica notadamente com relação à estabilidade do maciço. Tal questão se justifica uma vez que um eventual rompimento pode acarretar consequências desastrosas quanto à perda de vidas humanas, danos ambientais irreversíveis ou grandes prejuízos financeiros a uma comunidade ou mesmo a um país inteiro.

Em linhas gerais, a garantia da estabilidade do maciço passa, inevitavelmente, pela adoção cuidadosa e criteriosa de parâmetros de projeto quando da sua concepção. Extensas e igualmente criteriosas investigações de campo devem ser conduzidas visando reunir o maior número possível de informações geotécnicas sobre as condições geológicas do local onde se pretende implementar um barramento. Por fim, a etapa de construção, seja quanto ao controle de materiais ou quanto às técnicas construtivas utilizadas, deve ser conduzida visando sempre a máxima confiabilidade e segurança do empreendimento.

Tais cuidados, contudo, podem não ser suficientes caso a operação da referida obra hidráulica não seja realizada a contento. Isso significa afirmar que a operação indevida de um barramento, impondo ao mesmo, por exemplo, regimes

hidráulicos não previstos originalmente nas etapas de projeto, podem vir a causar a instabilidade da estrutura.

Nesse ponto, a parte fundamental a ser avaliada em um barramento, notadamente aqueles de grande altura, é o sistema extravasador e a solução de dissipação de energia adotada. Busca-se, então, um sistema de descargas capaz de conduzir os hidrogramas extremos afluentes ao reservatório em direção ao dissipador de energia situado imediatamente a jusante da barragem.

Essa operação de descarga de cheias deve transcorrer de forma que o vertedouro se mantenha íntegro, garantindo que as fundações da estrutura não sejam atingidas a ponto de lhes causar danos estruturais, culminando, por fim, com o encaminhamento do fluxo em condições hidráulicas que não venham a causar danos ao leito ou às margens do curso d'água. Tais condições serão atingidas apenas através de um processo eficiente de dissipação da energia do escoamento descarregado do reservatório.

Percebe-se, aqui, a importância de uma definição criteriosa na escolha da solução de dissipação de energia adotada em cada empreendimento. Tal definição é fundamental para a garantia da estabilidade do maciço ao longo da sua vida útil, uma vez que o mesmo estará sujeito a regimes adversos, sejam eles devido a questões hidrológicas ou devido a questões inerentes à sua operação normal. Saliencia-se que nem sempre essas questões são avaliadas corretamente e isso faz com que sejam identificados problemas nas estruturas hidráulicas de descarga e dissipação de energia, com reflexos diversos, sendo os mais graves aqueles relacionados aos problemas erosivos junto às fundações com reflexos imediatos na manutenção da estabilidade da barragem.

Problemas hidráulicos têm sido identificados ao longo dos anos e podem ser atribuídos a diversos fatores, como a utilização de critérios inadequados de dimensionamento e regimes de operação não previstos na fase de projeto. Lopardo *et al.* (2006) comentam que os problemas em obras hidráulicas só não ocorrem com maior intensidade devido à baixa frequência de operação dos sistemas descarregadores.

Cabe, então, ao engenheiro hidráulico avaliar cuidadosamente as condições de funcionamento e os esforços ocasionados pelo escoamento junto à estrutura

hidráulica bem como a jusante da mesma, visando obras tecnicamente viáveis, sempre com vistas à segurança.

Nesse contexto, uma das soluções mais adotadas no meio técnico como forma de dissipar a energia do escoamento a jusante de barragens são as “bacias de dissipação de energia por ressalto hidráulico”. Essas estruturas hidráulicas nada mais são do que planos horizontais de concreto (lajes) construídos imediatamente a jusante de vertedouros sobre os quais se forma o ressalto hidráulico e que tem como objetivo proteger o leito natural do rio contra a erosão devido à ação hidrodinâmica do escoamento, preservando, assim, a integridade das fundações da barragem.

1.2 Justificativas

O ressalto hidráulico é um dos fenômenos mais interessantes e fascinantes da engenharia hidráulica. Devido às suas características bifásicas e macroturbulentas, é largamente utilizado para dissipar energia especialmente a jusante de obras hidráulicas de descarregadores de superfície ou de fundo. Além disso, as suas características são muito exploradas como promotoras de mistura de produtos químicos e biológicos em estações de tratamento de água e de efluentes.

No que tange especificamente às aplicações relacionadas à dissipação de energia, as intensas flutuações de pressão e velocidades junto ao fundo, bem como a incorporação de ar e a conseqüente oscilação desordenada dos níveis d'água, fazem com que se desenvolva intensa turbulência de grande e pequena escala. Se por um lado essas características tornam a utilização do ressalto bastante usual para fins de dissipação de energia, por outro lado fazem com que os cuidados a serem tomados quanto ao dissipador sejam redobrados. No item 2.3 são apresentados alguns casos históricos de danos em dissipadores de energia a fim de demonstrar a relevância dessas preocupações.

Surgem, assim, questões de ordem prática quanto ao projeto adequado do dissipador, especialmente quanto à utilização de critérios de projeto. Para que esses critérios sejam estabelecidos, é de suma importância que as características internas e externas do ressalto sejam conhecidas, e isso inevitavelmente passa por estudos hidráulicos a partir de modelagem física do escoamento. Em suma, a análise dos

dados obtidos em laboratório ou mesmo em protótipo permite avaliar a influência dos parâmetros geométricos e hidráulicos no processo da dissipação de energia.

Ao longo de muitos anos o ressalto hidráulico tem sido objeto de extensa investigação por diversos laboratórios de todo o mundo. E não apenas estudos físicos hidráulicos, mas também estudos voltados à modelagem numérica do escoamento. Um dos primeiros trabalhos de que se tem conhecimento que faz menção ao ressalto hidráulico foi desenvolvido por Leonardo da Vinci (século XVI). As características externas (comprimentos do rolo, do ressalto, profundidades conjugadas, dentre outras) já estão bem delineadas e definidas. Contudo, permanece uma importante lacuna que vem sendo cada vez mais explorada acerca das características internas do ressalto hidráulico, especialmente pressões e velocidades flutuantes e aeração.

As bruscas flutuações de velocidade, pressão e nível e a incorporação de ar fazem parte do processo de dissipação de energia, e, portanto, estão relacionados a problemas de fadiga, vibração, cavitação ou subpressão junto à estrutura de concreto. Isso faz com que o conhecimento da dinâmica completa do sistema passe a ser imprescindível na busca de soluções seguras e econômicas.

Ressalta-se que poucos são os trabalhos experimentais conduzidos com vistas à investigação das características internas do ressalto com medição de velocidades flutuantes e concentração de ar. Ainda mais raros são aqueles que contemplam medições de características hidráulicas flutuantes a jusante de vertedouros e isso fica evidente quando se vê que a maioria dos trabalhos desenvolvidos em modelagem física acerca do ressalto hidráulico contempla situações a jusante de comportas.

Este trabalho apresenta-se, então, com a proposta de avaliar os efeitos hidrodinâmicos atuantes nestas estruturas a partir da investigação experimental em modelo físico do ressalto hidráulico formado em uma bacia de dissipação plana horizontal.

1.3 Apresentação do Problema Específico

Os esforços médios e flutuantes devidos aos aspectos macroturbulentos do escoamento são de fundamental importância para o dimensionamento estrutural de bacias de dissipação por ressalto hidráulico.

O projetista estrutural durante a fase de projeto executivo, via de regra, não dispõe de informações suficientes quanto à dinâmica do escoamento a jusante de vertedouros. Isso se dá, inicialmente, pela falta de critérios gerais e específicos de projeto que já estejam consensualmente estabelecidos no meio técnico.

Por outro lado, essa questão pode ser solucionada, caso a caso, a partir da adoção de estudos hidráulicos em modelos físicos como ferramenta de projeto. Na prática, o que se verifica é que quando são realizados estes estudos, normalmente eles não são voltados especificamente para investigar os dissipadores de energia. Ainda assim, quando isso é feito, as investigações das grandezas flutuantes envolvidas no processo de dissipação passam ao largo de outras preocupações.

Evidentemente que tal “falta de informação” tem como consequência projetos estruturais não otimizados. Isso pode se traduzir em estruturas superdimensionadas acarretando custos excessivos ao empreendimento. Por outro lado as estruturas podem ser subdimensionadas em função da falta de informação quantitativa acerca dos esforços flutuantes atuando sobre a estrutura de concreto.

A questão primordial deste estudo, então, vem ao encontro dessa necessidade demandada pelo meio técnico quanto ao comportamento dos esforços hidráulicos atuantes em bacias de dissipação, notadamente devido a pressões médias, flutuantes e extremas. A falta de critérios gerais e específicos de estimativa e previsão desses esforços induzidos pelo ressalto hidráulico livre (tipo A) e afogado (tipo B) conduzem a escolhas, se não equivocadas, pelo menos efetuadas com um nível de otimização inferior ao que poderia ser adotado.

1.4 Objetivos

O dimensionamento seguro e econômico de dissipadores de energia por ressalto hidráulico passa pela compreensão do fenômeno. Para que isso seja possível, é necessário que o escoamento seja descrito da forma mais apropriada possível a partir, inicialmente, de investigação experimental em modelos físicos que representem as características hidráulicas e que permitam, posteriormente, a criteriosa análise e correlação dos parâmetros hidráulicos auferidos.

Para que seja obtido o mapeamento da macroturbulência no ressalto hidráulico, devem ser consideradas as características externas e internas simultaneamente a partir da correlação entre os parâmetros físicos representativos destas características.

Neste contexto, insere-se o objetivo geral deste trabalho, que trata da análise da macroturbulência no ressalto hidráulico através da identificação e previsão das características médias, flutuantes e extremas de pressões junto ao piso de uma bacia de dissipação, avaliadas a partir de uma abordagem que considera o ressalto hidráulico como uma composição de efeitos hidráulicos identificados individualmente a partir de distintas condições de escoamento.

A análise do ressalto hidráulico a partir de uma avaliação experimental em modelo físico requer, então, uma série de etapas que compõe os objetivos secundários deste trabalho, quais sejam:

- Implementar um modelo físico com dimensões adequadas para a aquisição de dados com representatividade hidráulica visando a transposição de resultados para escalas distintas.

- Adquirir grandezas hidráulicas médias e flutuantes a partir de amostras fisicamente representativas do ponto de vista da taxa de aquisição e do tempo de amostragem.

- Validar as características hidráulicas do escoamento livre obtidas experimentalmente a partir de proposições teórico-práticas identificadas na revisão bibliográfica.

- Validar as características externas do ressalto hidráulico livre (Tipo A) e afogado (Tipo B) obtidas experimentalmente a partir de proposições teórico-práticas identificadas na revisão bibliográfica.

- Validar as características internas devidas às pressões médias, flutuantes e extremas junto ao fundo do ressalto hidráulico obtidas experimentalmente a partir de proposições teórico-práticas identificadas na revisão bibliográfica.

- Identificar a região de influência da curva de concordância vertical entre o perfil vertente e a bacia de dissipação.

- Identificar as características hidráulicas do escoamento livre ao longo da bacia de dissipação e da curva de concordância vertical.

- Individualizar os esforços de pressão induzidos exclusivamente pelo ressalto hidráulico livre (Tipo A) junto ao fundo da bacia de dissipação.

- Individualizar os esforços de pressão induzidos exclusivamente pelo afogamento do ressalto hidráulico junto ao fundo da bacia de dissipação.

- Estabelecer uma metodologia de previsão de valores médios e flutuantes de pressões a partir da acumulação dos efeitos hidráulicos individualizados.

- Estabelecer o coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades representativo das pressões com distintas probabilidades de ocorrência.

Espera-se que este estudo venha a contribuir com o meio técnico-científico no intuito de fornecer parâmetros adimensionais que sirvam como orientação para o dimensionamento de dissipadores de energia por ressalto hidráulico, de maneira a proporcionar maior confiabilidade e segurança às estruturas.

1.5 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho está estruturado a partir deste primeiro capítulo introdutório no qual são apresentados o tema geral, as justificativas do estudo, a delimitação do problema específico e, por fim, os objetivos da pesquisa.

No segundo capítulo segue a revisão bibliográfica contemplando a apresentação do ressalto hidráulico, um breve histórico de danos em protótipos, alguns aspectos históricos sobre estudos experimentais conduzidos em laboratório, um apanhado das principais contribuições acerca das características externas e

posteriormente aspectos voltados às características internas do ressalto hidráulico. Conclui-se este capítulo com a apresentação das principais características do escoamento sobre curvas verticais.

No terceiro capítulo estão destacados os aspectos experimentais e metodológicos deste estudo. No que tange aos aspectos experimentais, é feita uma descrição das instalações físicas, incluindo a infraestrutura, o modelo físico implementado, os equipamentos de medição e os processos de aferição destes equipamentos. No que tange aos aspectos metodológicos é feita uma apresentação dos principais critérios de medição utilizados bem como estão apresentadas as ferramentas que conduziram a avaliação e correlação das características hidráulicas obtidas experimentalmente.

No quarto capítulo estão apresentados os dados experimentais obtidos juntamente com a análise crítica dos mesmos a partir da validação dos resultados frente às proposições teórico-experimentais existentes na bibliografia.

No quinto capítulo estão apresentados os resultados obtidos neste estudo, com a descrição do método de superposição de efeitos hidráulicos proposto para a estimativa das pressões médias e flutuantes no ressalto hidráulico, bem como as previsões dos valores extremos de pressão a partir do coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades.

No sexto capítulo é apresentada uma breve análise de sensibilidade dos resultados obtidos a partir do método proposto neste estudo frente àqueles obtidos experimentalmente.

No sétimo e oitavo capítulos estão inseridas as conclusões finais e algumas sugestões para estudos futuros que venham a contribuir ainda mais para o tema do Ressalto Hidráulico.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Apresentação do Fenômeno

O ressalto hidráulico é um fenômeno rapidamente variado responsável pela transição do regime supercrítico (rápido) para o regime subcrítico (lento) em escoamentos a superfície livre. Trata-se de uma transição intensamente turbulenta, marcada pela forte incorporação de ar a partir do rolo formado superficialmente. Apresenta linha d'água instável e com grande oscilação de níveis, com propagação de ondas a jusante. Essas características tornam o ressalto um fenômeno extremamente interessante do ponto de vista hidráulico, uma vez que pela sua estrutura estão associados altos níveis dissipativos a partir de significativas componentes dinâmicas de velocidade e pressão.

2.1.1 DEFINIÇÕES E SIMBOLOGIA BÁSICA

Ao longo deste trabalho serão utilizadas de forma recorrente algumas definições e símbolos representativos e característicos do fenômeno hidráulico em análise, sendo ilustrados os dois tipos mais usuais de ressalto hidráulico: aqueles formados a jusante de uma comporta descarregadora de fundo, conforme Figura 1, e aqueles formados a jusante de uma soleira livre (vertedouro), conforme Figura 2.

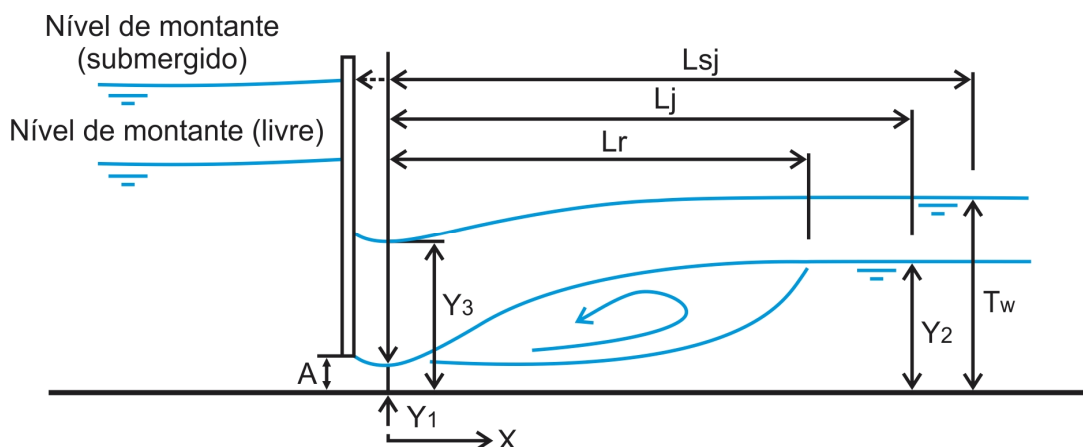


Figura 1 – Simbologia básica do ressalto hidráulico formado a jusante de comportas, adaptado de Trierweiler (2006)

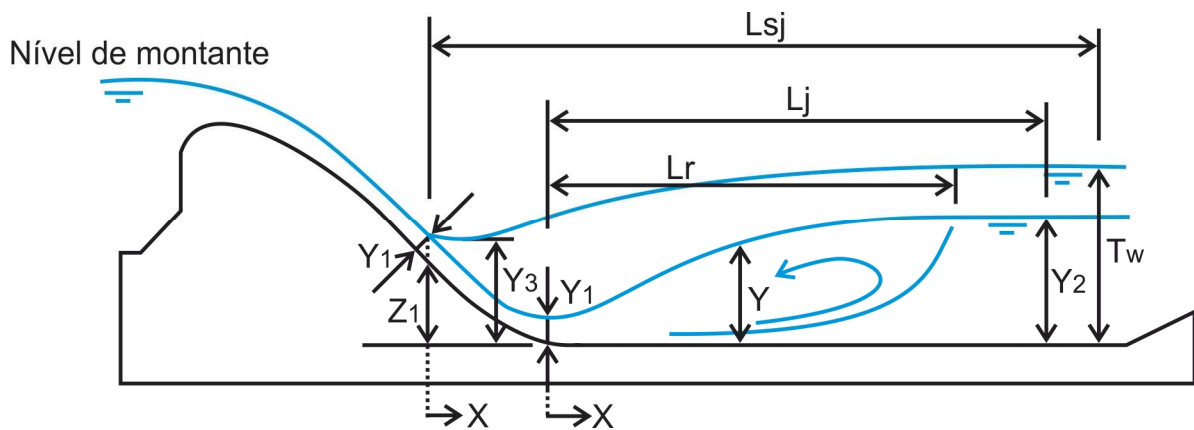


Figura 2 – Simbologia básica utilizada para ressalto formado a jusante de vertedouros, adaptado de Trierweiler (2006).

onde:

A = abertura da comporta descarregadora de fundo,

X = distância horizontal tomada a partir da seção transversal de início do ressalto,

Y = altura d'água tomada perpendicularmente ao contorno sólido,

Y_1 = altura d'água na entrada do ressalto hidráulico, altura conjugada rápida,

Y_2 = altura d'água na saída do ressalto hidráulico, altura conjugada lenta,

Y_3 = altura d'água na entrada do ressalto hidráulico submerso, desnível entre a superfície livre d'água e o piso da bacia de dissipação no ressalto hidráulico afogado.

T_w = altura d'água na saída do ressalto hidráulico submerso ou afogado,

L_r = comprimento do rolo,

L_j = comprimento do ressalto hidráulico livre,

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

2.1.2 TIPOS DE RESSALTO HIDRÁULICO

A formação do ressalto hidráulico ocorre de acordo com as condições de contorno hidráulicas e/ou geométricas a que o escoamento de entrada e/ou saída está submetido. Avaliando essas condicionantes, é possível identificar algumas formas distintas de formação do ressalto hidráulico descrevendo-os.

a) Quanto ao controle de montante o ressalto hidráulico pode se formar:

- a partir de descargas de fundo (comportas descarregadoras),

- a partir de escoamentos a superfície livre em canais (vertedouros), e
- a partir do impacto de jatos (dissipadores tipo salto de esqui)

b) Quanto às condições de nível d'água de jusante do ressalto hidráulico, o mesmo pode ser:

- livre: quando se desenvolve integralmente no trecho plano horizontal do canal,
- afogado: quando se desenvolve parcial ou integralmente sobre o paramento inclinado que antecede o trecho plano horizontal do canal,
- submergido: quando se forma a jusante de descargas de fundo submersas,
- forçado: quando paramentos estruturais implantados frontalmente ao escoamento antecipam a sua formação.

c) Quanto à declividade do contorno sólido de montante, o ressalto hidráulico pode ser formado:

- a partir de um trecho plano, como é o caso das descargas de fundo, e
- a partir de um trecho com declividade ou raio de curvatura vertical, como é o caso de vertedouros.

Peterka (1974) propõe a classificação dos ressaltos hidráulicos formados a jusante de uma comporta de fundo tendo como critério as condições hidráulicas na seção de entrada dos mesmos, representadas pelos números de Froude (Fr_1). O autor propõe, ainda, a descrição do fenômeno a partir das observações ilustradas na Figura 3 e da dissipação de energia associada.

A) Pré-ressalto – $1,7 \leq Fr_1 < 2,5$ – escoamento caracterizado por pequenos rolos superficiais e dissipação de energia da ordem de 20% da energia de entrada.

B) Ressalto oscilante – $2,5 \leq Fr_1 < 4,5$ – apresenta um contorno nítido, com a formação de pulsações não-periódicas que se propagam para jusante com amplitude aproximadamente constante. Apresenta dissipação de energia da ordem de 30% a 45%.

C) Ressalto estável – $4,5 \leq Fr_1 < 9,0$ – apresenta comportamento regular, de características externas estáveis e dissipação de energia entre 45% a 70%.

D) Ressalto forte – $Fr_1 > 9,0$ – apresenta intensa formação de vórtices e incorporação de ar, agitação da superfície e jatos de alta turbulência que se propagam por uma grande distância para jusante. A dissipação de energia pode atingir níveis de 85%.

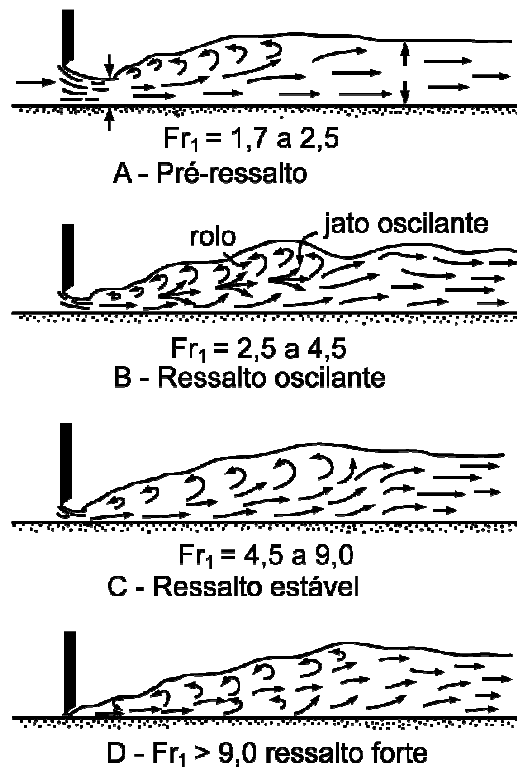


Figura 3 – Classificação do ressalto hidráulico em função do número de Froude na seção de entrada (Fr_1). Fonte: Peterka (1974).

Hager (1988) avalia a formação do ressalto hidráulico a jusante de canais com mudança de declividade e propõe uma classificação dependente do seu grau de afogamento e da posição em que se forma, conforme pode ser visto na Figura 4. O autor propõe, também, a descrição de cada um dos tipos de ressalto por ele identificados.

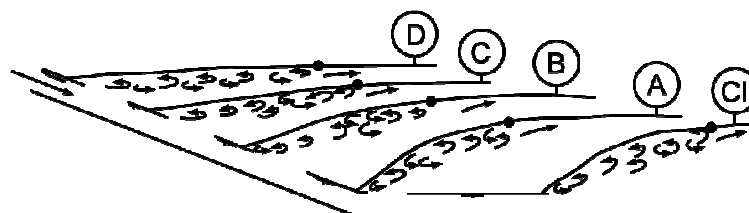


Figura 4 – Classificação do ressalto hidráulico formado a jusante de canais com mudança de declividade. Fonte: Hager (1988)

- Ressalto hidráulico clássico – forma-se no canal horizontal, a jusante da mudança de declividade. Esse tipo de ressalto ocorre quando a lâmina d'água a jusante (T_w) é inferior à altura conjugada lenta (Y_2) avaliada de acordo com a equação de Bélanger, a partir da profundidade do escoamento (Y) verificada junto à mudança de declividade.

- Ressalto hidráulico tipo A – forma-se quando a altura conjugada lenta é igual à lâmina d'água a jusante, sobre a bacia de dissipação. O ressalto tem seu início imediatamente após a mudança de declividade estando inteiramente inserido no canal horizontal.

- Ressalto hidráulico tipo B – forma-se quando T_w supera Y_2 afogando o ressalto em direção ao canal de maior declividade a montante. Nessa classificação enquadram-se apenas aquelas formações que apresentam a seção de entrada antes da mudança de declividade e a seção de saída do ressalto após a mudança de declividade.

- Ressalto hidráulico tipo C – forma-se inteiramente no canal de maior declividade de montante, apresentando a seção de saída no início da estrutura de dissipação. O valor de T_w aumenta ainda mais com relação à Y_2 .

- Ressalto hidráulico tipo D – apresenta grande afogamento, formando-se totalmente no canal de maior declividade de montante, caracterizando níveis d'água a jusante bastante superiores à altura conjugada lenta.

2.2 Aplicação do Ressalto Hidráulico

Tendo em vista as características macroturbulentas do ressalto hidráulico, uma série de aplicações desse fenômeno pode ser verificada explorando as suas propriedades de acordo com as necessidades técnicas dos problemas de engenharia. Dessa forma, remetem-se ao ressalto hidráulico aplicações como:

i) Dissipação de energia:

- sistemas de amortecimento de vazões excedentes, a jusante de vertedouros de barragens (Figura 5),

- descargas de fundo, a jusante de comportas,

- sistemas de drenagem urbana, a jusante de calhas escalonadas ou simplesmente canais de drenagem de forte declividade;

ii) Aeração do escoamento:

- atenuação dos efeitos de cavitação sobre estruturas hidráulicas sujeitas a fluxos em altas velocidades,

- incorporação de oxigênio ao escoamento facilitando a oxigenação e a autodepuração, especialmente de cursos d'água urbanos;

iii) Homogeneização de misturas:

- em estações de tratamento de água, na mistura de produtos químicos e biológicos inerentes aos processos de tratamento,

- em plantas de tratamento de efluentes domésticos e industriais como facilitador da mistura de produtos químicos e biológicos;

iv) Elevação do nível d'água:

- redução de velocidades em canais de irrigação, especialmente em situações de derivação.



Figura 5 – Ressalto hidráulico formado na bacia de dissipação da UHE de Porto Colômbia, vazão de $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ e número de Froude (Fr_1) igual a 3,88. Fonte: Marques *et al.* (1999).

O objetivo central desse trabalho está vinculado às aplicações do ressalto na engenharia hidráulica quanto às suas características macroturbulentas e aos consequentes efeitos dissipativos do escoamento. Assim, dentre as aplicações citadas, o interesse recai, especificamente, sobre o ressalto hidráulico formado a jusante de vertedouros, cujas características estão fortemente relacionadas com intensas flutuações de pressão, velocidades e níveis, associadas a concentrações de ar no escoamento. Essas características, quando não abordadas adequadamente na etapa de projeto, podem ocasionar danos significativos à estrutura de dissipação, bem como provocar erosões no leito do rio, por problemas ligados à fadiga, cavitação, ressonância e sobrepressão.

2.3 Casos Históricos de Falhas e Danos em Estruturas Hidráulicas

Os danos em estruturas hidráulicas ocorrem, geralmente, devido a flutuações de velocidade ou de pressão do escoamento atuantes junto ao contorno sólido. No caso de estruturas de descarga e dissipação de energia de barragens essas características hidrodinâmicas do escoamento, se não estiverem devidamente consideradas do ponto de vista técnico, podem vir a danificar o piso de uma bacia de dissipação, especialmente junto a descontinuidades hidráulicas (end-sill, chute-blocks, pilares, ranhuras, juntas estruturais, defeitos construtivos, dentre outros), e até mesmo a jusante do dissipador com atuação sobre a geologia.

A partir dessas considerações, julga-se oportuno apresentar alguns casos de danos verificados em obras hidráulicas, de forma resumida na Tabela 1 (ilustrados pela Figura 6), visando demonstrar a real importância do conhecimento das características do ressalto hidráulico.

De modo geral, os danos identificados nas estruturas hidráulicas têm como causa principal os efeitos do escoamento, responsável pelo desencadeamento e manutenção de processos de abrasão e erosão por cavitação, ou ainda pela ocorrência de sobrepressões e flutuações das pressões não suportadas pelas estruturas resultando em arrancamento de blocos estruturais e de rocha.

Tabela 1 – Alguns casos históricos de danos em obras hidráulicas por ação do ressalto hidráulico

Autores	Ocorrência
Sanchez Bribiesca e Viscaino (1973) ¹	Barragem de Malpaso: arrancamento de blocos de rocha
Bowers e Tsai (1969) ²	Barragem de Karnafuli: danos no descarregador
Lopardo <i>et al.</i> (2006)	Barragem de Nort Folk: danos na soleira terminal da bacia de dissipação e erosão a jusante
Elevatorsky (1959)	Barragens de Bonneville e de Wilson: danos erosivos na bacia de dissipação
Senturk (1998)	Barragem de Keban: erosão na bacia de dissipação
Lopardo <i>et al.</i> (1982) ³	Barragem de Salto Grande: erosão nos blocos de dissipação da bacia
ICOLD/CBDB (2002)	Barragem de Camargos: erosão no defletor no final da bacia de dissipação
ICOLD/CBDB (2002)	Barragem de Porto Colômbia: erosão dos blocos de dissipação na entrada e na saída da bacia



Figura 6 – Danos ocorridos em estruturas hidráulicas: a esquerda erosão por cavitação nos blocos de dissipação da UHE Porto Colômbia (ICOLD/CBDB, 2002) e a direita a bacia de dissipação da UHE Salto Grande (Lopardo *et al.*, 2006)

Apesar da relevância das questões apresentadas raras são as investigações efetuadas diretamente em protótipos acerca das características do ressalto

¹ Sanchez Bribiesca, J. S e Viscaino, A. C. (1973). Turbulence Effects on the Lining of Stilling Basins, ICOLD, XI Congress, Madrid, Q41, Vol. 2 *apud* Fiorotto e Rinaldo (1992).

² Bowers, C. E. e Tsai, F. H. (1969) Fluctuating Pressure in Spillway Stilling Basins. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, vol. 95, HY6, 2071-2079 *apud* Armênio *et al.* (2000).

³ Lopardo, R. A., De Lio, J. C.; Vernet, G. F. (1982). Physical modelling of cavitation tendency for macroturbulence of hydraulic jump. Hydraulic Modelling of Civil Engineering Structures, Coventry, Inglaterra, pág. 109-121 *apud* Lopardo *et al.* (2006).

hidráulico, podendo ser citados os casos da UHE Porto Colômbia e da UHE Salto Grande. A dificuldade de obtenção de dados em nível de protótipo faz com que até hoje esses dados ainda sejam amplamente utilizados.

2.4 Antecedentes Históricos

Se por um lado são raras as investigações diretamente em protótipo, por outro, inúmeros são os estudos teóricos e experimentais que têm sido desenvolvidos em nível de laboratório ao longo dos anos, focados principalmente nas características externas do ressalto hidráulico. As investigações acerca das características internas são menos frequentes e baseadas na investigação do fenômeno a jusante de comportas. Investigações numéricas também têm sido cada vez mais desenvolvidas, mas carecem de maiores informações de medições em modelos físicos a fim de proporcionar melhores ajustes das condições de contorno, especialmente no que diz respeito à incorporação de ar, ao comportamento da superfície livre e ao comportamento das velocidades médias e flutuantes.

De acordo com Hager (1992), o ressalto hidráulico foi descrito inicialmente por Leonardo da Vinci, no século XVI, e mais tarde contou com as primeiras contribuições quantitativas a partir dos estudos experimentais apresentados por Bidone (1820). Significativa contribuição foi dada por Bélanger (1828), especialmente quanto à determinação das alturas conjugadas do ressalto. Bresse (1868), Bazin e Darcy (1865)⁴ e Boussinesq (1877)⁵, a partir da segunda metade do século XIX, contribuíram com estudos teóricos e experimentais. Outros autores, como Gibson (1914)⁶, Kennison (1916)⁷ e Riegel e Beebe (1917)⁸, no princípio do século XX, também devem ser citados neste contexto histórico.

⁴ Bazin, H.; Darcy, H. (1865). Recherches Expérimentales Relatives au Remous et à la Propagation des Ondes. Recherches Hydrauliques, Parties I et II. Dunod, Paris *apud* Hager (1992).

⁵ Boussinesq, J. (1877). Essais sur la Théorie des Aux Tourants: Memoires Présentés par Divers avants à L'academie des Sciences, Paris, 680p *apud* Hager (1992).

⁶ Gibson, A. H. (1914). The Formation of Standing Waves in an Open Stream . Minutes of Proceedings. Inst. Civil Engineers, London, 197: 233-242 *apud* Hager (1992).

⁷ Kennison, K. R. (1916). The Hydraulic Jump in Open-Channel Flow at High Velocity. Transactions, ASCE, 80: 338-420 *apud* Hager (1992).

⁸ Riegel, R. M.; Beebe, J. C. (1917). The Hydraulic Jump as a Means of Dissipating Energy. Miami Conservancy District, Technical Reports Part III: 60-111. Dayton, Ohio *apud* Hager (1992).

A partir dos estudos de Safranez (1929)⁹ e Einwachter (1932)¹⁰, passaram a ser desenvolvidos estudos sistemáticos acerca do ressalto hidráulico, considerando as alturas conjugadas, o comprimento do rolo e a associação da dissipação de energia ao movimento rotacional nesta região do rolo.

Significativas contribuições de pesquisadores norte-americanos na década de 30 foram destacadas por Hager (1992): Bakhmeteff e Matzke (1936)¹¹ a partir de considerações adimensionais sobre linha d'água, alturas conjugadas e comprimentos característicos, e Rouse (1934)¹² com a introdução de números adimensionais, especialmente o número de Froude, na análise do escoamento.

A partir da década de 50, as investigações sobre o ressalto hidráulico passaram a ter novos componentes de interesse. Isso fica evidenciado pelos estudos de Rouse *et al.* (1959)¹³ e Rajaratnam (1965a) acerca dos campos de velocidade e das características turbulentas do escoamento. Rajaratnam (1967) faz uma revisão bastante abrangente sobre os trabalhos desenvolvidos até essa época.

Destaca-se, além dos já citados, o trabalho pioneiro de Elder (1961)¹⁴ acerca da investigação de pressões flutuantes junto ao fundo de um canal submetido ao ressalto hidráulico, utilizando instrumentação capaz de adquirir dados a frequências elevadas.

Na década de 70 surgiram os primeiros estudos a partir de observações efetuadas por anemometria a filme quente (Rech e Leutheuser, 1971), e mais adiante por efeito Doppler (Long *et al.*, 1990). Juntamente com esses estudos, passam a ser desenvolvidos os primeiros modelos computacionais do ressalto hidráulico.

A partir de então inúmeros trabalhos têm sido desenvolvidos com interesse voltado aos esforços hidrodinâmicos atuantes nos dissipadores de energia a partir da avaliação das variações instantâneas das propriedades dos escoamentos sobre a

⁹ Safranez, K. (1929). Untersuchungen über den Wechselsprung. Der Bauingenieur, vol. 10(37):649-651 e vol, 10(38): 668-677 *apud* Hager (1992).

¹⁰ Einwachter, J. (1932). Berechnung der Deckwalzenbreite des frein Wechselsprungs. Wasserkraft und Wasserwirtschaft, vol. 27, pp. 245-249 *apud* Hager (1992).

¹¹ Bakhmeteff, B. A.; Matzke, A. E. (1936). The Hydraulic Jump in Terms of Dynamic Similarity. Transactions, ASCE, Vol. 101, pp. 630-680 *apud* Hager (1992).

¹² Rouse, H. (1934). On the Use of Dimensionless Numbers. Civil Engineering 4(11): 563-568 *apud* Hager (1992).

¹³ Rouse, H; Siao, T. T; Nagaratnam, S. (1959). Turbulence Characteristics of the Hydraulic Jump. Transactions, ASCE, vol. 124, pp. 926-966 *apud* Hager (1992).

¹⁴ Elder, R. A. (1961). Prototype-Model Turbulence Scaling. In: Proc. Of Nineth Convention of IAHR, vol. 24, Dubrovnik, Yugoslavia, pp. 24-31 *apud* Marques (1995).

estrutura de dissipação. Esses estudos serão abordados ao longo dos próximos itens desta revisão bibliográfica.

2.5 Ressalto Hidráulico – Características Externas

2.5.1 ALTURAS CONJUGADAS

As alturas conjugadas do ressalto hidráulico livre correspondem às lâminas d'água verificadas a montante e a jusante do fenômeno. Assim, a profundidade do escoamento na seção mais a montante do ressalto (seção de entrada) é denominada por altura rápida (ou supercrítica) (Y_1), e a profundidade do escoamento na seção mais a jusante do ressalto (seção de saída) é denominada por altura lenta (ou subcrítica) (Y_2).

Apesar de Bidone (1820) ter sido o precursor nos estudos quantitativos acerca do ressalto hidráulico, foi Bélanger (1828) quem primeiro deduziu uma equação que correlacionasse as alturas conjugadas do ressalto hidráulico tipo A, a partir da conservação da quantidade de movimento entre 2 seções de controle, tomadas respectivamente na entrada e na saída do ressalto, conforme Equação 1.

$$\frac{1}{2}\rho g B Y_1^2 + \rho Q V_1 = \frac{1}{2}\rho g B Y_2^2 + \rho Q V_2 \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

ρ = massa específica da água,

g = aceleração da gravidade,

B = largura do canal,

Y_1 = altura d'água na seção de entrada do ressalto hidráulico,

Y_2 = altura d'água na seção de saída do ressalto hidráulico,

Q = vazão média do escoamento,

V_1 = velocidade média do escoamento na seção de entrada do ressalto hidráulico, e

V_2 = velocidade média do escoamento na seção de saída do ressalto hidráulico.

A partir da inserção do número de Froude na seção de entrada do ressalto (Fr_1) na Equação 1, obtém-se a consagrada relação de Bélanger (Equação 2) das alturas conjugadas do ressalto hidráulico tipo A.

$$\frac{Y_2}{Y_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8 Fr_1^2} - 1 \right), \text{ onde } Fr_1 = \frac{V_1}{\sqrt{gY_1}} \quad \text{Equação 2}$$

A partir da dedução de Bélanger, diversas outras proposições foram estabelecidas ao longo dos anos para correlacionar as alturas conjugadas, compreendendo ressaltos hidráulicos tipos A e B formados a jusante de vertedouros, e ressaltos hidráulicos livres e submergidos a jusante de descargas de fundo. Citam-se, então, os trabalhos de Silvester (1964)¹⁵, Rajaratnam (1965a), Rajaratnam (1965b), Leutheuser e Kartha (1972), Hager (1988), Hager e Bremen (1989) e Ohtsu e Yasuda (1994).

Além da consagrada relação das alturas conjugadas de Belanger, destacam-se as propostas de Hager (1988) (Equação 3) e Ohtsu e Yasuda (1994) (Equação 4) por terem sido desenvolvidas a partir de estudos em ressaltos hidráulicos tipos A e B, seguindo a delimitação experimental deste trabalho.

$$\frac{T_w}{Y_1 \cdot \cos(\theta)} = 23,5 \cdot \left(1 + \frac{3}{2} E \right)^{-2} + \frac{\sqrt{2}(Fr_1 - 3)}{\text{th}\left(\frac{5}{2} E\right)}, \text{ onde } E = \frac{T_w - Z_1}{T_w} \quad \text{Equação 3}$$

$$\left(\frac{Y_2}{Y_1} \right)^3 - \left\{ 2 \cdot Fr_1^2 + 1 - S_f \right\} \left(\frac{Y_2}{Y_1} \right) + 2 \cdot Fr_1^2 = 0, \text{ onde } S_f = 0,12(Fr_1 - 1)^2 \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

θ = declividade do canal a montante do trecho plano sobre o qual ocorre a formação do ressalto hidráulico, e

Z_1 = desnível entre a cota da estrutura de descarga onde se identifica o início do ressalto hidráulico e a cota de fundo da bacia de dissipação

¹⁵ Silvester, R. (1964) Hydraulic Jump in all Shapes of Horizontal Channels. Journal of Hydraulics Division, ASCE, vol. 90, pp. 1125 *apud* Bhutto *et al.* (1989).

2.5.2 COMPRIMENTOS CARACTERÍSTICOS

A caracterização do ressalto hidráulico passa, também, pela definição dos comprimentos ao longo dos quais a influência do fenômeno sobre a estrutura hidráulica se faz presente. Diversos autores têm apresentado formulações a fim de caracterizar a região de influência do ressalto junto às estruturas, notadamente aquelas destinadas à dissipação de energia. Desta forma, dois comprimentos tornam-se importantes: o comprimento do ressalto livre (L_j) ou afogado/submerso (L_{sj}) e o comprimento do rolo (L_r).

Não é consensual no meio técnico/científico, a posição exata em que cessam as influências do rolo e do ressalto sobre a estrutura hidráulica. Sabe-se, contudo, que o rolo está contido no ressalto e que essa é uma zona de particular interesse tendo em vista suas características particularmente macroturbulentas e ainda por ser esta região responsável por praticamente a totalidade da dissipação da energia do escoamento.

2.5.2.1 Comprimento do Ressalto

O comprimento do ressalto hidráulico é a distância longitudinal ao longo da qual se processa integralmente a transição do escoamento em regime rápido para regime lento. Para quantificar esse comprimento característico, é necessário identificar as seções transversais de início e fim do ressalto.

A posição de início do ressalto, em termos médios, é facilmente identificável, mesmo para as situações de ressalto afogado, pela simples avaliação da brusca mudança de comportamento da linha média d'água. Long *et al.* (1991) observa que as pulsações típicas do início do ressalto seriam causadas pelo desenvolvimento, advecção e emparelhamento dos vórtices de grande escala.

Quanto ao final do ressalto, diferentes interpretações sobre a sua delimitação física foram (e ainda são) levadas em conta ao longo das diversas avaliações experimentais encontradas na bibliografia. Elevatorski (1959) afirma ser a posição em que não há grande variação de níveis, estabelecendo um critério baseado na superfície livre do escoamento. Rajaratnam (1967), a partir de uma proposta analítica, remete o final do ressalto onde a altura d'água encontra a altura conjugada lenta e Marques *et al.* (1996) que, introduzindo uma abordagem hidrodinâmica,

admitem o final do ressalto onde terminam as perturbações no piso da bacia de dissipação induzidas pelas flutuações de pressão.

Gomes (2000) ressalta que o comprimento do ressalto hidráulico livre pode apresentar variação da ordem de $0,35(Y_2 - Y_1)$, ocasionada pela instabilidade macroturbulenta do escoamento.

Assim, diversas proposições foram estabelecidas ao longo dos anos para definir quantitativamente o comprimento do ressalto (L_j), podendo ser citados os trabalhos de Riegel e Beebe (1917)¹⁶, Chertoussove (1935)¹⁷, Bakhmateff e Matzke (1936)¹⁸, Peterka (1974), GovindaRao e Rajaratnam (1963) e Silvester¹⁵ (1964).

Destacam-se, ainda, as proposições de Smetana (1933)¹⁹ (Equação 5) e Elevatorski (1959) (Equação 6) por muito tempo utilizadas para ressalto livre. Enfatizam-se ainda aquelas formulações desenvolvidas a partir de estudos efetuados em ressaltos hidráulicos a jusante de vertedouros, como é o caso de Marques *et al.* (1996) (Equação 7) e Teixeira (2003) (Equação 8), que levam em consideração na definição de comprimento do ressalto, o critério hidrodinâmico citado anteriormente. Por fim, ressalta-se a proposta de Lopardo *et al.* (2004a) (Equação 9) por contemplar o comprimento de ressaltos hidráulicos submersos (L_{sj}), a partir, também, de uma abordagem hidrodinâmica.

$$L_j \cong 6 (Y_2 - Y_1) \quad \text{Equação 5}$$

$$L_j = 6,9 (Y_2 - Y_1) \quad \text{Equação 6}$$

$$L_j = 8,5 (Y_2 - Y_1) \quad \text{Equação 7}$$

$$L_j = 8 (Y_2 - Y_1) \quad \text{Equação 8}$$

$$\frac{L_{sj}}{T_w - Y_3} = 41,2.S^* + 6, \text{ onde } S^* = \frac{T_w - Y_2}{Y_2} \quad \text{Equação 9}$$

¹⁶ Riegel, R. M. e Beebe, J. C. (1917) The Hydraulic Jump as a Means of Dissipating Energy. Miami Conservancy District, Technical Reports Part III: 60-110 Dayton (Ohio) *apud* Hager (1992)

¹⁷ Chertoussove, M. P. (1935) Some Characteristics Regarding the Length of the Hydraulic Jump". Transactions, Science Research Institute of Hydrotechnics, pp. 66 *apud* Bhutto *et al.* (1989).

¹⁸ Bakhmateff, B. A. e Matzke, A. E. (1936) "The Hydraulic Jump in Terms of Dynamic Similarity" Transactions, ASCE, vol. 101, pp. 630 *apud* Bhutto *et al.* (1989).

¹⁹ Smetana, J. (1933) Experimental Study of Hydraulic Jump, p. 2-40 *apud* Bhutto *et al.* (1989).

2.5.2.2 Comprimento do Rolo

O comprimento total do rolo é de definição mais simples (com relação ao final do ressalto), porém não consensual. A subjetividade envolvida refere-se à identificação da seção transversal onde o rolo se encerra. Novamente, diferentes interpretações são dadas sobre a posição final do rolo. Rajaratnam (1965b) dentre outros, remetem esta posição àquela em que a altura da água alcança 95% da altura conjugada lenta. Marques *et al.* (1996) atribuem ao final do rolo a seção transversal local onde se verifica o mínimo valor do coeficiente de assimetria das amostras de pressões medidas junto ao fundo da bacia de dissipação.

Gomes (2000) ressalta que o comprimento do rolo pode apresentar variação da ordem de $0,50(Y_2 - Y_1)$, ocasionada pela instabilidade macroturbulenta do escoamento.

Verifica-se, novamente, diversas proposições estabelecidas ao longo dos anos para definir quantitativamente o comprimento do rolo (L_r), citando-se os trabalhos de Safranez (1933)²⁰, Einwachter (1935)²¹, Peterka (1974), Sarma e Newnham (1973), Busch (1981)²² e Hager *et al.* (1990).

Destaca-se, aqui, a proposta de Marques *et al.* (1996) (Equação 10) tendo em vista o critério hidrodinâmico utilizado pelos autores.

$$L_r = 6 (Y_2 - Y_1)$$

Equação 10

2.5.2.3 Comprimento de Turbulência

Lopardo *et al.* (2004a) propõem a definição de um comprimento turbulento (ou comprimento de turbulência) para o ressalto hidráulico submerso a partir das avaliações do decaimento da turbulência em ressalto hidráulico livre. Os autores definem esse comprimento como sendo aquele a partir do qual a flutuação de pressão passa a corresponder àquela verificada em escoamentos a superfície livre em canais em regime lento.

²⁰ Safranez, K. (1933) Length of Hydraulic Jump. Munich, vo. 28, n. 24, pp. 263-277 *apud* Bhutto *et al.* (1989).

²¹ Einwachter, J. (1935) "The Hydraulic Jump and Length of the Surface Roller", *Wasserkraft und Wasserwirtschaft*, April, Vol. 30 *apud* Peterka (1959).

²² Busch, F. (1981) The Length of a Free Plane Hydraulic Jump. Proc. XIX IAHR-Congress, New Delhi, Subject D(d), Paper No. 15, pp. 299-306. *apud* Hager *et al.* (1990).

2.5.3 LINHA MÉDIA D'ÁGUA

No dimensionamento de uma bacia de dissipação a jusante de um vertedouro os níveis médios da superfície livre d'água ao longo do ressalto hidráulico têm sua importância atrelada à determinação da altura dos muros laterais do dissipador. Trata-se, portanto, de uma importante característica do ressalto tendo em vista que a mesma é altamente influenciada pela incorporação do ar no escoamento.

Dada a sua importância, distintos autores propuseram a avaliação dessa característica hidráulica, citando-se aqui os estudos de Bakhmeteff e Matzke (1936)¹⁸, Rajaratnam (1965a) e Rajaratnam e Subramanya (1968). Enfatizam-se, aqui, as propostas de Sauma Haddad *et al.* (1992) (Equação 11) e de Hager (1992) (Equação 12), a primeira por relacionar o ressalto hidráulico a uma onda estacionária e a segunda por considerar a diferença das alturas conjugadas do ressalto hidráulico fazendo relação com o comprimento do mesmo.

$$\frac{Y}{Y_1} = \left[1 + \left(\frac{Y_2}{Y_1} - 1 \right) \text{sen} \left(\frac{\pi X}{2 L_j} \right) \right] \quad \text{Equação 11}$$

$$\frac{Y - Y_1}{Y_2 - Y_1} = 1,5 \text{ th} \left(\frac{X}{L_r} \right) \quad \text{Equação 12}$$

2.6 Ressalto Hidráulico – Características Internas

2.6.1 CARACTERIZAÇÃO DA MACROTURBULÊNCIA

O ressalto é um fenômeno hidráulico macroscopicamente permanente, bruscamente variado que se forma quando um escoamento à superfície livre passa do regime supercrítico para o regime subcrítico. Essa transição é caracterizada pela abrupta elevação da linha d'água e pela formação de um turbilhão de eixo horizontal, responsável pela geração de macroturbulência de grande intensidade, incorporação e arraste de ar na massa líquida e dissipação da energia cinética do fluxo incidente (Lopardo, 2005a).

A turbulência é uma propriedade associada ao escoamento e não uma propriedade física dos fluidos. Sabe-se que uma definição precisa da turbulência é uma tarefa bastante discutida e, sendo assim, procura-se associar a esse tipo de escoamento características como aleatoriedade, campo tridimensional de velocidades, não linearidade e difusividade, dentre outras. Além disso, são escoamentos dissipativos e que se desenvolvem a partir de altos números de Reynolds (Tennekes e Lumley, 1972).

Na macroturbulência, os vórtices de maior tamanho (turbilhões) estão associados a baixas frequências de flutuação, são governados pelas condições de contorno do escoamento e têm dimensões da mesma ordem de grandeza do escoamento considerado. Os turbilhões interagem com o escoamento médio, do qual extraem energia cinética com que alimentam as flutuações de pressão (Lopardo, 2005a).

Os grandes turbilhões, por sua vez, dão origem a outros de menor tamanho, num processo contínuo, de modo que a energia se transfere para vórtices cada vez menores até que eles alcancem dimensões tão reduzidas que as forças viscosas passam a exercer influência, dissipando a energia mecânica em calor.

Ortiz *et al.* (1998) comentam acerca da dicotomia da turbulência em escoamentos. Por um lado trata-se de um fenômeno essencialmente randômico, por outro, seria composto por estruturas de coerência, devendo ser tratado deterministicamente. Segundo os autores, esses dois “pontos de vista” não podem ser tratados isoladamente, uma vez que mesmo com a identificação de estruturas coerentes, a aleatoriedade da posição dos turbilhões no espaço está presente no fenômeno.

Long *et al.* (1991) descrevem o comportamento dos turbilhões que se formam internamente no ressalto hidráulico, afirmando que quando o início do ressalto encontra-se mais a montante, existe um maior número de turbilhões no seu interior, cujos tamanhos vão aumentando em direção a jusante, estando o maior deles presente no final do rolo. Esses turbilhões têm sentido de rotação anti-horário. Os autores também verificaram que quaisquer dois vórtices vizinhos devido a sua rotação e influência mútua podem ser deformados e incorporados, formando um novo vórtice maior. Essas características evidenciam o comportamento oscilante na

estrutura do escoamento de um ressalto hidráulico e configuram a macroturbulência verificada.

Mossa (1999), avaliando as características macroscópicas do ressalto a partir de registros fotográficos dos seus experimentos, atribui a característica oscilatória verificada no escoamento à movimentação longitudinal do início do ressalto, à variação das componentes de velocidade e pressão na região final do rolo e ao processo de formação, desenvolvimento e auto-incorporação entre as estruturas de larga escala. Ainda segundo o autor, a característica oscilatória do fenômeno poderia ser descrita como um processo regular e não aleatório sobreposto a uma condição de turbulência.

2.6.2 DISSIPACÃO DE ENERGIA

A dissipação de energia ocorrida no ressalto hidráulico é determinada a partir das condições de energia do escoamento na entrada e na saída do ressalto, ou seja, considerando as cargas estáticas, representadas pelas alturas conjugadas, e as cargas cinéticas, representadas pelas velocidades médias nas seções S_1 e S_2 .

Elevatorski (1959), a partir da Figura 7, ilustra a energia de montante (E_1) e a energia de jusante (E_2), estabelecendo o total dissipado ao longo do ressalto (H_t) a partir da Equação 13, que reescrita em termos das alturas conjugadas, resulta na Equação 14.

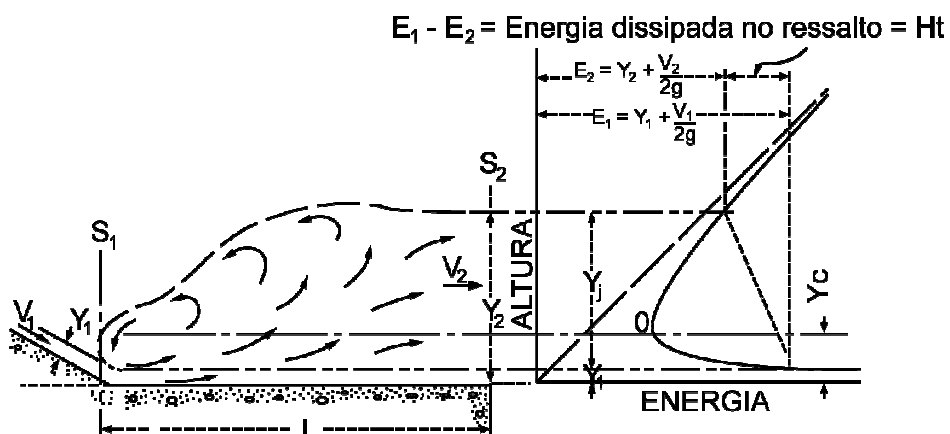


Figura 7 – Dissipação de energia no ressalto hidráulico, adaptado de Elevatorski (1959)

$$H_t = E_1 - E_2 = \left(Y_1 + \frac{V_1^2}{2g} \right) - \left(Y_2 + \frac{V_2^2}{2g} \right) \quad \text{Equação 13}$$

$$H_t = \frac{1}{4} \frac{(Y_2 - Y_1)^3}{Y_1 Y_2} \quad \text{Equação 14}$$

Efetuada-se a comparação entre a energia total dissipada (H_t) e a energia inicialmente disponível na seção de entrada, calcula-se a eficiência do ressalto hidráulico (η) e, por consequência, da bacia de dissipação, conforme Equação 15.

$$\eta = \frac{E_1 - E_2}{E_1} = \frac{H_t}{E_1} \quad \text{Equação 15}$$

Peterka (1974) correlaciona a eficiência do ressalto hidráulico com o número de Froude (Fr_1) tomado na seção de montante, mostrando a proporcionalidade entre ambos. O autor demonstra que com o aumento do número de Froude, a eficiência da dissipação também aumenta, porém a níveis decrescentes a partir de $Fr_1 > 4$, conforme ilustrado pela Figura 8.

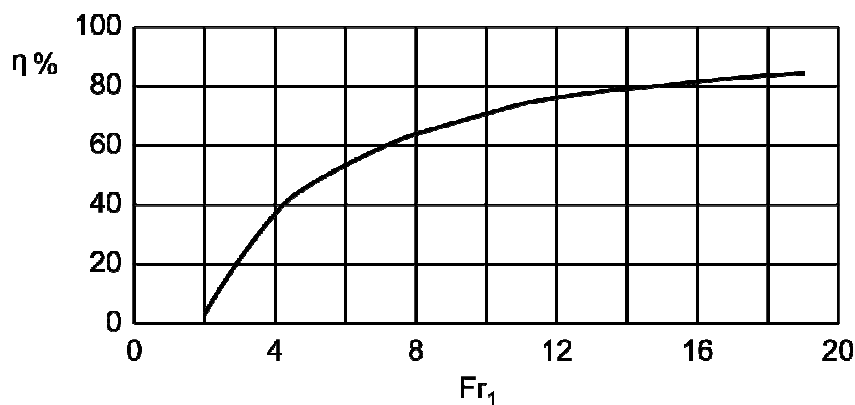


Figura 8 – Eficiência do ressalto hidráulico. Fonte: Peterka (1974)

Diversos autores apresentam propostas para a estimativa da eficiência do ressalto hidráulico, todas elas considerando as condições de entrada e saída englobando, também o número de Froude. Citam-se aqui as propostas de Chow (1959), Elevatorski (1959) e Silvester¹⁵ (1964).

Marques *et al.* (1998) associam a dissipação de energia ao longo do ressalto com as flutuações de pressão verificadas junto ao piso da bacia de dissipação. Segundo os autores, a integração sob os dados verificados ao longo de todo o ressalto representa a energia total dissipada. Assim, pode-se avaliar longitudinalmente a dissipação para a condição de ressalto livre. A adimensionalização longitudinal pela diferença das alturas conjugadas mostra que, em média, na posição onde ocorre o final do rolo, 95% do potencial dissipativo do ressalto é atingido, conforme ilustrado pela Figura 9.

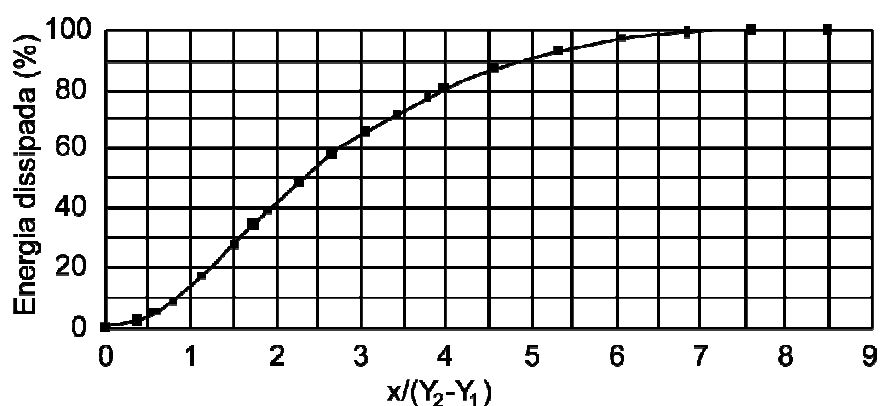


Figura 9 – Dissipação de energia ao longo do ressalto hidráulico a partir da avaliação das flutuações de pressão junto ao fundo. Fonte: Marques *et al.* (1998)

Segundo Lopardo (2005a), o processo de dissipação macroturbulenta no interior do ressalto é inevitavelmente acompanhado por severas flutuações de pressão que são transmitidas às estruturas que compõe o layout estrutural da bacia de dissipação de energia, podendo submetê-lo a fenômenos de arrancamento de lajes, fadiga de materiais, vibrações na estrutura e cavitação.

2.6.3 PRESSÕES MÉDIAS, FLUTUANTES E EXTREMAS

O conhecimento das pressões médias, flutuantes e extremas no ressalto hidráulico, mesmo quando auferidas em laboratório, fornecem informações importantes para o projeto de estruturas hidráulicas, bem como auxilia na compreensão do processo de dissipação de energia.

As flutuações de pressão verificadas no ressalto, por serem ocasionadas por um escoamento macroturbulento, podem ser abordadas analiticamente admitindo-as como resultado de um processo estocástico, estacionário e ergódico. A natureza

aleatória das flutuações faz com que os estudos a seu respeito sejam conduzidos a partir da análise estatística espectral e probabilística das amostras coletadas em laboratório (ou mesmo em protótipo), como sendo a forma analítica mais adequada de representação das pressões do ressalto hidráulico.

Assim, para a condução dessa análise é necessário que sejam estimados parâmetros estatísticos como valores médios, médios quadráticos, coeficientes de assimetria e curtose, assim como frequências dominantes. Além disso, valores extremos associados a determinadas probabilidades de ocorrência são de essencial interesse neste âmbito, uma vez que representam condições críticas de operação do dissipador de energia.

A flutuação de pressão junto ao piso da bacia de dissipação deve ser descrita em função das características hidráulicas do escoamento e do fluido avaliadas ao longo do tempo, em conjunto com as condicionantes geométricas da estrutura. Particularizando essa análise para o ressalto hidráulico formado em um canal retangular de fundo plano e seção transversal retangular, estabelece-se uma relação de parâmetros de influência sobre as flutuações de pressão, conforme Equação 16,

$$\Delta P = \text{função}(X, q, Y_1, Y_2, T_w, L_j, \nu, \rho, g, \sigma_s, H_t, f) \quad \text{Equação 16}$$

onde,

ΔP = amplitude média da flutuação de pressão,

X = coordenada longitudinal relativa do ponto em análise,

q = vazão por unidade de largura do canal,

Y_1 e Y_2 = alturas conjugadas do ressalto hidráulico,

T_w = altura d'água na saída do ressalto hidráulico submerso ou afogado,

L_j = comprimento do ressalto,

ν = viscosidade cinemática da água,

ρ = massa específica da água,

g = aceleração da gravidade,

σ_s = tensão superficial,

H_t = energia total dissipada ao longo do ressalto hidráulico,

f = frequência dominante do fenômeno hidráulico.

A equação 16 pode ser representada adimensionalmente pelo coeficiente de pressão (C_p) a partir da Equação 17, na qual introduzem-se relações adimensionais de comprimentos, das alturas conjugadas, da dissipação de energia e dos números de Froude (Fr_1), Reynolds (Re_1), Webber (We_1), todos referenciados à seção de início do ressalto hidráulico. Acrescenta-se, ainda, o número de Strouhal (St) a partir da análise das flutuações de pressão no ressalto hidráulico conduzida no domínio das frequências.

$$C_p = f\left(\frac{X}{L_j}, \frac{L_j}{H_t}, \frac{Y_1}{Y_2}, \frac{Tw}{Y_2}, Fr_1, Re_1, We_1, St\right) \quad \text{Equação 17}$$

Onde:

$$C_p = \frac{\Delta P}{V_1^2 / 2g} \quad \text{Equação 18}$$

$$Re_1 = \frac{V_1 Y_1}{\nu} \quad \text{Equação 19}$$

$$We_1 = \frac{\rho V_1^2 Y_1}{\sigma_s} \quad \text{Equação 20}$$

$$St = \frac{f Y_1}{V_1} \quad \text{Equação 21}$$

A amplitude média da flutuação de pressão pode ser avaliada através da amplitude média quadrática das amostras de pressão, conforme definição estatística do desvio padrão (σ_x), apresentada na Equação 22.

$$\Delta P = \left(\frac{1}{t_a} \sum_{k=1}^{t_a} [(P_k - P_x)^2] \right)^{1/2} \equiv \sigma_x \quad \text{Equação 22}$$

Onde:

t_a = tempo de aquisição da amostra,

P_k = valor da pressão num instante de tempo t , e

P_x = valor médio da amostra de pressões.

A seguir serão apresentadas, cronologicamente, as principais contribuições relativas ao estudo das flutuações de pressão verificadas junto ao piso de bacias de dissipação sob influência do ressalto hidráulico.

Vasiliev e Burkreyev (1967)²³ abordam as características estatísticas das flutuações de pressão na região do ressalto hidráulico a partir da obtenção de correlações espaço-tempo ao longo do ressalto, assim como estudos acerca da distribuição de frequências a partir de um estudo experimental.

Khader e Elango (1974) efetuaram análises estatísticas nas medições de pressão no ressalto hidráulico avaliando a parcela flutuante a partir do coeficiente de pressão (C_p) (Equação 18). Os autores apresentam, de forma pioneira, o comportamento dos coeficientes de pressão ao longo do ressalto hidráulico determinados a partir de seus estudos experimentais e comparados com àqueles oriundos dos estudos de Vassiliev e Bukreyev (1967)²³.

Lopardo e Solari (1980)²⁴, bem como Akbari *et al.* (1982), efetuaram a avaliação das flutuações de pressão em ressalto hidráulico formado a jusante de comporta descarregadora de fundo também a partir deste coeficiente de pressão (C_p), no qual os autores constatam o comportamento decrescente dos coeficientes de pressão com o aumento do número de Froude.

Lopardo (1986) apresenta estudo experimental visando identificar a influência das condições de entrada no ressalto sobre as flutuações de pressão, avaliando ressaltos formados a jusante de comporta e a jusante de vertedouro, com e sem curva de concordância com a bacia de dissipação. Dentre outras conclusões, os autores destacam:

i) O comportamento dos coeficientes de pressão difere nas condições a jusante de vertedouro e a jusante de comporta, a partir da detecção de valores máximos para distintos números de Froude em cada situação.

²³ Vasiliev, O. F.; Burkreyev, V. I. (1967) Statistical Characteristics of Pressure Fluctuations in the Region of Hydraulic Jump. Proceedings, Twelfth Congress of the International Association for Hydraulic Research, vol. 2, pp. 1-8 *apud* Narayanam (1978).

²⁴ Lopardo, R. A. e Solari, H. G. (1980) Flutuaciones de Presión en la Base de Resalto Libre. IX Congreso Latino Americano de Hidráulica, Mérida, Venezuela, p. 69-78 *apud* Lopardo (1986).

ii) O comportamento do coeficiente de assimetria indicou que no ressalto a jusante de vertedouros, o descolamento do fluxo com relação ao fundo ocorre antes do que num ressalto formado a jusante de uma comporta.

iii) Os autores verificaram que a estrutura macroturbulenta varia de acordo com as condições de entrada do escoamento no ressalto.

Ainda em Lopardo (1986) estão apresentados os comportamentos dos coeficientes de assimetria ao longo do ressalto hidráulico, bem como o número de Strouhal, o qual apresentou comportamento inversamente proporcional ao número de Froude na entrada do ressalto.

Toso e Bowers (1988) mostraram que dependendo das condições de entrada do escoamento no ressalto hidráulico – ou seja, distintos números de Froude, ângulo de entrada, parâmetro do vertedouro – tanto as flutuações quanto os valores extremos sofrem alterações. Além disso, confirmam que a distribuição de probabilidades das flutuações de pressão difere da lei normal, conforme afirmado por outros autores.

Pinto *et al.* (1988), analisando as flutuações de pressão em ressaltos hidráulicos livres e afogados a jusante de vertedouros, observam, dentre outras questões, que as frequências de pico associadas às flutuações de pressão decrescem com o aumento do afogamento.

Fiorotto e Rinaldo (1992) conduziram experimentos para avaliar o comportamento do piso na presença de pulsações de pressão e na quantificação do desenvolvimento e propagação das pressões na face inferior das lajes, enfatizando suas avaliações na distribuição espacial de flutuações, culminando com o estabelecimento de critérios de projeto para as dimensões das lajes de fundo, a partir das forças de arrancamento determinadas.

Pinheiro (1995) indica que ao longo do ressalto hidráulico as pressões junto ao fundo são inferiores à correspondente altura média do escoamento, podendo ocorrer valores negativos em posições de até 70% do comprimento do ressalto.

Marques *et al.* (1996) comentam que as distribuições de pressão junto ao fundo do ressalto hidráulico não podem ser descritas por uma lei que segue uma distribuição normal, tendo em vista que os valores dos coeficientes de assimetria e curtose encontrados nas amostras de pressões são distintos daqueles esperados

em uma lei gausseana. Os mesmos autores sugerem a adoção de novas relações adimensionais para caracterização das pressões médias (Equação 23) e flutuantes (Equação 24) como forma de uniformizar os resultados experimentais de diferentes estudos.

$$\frac{P_x - Y_1}{Y_2 - Y_1} = f_1 \left(\frac{X}{Y_2 - Y_1} \right) \quad \text{Equação 23}$$

$$\left(\frac{\sigma_x}{Ht} \right) \left(\frac{Y_2}{Y_1} \right) = f_2 \left(\frac{X}{Y_2 - Y_1} \right) \quad \text{Equação 24}$$

onde:

P_x = pressão média verificada em um ponto distante X unidades do início do ressalto hidráulico,

σ_x = desvio padrão da amostra de pressões num ponto de coordenada X a jusante do início do ressalto,

Ht = perda de carga total ao longo do ressalto hidráulico, e

f_1 e f_2 = funções de ajuste.

Os dados de pressão obtidos por Marques (1995), Endres (1990) e Pinheiro (1995) estão adimensionalizados a partir da proposta Marques *et al.* (1996) quanto aos seus valores médios (Figura 10) e flutuantes (Figura 11).

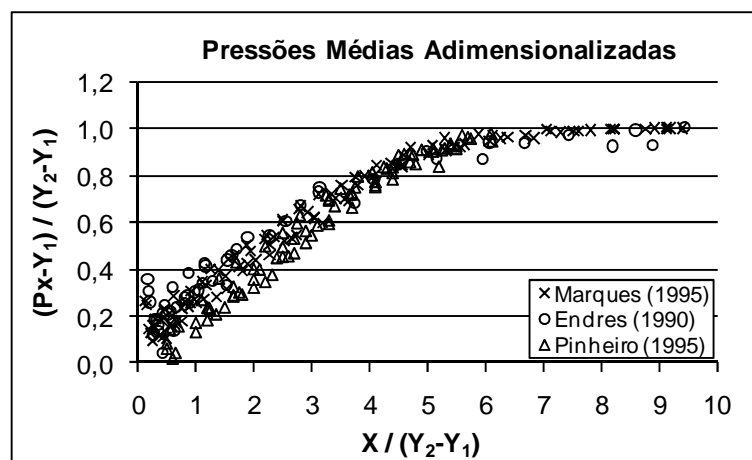


Figura 10 – Pressões médias adimensionalizadas segundo Marques *et al.* (1996).

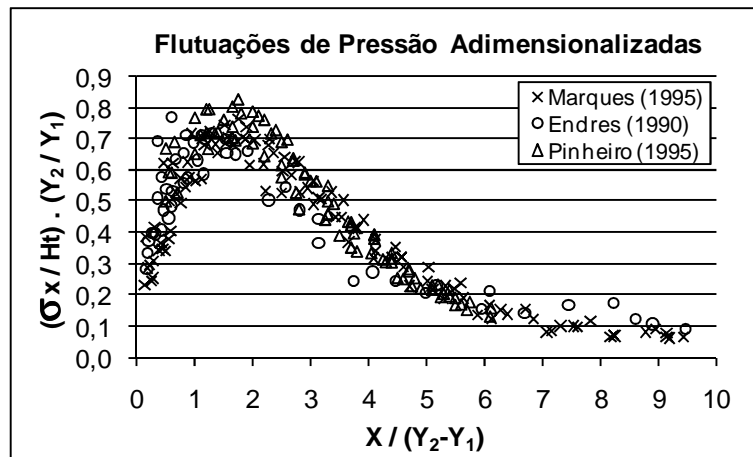


Figura 11 – Flutuações de pressão adimensionalizadas segundo Marques *et al.* (1996).

A partir dessas adimensionalizações e da análise estatística das medições de pressões médias e flutuantes, os autores puderam identificar características externas e internas do ressalto hidráulico, conforme Tabela 2.

Tabela 2 – Características do ressalto hidráulico tipo A (Marques *et al.*, 1996)

Simbologia	Descrição	$X/(Y_2 - Y_1)$
$L\sigma_{max}$	Máxima flutuação de pressão	1,75
L_d	Descolamento do escoamento junto ao fundo	4,00
L_r	Final do rolo	6,00
L_j	Final da dissipação de energia	8,50

A partir da consideração de que a flutuação de pressão em um ressalto hidráulico seja um fenômeno estacionário ergódico, Marques *et al.* (1996) afirmam que se pode estimar os esforços com certa probabilidade de ocorrência ($P_{X\%}$) a partir do conhecimento da pressão média (P_x) e da flutuação de pressão – desvio padrão (σ_x), de acordo com a Equação 25.

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

Equação 25

onde:

N = coeficiente estatístico, função da lei de distribuição de probabilidades a que a amostra possa ser ajustada adequadamente.

Segundo Ortiz *et al.* (1998) o ressalto hidráulico é um fenômeno caracterizado por baixas frequências e grandes amplitudes de flutuação de pressão. O autor salienta que a medição em protótipo ao longo da bacia permite a avaliação criteriosa dos momentos estatísticos, das funções de autocorrelação, das correlações cruzadas, dos espectros de potência e dos espectros cruzados entre os valores de pressão obtidos. Essas informações permitem acompanhar o desenvolvimento do rolo na bacia, o comportamento dos picos, a duração e o tamanho das maiores escalas de turbilhões e a possível distribuição de probabilidade de pressões flutuantes.

Marques *et al.* (1999), visando uniformizar dados de ressaltos hidráulicos tipos A e B, sejam eles oriundos de modelos físicos ou de protótipos, propõem a utilização do fator de submergência (S) (Equação 26) nas adimensionalizações das pressões médias e flutuantes, partindo da consideração de que a geometria de fundo do canal a jusante da formação do ressalto não altera significativamente os adimensionais da flutuação de pressão. A Equação 23, então, é reescrita conforme Equação 27 e a Equação 24 assume a forma da Equação 28.

$$S = \frac{T_w}{Y_2} \quad \text{Equação 26}$$

$$\Psi = \left(\frac{P_x - Y_1}{Y_2 - Y_1} \right) \left(\frac{Y_2}{T_w} \right) \quad \text{Equação 27}$$

$$\Omega = \left(\frac{\sigma_x}{H_t} \right) \left(\frac{Y_2}{Y_1} \right) \left(\frac{Y_2}{T_w} \right) \quad \text{Equação 28}$$

$$\Gamma = \left(\frac{X}{Y_2 - Y_1} \right) \quad \text{Equação 29}$$

onde:

T_w = altura d'água na saída do ressalto hidráulico submergido,

H_t = energia total dissipada ao longo do ressalto hidráulico, e

X = Distância horizontal tomada a partir do início do ressalto hidráulico.

Armênio *et al.* (2000) comentam que as flutuações de pressão podem ser responsáveis pela desestabilização dos blocos da laje, ocasionando colapso dos mesmos. Do ponto de vista estrutural da bacia de dissipação os autores afirmam:

i) que a pulsação de pressão pode danificar as juntas entre as lajes provocando a propagação de valores extremos de pressão para a face inferior,

ii) que a diferença instantânea entre a pressão total atuando superior e inferiormente à laje pode ocasionar, eventualmente, uma força total de sustentação que exceda o peso da laje, e

iii) que a estrutura espacial instantânea das flutuações de pressão representa um importante papel na magnitude das forças de sustentação em toda a estrutura.

Teixeira (2003) apresenta ajuste matemático para os dados experimentais de pressões médias e flutuantes coletadas por diversos autores em ressalto hidráulico a jusante de vertedouros, seguindo a proposta de Marques *et al.* (1999). O autor também aplica a proposta de Marques *et al.* (1996) para a determinação de valores extremos de pressões atuantes em bacias de dissipação, estabelecendo relações de ajuste para o coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades (N) (Equação 25).

Marques *et al.* (2004a) apresentam os máximos coeficientes de pressão (C_{pmax}) obtidos por diversos autores (Figura 12), propondo uma linha de tendência em função do número de Froude na entrada do ressalto (Fr_1). Analogamente, os autores apresentam a tendência de comportamento da posição de ocorrência dos máximos coeficientes de pressão (X_{cpmax}) (Figura 13).

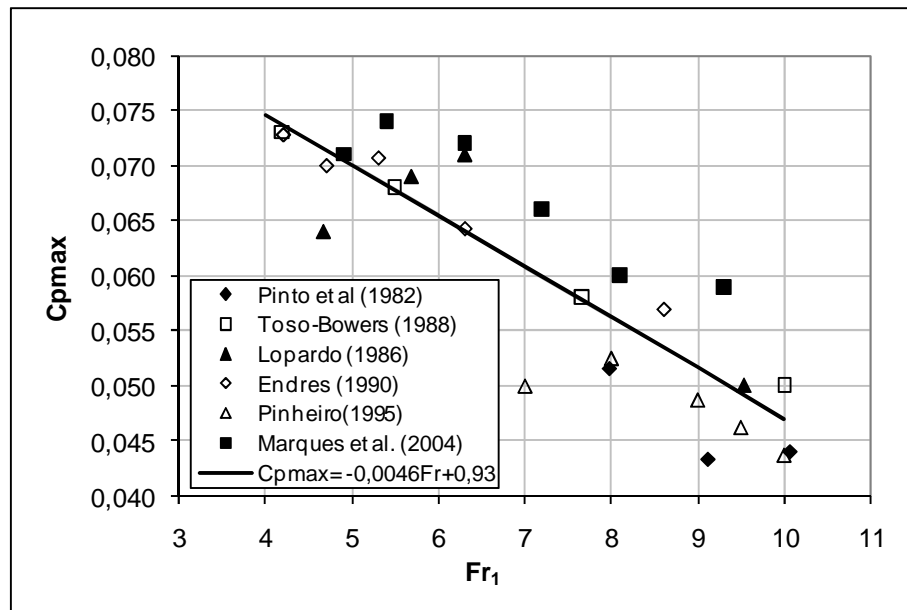


Figura 12 – Tendência de comportamento dos máximos coeficientes de pressão (C_{pmax}) frente ao número de Froude. Fonte: Marques *et al.* (2004)

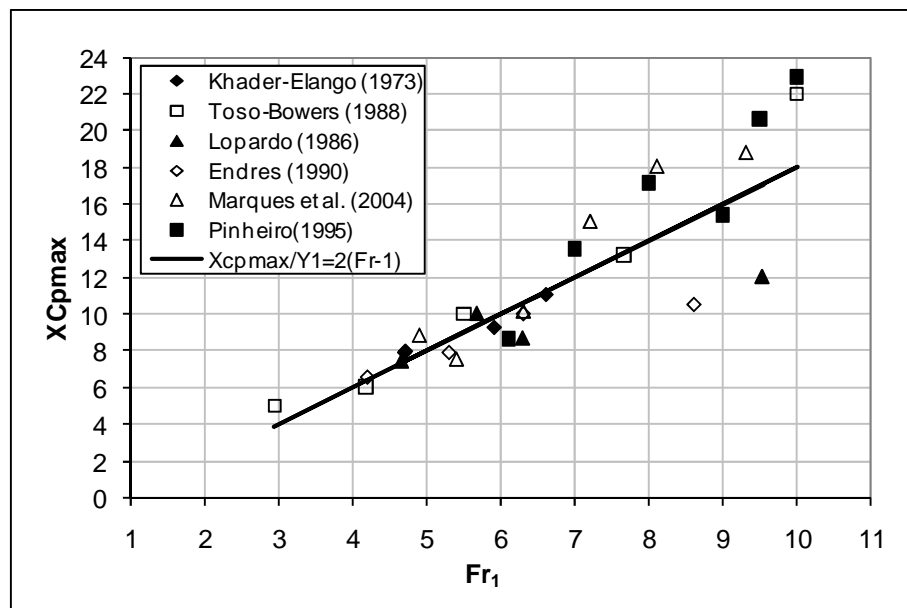


Figura 13 – Tendência de comportamento da posição de ocorrência dos máximos coeficientes de pressão (X_{Cpmax}). Fonte: Marques *et al.* (2004)

Lopardo *et al.* (2004b) introduzem o fator de submergência (S^*) (Equação 30) na avaliação dos coeficientes de pressão (C_p) verificados em ressalto hidráulico afogado a jusante de uma comporta. Para condições de igual afogamento, os autores verificaram que na região de montante do ressalto hidráulico ($X/Y_1 < 10$), o comportamento do C_p é inversamente proporcional ao número de Froude, e na região de jusante esse comportamento se inverte. Já pela avaliação de diferentes

afofamentos, os autores verificam que as flutuações de pressão aumentam com o fator de submergência, especialmente mais a jusante do ressalto hidráulico, conforme pode ser visto na Figura 14.

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

Equação 30

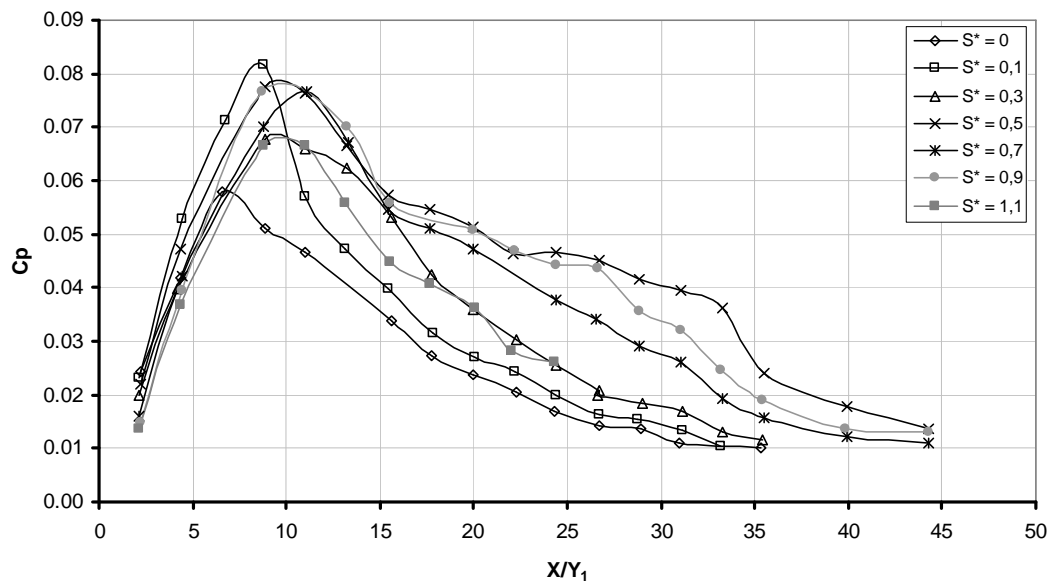


Figura 14 – Comportamento do coeficiente de flutuação de pressão frente a diferentes fatores de submergência. Fonte: Lopardo *et al.* (2004b).

Wiest *et al.* (2005) apresentam a variação do coeficiente estatístico de distribuição de probabilidade (N) para ressaltos hidráulicos submergidos, utilizando dados experimentais. Os autores verificaram que o coeficiente (N) apresenta a tendência de se manter constante ao longo de todo comprimento para ressaltos afofados, comportamento que não ocorre em ressaltos hidráulicos livres, conforme Teixeira (2003).

Trierweiler (2006) afirma que as distribuições longitudinais de pressões médias, desvio padrão, coeficientes de assimetria e de curtose comportam-se de forma muito semelhante quando da comparação entre ressaltos formados a jusante de vertedouros e de comportas. Já com relação aos valores de desvio padrão na posição de maior flutuação, o autor observou diferenças da ordem de 20% nesta mesma comparação. Na avaliação da influência do afofamento sobre as

distribuições de pressões junto ao fundo em ressalto hidráulico a jusante de comporta, o autor detecta que na região do rolo, os ressaltos a jusante de comportas apresentam distribuição aparentemente mais próxima da distribuição normal.

Trierweiler (2006) propõe uma metodologia para o cálculo de pressões extremas em ressaltos hidráulicos (livres e afogados) a jusante de comportas baseada na proposta de Marques *et al.* (1996), sobre a qual o autor se propõe a adicionar os efeitos atribuídos ao afogamento do ressalto a partir de parâmetros adimensionais. A Figura 15 ilustra de forma qualitativa a proposta do autor.

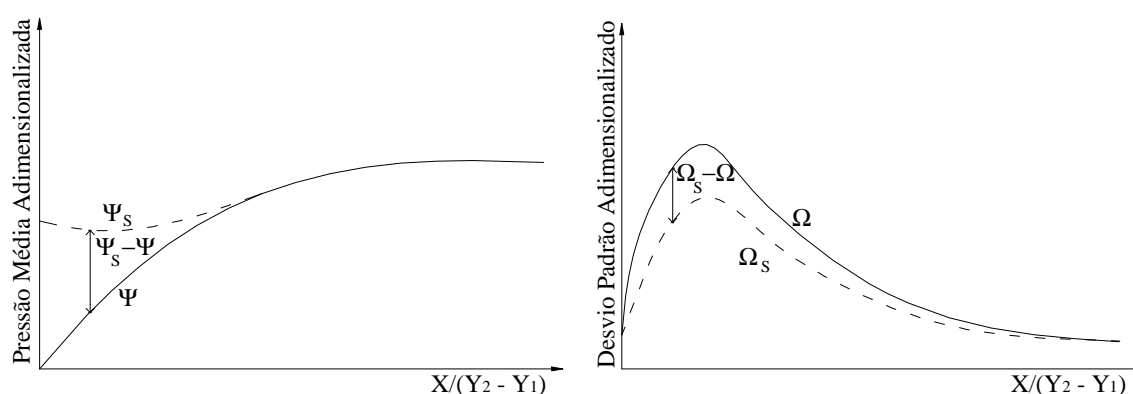


Figura 15 – Metodologia proposta por Trierweiler (2006) para a previsão de pressões extremas em ressaltos afogados a jusante de comportas. Fonte: Trierweiler (2006).

Wiest (2008), avaliando ressaltos hidráulicos tipo B, estabelece a importância da definição da posição de início do ressalto afogado na adimensionalização das pressões médias e flutuantes. O mesmo autor atribui o acréscimo das pressões no início do ressalto afogado às sobrepressões induzidas pela curva de concordância vertical entre o perfil vertente e a bacia de dissipação. No que tange às flutuações de pressão, o autor apresenta relações, em sua maioria, dependentes apenas da submersão do escoamento. Já para a determinação das pressões extremas, Wiest (2008) ratifica as conclusões de Wiest *et al.* (2005) quanto ao comportamento do coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades (N).

Cerezer (2008) apresenta uma metodologia para a estimativa de valores extremos de pressão a partir da Teoria dos Valores Extremos (TVE), utilizando os dados obtidos no protótipo da UHE Porto Colômbia. Os modelos de previsão obedecem a Distribuição Generalizada de Valores Extremos (GEV) validando a sua

aplicação para a avaliação das pressões máximas e mínimas que ocorrem em bacias de dissipação por ressalto hidráulico.

Teixeira (2008) conduz trabalho analítico acerca dos efeitos de escala verificados sobre as características internas de ressaltos hidráulicos tipo B a partir da utilização de resultados experimentais de 4 estruturas com escalas distintas do sistema de dissipação de energia da UHE Porto Colômbia: protótipo, 1:100, 1:50 e 1:32. Dentre as diversas conclusões do autor, destaca-se que:

i) existe efeito de escala nos valores das pressões médias obtidas nos modelos devido à aeração distinta entre modelos e protótipos, principalmente no trecho inicial do ressalto, além de estar associado à influência do raio de curvatura e da instabilidade da posição de início do ressalto. Para relações $Fr_1.S$ inferiores a 20, o autor recomenda a adoção de modelos físicos hidráulicos em torno da escala 1:20.

ii) as flutuações de pressão no protótipo e nos modelos apresentam um mesmo padrão de desenvolvimento ao longo do ressalto hidráulico no trecho plano da bacia de dissipação, podendo considerar que não exista efeito de escala significativo na flutuação de pressão, o que indica que o processo de dissipação de energia ocorre de maneira idêntica em protótipo e modelos.

iii) para a representação das pressões com 1% de probabilidade de ocorrência, dentro da dispersão natural dos dados, recomenda-se modelos físicos hidráulicos em torno da escala 1:60. Já para as pressões com 99% de probabilidade de ocorrência, a escala deve ser em torno de 1:20. Tais recomendações flexibilizam-se de acordo com a dispersão considerada como aceitável.

2.6.4 AERAÇÃO

A incorporação de ar ao escoamento influencia fortemente o desempenho das estruturas hidráulicas, fazendo do escoamento aerado um assunto de extrema importância para a engenharia hidráulica. Isso pode ser reforçado pela dicotomia que os escoamentos bifásicos apresentam, podendo ser, por um lado indesejáveis em determinadas condições de operação, por outro lado podem se apresentar como alternativas extremamente desejáveis e eficientes.

Segundo Kobus (1991), o processo de incorporação de ar pode ser visto como “pacotes” de ar capturados entre o rolo ou superfície da água e o escoamento

de entrada, e então carregados a jusante por meio do escoamento. O tamanho e a frequência de formação de cada “pacote” depende do diferencial de velocidade entre o volume de água receptor e o fluxo impactante. Essa velocidade governa a tensão tangencial turbulenta gerada na camada de entrada de ar. O autor comenta, ainda, que a entrada de ar, a capacidade de transporte e a expulsão para a superfície livre estão correlacionadas. Apesar disso, as condições de entrada de ar são governadas pelas condições de montante, e a capacidade de transporte é função principal das condições de jusante do escoamento. A capacidade de transporte depende principalmente da razão entre a velocidade da água e a velocidade de ascensão das bolhas.

A partir dessas condições gerais acerca da incorporação de ar em escoamentos apresentada por Kobus (1991), aponta-se especificamente para as questões de incorporação de ar no ressalto hidráulico.

Gomes (2000) ilustra o processo de incorporação de ar, conforme Figura 16, identificando uma entrada principal de ar no impacto do jato de montante, alguma incorporação de ar na região do rolo e após o seu desenvolvimento, a saída de ar do escoamento.

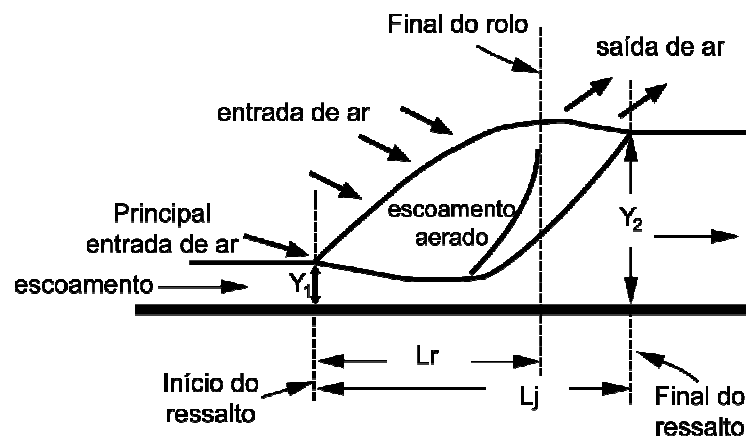


Figura 16 – Incorporação de ar no ressalto hidráulico, adaptado de Gomes (2000).

Rajaratnam (1967) mostra que a concentração média de ar cresce rapidamente no início do ressalto até um valor máximo, próximo à posição adimensional $(X/Y_2) = 1$, e imediatamente passa a decrescer de forma brusca em direção ao final do ressalto. O autor relaciona, ainda, o número de Froude na entrada do ressalto com a máxima concentração média de ar (C_{max}) (Equação 31) e

com a capacidade máxima de bombeamento de ar (β_{\max}) (Equação 32), ou seja, a razão entre a vazão de ar ingressante no ressalto hidráulico (Q_a) e a vazão de água (Q_w).

$$C_{\max} = Fr_1^{1,35} \quad \text{Equação 31}$$

$$\beta_{\max} = \frac{Q_a}{Q_w} = 0,018(Fr_1 - 1)^{1,245} \quad \text{Equação 32}$$

Resch *et al.* (1974) indicam que as condições de ingresso do escoamento no ressalto afetam a incorporação de ar, detectando o aumento progressivo da concentração de ar no escoamento para menores profundidades, atingindo valores máximos da ordem de 40%. Quanto à distribuição longitudinal, para posições a jusante, as concentrações médias tendem gradativamente a valores nulos.

Chanson (1995a) apresenta na Tabela 3 a compilação de alguns estudos acerca da capacidade máxima de bombeamento de ar em ressalto hidráulico. O autor afirma, ainda, que a incorporação de ar é função da diferença entre a velocidade do escoamento na entrada do ressalto (V_1) e a velocidade de entrada de ar no fluxo (V_e).

Chanson (1995a) descreve o processo de entrada de ar no ressalto na forma de pacotes capturados na interface entre o jato incidente de montante com o rolo, por vórtices perpendiculares ao escoamento. Esses pacotes são fragmentados em pequenas bolhas de ar e encaminhados em direção a região de pequena tensão tangencial turbulenta, onde ocorre a coalescência em bolhas de maior tamanho. Essas bolhas, por empuxo, são encaminhadas para a região mais agitada e, por fim, expulsas para a atmosfera.

Mossa (1999) comenta que as características oscilatórias do ressalto hidráulico são acompanhadas pelas mudanças no perfil superficial do ressalto hidráulico, como uma função da concentração de ar presente no rolo. Dessa forma, a mistura água-ar não pode ser negligenciada na análise dessas oscilações.

Tabela 3 – Quantidade de ar incorporada ao ressalto hidráulico. Fonte: Chanson (1995a).

Kalinske e Robertson (1943) ²⁵	$\beta_{\max} = 0,0066(Fr_1 - 1)^{1,4}$	Equação 33
Wisner (1965) ²⁶	$\beta_{\max} = 0,014(Fr_1 - 1)^{1,4}$	Equação 34
Rajaratnam (1967)	$\beta_{\max} = 0,018(Fr_1 - 1)^{1,245}$	Equação 32
Raben <i>et al.</i> (1983) ²⁷	$\beta_{\max} = 0,03(Fr_1 - 1)^{0,76}$	Equação 35

Waniewski *et al.* (2001) comentam que a maioria dos trabalhos realizados acerca das medições de concentração de ar e de distribuição do tamanho de bolhas são de caráter empírico e normalmente avaliam o escoamento na adjacência imediata do ressalto hidráulico não avaliando o desenvolvimento para jusante da massa de bolhas no escoamento. Esse desenvolvimento tem influência fundamental nas condições turbulentas do escoamento a jusante, sendo que os efeitos da mistura turbulenta são mais pronunciados que os efeitos de empuxo no comportamento espacial das bolhas.

Liu *et al.* (2002) conduziram medições de concentração de ar no ressalto hidráulico e comprovam experimentalmente a presença marcante de ar no rolo. Os dados dos autores relativos à seção de máxima concentração média de ar concordam com a proposta de Rajaratnam (1967) na forma da Equação 31.

Chanson (2006), descrevendo o processo de aeração do ressalto, afirma que devido às características de forte instabilidade e recirculação, grandes quantidades de ejeção água-ar ocorrem sobre a superfície livre do rolo. A magnitude do rolo poderia ser estimada pelo volume de ar incorporado na entrada do ressalto.

²⁵ Kalinske, A. A.; Robertson, J. M. (1943). Close Conduit Flow. Transactions, ASCE, vol. 108, 1435-1447 *apud* Chanson (1995a).

²⁶ Wisner, P. (1965). Sur le role du Critère de Froude dans L'étude de L'entraînement de L'aire par les Courants à Grande Vitesse. Proc. XI IAHR Congress, Leningrad, URSS, paper 1.15 *apud* Chanson (1995a).

²⁷ Raben, S. L.; Els, H.; Rouve, G. (1983). Investigation of Flow Aeration at Offsets Downstream of High-Head Control Structures. Proc. XX IAHR Congress, Moscow, URSS, vol. 3, pp. 354-360 *apud* Chanson (1995a).

2.6.5 LINHA DE SEPARAÇÃO

Hager e Hutter (1983) propõem a avaliação do ressalto hidráulico a partir de duas zonas distintas, conforme ilustrado pela Figura 17: uma região inferior, denominada de escoamento principal (Y_p) e outra, superior, denominada zona de separação do ressalto (Y_a).

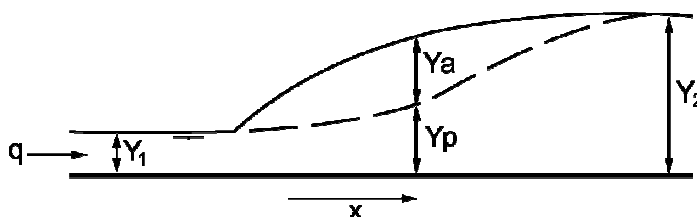


Figura 17 – Linha de separação do escoamento dividindo o ressalto em duas zonas distintas, adaptado de Hager

A zona de separação consiste de um escoamento intensamente aerado, com velocidades muito menores do que aquelas verificadas na zona de escoamento principal. Nesta região inferior, os autores admitem que o escoamento seja unidimensional e com distribuição hidrostática de pressões. Segundo Hager e Hutter (1983), a abordagem do ressalto por esse ponto de vista representa bem as principais características externas do escoamento, mas os mecanismos de incorporação de ar, as características turbulentas e as distribuições de pressão e velocidade deveriam ser melhor investigadas e, de alguma forma, incorporadas ao método.

Marques *et al.* (2004b), a partir de Hager e Hutter (1983), propõem um ajuste analítico para a linha de separação a partir da conservação da quantidade de movimento seção a seção. Os autores utilizaram como condição de controle as distribuições de pressões médias e a linha d'água ao longo do ressalto hidráulico.

2.7 Escoamento sobre Curvas Verticais

Em escoamentos a superfície livre ao longo de um canal de baixa declividade, as pressões médias verificadas obedecem à distribuição hidrostática de pressões, proporcionalmente à profundidade do escoamento no ponto em análise. Esse comportamento das pressões médias, contudo, se restringe àquelas situações nas

quais as linhas de corrente do escoamento apresentam-se retilíneas, sem acelerações no sentido longitudinal, configurando escoamento paralelo.

Desta forma verifica-se a distribuição hidrostática de pressões em escoamentos uniformes. Em escoamentos gradualmente variados, mesmo que a curvatura das linhas de corrente induza componentes de aceleração longitudinal, os mesmos podem ser admitidos como paralelos, pois essas acelerações induzidas podem ser negligenciadas. Por outro lado, se a curvatura das linhas de corrente é significativa, o fluxo deve ser tratado como escoamento curvilíneo, quando representativos componentes de aceleração são induzidos, resultando no surgimento de forças centrífugas normais ao sentido do escoamento. A força centrífuga induzida pela curvatura das linhas de corrente faz com que as pressões atuantes na massa líquida não sejam adequadamente representadas pela distribuição hidrostática.

Escoamentos curvilíneos, então, podem ser encontrados em escoamentos bruscamente variados, especialmente em curvas verticais. No caso de curvas verticais convexas, as forças centrífugas atuam no sentido ascendente, se contrapondo à ação gravitacional, resultando em pressões atuantes menores que as pressões hidrostáticas. Por outro lado, no caso de curvas côncavas, as forças centrífugas atuam no sentido descendente, ou seja, favoravelmente à ação gravitacional, resultando em pressões atuantes maiores que as pressões hidrostáticas. A Figura 18 ilustra o comportamento das pressões em curvas côncavas e convexas.

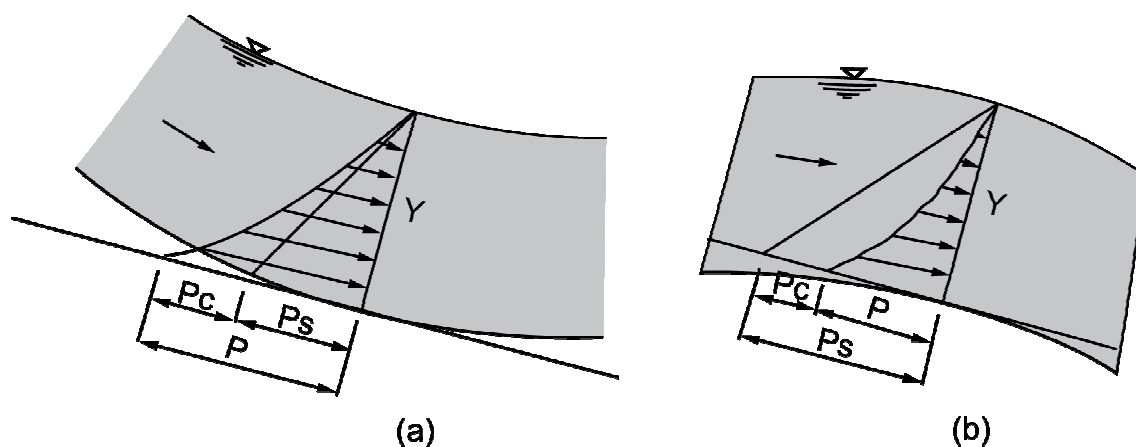


Figura 18 – Distribuição de pressões em curvas côncavas e convexas, adaptado de Baptista e Lara (2002).

Chow (1959) apresenta analiticamente a descrição das pressões médias atuantes em curvas verticais (P) (Equação 36) como a composição de duas parcelas distintas: uma relativa ao comportamento hidrostático das pressões (Ps) (Equação 37) e outra associada à pressão devida à força centrífuga induzida pela curvatura das linhas e corrente (Pc) (Equação 38).

$$P = P_s \pm P_c \quad \text{Equação 36}$$

$$P_s = \gamma Y \quad \text{Equação 37}$$

$$P_c = \frac{\gamma Y V^2}{g R} \quad \text{Equação 38}$$

Onde:

γ = peso específico da água,

Y = altura d'água tomada perpendicularmente ao fundo da curva vertical,

V = velocidade média do escoamento, e

R = raio da curva vertical.

LinFu e Jie (1985) consideram que escoamentos em curvas verticais de barragens podem ser considerados escoamentos planos irrotacionais, estabelecendo a Equação 39 como equação diferencial básica do escoamento. A Figura 19 apresenta os parâmetros considerados pelos autores.

$$\frac{\partial u}{\partial Y} = \frac{u}{R} \quad \text{Equação 39}$$

onde:

u = velocidade na direção X no ponto em análise.

A partir da consideração de que as linhas de corrente do escoamento podem ser admitidas como concêntricas à curva vertical (teoria dos círculos concêntricos), os autores avaliam as pressões integrando a equação de Bernoulli, apresentando, contudo, apenas a parcela devida à força centrífuga. A Equação 40, então, apresenta o coeficiente de pressão máxima devida à força centrífuga (C_{pCM}).

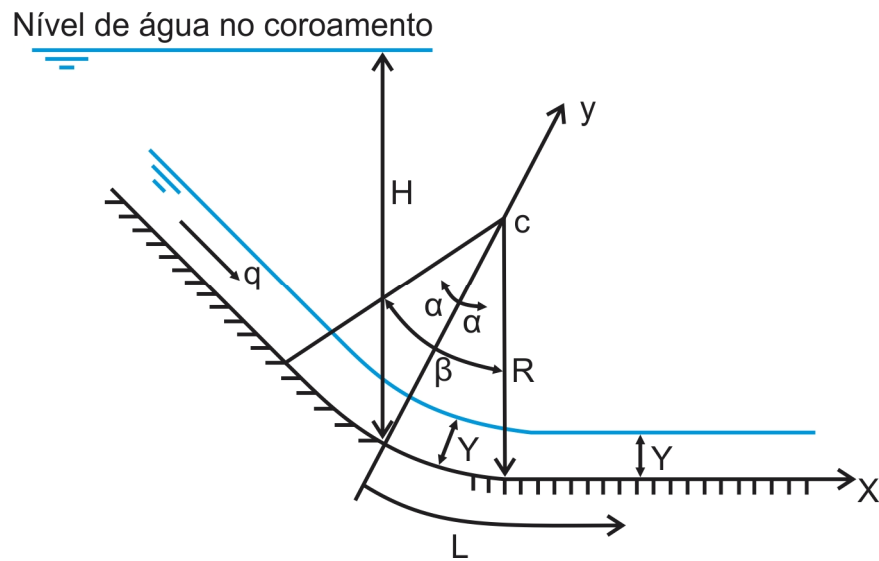


Figura 19 – Parâmetros utilizados por LinFu e Jie (1985) na avaliação de escoamentos em curvas de concordância vertical (adaptado).

$$C_{p_{CM}} = \frac{P_{CM}/\gamma}{H - Y}$$

Equação 40

onde:

P_{CM} = valor da máxima pressão devida à força centrífuga, e

H = carga na soleira curva correspondente ao ponto em análise.

Os autores identificam que a atuação da força centrífuga aumenta gradativamente até que o ponto central da curva, onde se identifica a máxima pressão média devida à força centrífuga. A partir desse ponto central a influência passa a diminuir gradativamente até cessar em algum ponto a jusante. O comprimento longitudinal a partir do centro da curva, tanto para montante quanto para jusante, ao longo do qual a força centrífuga influencia o escoamento (L_c) pode ser quantificado, segundo LinFu e Jie (1985) pela Equação 41.

$$L_c = \frac{4 Y \text{sen}(\beta)}{C_{p_{CM}}}$$

Equação 41

onde:

L_c = distância do ponto médio da curva aos pontos a jusante e a montante onde se anula a influência da força centrífuga, e

β = ângulo da curva de concordância vertical.

LinFu e Jie (1985) propõem, ainda, a Equação 42 que exprime a distribuição de pressões devida à força centrífuga em soleiras curvas.

$$\frac{C_{pC}}{C_{pCM}} = \frac{1}{2} \left[1 + \cos \left(\frac{\pi X}{L} \right) \right] \quad \text{Equação 42}$$

onde:

C_{pC} = coeficiente de pressão devido à força centrífuga.

No que tange às flutuações de pressão ao longo de uma curva vertical, LinFu e Jie (1985) detectaram valores máximos no ponto de tangência de jusante imediatamente anterior ao trecho plano horizontal. Os autores comentam, ainda, que as máximas flutuações de pressão são inferiores a 10% da energia cinética do escoamento.

3 METODOLOGIA

A caracterização do ressalto hidráulico e os seus efeitos sobre os contornos sólidos passa por investigações experimentais que forneçam dados para confirmação dos aspectos teóricos envolvidos nesta transição de regime e/ou para subsidiar avaliações empíricas, agregando novos conhecimentos e parâmetros adimensionais que se mostrem relevantes na avaliação do escoamento.

A descrição dos mecanismos básicos e dos efeitos globais da dissipação de energia para aplicação imediata em projetos de estruturas hidráulicas exige grande esforço analítico e experimental. O caráter não linear e bifásico da dissipação induz mecanismos de alta complexidade, para os quais uma descrição analítica completa ainda não é conhecida.

Para uma melhor compreensão do fenômeno, é necessário, então, o monitoramento e análise das distribuições de pressão e velocidade, não apenas em termos médios, mas também em termos flutuantes no interior do ressalto hidráulico e junto aos contornos sólidos, no caso do interesse pelos esforços provocados pelo escoamento.

O comportamento do nível médio (e flutuante) da superfície livre d'água ao longo do ressalto hidráulico e da distribuição dos perfis de concentração média de ar agrega ainda mais parâmetros a serem correlacionados em busca de leis gerais de comportamento médio e flutuante deste escoamento bifásico e turbulento.

Neste capítulo são descritas a instalação experimental, a instrumentação e os processos de aferição dos equipamentos utilizados neste trabalho. Também estão apresentadas as condições de ensaio impostas no modelo físico e os critérios de medição adotados, bem como as grandezas físicas auferidas durante o processo de experimentação.

3.1 Instalação Experimental

Os trabalhos experimentais foram desenvolvidos no Laboratório de Hidráulica Experimental e Recursos Hídricos da Eletrobrás Furnas (LAHE/FURNAS), situado em Jacarepaguá, no Rio de Janeiro/RJ, tendo como ponto de partida um modelo

físico bidimensional em escala geométrica na razão de 1:32 da estrutura de descarga e dissipação de energia da UHE Porto Colômbia.

Algumas alterações no modelo físico original foram propostas visando ampliar as possibilidades de avaliação do escoamento a jusante do perfil vertente, garantindo maior flexibilidade aos estudos e permitindo a imposição de situações hidráulicas de controle. Desta forma, foram retirados os pilares que individualizavam os vãos das comportas, que por sua vez foram também retiradas, restando um perfil vertente livre com toda a largura do canal de ensaios. Se por um lado tal alteração diminui a carga hidráulica disponível a montante do vertedouro, por outro elimina quaisquer efeitos que possam ser causados pela imposição desigual nas aberturas das comportas originais (gerando assimetria no escoamento) ou ainda elimina qualquer influência que possa ser atribuída aos pilares do vertedouro.

Foram alteradas, também, as condições a jusante da bacia de dissipação a partir da retirada da soleira terminal e do rebaixamento das cotas a jusante deste, mantendo toda a estrutura após a curva de concordância vertical em uma única cota idêntica à cota original da bacia de dissipação. Isso permitiu a imposição em modelo físico, além do ressalto hidráulico afogado (Tipo B), o ressalto hidráulico livre (Tipo A) e o escoamento livre ao longo da estrutura para a avaliação individualizada do efeito da curva de concordância vertical.

Percebe-se que essas alterações descaracterizaram completamente o modelo físico originalmente concebido, resultando em um estudo experimental genérico e que não tem relação direta com os demais estudos conduzidos a partir de modelos físicos bidimensionais da UHE Porto Colômbia.

A partir dessas alterações, contudo, tornou-se possível a imposição do ressalto hidráulico em diferentes posições ao longo da bacia de dissipação e do perfil vertente, com diferentes graus de submergência, a partir da manipulação de uma comporta de controle de níveis a jusante, permitindo impor condições de controle de interesse neste estudo.

A Figura 20 apresenta esquematicamente o modelo utilizado neste estudo (com as modificações descritas anteriormente) implantado no canal de ensaios do LAHE/FURNAS.

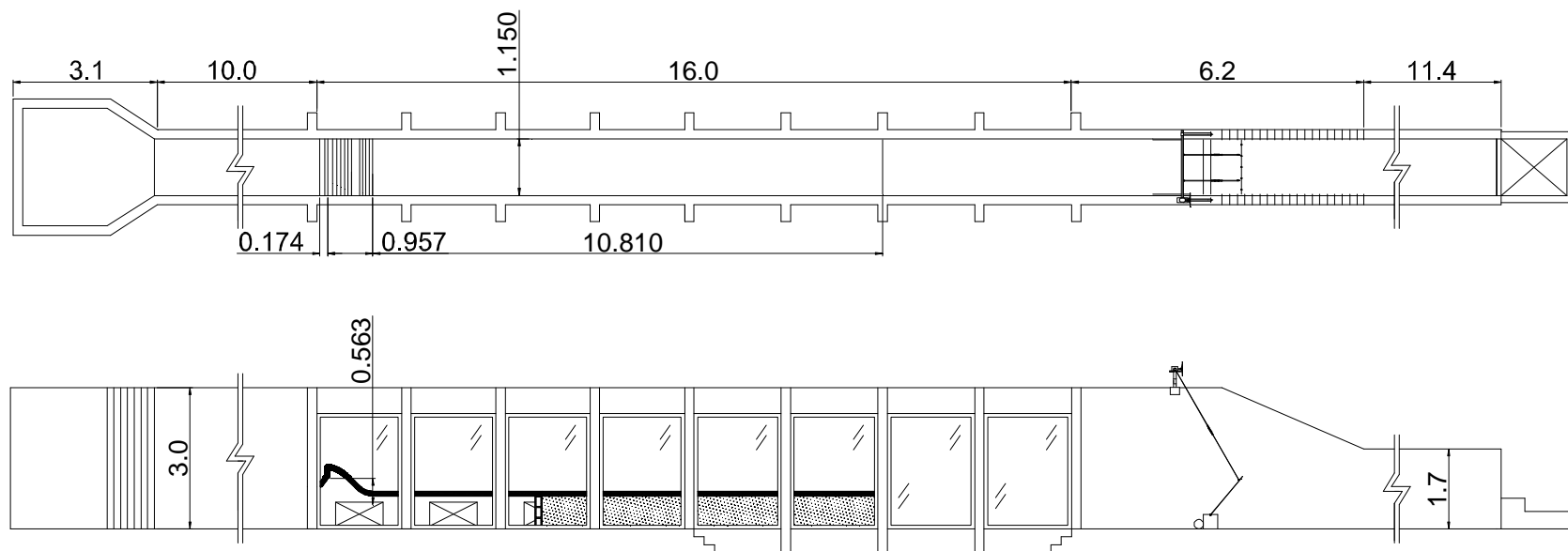


Figura 20 – Instalações experimentais do LAHE/FURNAS onde foram conduzidas as investigações experimentais (dimensões em metros).

O circuito hidráulico do LAHE/FURNAS, ao qual o modelo está vinculado, consiste de um canal-reservatório inferior de onde a água é recalçada por bombeamento para um reservatório superior mantido a nível constante. A partir desse reservatório superior, a água é conduzida por gravidade até a cuba de tranquilização, a montante do canal de ensaios, por um sistema de tubulação em ferro fundido (DN16”), vencendo aproximadamente 7 metros de queda e comprimento total de aproximadamente 40 metros.

O canal onde o modelo está instalado tem extensão total da ordem de 46 metros com 1,15 metros de largura. Entre a cuba de tranquilização e o vertedouro, existem 10 metros de distância, para uniformização do fluxo e controle dos níveis médios d’água a montante do vertedouro. O trecho onde podem ser feitas as medições tem 12 metros de comprimento, incluindo o perfil vertente. Ao longo desse trecho, pode-se permitir a formação do ressalto hidráulico e medir os níveis médios d’água e as pressões junto ao fundo. A partir do final desse trecho, 7 metros adiante, está posicionada a comporta de controle de níveis, pela qual se pode impor distintas condições de submergência ao ressalto hidráulico. A partir da comporta, o escoamento vence, ainda, 15 metros deste mesmo canal antes de ser encaminhado para o sistema de retorno e, posteriormente, ao reservatório inferior.

A Tabela 4 apresenta o resumo das características do canal de ensaios e do modelo físico utilizado neste estudo.

3.2 Grandezas Físicas e Instrumentação Utilizada

A proposta deste trabalho de identificar e predizer as características médias, flutuantes e extremas de pressões junto ao fundo de uma bacia de dissipação considera o ressalto hidráulico como uma composição de efeitos individualizados a partir de distintas condições de escoamento. Além dessas características internas, as características externas do ressalto hidráulico como o nível médio da superfície livre d’água ao longo da bacia de dissipação, as posições de início e fim do ressalto hidráulico e a localização do rolo, foram avaliadas experimentalmente.

Tabela 4 – Resumo das características do modelo físico

Característica	Dimensão
Volume da cuba de tranquilização (m ³)	15
Comprimento total do canal de aproximação (m)	10
Comprimento total da bacia de dissipação (m)	12
Comprimento da zona de medição na bacia de dissipação (m)	3,250
Largura do canal de aproximação e da bacia de dissipação (m)	1,150
Desnível entre a soleira do vertedouro e a bacia de dissipação (m)	0,562
Desnível entre a soleira do vertedouro e o piso do canal de aproximação (m)	0,375
Equação do perfil vertente tipo Creager (m)	$Y = -0,9686.X^{1,85}$
Raio da curva de concordância vertical (m)	0,390
Concordância entre o perfil vertente e a curva de concordância vertical (graus)	45° (1:1)

Neste tópico estão descritas, então, as grandezas físicas medidas experimentalmente bem como a respectiva instrumentação utilizada. Estão descritos, ainda, os critérios adotados quando destas medições, sejam eles subjetivos, meramente qualitativos ou ainda estatisticamente representativos.

3.2.1 NÍVEL MÉDIO DA SUPERFÍCIE LIVRE D'ÁGUA

A medição do nível médio da superfície livre d'água ao longo do ressalto hidráulico foi efetuada a partir da utilização de uma ponta linimétrica, que consiste de uma escala graduada dotada de Vernier (EGV), fixada sobre um carrinho de medições metálico, com movimentação longitudinal, a partir de um sistema de rodízios sobre trilhos fixados internamente às paredes do canal.

Tendo em vista a grande oscilação da superfície livre d'água ao longo do ressalto, foi utilizado um “sensor eletrônico emissor de sinal sonoro e visual”, acoplado à EGV, cuja função foi auxiliar na determinação dos níveis médios da superfície livre d'água em cada ponto de medição e uniformizar o critério de medição.

Adotou-se como representativo aquele valor em que o elemento sensível da EGV estivesse 50% do tempo imerso no escoamento (em contato com a água) e 50% sem contato com o escoamento. Esse tempo foi avaliado subjetivamente a partir do sinal sonoro e visual emitido pelo sistema acoplado à EGV quando do seu contato com a água. Trata-se, portanto, de um critério altamente subjetivo, contudo adequado, tendo em vista as fortes características oscilatórias e macroturbulentas do ressalto hidráulico.

Foram efetuadas medições de nível médio da superfície livre d'água em 20 posições fixas ao longo de um único alinhamento longitudinal centralizado na largura do canal. Os pontos de medição (P1 a P20) foram distribuídos ao longo da bacia de dissipação e da curva de concordância vertical com o perfil vertente.

As posições P1, P2 e P3 localizam-se na curva de concordância vertical, nos respectivos pontos de tangência (P1 e P3) e ponto central (P2). A partir da posição P3, a bacia de dissipação foi dividida em três zonas distintas:

i) Entre P3 e P8, optou-se por maior discretização longitudinal, estabelecendo a distância entre pontos na ordem de 100mm.

ii) Entre P8 e P17, optou-se por discretização longitudinal menor, estabelecendo a distância entre pontos da ordem de 200mm.

iii) Entre P17 e P20, optou-se por mínima discretização longitudinal, estabelecendo a distância entre pontos da ordem de 300mm.

A Tabela 5 apresenta a descrição dos pontos de medição de níveis médios da superfície livre d'água pela localização dos mesmos na estrutura a partir de distâncias e desníveis absolutos (relacionados à crista da soleira do vertedouro) e relativos (relacionados ao ponto de medição imediatamente à montante).

A discretização adotada para as medições do nível médio da superfície livre d'água foram assim estabelecidas em função da necessidade de maior detalhamento junto às seções de montante do ressalto hidráulico, onde se identificam variações mais pronunciadas na linha d'água ao longo da bacia de dissipação. A Figura 21 apresenta os locais onde foram efetuadas as medições de linha d'água.

Tabela 5 – Localização dos pontos de medição de níveis médios da superfície livre d'água

Localização do ponto de medição	Distância*(m)	ΔL (m)	Desnível**(m)	ΔZ (m)
P1 – Final do perfil vertente / início da curva de concordância vertical	0,680	-	0,448	-
P2 – Centro da curva de concordância vertical	0,807	0,127	0,534	0,086
P3 – Final da curva de concordância vertical / início da bacia de dissipação	0,957	0,150	0,563	0,029
P4 – Bacia de dissipação	1,062	0,105	0,563	0,000
P5 – Bacia de dissipação	1,163	0,101	0,563	0,000
P6 – Bacia de dissipação	1,264	0,101	0,563	0,000
P7 – Bacia de dissipação	1,365	0,101	0,563	0,000
P8 – Bacia de dissipação	1,463	0,098	0,563	0,000
P9 – Bacia de dissipação	1,664	0,201	0,563	0,000
P10 – Bacia de dissipação	1,868	0,204	0,563	0,000
P11 – Bacia de dissipação	2,079	0,211	0,563	0,000
P12 – Bacia de dissipação	2,280	0,201	0,563	0,000
P13 – Bacia de dissipação	2,477	0,197	0,563	0,000
P14 – Bacia de dissipação	2,678	0,201	0,563	0,000
P15 – Bacia de dissipação	2,885	0,207	0,563	0,000
P16 – Bacia de dissipação	3,086	0,201	0,563	0,000
P17 – Bacia de dissipação	3,283	0,197	0,563	0,000
P18 – Bacia de dissipação	3,583	0,300	0,563	0,000
P19 – Bacia de dissipação	3,897	0,314	0,563	0,000
P20 – Bacia de dissipação	4,199	0,302	0,563	0,000

* corresponde à distância em planta entre a crista da soleira do vertedouro e o ponto de medição.

** corresponde ao desnível entre a crista da soleira do vertedouro e o ponto de medição.

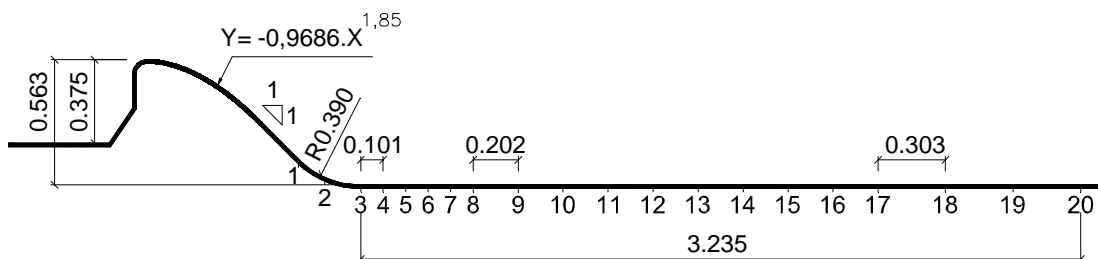


Figura 21 – Posição das tomadas de pressão ao longo da bacia de dissipação.

Além disso, objetivou-se avaliar com maior detalhamento o comportamento do rolo do ressalto hidráulico, onde se dissipa majoritariamente a energia do escoamento.

Nas condições de ensaio sem a ocorrência do ressalto hidráulico as posições de medição de nível médio da superfície livre d'água foram as mesmas apresentadas na Tabela 5.

Salienta-se, por fim, que todas as medições foram feitas verticalmente, sendo que para as posições na curva de concordância vertical as devidas correções foram conduzidas de forma analítica a partir da geometria da estrutura, visando a obtenção das profundidades do escoamento perpendiculares ao contorno sólido.

3.2.2 SEÇÕES TRANSVERSAIS CARACTERÍSTICAS

As seções transversais características do ressalto hidráulico foram estabelecidas a partir da avaliação do comportamento médio da superfície livre d'água e a partir do comportamento das pressões junto ao fundo.

A quantificação da distância de cada uma das seções características com relação à crista do vertedouro foi conduzida a partir do sistema ponta linimétrica e carrinho de medições descritos no item 3.2.1, sistema este que foi vinculado a uma escala graduada posicionada nas paredes internas do canal de ensaios e referenciada à posição do eixo da crista do vertedouro.

3.2.2.1 Início do Ressalto Hidráulico

A seção transversal onde se inicia o ressalto hidráulico foi definida visualmente a partir da identificação da posição média em torno da qual a instabilidade natural da posição de início do ressalto flutuava.

Essa instabilidade ficou evidenciada especialmente nos escoamentos com menores números de Froude, tanto longitudinalmente quanto transversalmente ao sentido do fluxo, conferindo a essa medição também um grau de subjetividade, ainda que pequeno se comparado àquele descrito no item 3.2.1.

Uma vez estabelecida essa seção transversal, efetuou-se a medição da profundidade do escoamento, adotando o mesmo equipamento e os mesmos critérios experimentais descritos no item 3.2.1, obtendo-se a altura conjugada rápida do ressalto hidráulico.

Tal procedimento foi efetuado tanto para as condições de ensaio com a imposição do ressalto hidráulico tipo A como para ressaltos hidráulicos afogados, quando, novamente, identificou-se instabilidade na posição de início do ressalto, contudo de forma bastante atenuada. Essa atenuação tornou-se cada vez mais evidente com o aumento do grau de submersão imposto.

3.2.2.2 Final do Ressalto Hidráulico

O estabelecimento da seção onde se completa a mudança de regime (rápido para lento) foi conduzido, igualmente, de forma visual, buscando identificar a seção transversal onde não havia mais influência do ressalto hidráulico sobre o escoamento.

Conduzindo esta avaliação do ponto de vista do comportamento da superfície livre do escoamento, esta seção terminal foi definida experimentalmente como sendo aquela região limite entre duas zonas distintas: a primeira, a montante, onde as bolhas de ar remanescentes no escoamento eram predominantemente impulsionadas no sentido vertical de forma ascendente (como uma consequência dos aspectos macroturbulentos do fenômeno), e a segunda, a jusante, onde as bolhas apresentavam, evidentemente, movimento ascensional, contudo já sobre a

influência predominante do escoamento em regime lento, induzindo um movimento longitudinal.

Por essa descrição nota-se o alto grau de subjetividade na escolha desta seção de controle. Alia-se a essa subjetividade, a instabilidade das zonas descritas, novamente potencializada nos escoamentos com menores números de Froude.

Uma vez estabelecida essa seção de jusante, efetuou-se a medição da profundidade do escoamento, adotando o mesmo equipamento e os mesmos critérios experimentais descritos no item 3.2.1, obtendo-se a altura conjugada lenta do ressalto hidráulico.

Analogamente efetuou-se esse procedimento, também para ressaltos hidráulicos afogados, quando a instabilidade relatada diminuiu gradativamente. As condições de identificação da seção transversal onde cessa o ressalto hidráulico só se tornam efetivamente menos críticas para condições extremas de submergência.

3.2.2.3 Final do Rolo

Dentre as seções transversais características, o estabelecimento daquela em que se identifica o final do rolo é, sem sombra de dúvidas, a mais complexa de todas, especialmente conduzindo esta avaliação do ponto de vista do comportamento da superfície livre do escoamento.

Trata-se, portanto, de uma posição onde parte do fluxo oriundo do perfil vertente junto à superfície livre é reconduzido para montante, num processo de circulação, e parte é encaminhado para jusante em direção ao final do ressalto hidráulico. Trata-se de uma região fortemente instável, com forte oscilação ora para montante, ora para jusante, conferindo alto grau de subjetividade nos resultados obtidos, ainda que com um critério bem estabelecido.

Novamente os ressaltos hidráulicos afogados foram avaliados quanto à posição final do rolo e apenas para condições extremas de afogamento é que foi possível avaliar com menor grau de subjetividade esse parâmetro hidráulico.

3.2.3 PRESSÕES MÉDIAS, FLUTUANTES E EXTREMAS

As pressões médias, flutuantes e extremas foram obtidas experimentalmente, visando, inicialmente, validar as características internas (junto ao fundo) do ressalto

hidráulico e posteriormente individualizar os esforços de pressão induzidos pelas diferentes condicionantes hidráulicas avaliados neste trabalho.

As flutuações de pressão também foram utilizadas para verificação da posição do fim do rolo e da influência do ressalto hidráulico, seguindo a proposta de Marques *et. al* (1996), que associa a estas seções transversais características, padrões de comportamento das pressões atuantes junto ao fundo da estrutura, conforme item 2.6.3.

3.2.3.1 Pressões Médias

As pressões médias foram tomadas em 20 posições fixas ao longo de um único alinhamento longitudinal centralizado na largura do canal (P1 a P20), coincidentes com os pontos de medição de nível médio da superfície livre d'água, conforme apresentado no item 3.2.1, na Tabela 5 e na Figura 21.

Construtivamente, as tomadas de pressão são formadas numa extremidade por um conduto de cobre, com 1,5mm de diâmetro interno, fixado à laje da bacia de dissipação, e na outra extremidade por uma peça também em cobre, roscada, para o engate do conduto que transmite a pressão para o quadro piezométrico.

O fundo do quadro piezométrico consistia de uma graduação milimétrica referenciada altimetricamente com o piso da bacia de dissipação, obtendo-se, assim, de forma imediata e por visualização, as pressões médias atuantes em cada ponto.

O tempo de observação de cada ponto de medição de pressão média variou desde poucos segundos (em posições a jusante do ressalto hidráulico ou nas condições de escoamento livre) até situações extremas de 2 minutos de observação, visando captar com a máxima veracidade possível a pressão média atuante nesses pontos. Essas situações extremas apresentaram-se invariavelmente na região do rolo do ressalto hidráulico livre (Tipo A) para menores números de Froude.

3.2.3.2 Pressões Flutuantes e Extremas

As pressões flutuantes e extremas foram tomadas nas 14 primeiras posições (P1 a P14), tendo em vista a disponibilidade de instrumentação do LAHE/FURNAS para a condução deste estudo (Figura 21).

As tomadas de pressão utilizadas têm a mesma configuração apresentada no item 3.2.1, à exceção dos condutos de transmissão das pressões médias, que foram substituídos por transdutores de pressão piezoresistivos roscados na face inferior da laje que compõe a bacia de dissipação. Cabe salientar que a distância entre o piso da bacia (onde efetivamente as pressões são atuantes) e a membrana do sensor era de no máximo 10 cm, tendo em vista a metodologia construtiva adotada pelo LAHE/FURNAS na qual este trabalho se insere.

Os transdutores de pressão utilizados neste estudo foram da marca ZURICH, modelo PSI.420, com faixa de trabalho de -100mbar à 200mbar, com precisão de 0,1% FE. A caracterização técnica dos transmissores está apresentada no Anexo A, no qual se reproduz o catálogo do fabricante.

As amostras de pressão adquiridas experimentalmente foram coletadas à taxa de 500 Hz com 10 minutos de duração e de forma simultânea para as 14 tomadas de pressão. Tal taxa de amostragem e tempo de aquisição é bastante superior àquele indicado por Teixeira (2008), contudo, a opção por esses valores elevados, tanto de tempo de amostragem, como de frequência de aquisição, foi feita tendo em vista duas questões principais:

i) Equipamentos utilizados nas medições: uma vez que ainda não havia experiência anterior deste autor, e nem mesmo do LAHE/FURNAS, com a utilização dos sensores da marca ZURICH.

ii) Tempo e taxa de amostragem: motivados pela necessidade de avaliação do tempo mínimo de amostragem e da taxa mínima necessária para a aquisição de dados de pressões flutuantes e extremas em escoamentos livres e em ressaltos hidráulicos tipo A e tipo B com estes equipamentos.

3.3 Aferição dos Transdutores de Pressão

Os transdutores são equipamentos que convertem uma grandeza física em sinal elétrico (tensão ou corrente). Os transdutores de pressão têm como elemento sensível uma membrana que, ao ser defletida pela pressão atuante sobre ela, ocasiona alteração na resistência elétrica do circuito embarcado, alterando o sinal de resposta do equipamento excitado eletricamente.

Contudo, para a interpretação do sinal elétrico resultante das medições, são necessárias relações que convertam esse sinal em grandeza física (no caso, pressão) a partir de uma curva de aferição.

Esse processo de aferição dos sensores foi efetuado individualmente conectando os mesmos a um equipamento dotado de bomba de ar interna para imposição de distintas pressões. Esse equipamento citado é um Calibrador de Pressões da marca FLUKE modelo 718 30G, capaz de impor valores máximos de pressão entre -12 e 20 psi. No Anexo B pode-se consultar as principais especificações técnicas do calibrador.

O processo de aferição consiste na imposição de determinadas pressões efetuando-se a aquisição dos sinais de resposta dos sensores para cada uma delas, definindo as relações Tensão x Pressão para cada um dos sensores utilizados neste estudo. Na construção dessas relações, para cada transdutor se utilizou, em média, 15 valores de pressão variáveis entre os limites operacionais dos transdutores.

Salienta-se que o processo de aferição descrito compreende apenas situações estáticas de pressão e que o recomendável, em última instância, seria submeter os transdutores de pressão a um processo de aferição dinâmica dos mesmos, impondo a eles, por exemplo, condições oscilatórias de pressão, a frequências controladas para verificação do seu comportamento quando submetidos a solicitações dinâmicas.

3.4 Sistema de Aquisição de Dados

Os dados de pressões flutuantes e extremas foram adquiridos a partir do sistema utilizado pelo LAHE/FURNAS, que consiste, fundamentalmente, em um conjunto composto por um computador de padrões industriais e um sistema de aquisição de dados externo ao computador.

O sistema externo utilizado é da marca LYNX Tecnologia, modelo AC2122, composto de três unidades acopladas em um único conjunto:

i) Gabinete composto por fonte de entrada de tensão (90 a 240 Volts), saída em tensão para alimentação auxiliar (24 Volts), conexões de entrada e saída e bornes de aterramento.

ii) Placa controladora de aquisição composta por conversor A/D de 16bits com varredura de 16 canais analógicos e taxa máxima de aquisição de 32.000 amostras por segundo, com interface rede padrão Ethernet 10Mbits e protocolo TCP/IP.

iii) Placa condicionadora de sinais com 16 canais amplificadores controlados por software, filtro passa baixas de segunda ordem com frequências de corte selecionadas por software, fonte de tensão para alimentação dos sensores independente para cada canal com tensão de saída selecionável por software, configuração de entrada dos sensores selecionada por software.

O software compatível com o sistema descrito é o AqDados 7, também da LYNX Tecnologia, através do qual foi possível coletar simultaneamente os sinais dos 14 transdutores de pressão, com taxa de aquisição configurável e armazenamento em disco durante a aquisição das amostras.

O computador utilizado como interface com o sistema de aquisição é um equipamento de padrões industriais específico para aquisição de sinais e automação de processos, com processador Pentium IV de 2,8GHz, 1GB de memória RAM DDR2, disco rígido de 160GB, cartão backplane com características construtivas visando a redução de ruídos e impedâncias, com 2 slots PCIMG, 4 slots PCI e 8 slots ISA.

A caracterização técnica do sistema de aquisição da LYNX Tecnologia está apresentada no Anexo C.

3.5 Condições de Ensaio

As condições de ensaio impostas ao longo dos experimentos tiveram como objetivo fundamental a coleta de dados médios (pressões e níveis da superfície livre da água), flutuantes e extremos (pressões) para distintas condições hidráulicas.

Dessa forma foram conduzidos ensaios visando mapear o escoamento em três situações distintas:

i) Escoamento livre ao longo do perfil vertente e da bacia de dissipação, a partir da simples imposição das vazões, sem qualquer controle de níveis d'água a jusante.

ii) Escoamento livre no perfil vertente e com a imposição do ressalto hidráulico livre (Tipo A) junto ao pé do vertedouro, imediatamente após a curva de concordância vertical.

iii) Escoamento com a imposição do ressalto hidráulico afogado (Tipo B) com o mesmo avançando sobre a curva de concordância vertical e/ou sobre o perfil vertente, a partir de distintos graus de submergência.

Essas três situações hidráulicas forneceram os subsídios necessários para a decomposição de esforços proposta neste trabalho.

3.5.1 IMPOSIÇÃO E CONTROLE DAS VAZÕES EM TRÂNSITO NO MODELO

As medições foram realizadas para 6 vazões compreendidas entre 50 L/s e 250 L/s, ou ainda, 0,043 m³/s/m e 0,217 m³/s/m. Essas vazões foram garantidas através da manutenção do nível constante do reservatório superior do circuito de alimentação e estabelecidas a partir da manipulação de registros tipo gaveta com controle das vazões através de medidores eletromagnéticos.

Os medidores eletromagnéticos de vazão instalados na tubulação de alimentação são da marca Fisher-Rosemount, modelo 570TM, e são compostos por dois componentes:

i) Tubo medidor de vazões com diâmetro de 16", instalado em série com a tubulação de alimentação do modelo, flangeado entre trechos retilíneos de tubulação, composto por corpo em aço Inox, eletrodos e anel de aterramento, e revestimento interno de poliuretano.

ii) Conversor eletrônico de vazões com precisão de 0,5% do valor medido, composto por display LCD para leitura das vazões em trânsito configurável.

Para as vazões de 50L/s e 75L/s, foi utilizado medidor de vazão eletromagnético de mesmo modelo apresentado, contudo com diâmetro de 6", instalado em linha de alimentação do modelo paralela ao alinhamento principal.

3.5.2 IMPOSIÇÃO E CONTROLE DAS CARACTERÍSTICAS DO RESSALTO HIDRÁULICO

A imposição do ressalto hidráulico na bacia de dissipação foi realizada através da manipulação de uma comporta tipo basculante posicionada no extremo de jusante do canal de ensaios. Desta forma, com a elevação ou rebaixamento da comporta, o nível d'água a jusante do vertedouro foi regulado de acordo com a situação de afogamento desejada.

Os níveis médios da superfície livre d'água, através dos quais foram controlados os graus de submergência, foram tomados em um poço de controle de níveis externo ao canal, com tomada d'água junto ao fundo do canal.

A determinação dos níveis médios d'água a jusante do ressalto hidráulico foi feita a partir da imposição visual do ressalto hidráulico livre (Tipo A) na bacia de dissipação com posterior medição da profundidade do escoamento a jusante do ressalto (altura lenta). De posse da altura lenta para cada uma das 6 (seis) vazões de ensaio, e a partir de um plano pré-estabelecido de graus de submergência, estabeleceu-se os níveis médios da superfície livre d'água a serem impostos no poço de controle para cada uma das condições de ensaio.

Os graus de submergência ($S=Tw/Y_2$) avaliados neste estudo foram pré-estabelecidos a partir da opção de melhor discretizar as situações de afogamentos menores, diminuindo gradativamente essa discretização com o aumento do afogamento.

Assim os graus de submergência pré-definidos correspondiam aos valores 1,00 (ressalto livre – tipo A); 1,10; 1,20; 1,35; 1,50; 1,70 e 1,90 (ressalto afogado – tipo B).

A Tabela 6 apresenta o resumo das condições de ensaio efetivamente impostas ao longo das atividades experimentais, considerando eventuais correções necessárias ao longo dos ensaios em função das condições operacionais do modelo.

Tabela 6 – Condições de submergência impostas nas investigações experimentais

Vazão (m³/s/m)	Fr ₁	S	Vazão (m³/s/m)	Fr ₁	S	Vazão (m³/s/m)	Fr ₁	S
0,043	9,26	1,00	0,062	7,53	1,00	0,087	6,90	1,00
	7,56	1,09		7,20	1,09		5,71	1,09
	7,79	1,15		6,43	1,19		5,09	1,17
	6,73	1,26		5,43	1,31		4,87	1,30
	6,21	1,35		5,53	1,44		4,33	1,42
	6,00	1,56		4,75	1,62			
	5,14	1,73						
0,130	5,74	1,00	0,174	4,97	1,00	0,217	4,38	1,00
	4,91	1,09		4,34	1,09		3,72	1,12
	4,42	1,17		3,95	1,18		3,45	1,18
	3,91	1,31		3,41	1,32			
	3,52	1,41						

Cabe salientar que com o aumento da vazão em trânsito no modelo, as condições de submergência impostas diminuíram, tendo em vista o rápido afogamento do perfil vertente para pequenos acréscimos no grau de submergência. Adotou-se como limitante para a imposição das submergências aquelas situações em que a posição de início do ressalto hidráulico se encontrava ainda no desenvolvimento do perfil Creager, ou seja, antes mesmo de alcançar o trecho com declividade 1:1, que proporciona a concordância entre o perfil vertente e a curva de concordância vertical com a bacia de dissipação.

As três situações típicas de ensaio impostas ao longo das investigações experimentais estão apresentadas na Figura 22 (escoamento livre), na Figura 23 (ressalto hidráulico livre – Tipo A) e na Figura 24 (ressalto hidráulico afogado – Tipo B).

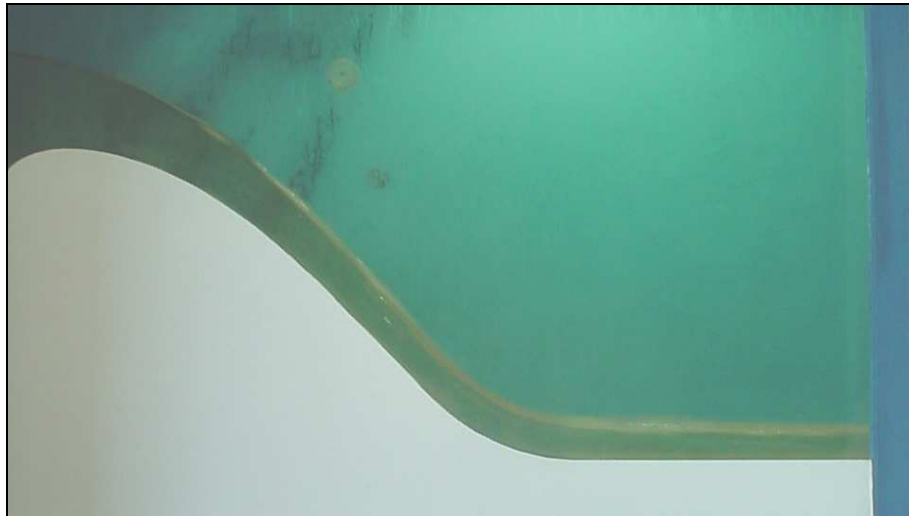


Figura 22 – Escoamento Livre ($q = 0,217\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$)



Figura 23 – Ressalto Hidráulico Livre (Tipo A) ($q = 0,130\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$)



Figura 24 – Ressalto Hidráulico Afogado (Tipo B) ($q = 0,043\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$; $S = 1,26$)

4 APRESENTAÇÃO DOS DADOS EXPERIMENTAIS

Os dados experimentais obtidos neste estudo serão, a partir de agora, apresentados na ótica de comparação com demais proposições teóricas e experimentais desenvolvidas por outros autores. Com isso objetiva-se validar as características hidráulicas internas e externas do ressalto hidráulico livre (Tipo A) e afogado (Tipo B), bem como do escoamento livre ao longo da curva de concordância vertical e da bacia de dissipação, no tocante àqueles parâmetros auferidos neste estudo.

Esse processo de validação será conduzido por comparação entre grandezas físicas medidas direta ou indiretamente no modelo físico e por comparação através de relações adimensionais representativas. A simbologia utilizada ao longo desta etapa segue aquela da Figura 2 aqui rerepresentada.

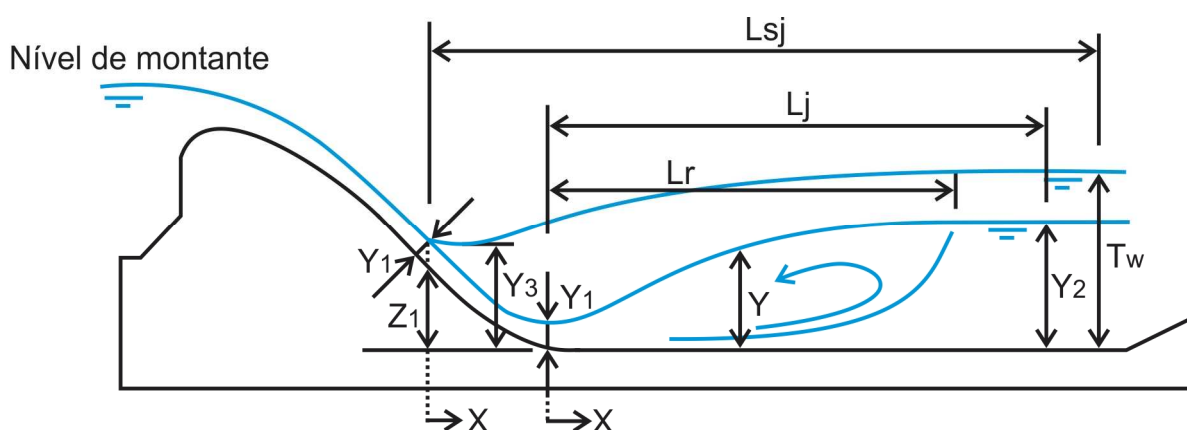


Figura 2 – Simbologia básica utilizada para ressalto formado a jusante de vertedouros.

4.1 Alturas Características do Ressalto Hidráulico

As alturas conjugadas do ressalto hidráulico livre (Tipo A), conforme item 2.5.1, são as lâminas d'água verificadas a montante e a jusante do fenômeno de transição do regime rápido para o regime lento. Assim, a profundidade do escoamento na seção mais a montante do ressalto (seção de entrada) é denominada por altura rápida (ou supercrítica) (Y_1), e a profundidade do escoamento na seção mais a jusante do ressalto (seção de saída) é denominada por altura lenta (ou subcrítica) (Y_2).

As alturas conjugadas do ressalto hidráulico foram avaliadas experimentalmente por critério de visualização, como já descrito nos itens 3.2.1 e 3.2.2, a partir de pontas linimétricas (escalas graduadas com vernier). A definição do estabelecimento da seção transversal de saída do ressalto, seja pelo critério visual, seja pela identificação da posição em que as perturbações causadas pelo ressalto hidráulico junto ao fundo cessam, conduziu a valores de alturas lentas semelhantes, o que valida o método visual aqui adotado.

Os dados experimentais deste estudo relativos às alturas conjugadas do ressalto hidráulico livre (tipo A) estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Alturas conjugadas dos ressaltos hidráulicos livres (tipo A)

Vazão Específica q (m ³ /s/m)	Froude Fr_1	Reynolds Re_1 (10 ⁴)	Altura Rápida Y_1 (m)	Altura Lenta Y_2 (m)
0,0435	9,26	4,3	0,013	0,161
0,0652	7,53	6,5	0,020	0,200
0,0870	6,90	8,7	0,025	0,228
0,1304	5,74	13,0	0,037	0,284
0,1739	4,97	17,4	0,050	0,329
0,2174	4,38	21,7	0,063	0,368

A Figura 25 propõe a comparação entre os valores obtidos experimentalmente e os ajustes teóricos e experimentais de alguns autores, dentre as inúmeras propostas existentes na bibliografia.

Pela análise da tendência de comportamento dos pontos apresentados na Figura 25, julga-se que os resultados obtidos experimentalmente para o ressalto hidráulico livre encontram-se dentro da dispersão esperada, especialmente tendo em vista as incertezas quanto ao estabelecimento da seção de jusante e da oscilação do nível d'água nesta seção. Isso posto, confirma-se, mais uma vez, a validade da proposição teórica de Belanger (1828) para caracterização das alturas conjugadas do ressalto hidráulico, apesar das simplificações feitas na dedução da equação da relação entre as alturas conjugadas.

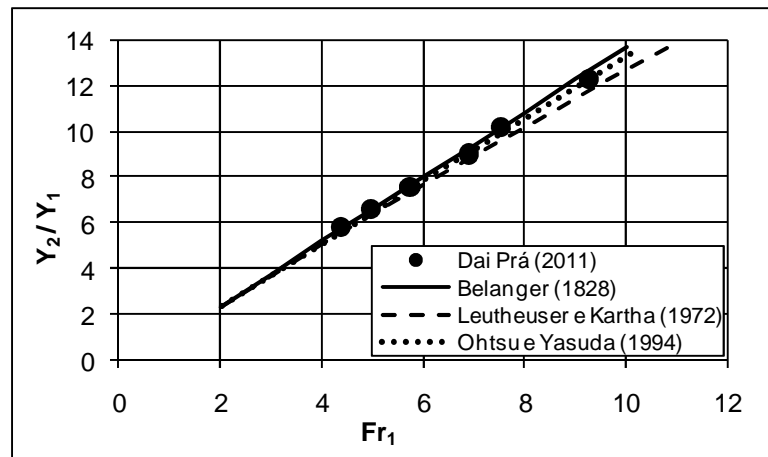


Figura 25 – Comparação entre as alturas conjugadas do ressalto hidráulico livre.

A avaliação dos ressaltos hidráulicos afogados seguiu o mesmo critério de identificação das seções de montante e jusante apresentado nos itens 3.2.1 e 3.2.2.

A Tabela 8 apresenta as alturas características do ressalto hidráulico afogado (Tipo B) medidas experimentalmente neste trabalho. Salienta-se que os valores de altura conjugada rápida referem-se à projeção da lâmina d'água – medida verticalmente na posição de início do ressalto – no sentido perpendicular ao paramento do vertedouro e/ou da curva de concordância vertical.

A submergência (S) pode ser considerada como a razão entre o nível d'água no final do ressalto hidráulico afogado (Tw) e o nível d'água a jusante do ressalto hidráulico livre (Y_2). Esta forma é a mesma adotada por Marques *et al.* (1999), entre outros.

Tabela 8 – Alturas conjugadas rápidas e níveis d'água no final dos ressaltos hidráulicos afogados.

q (m ³ /s/m)	Fr ₁	Y ₁ (m)	Tw (m)	S
0,0435	7,56	0,015	0,180	1,09
	7,79	0,015	0,190	1,15
	6,73	0,016	0,208	1,26
	6,21	0,017	0,223	1,35
	6,00	0,017	0,257	1,56
	5,14	0,019	0,286	1,73

q (m ³ /s/m)	Fr ₁	Y ₁ (m)	Tw (m)	S
0,0652	7,20	0,020	0,219	1,09
	6,43	0,022	0,238	1,19
	5,43	0,024	0,262	1,31
	5,53	0,024	0,288	1,44
	4,75	0,027	0,324	1,62

Tabela 8 – Alturas conjugadas rápidas e níveis d'água no final dos ressaltos hidráulicos afogados (continuação)

q (m³/s/m)	Fr ₁	Y ₁ (m)	Tw (m)	S
0,0870	5,71	0,029	0,255	1,09
	5,09	0,031	0,274	1,17
	4,87	0,032	0,306	1,30
	4,33	0,034	0,333	1,42

q (m³/s/m)	Fr ₁	Y ₁ (m)	Tw (m)	S
0,1304	4,91	0,042	0,313	1,09
	4,42	0,045	0,335	1,17
	3,91	0,048	0,374	1,31
	3,52	0,052	0,404	1,41

q (m³/s/m)	Fr ₁	Y ₁ (m)	Tw (m)	S
0,1739	4,34	0,055	0,358	1,09
	3,95	0,058	0,387	1,18
	3,41	0,064	0,432	1,32

q (m³/s/m)	Fr ₁	Y ₁ (m)	Tw (m)	S
0,2174	3,72	0,070	0,404	1,12
	3,45	0,074	0,426	1,18

A Figura 26 propõe a comparação entre os resultados experimentais deste estudo frente à proposição teórica de Hager (1988), que desenvolveu, também, estudo experimental do ressalto hidráulico submergido (Tipo B) em paramento à 45° com a horizontal. Os símbolos “+” representam os valores esperados a partir das condições de ensaio deste estudo, calculados segundo Hager (1988).

Cabe salientar que o parâmetro E apresentado na Figura 26 relaciona a profundidade a jusante do ressalto hidráulico afogado (Tw) e o desnível entre a cota do piso da bacia de dissipação e a cota da estrutura onde inicia o ressalto hidráulico afogado (Z₁), conforme equação 3 aqui reescrita.

$$E = \frac{Tw - Z_1}{Tw} \quad \text{Equação 3}$$

Percebe-se que não existe correspondência direta entre os valores experimentais deste estudo frente aos resultados de Hager (1988), apresentando, contudo, a mesma tendência da relação Tw/Y₁ em aumentar com o número de Froude na seção de ingresso do ressalto hidráulico afogado.

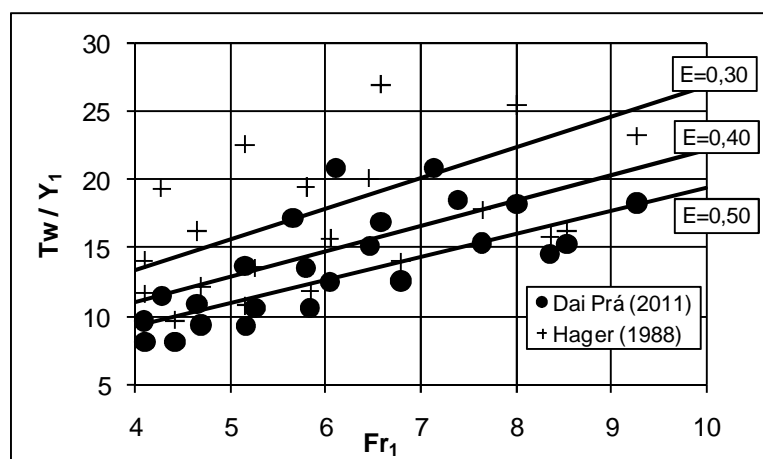


Figura 26 – Comparação entre as alturas conjugadas do ressalto hidráulico afogado

4.2 Comprimento do Rolo e do Ressalto

O comprimento do ressalto hidráulico livre (L_j) foi medido a partir do estabelecimento das duas seções de controle, de montante (início do ressalto) e de jusante (final do ressalto), conforme descrito no item 3.2.2, tomando-se a distância longitudinal entre elas. Procedimento idêntico foi conduzido para a identificação do comprimento do rolo (L_r) quando a seção de jusante utilizada foi aquela onde se identificou o final do rolo.

A Tabela 9 apresenta os resultados experimentais deste estudo relativos ao comprimento do rolo e do ressalto hidráulico livre (Tipo A).

Tabela 9 – Comprimentos dos rolos (L_r) e dos ressaltos hidráulicos livres (L_j)

q (m ³ /s/m)	Fr_1	L_r (m)	L_j (m)
0,0435	9,26	0,707	1,155
0,0652	7,53	0,946	1,351
0,0870	6,90	1,173	1,742
0,1304	5,74	1,340	1,972
0,1739	4,97	1,572	2,120
0,2174	4,38	1,785	2,355

Os resultados adimensionalizados relativos aos comprimentos dos ressaltos hidráulicos livres deste estudo estão apresentados na Figura 27. Os símbolos cheios

referem-se ao critério de inspeção visual e os símbolos vazados referem-se ao critério hidrodinâmico de Marques *et al.* (1996).

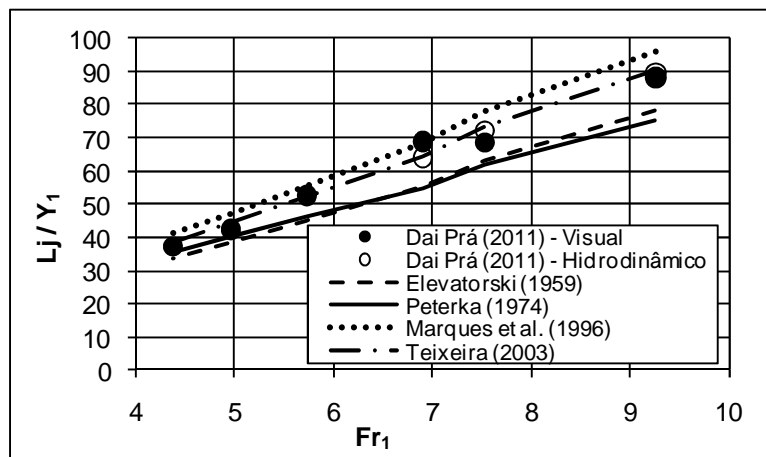


Figura 27 – Análise comparativa do comprimento do ressalto hidráulico tipo A.

Pela análise da Figura 27 percebe-se que os resultados experimentais estão mais de acordo com a proposta de Teixeira (2003). Salienta-se que a proposta do referido autor, assim como Marques *et al.* (1996), baseou-se na análise do comportamento das pressões junto ao fundo, identificando como final do ressalto aquela posição onde as pressões atuantes não sofriam mais os efeitos do ressalto hidráulico.

Avaliou-se, também, o comprimento do ressalto hidráulico livre segundo critério hidrodinâmico de Marques *et al.* (1996). Contudo, em apenas três condições de ensaio foi possível identificar o final da influência das pressões junto ao fundo, uma vez que para as demais condições de ensaio o último ponto instrumentado ainda se encontrava na região de desenvolvimento do ressalto.

Os resultados adimensionalizados relativos aos comprimentos dos rolos verificados nos ressaltos hidráulicos livres deste estudo estão apresentados na Figura 28. Novamente, os símbolos cheios referem-se ao critério de inspeção visual, e os símbolos vazados referem-se ao critério hidrodinâmico de Marques *et al.* (1996).

Conforme Figura 28, os dados experimentais pelo critério visual se agrupam em torno de todas as propostas dos autores utilizados na comparação, tendendo a concordar com a proposta de Peterka (1974), enquanto que o comprimento dos

rolos obtidos pelo critério hidrodinâmico tenderam à proposta de Marques *et al.* (1996).

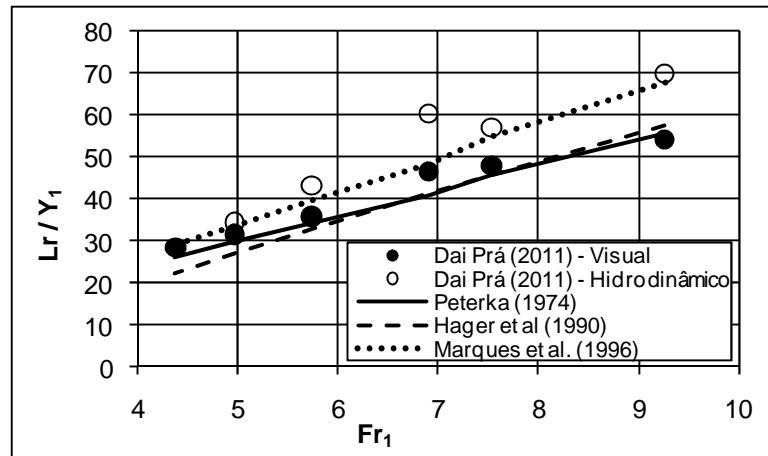


Figura 28 – Análise comparativa do comprimento do rolo no ressalto hidráulico livre.

Analisando especificamente os resultados deste estudo frente à proposta de Marques *et al.* (1996), fica evidenciado que a avaliação visual do fenômeno não está de acordo com a identificação da posição do rolo a partir da avaliação das pressões atuantes junto ao fundo e das características estatísticas das amostras de pressão.

Tal discordância é atribuída aos fatores mencionados no item 3.2.2.3 quanto à subjetividade inerente ao critério estabelecido para definição da seção transversal onde se verifica o final do rolo. Recomenda-se, então, que seja adotado como critério aquele proposto por Marques *et al.* (1996), por se tratar de uma abordagem que tem como fundamentação as pressões hidrodinâmicas atuantes junto ao fundo do canal.

A identificação das seções transversais onde se verificou o final do rolo e do ressalto, nas condições de ressalto hidráulico afogado, segue o mesmo critério visual apresentado para o ressalto hidráulico livre. A Tabela 10 apresenta os resultados experimentais deste estudo.

A comparação/validação dos dados experimentais apresentados fica bastante comprometida, uma vez que são raros os trabalhos na bibliografia que analisam os comprimentos de ressaltos hidráulicos afogados. Tanto os trabalhos de Elevatorski (1959) como de Peterka (1974) contemplam ressaltos hidráulicos

afogados em canais de pequena declividade, inviabilizando a comparação dos dados do presente estudo, por terem sido coletados sobre um paramento com 45° de inclinação.

Tabela 10 – Comprimentos dos rolos e dos ressaltos hidráulicos submergidos

q (m³/s/m)	Fr ₁	Lr (m)	Lj (m)	S
0,0435	7,56	0,433	0,819	1,09
	7,79	0,340	0,605	1,15
	6,73	0,322	0,593	1,26
	6,21	0,290	0,510	1,35
	6,00	0,282	0,655	1,56
	5,14	0,240	0,599	1,73

q (m³/s/m)	Fr ₁	Lr (m)	Lj (m)	S
0,0652	7,20	0,651	1,108	1,09
	6,43	1,076	1,627	1,19
	5,43	0,507	0,981	1,31
	5,53	0,498	0,942	1,44
	4,75	0,385	0,993	1,62

q (m³/s/m)	Fr ₁	Lr (m)	Lj (m)	S
0,0870	5,71	0,905	1,248	1,09
	5,09	0,563	1,020	1,17
	4,87	0,578	1,081	1,30
	4,33	0,630	1,086	1,42

q (m³/s/m)	Fr ₁	Lr (m)	Lj (m)	S
0,1304	4,91	0,953	1,497	1,09
	4,42	0,941	1,395	1,17
	3,91	0,705	1,393	1,31
	3,52	0,608	1,202	1,41

q (m³/s/m)	Fr ₁	Lr (m)	Lj (m)	S
0,1739	4,34	1,337	1,726	1,09
	3,95	1,396	1,743	1,18
	3,41	1,181	1,741	1,32

q (m³/s/m)	Fr ₁	Lr (m)	Lj (m)	S
0,2174	3,72	1,448	1,998	1,12
	3,45	0,893	1,529	1,18

A proposta de Hager (1988), válida para paramento com inclinação de 30°, apresentou resultados de comprimento do ressalto superiores ao identificado experimentalmente neste estudo, o que está dentro do esperado, uma vez que o aumento da declividade do paramento antecipa o final do ressalto hidráulico, para idênticas condições de entrada e afogamento.

Os resultados deste trabalho mostraram-se bastante dispersos em torno de um valor médio sem uma tendência de comportamento bem definida do ponto de

vista da avaliação dos adimensionais propostos por Rajaratnam (1967) e Ohtsu e Yasuda (1991), conforme pode ser avaliado pela Figura 29a.

Já a proposta de Lopardo *et al.* (2004) apresentou-se mais consistente quanto ao ajuste dos dados experimentais deste estudo, ainda que a mesma tenha sido desenvolvida a partir de ressaltos submergidos a jusante de uma comporta de fundo. Visando compatibilizar a proposta dos referidos autores para situações de ressaltos hidráulicos afogados a jusante de vertedouros, propõe-se a substituição direta da altura d'água na entrada do ressalto hidráulico submergido (a jusante de uma comporta de fundo) pela diferença entre o nível médio da superfície livre d'água na seção de entrada do ressalto hidráulico afogado a jusante de um vertedouro e a cota de fundo do dissipador de energia. A Figura 29b apresenta a comparação dos resultados deste estudo frente a proposta de Lopardo *et al.* (2004), a qual se mostrou válida para graus de submergência ($S=Tw/Y_2$) não maiores do que 1,4, a partir da qual a relação proposta mostra uma tendência de rápido crescimento com a submergência.

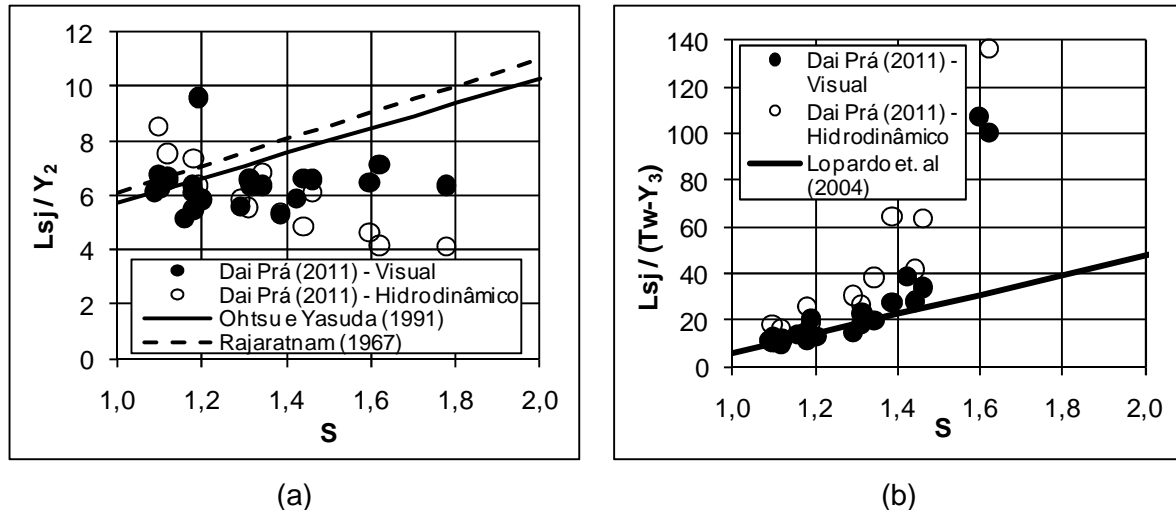


Figura 29 – Comparações entre o comprimento do ressalto hidráulico afogado.

Cabe salientar que considerando a seção de saída do ressalto hidráulico conforme proposta hidrodinâmica de Marques *et al.* (1996), os comprimentos do ressalto hidráulico mostraram-se, em média, 16% superiores àqueles apresentados na Tabela 10 a partir da análise visual.

Quanto ao comprimento do rolo, novamente são poucos os estudos, ou mesmo propostas teóricas que abordam os ressaltos tipo B. Avaliou-se, portanto, a

única proposta identificada na bibliografia, quanto à formação de ressaltos hidráulicos afogados a jusante de vertedouros, estipulada por Hager (1988), conforme apresentado pela Figura 30. Os símbolos “+” representam os valores esperados a partir das condições de ensaio deste estudo, calculados segundo Hager (1988).

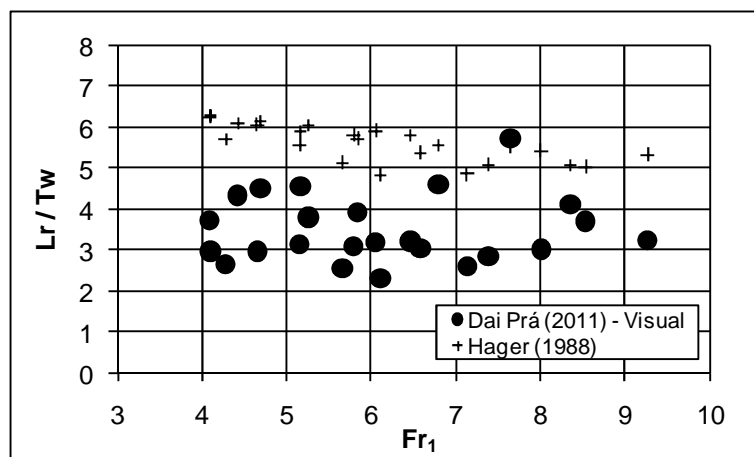


Figura 30 – Comparação entre avaliações do comprimento do rolo verificado no ressalto hidráulico afogado

Pode-se observar que os valores encontrados por Hager (1988) são superiores aos do presente trabalho podendo chegar a ser aproximadamente 2 vezes maiores. Os valores de Hager (1988) apresentam uma dispersão menor que os resultados aqui obtidos.

No que tange à avaliação do rolo no ressalto hidráulico submergido, segundo critério de Marques *et al.* (1996), observou-se que pelo critério visual o rolo foi superestimado em 20% (em média) se comparado com o critério hidrodinâmico, o que afasta ainda mais os dados do presente estudo se avaliados do ponto de vista de Hager (1988).

Percebe-se que a definição da seção transversal onde se verifica o final do rolo no ressalto hidráulico afogado (Tipo B) segue sendo um dos aspectos a ser avaliado pelo meio técnico-científico, visando à obtenção de um critério que se mostre consensual.

4.3 Posição do Início do Ressalto Hidráulico Afogado

Praticamente inexitem propostas que avaliam especificamente a posição de início do ressalto hidráulico afogado a jusante de vertedouros, sendo identificada apenas a proposta de Wiest (2008), que propõe uma relação adimensional para avaliar essa posição. Na Figura 31 observa-se a comparação entre a equação proposta pelo autor e os dados experimentais deste trabalho.

Percebe-se, claramente, que não existe concordância entre os resultados apresentados. Salienta-se, contudo, que as condições de ensaio propostas neste trabalho diferem daquelas utilizadas por Wiest (2008), as quais consistiam de um vertedouro controlado por comportas, aumentando a energia disponível a montante. Também diferia quanto à geometria a jusante da bacia de dissipação, com uma soleira terminal e a jusante desta uma rampa com declividade de 4:1 até atingir o terreno natural, alterando as condições de afogamento do ressalto hidráulico. Acrescenta-se, ainda, o fato de que nos estudos experimentais de Wiest (2008) o ressalto afogado apresentava sua posição de início em meio a presença dos pilares que individualizavam os vãos das comportas.

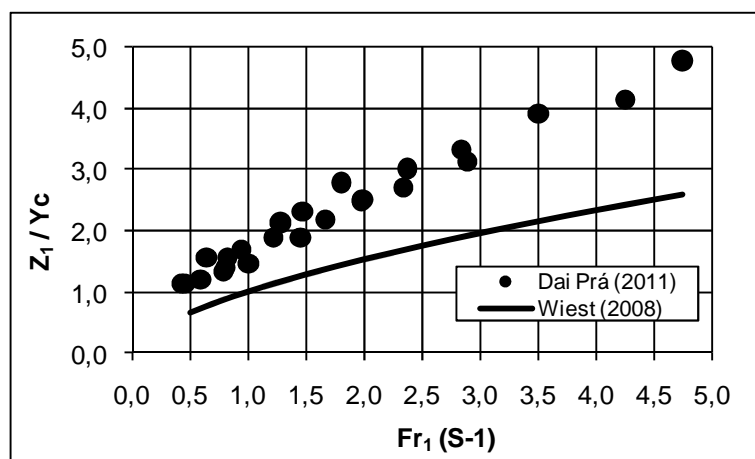


Figura 31 – Análise comparativa da posição de início do ressalto hidráulico afogado.

Independente dessas diferenças observadas, cabe salientar aqui o mérito da adimensionalização proposta de Wiest (2008), a qual agrupou os dados experimentais obtidos no presente estudo de forma consistente e com dispersão reduzida, mesmo sendo o processo de medição dessa grandeza física bastante sujeito a subjetividades.

4.4 Nível Médio da Superfície Livre no Ressalto Hidráulico

O nível médio da superfície livre d'água ao longo do ressalto hidráulico foi medido experimentalmente de acordo com os procedimentos descritos no item 3.2.1.

Salienta-se, mais uma vez, a existência de certa subjetividade nessas medições, tendo em vista a macroturbulência do escoamento, que torna a superfície livre d'água do ressalto hidráulico altamente instável e flutuante.

A comparação dos resultados experimentais obtidos para o ressalto hidráulico livre, apresentada na Figura 32, foi conduzida a partir da análise entre as propostas de Sauma Haddad *et al.* (1992) – que correlaciona os níveis médios d'água com o comprimento do ressalto – e de Hager (1988) – que correlaciona os níveis médios d'água com o comprimento do rolo. Salienta-se que para compatibilizar as duas propostas, correlacionou-se os comprimentos do ressalto e do rolo a partir da proporcionalidade de 4/3 entre ambos.

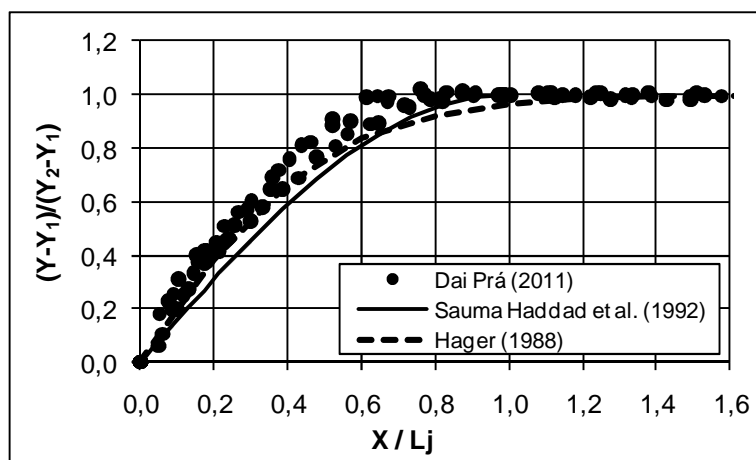


Figura 32 – Análise comparativa do perfil médio da superfície livre d'água no ressalto hidráulico livre.

Percebe-se pela análise da Figura 32 que os resultados de lâmina média d'água concordam com as propostas dos referidos autores, sendo que as eventuais diferenças podem ser atribuídas às distintas metodologias analítico/experimentais utilizadas pelos autores.

As comparações dos resultados do perfil médio da linha d'água para ressalto hidráulico afogado fica comprometida, uma vez que não foram identificadas na bibliografia propostas que contemplem esse tipo de comportamento afogado.

4.5 Nível Médio da Superfície Livre no escoamento Livre

A medição dos níveis médios da superfície livre d'água do escoamento ao longo do perfil vertente e da bacia de dissipação foi efetuada visando o estabelecimento de uma situação de controle para os ensaios com ressalto hidráulico livre e afogado. Essas medições servirão de apoio às adimensionalizações propostas nos itens subsequentes, quando da avaliação da superposição de efeitos proposta neste trabalho.

As medições seguiram o mesmo critério anteriormente abordado, a partir de uma ponta linimétrica (item 3.2.1). Foram, então, efetuadas medições desde o início da curva de concordância entre o paramento de jusante do perfil vertente até posições distribuídas longitudinalmente na bacia de dissipação, coincidentes com as tomadas de pressão, conforme apresentado na Tabela 5.

Os resultados experimentais obtidos neste trabalho quanto ao perfil médio da linha d'água do escoamento livre serão aqui confrontados com a proposta de LinFu e Jie (1984), notadamente quanto ao comportamento verificado na curva de concordância entre o perfil vertente e a bacia de dissipação.

Os referidos autores sugerem que o comportamento da superfície livre média do escoamento ao longo de uma curva vertical possa ser representado pela hipótese das curvas circulares concêntricas. Tal hipótese foi aplicada aos resultados experimentais deste estudo, conforme apresentado na Figura 33.

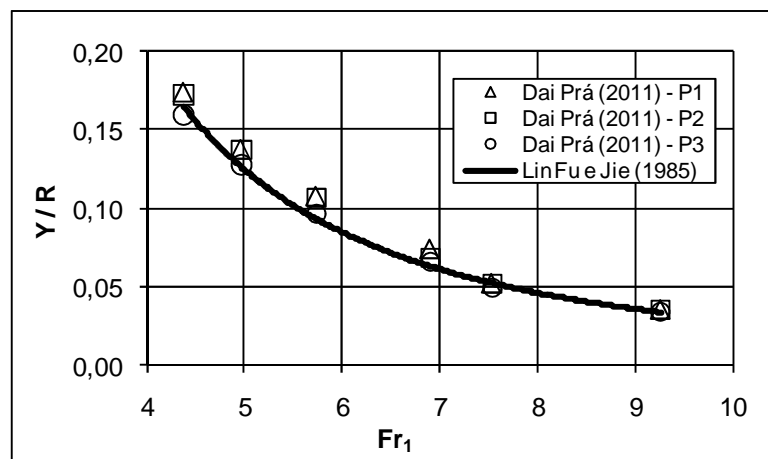


Figura 33 – Profundidade média do escoamento livre na curva de concordância vertical.

Percebe-se que as profundidades do escoamento medidas nas três posições (P1, P2 e P3) ao longo da curva de concordância vertical ajustam-se adequadamente ao método apresentado por LinFu e Jie (1985), com alguma dispersão verificada nas posições P1 e P2 e para escoamentos com menores números de Froude. Tal constatação pode ser atribuída ao fato de que com o aumento da razão entre lâmina d'água e raio de curvatura (Y/R), a transição tende a perder a eficiência no que diz respeito à garantia de uma transição adequada do fluxo do perfil vertente para a bacia de dissipação.

4.6 Pressões Médias

A validação das pressões médias obtidas experimentalmente passa pela avaliação do escoamento livre (especialmente na curva de concordância vertical) e do ressalto hidráulico livre (Tipo A).

4.6.1 ESCOAMENTO LIVRE AO LONGO DA CURVA DE CONCORDÂNCIA VERTICAL

Quanto às pressões médias devidas à força centrífuga verificadas na curva de concordância vertical, a comparação entre os coeficientes de pressão média máximos devidos a força centrífuga ($C_{p_{CM}}$) – estabelecidos por LinFu e Jie (1985), pela Equação 40 reescrita abaixo – verificados experimentalmente neste estudo estão apresentados na Figura 34, a partir da consideração de que o escoamento ao longo de uma curva vertical é composto por filetes líquidos concêntricos com a curva.

$$C_{p_{CM}} = \frac{P_{CM}/\gamma}{H - Y} \quad \text{Equação 40}$$

$$P_C = \frac{\gamma Y V^2}{g R} \quad \text{Equação 38}$$

onde:

P_{CM} = valor da máxima pressão devida à força centrífuga (P_C), e

H = carga hidráulica no ponto de máxima pressão devida à força centrífuga,

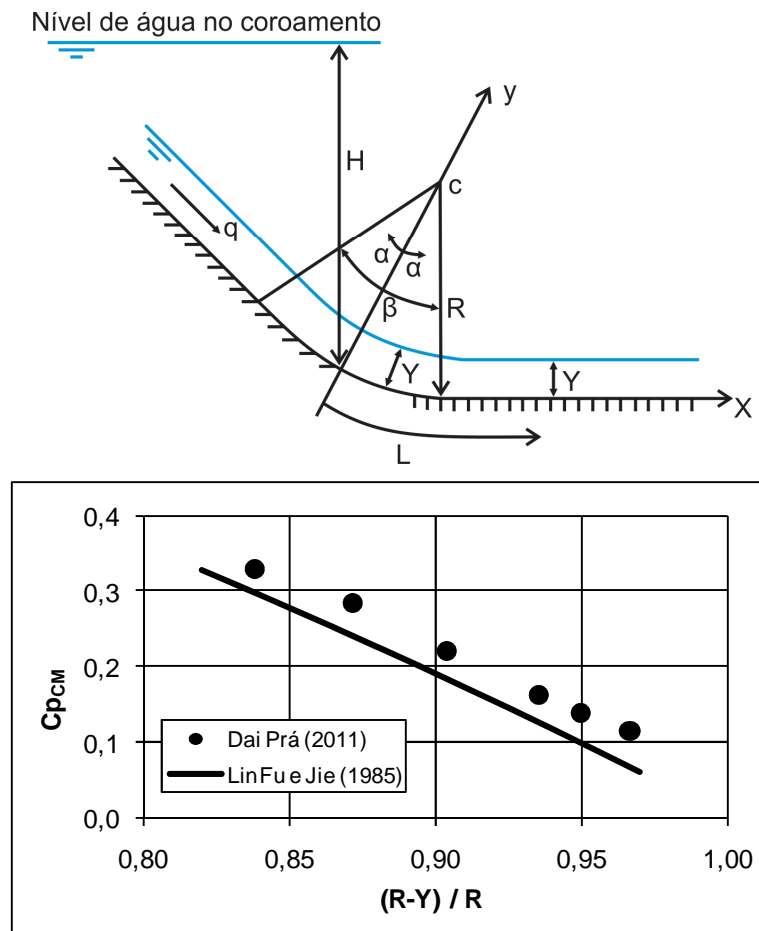


Figura 34 – Pressões médias máximas atuantes no centro da curva de concordância

Percebe-se que os dados do presente trabalho apresentam uma mesma tendência de decréscimo do C_{pCM} para menores profundidade do escoamento (Y). Por outro lado não existe correspondência imediata entre os resultados previstos pela teoria dos círculos concêntricos de LinFu e Jie (1985) para as pressões médias máximas devidas à força centrífuga na curva de concordância vertical. Isso pode ser atribuído ao fato de que a montante da curva de concordância vertical não existe uma condição de canal longo o suficiente de forma a uniformizar os perfis de velocidade. Com isso, o fluxo vertente pelo perfil Creager a montante já ingressa na curva de concordância vertical com os perfis de velocidade condicionados pela geometria da soleira Creager, ocasionando pressões superiores àquelas esperadas em uma condição ideal de desenvolvimento do escoamento.

Análise semelhante é conduzida para os demais coeficientes de pressão (C_{pC}) ao longo da curva de concordância, conforme apresentado pela Figura 35. Nesta figura a razão entre os coeficientes de pressão definidos por LinFu e Jie (1985) é comparada com o comprimento de influência da curva de

concordância (L_c) com relação ao comprimento (X) tomado longitudinalmente junto ao fundo da soleira curva a partir do ponto central da mesma, de acordo com a Equação 41 aqui reescrita.

$$L_c = \frac{4 Y \text{sen}(\beta)}{C_{pCM}} \quad \text{Equação 41}$$

onde:

L_c = distância do ponto médio da curva aos pontos a jusante e a montante onde se anula a influência da força centrífuga.

β = ângulo da curva de concordância vertical.

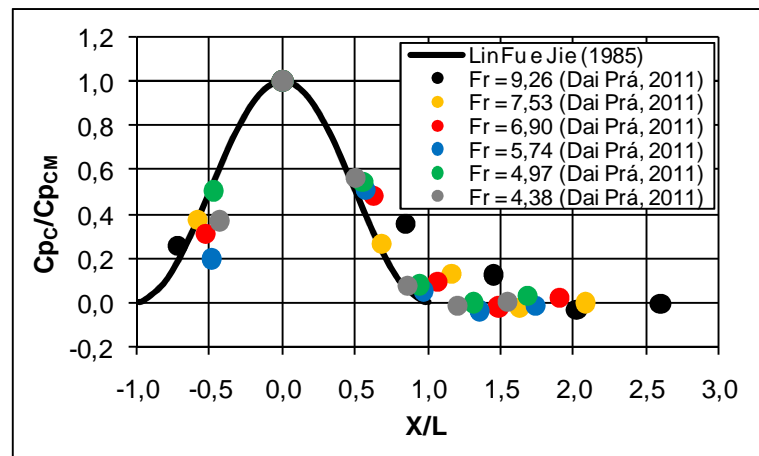


Figura 35 – Pressões médias devidas à força centrífuga na curva de concordância vertical entre o perfil vertente e a bacia de dissipação

Verifica-se que a razão entre os coeficientes de pressão média tem alguma dispersão frente à proposição de LinFu e Jie (1985). Percebe-se nos escoamentos com maiores números de Froude, que a proposta dos autores tende a subestimar as pressões médias atuantes, subestimando, também, o comprimento de influência da curva de concordância vertical no escoamento ao longo da bacia de dissipação.

4.6.2 RESSALTO HIDRÁULICO LIVRE (TIPO A)

Quanto às pressões médias (P_x) obtidas experimentalmente nas situações de ressalto hidráulico livre (tipo A), as mesmas são aqui confrontadas com os dados

experimentais de Marques (1995), Endres (1990) e Pinheiro (1995), a partir da adimensionalização proposta por Marques *et al.* (1996), conforme Figura 36.

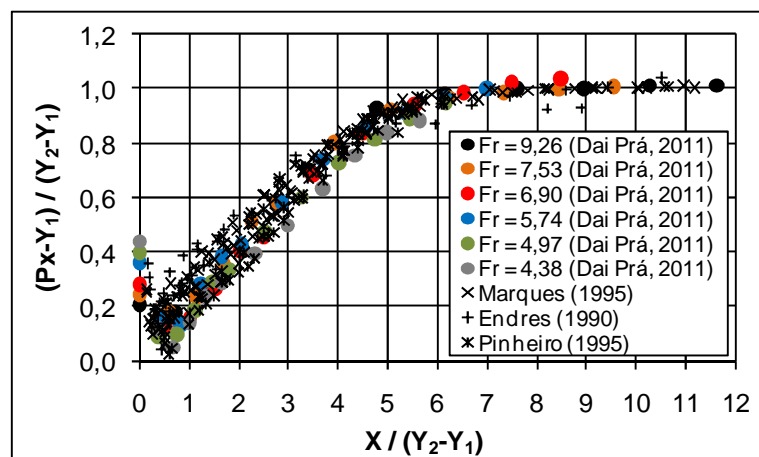


Figura 36 – Pressões médias adimensionalizadas do ressalto hidráulico livre

A Figura 36 mostra que os resultados experimentais deste estudo apresentam boa correspondência frente àqueles obtidos pelos demais autores citados. Observe, ainda, que as pressões médias verificadas junto à posição de início do ressalto hidráulico apresentam-se dispersas da tendência geral observada. Isso ocorre tendo em vista os efeitos ocasionados pela curva de concordância vertical que se manifesta nas seções transversais mais a montante do ressalto hidráulico.

Na Tabela 11 estão apresentados, de forma sintetizada, os comportamentos das pressões médias ao longo das seções transversais características do ressalto hidráulico livre, conforme identificado por Marques *et al.* (1996), com os quais os resultados do presente estudo vêm a concordar.

Tabela 11 – Posições médias características no ressalto hidráulico livre (Tipo A)

Descrição	$\Gamma = \frac{X}{Y_2 - Y_1}$	$\Psi = \frac{P_x - Y_1}{Y_2 - Y_1}$
Maior flutuação de pressão ($L_{\sigma_{max}}$)	1,75	0,40
Ponto de descolamento (L_d)	4,00	0,75
Final do rolo (L_r)	6,00	0,95
Final da influência do ressalto (L_j)	8,00	1,00

4.7 Flutuações de Pressão

Analogamente ao efetuado no item 4.6, comparam-se os dados relativos às flutuações de pressão (σ_x) obtidas neste estudo, para as condições de ressalto hidráulico livre, frente aos resultados experimentais de Marques (1995), Endres (1990) e Pinheiro (1995), conforme Figura 37.

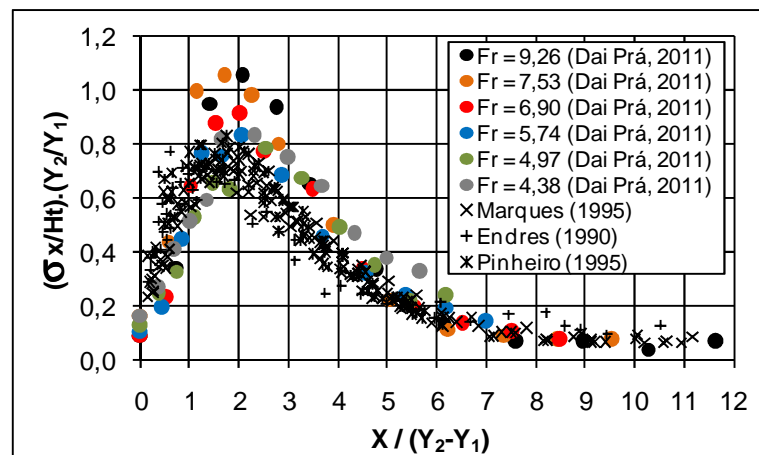


Figura 37 – Flutuações de pressão adimensionalizadas do ressalto hidráulico livre.

A alteração na tendência verificada na região de maior dispersão, em torno da posição adimensionalizada 2, se deve, possivelmente, pela medição da altura conjugada rápida do ressalto hidráulico. Especialmente para elevados números de Froude, a lâmina d'água assume valores bastante reduzidos e qualquer pequena diferença quando da medição da altura conjugada lenta (Y_1), representa um valor significativo no parâmetro adimensional da flutuação de pressão.

Os reflexos decorrentes de alguma pequena diferença na medição de Y_1 também se manifestam sobre o parâmetro adimensional da posição ao longo do ressalto hidráulico, o que pode explicar a defasagem dos dados experimentais deste estudo frente aos resultados dos demais autores.

Avaliam-se também as flutuações de pressão obtidas neste estudo frente aos dados de diferentes autores (Figura 38) obtidos em ressaltos hidráulicos tipo A, tanto a jusante de comportas como a jusante de vertedouros, a partir do coeficiente de pressão (C_p) apresentado na Equação 18.

$$C_p = \frac{\sigma_x/\gamma}{V_1^2/2g}$$

Equação 18

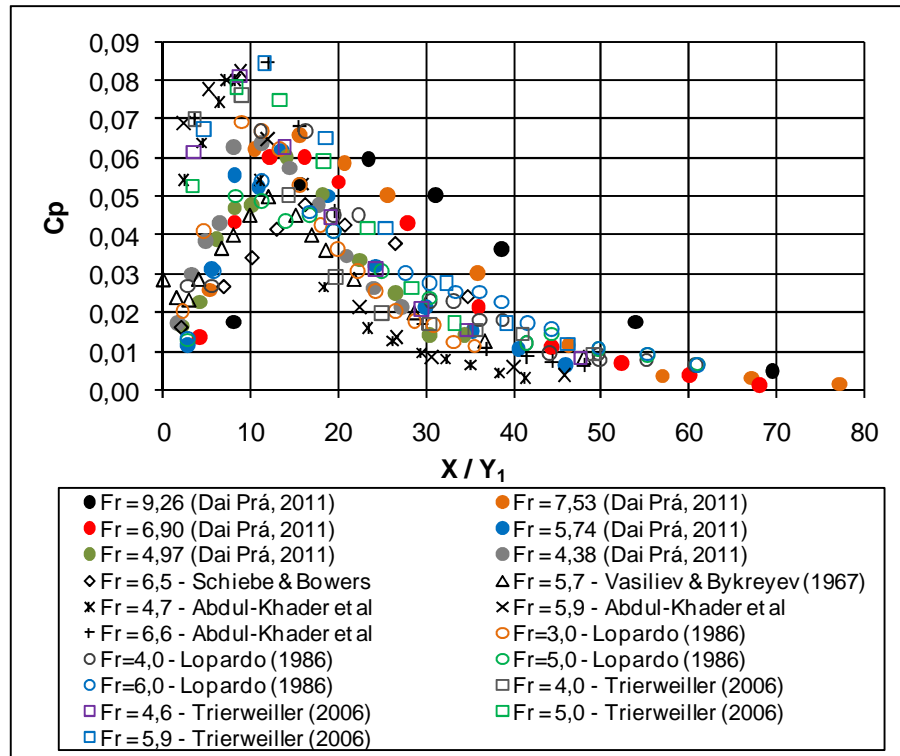


Figura 38 – Análise comparativa do coeficiente de pressão.

Apesar da dispersão verificada na Figura 38, pode-se verificar que os dados deste trabalho seguem a tendência geral identificada pelos demais autores utilizados nessa análise comparativa. A exceção pode ser feita por conta dos coeficientes de pressão para números de Froude maiores do que 7,5, que se por um lado se distanciam da tendência geral, por outro não podem ser comparados diretamente pela inexistência de dados experimentais com números de Froude desta magnitude.

Observa-se, ainda, a grande dispersão verificada entre as posições adimensionalizadas 0 e 20, justamente onde estão identificados os máximos coeficientes de pressão.

4.8 Coeficiente de Assimetria

Os coeficientes de assimetria (Ad) das amostras podem ser relacionados com zonas de separação do escoamento, conforme Lopardo (1986). Desta forma, assimetrias negativas indicam regiões onde o fluxo descola do contorno sólido, ou seja, do fundo da bacia de dissipação no caso de assimetrias negativas ao longo do ressalto hidráulico.

Apresenta-se na Figura 39 os coeficientes de assimetria identificados ao longo do ressalto hidráulico livre, comparados com os resultados experimentais de Marques (1995), Endres (1990) e Pinheiro (1995), relativos a estudos experimentais de ressalto hidráulicos a jusante de vertedouros.

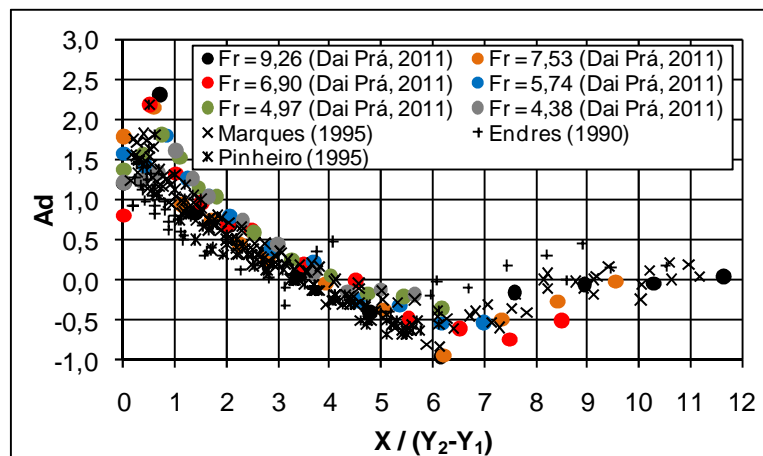


Figura 39 – Coeficientes de Assimetria para o ressalto hidráulico livre

Na Figura 39 ficam evidenciadas as seções transversais características descritas por Marques *et. al* (1996). No início do ressalto hidráulico, as pressões positivas são predominantes (assimetrias máximas positivas), sendo atribuídas ao efeito da curva de concordância vertical a partir da força centrífuga que o escoamento exerce sobre o contorno sólido. Na posição adimensional igual a 4, as assimetrias passam a assumir valores negativos, indicando o início de uma região de descolamento do fundo do canal onde os componentes de velocidade verticais passam a ter maior importância. Na posição adimensional 6, onde se verifica o final do rolo, as assimetrias assumem o seu valor extremo mínimo, indicando a predominância de pressões inferiores ao valor médio, ou ainda, maior relevância das componentes verticais de velocidade.

4.9 Coeficiente de Curtose

A avaliação do coeficiente de curtose (K) das amostras de pressão vem a confirmar as informações extraídas dos coeficientes de assimetria (Ad). Pela Figura 40, então, percebe-se que a distribuição das pressões não podem ser representadas por uma lei normal, à exceção das regiões a jusante do rolo e bem próximas do final da influência do ressalto (posição adimensional 8), quando os valores de assimetria e de curtose assumem o valor esperado para uma distribuição normal.

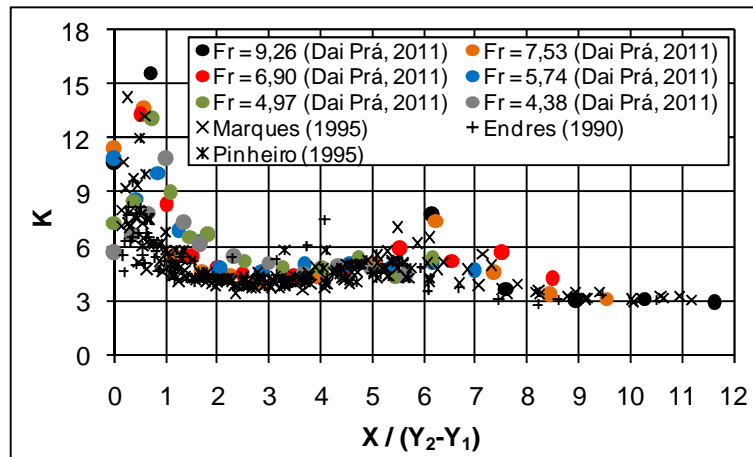


Figura 40 – Coeficientes de Curtose para o ressalto hidráulico livre

Verifica-se de forma mais clara, e em concordância com as propostas de Marques (1995), Endres (1990) e Pinheiro (1995), que nas regiões próximas ao início do ressalto as pressões atuantes não têm um comportamento da função densidade de probabilidade normal, estejam elas sobre influência da curva de concordância vertical e/ou sejam elas próprias da macroturbulência do escoamento. Mesmo fato acontece ao longo do ressalto, com destaque novamente para o comportamento do coeficiente de curtose na altura da posição adimensionalizada 6, onde já se identificou o final do rolo e a predominância de pressões inferiores ao valor médio.

4.10 Coeficiente Estatístico de Distribuição de Probabilidades (N)

A estimativa das pressões com determinada probabilidade de não excedência ($P_{X\%}$) atuantes junto ao fundo de bacias de dissipação provocadas pelo ressalto hidráulico livre (Tipo A) pode ser realizada a partir da proposta de Marques *et al.* (1996). Essa proposta considera o efeito acumulado devido às pressões médias (P_x) atuantes em cada ponto ao longo da bacia de dissipação e devido às flutuações de pressão (σ_x), estas ponderadas por um coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades (N), conforme Equação 25, apresentada no item 2.6.3, reescrita abaixo.

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

Equação 25

A determinação do coeficiente N foi conduzida a partir das pressões médias, flutuantes e com diferentes probabilidades de ocorrência obtidas experimentalmente. A Figura 41 apresenta, então, os valores do coeficiente N das amostras de pressão obtidas para o ressalto hidráulico livre associados às probabilidades de não excedência de 0,1% e de 1% respectivamente, ilustrando que os mesmos independem do número de Froude na seção de início do ressalto hidráulico livre (Tipo A).

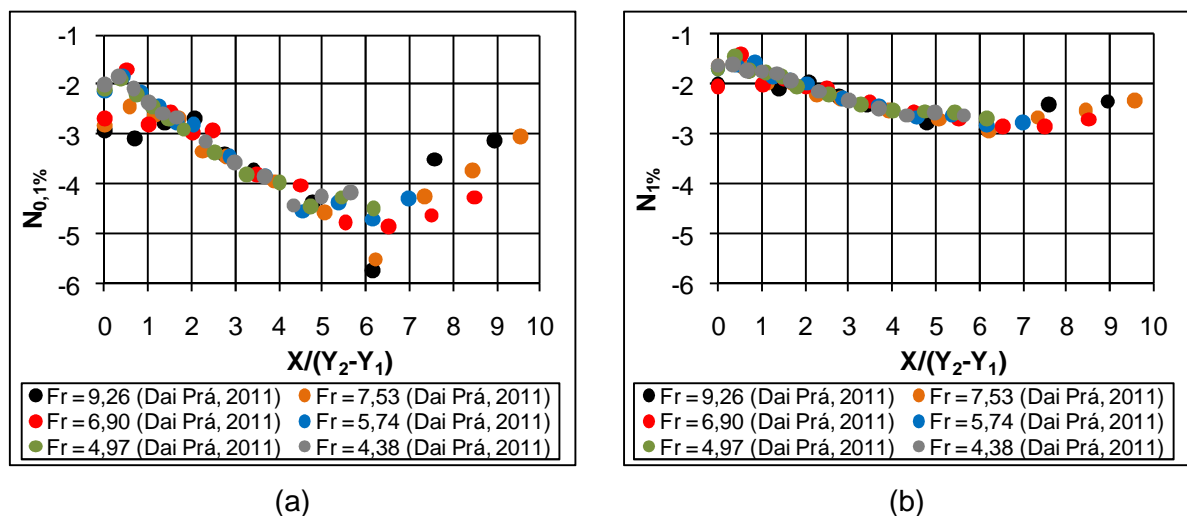


Figura 41 – Coeficiente estatístico do ressalto hidráulico livre (Tipo A): a) probabilidade de não excedência de 0,1% e b) probabilidade de não excedência de 1%.

Observa-se que os valores de N diminuem até um valor mínimo em torno da posição 6 (posição média do fim do rolo) e após voltam a crescer até atingir um comportamento similar à distribuição normal uma vez que o coeficiente de assimetria passa a ser em torno de zero e o coeficiente de curtose em torno de 3. Cabe lembrar que para uma distribuição normal de probabilidades o valor de $N_{0,1\%}$ corresponde ao valor -3,09 e o $N_{1\%}$ corresponde ao valor -2,33.

Na Figura 42 apresentam-se os resultados obtidos neste estudo para as probabilidades de não excedência das pressões 0,1%, 1%, 5%, 10%, 90%, 95% e 99% e 99,9%, frente aos ajustes efetuados por Teixeira (2003) (considerando ressaltos hidráulicos a jusante de vertedouros) e por Trierweiller (2006) (considerando ressaltos hidráulicos a jusante de descargas de fundo).

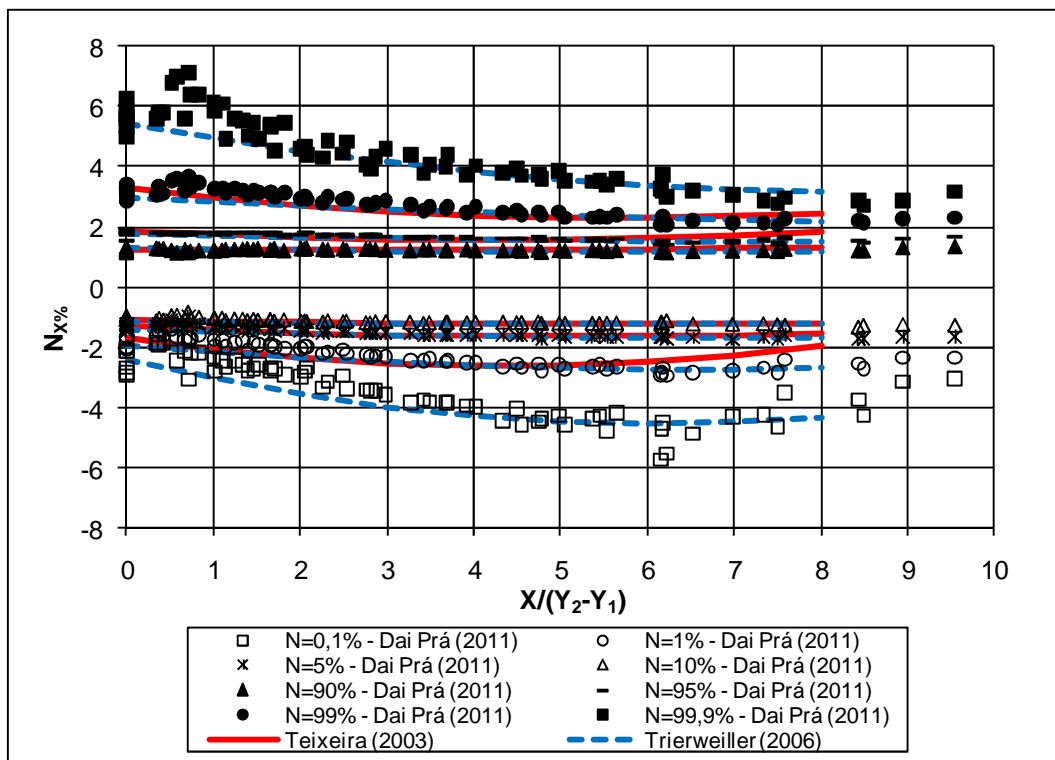


Figura 42 – Coeficiente estatístico do ressalto hidráulico livre (Tipo A) para probabilidades extremas de não excedência.

Pela análise da Figura 42, percebe-se que, de maneira geral, tanto as propostas de Teixeira (2003) e de Trierweiller (2006) ajustam-se bem aos resultados experimentais deste estudo. Percebe-se, contudo, que nas pressões extremas 0,1% e 99,9%, há alguma dispersão no trecho inicial do ressalto hidráulico, o que, *a priori*,

atribui-se à curva de concordância vertical, elemento não presente nos estudos de Trierweiler (2006).

Efetuada-se, agora, a avaliação conjunta dos coeficientes estatísticos N para ressaltos hidráulicos tipos A e B, obtidos neste estudo, percebe-se pela Figura 43, de maneira geral, a independência dos mesmos frente ao grau de submergência (S) conforme já afirmado por Wiest (2005) e Trierweiler (2006), à exceção das posições iniciais do ressalto hidráulico, onde o grau de submergência e a curva de concordância vertical impõem um comportamento distinto daquele verificado no ressalto livre (Tipo A).

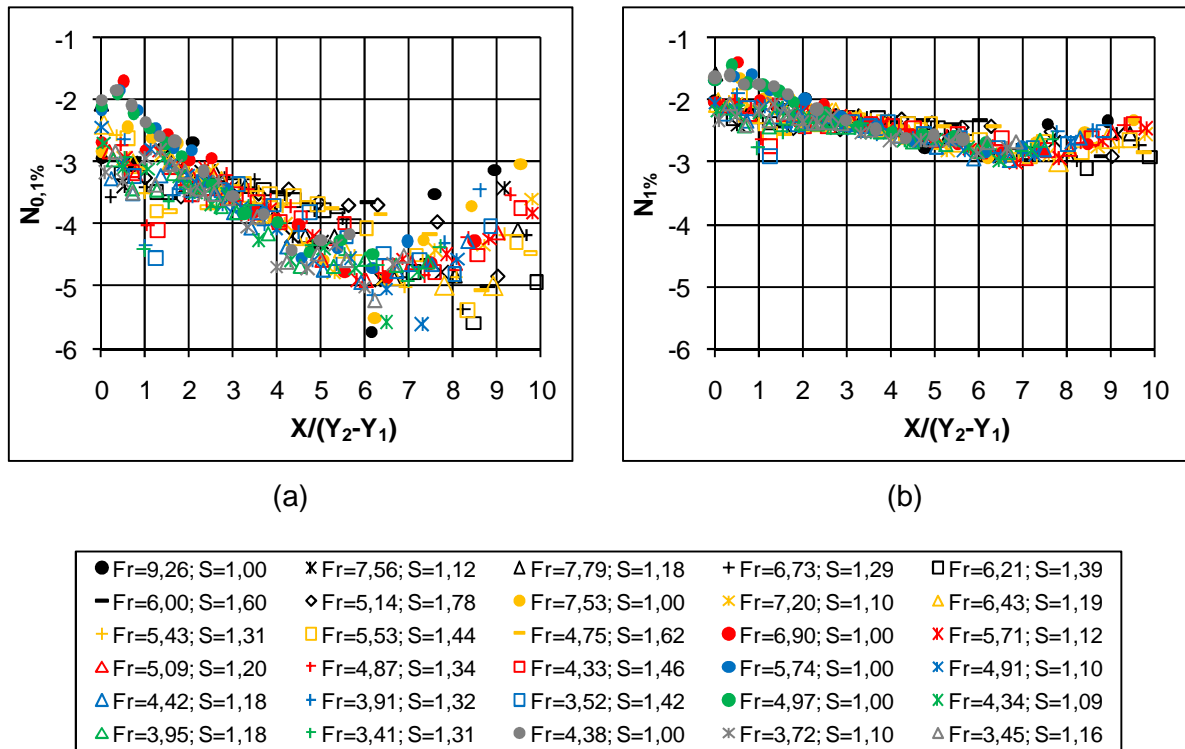


Figura 43 – Coeficiente estatístico do ressalto hidráulico tipos A e B: a) probabilidade de não excedência de 0,1% e b) probabilidade de não excedência de 1%.

Cabe salientar que esse comportamento distinto manifesta-se de forma significativa apenas nas pressões extremas com probabilidades de não excedência de 0,1% e 99,9%, reduzindo seu efeito rapidamente para as demais probabilidades.

No Anexo D estão apresentados os coeficientes de distribuição estatística das amostras com probabilidades de não excedência de 0,1%, 1%, 5%, 10%, 90%, 95%, 99% e 99,9%.

Individualizando a análise, agora, para as condições de ressalto hidráulico afogado contempladas neste estudo, apresenta-se a Figura 44, na qual estão inseridos os ajustes efetuados por Wiest (2008) (considerando ressaltos hidráulicos tipo B a jusante de vertedouros) e Trierweiller (2006) (considerando ressaltos hidráulicos submergidos a jusante de descargas de fundo).

Pela análise da Figura 44 percebe-se que a proposta de Wiest (2008), que admite que o coeficiente N assume valor constante para cada uma das probabilidades, concorda com os dados deste estudo para probabilidades compreendidas entre 5% e 95%. Para as pressões extremas, tanto máximas quanto mínimas, a proposição do autor não se configura como o melhor ajuste.

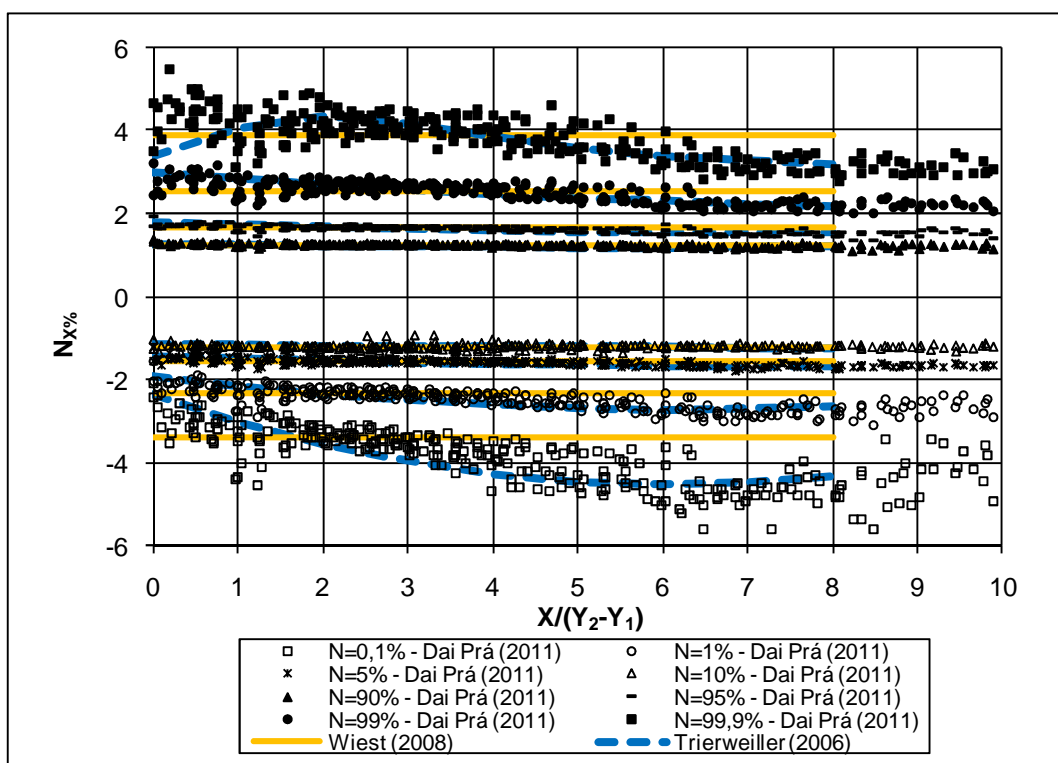


Figura 44 – Coeficiente estatístico do ressalto hidráulico afogado (tipo B) para probabilidades extremas de não excedência.

Por outro lado, e ainda que os estudos de Trierweiller (2006) tenham sido conduzidos para ressaltos submergidos a jusante de comporta descarregadora de fundo, os seus ajustes mostraram-se mais consistentes com os dados experimentais aqui apresentados. Cabe apenas observar que o coeficiente N nas posições iniciais do ressalto hidráulico assume comportamento distinto, apresentando-se menor para as menores probabilidades, e maior para as maiores probabilidades.

Novamente remete-se à curva de concordância vertical essa distorção verificada nas probabilidades de 0,1% e 99,9%, a qual confere ao coeficiente estatístico (N) uma forma decrescente em direção ao final do ressalto hidráulico.

4.11 Análise de Frequências

A apresentação e validação dos dados experimentais serão concluídas a partir de investigação das flutuações de pressão do ressalto hidráulico livre e afogado quanto à resposta do fenômeno em termos de frequências. Busca-se, com essa análise, a identificação de frequências dominantes ao redor da qual se concentra a máxima energia de flutuação de pressão.

A determinação analítica das frequências dominantes foi conduzida pela determinação das funções de densidade espectral das amostras de pressão coletadas junto ao fundo da bacia de dissipação. Para tanto foram utilizados pacotes estatísticos do software MATLAB, notadamente o SPTOOL pelo método de WELCH.

A Figura 45 apresenta a função de densidade espectral das tomadas de pressão ao longo da bacia de dissipação, lembrando que $\Gamma = X/(Y_2 - Y_1)$.

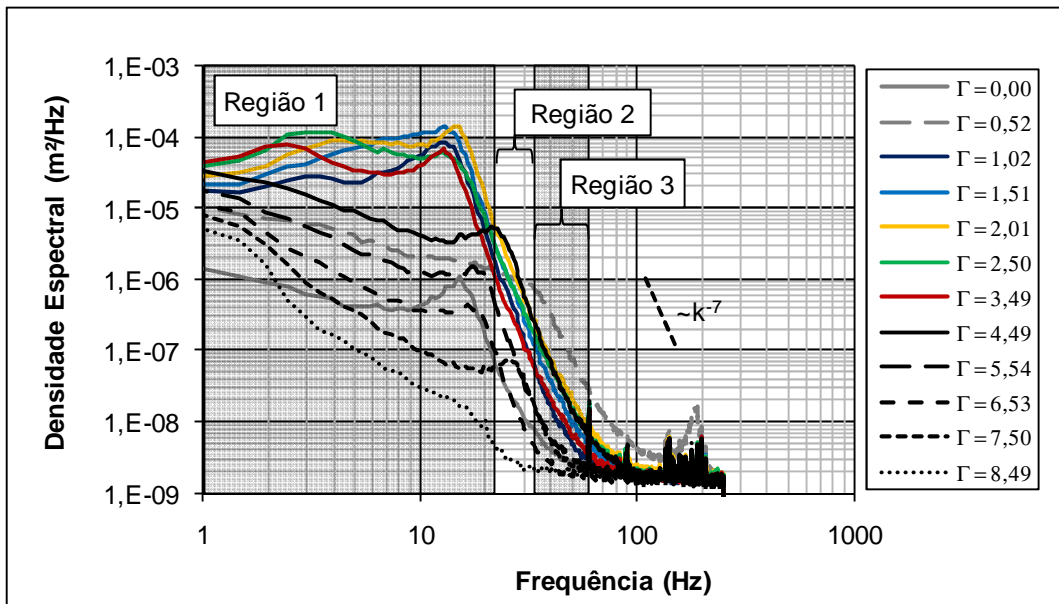


Figura 45 – Função de densidade espectral ao longo da bacia de dissipação – Ressonância Hidráulico tipo A - $Fr_1 = 6,90$

Pela análise da Figura 45 pode-se identificar claramente que a máxima energia da flutuação de pressão situa-se entre as posições adimensionais 1 e 2 (região de maior flutuação de pressão), com frequências dominantes da ordem de 12Hz. Para posições mais a jusante, até por volta da posição adimensional 4 (ponto de descolamento), as frequências dominantes passam a apresentar também um pico da ordem de 2 a 4Hz. A partir da posição adimensional 4 não se identificam mais picos de frequências. Conclui-se, com isso, que a energia das flutuações de pressão está concentrada fundamentalmente entre as posições adimensionais $\Gamma = 1,0$ e $\Gamma = 3,5$.

Avaliando a curva de densidade espectral da Figura 45 é possível visualizar um comportamento esperado na análise da produção e decaimento de energia da turbulência, quando considerada homogênea e isotrópica, com o aumento da frequência, desde as maiores estruturas até as menores e de acordo com o processo denominado Cascata de Energia de Kolmogorov.

Neste caso particular, entre as posições adimensionais $\Gamma = 1,0$ e $\Gamma = 3,5$, estão identificadas três regiões distintas na Figura 45:

- a) Região 1 (frequências inferiores a 12Hz) – equivalente à Região dos Grandes Vórtices, que possuem dimensão da ordem de grandeza do escoamento médio.
- b) Região 2 (entre as frequências 12 e 14Hz) – que pode ser associada à concentração da máxima energia do escoamento turbulento; e
- c) Região 3 (frequências entre 14Hz e 60Hz) – que pode ser associada à dissipação de energia do escoamento, denominada por Kolmogorov como Região de Equilíbrio Universal.

No que tange, especificamente, à Região 3, identifica-se comportamento análogo ao esperado durante o processo de dissipação viscosa da energia do escoamento, a partir da proposta de Heisenberg²⁸ (1948) *apud* Moller e Silvestrini (2004) que prevê o decaimento da energia contida nas estruturas segundo uma lei de potência em torno de k^{-7} , sendo k o número de onda definido como $k_i = 2 \pi f / u_i$.

²⁸ HEISENBERG, W., 1948. Zur statistischen Theorie der Turbulenz, Zeitschrift für Physik, vol. 124, 628.

Uma vez estabelecidas as frequências dominantes em cada condição de ensaio, adimensionalizou-se as mesmas a partir do número de Strouhal, tendo como parâmetro as condições de entrada do ressalto hidráulico, conforme Equação 43.

$$St = \frac{f Y_1}{V_1}$$

Equação 43

Avaliando-se inicialmente as condições de ressalto hidráulico tipo A, e comparando os dados deste estudo com aqueles apresentados por Lopardo (1986), obtém-se a Figura 46.

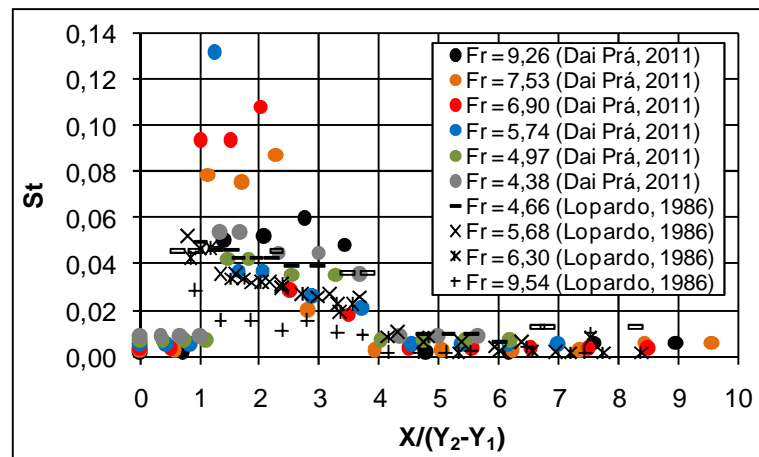


Figura 46 – Comparação das frequências dominantes do ressalto hidráulico tipo A.

Pela análise da Figura 46, avaliando apenas os dados deste estudo, não fica clara a afirmação de Lopardo (1986) quanto à relação de diminuição do número de Strouhal com o aumento do número de Froude na seção de ingresso do ressalto hidráulico. Contudo, percebe-se claramente, e agora, concordando com o referido autor que a partir da posição adimensional 4 ocorre uma queda brusca do número de Strouhal, estabelecendo que a jusante dessa posição, conforme a avaliação dos coeficientes de assimetria já vinham indicando, ocorre uma alteração na estrutura do ressalto hidráulico.

Fica evidente, também, que nas posições iniciais do ressalto hidráulico, as frequências dominantes são bastante baixas, ocasionando pequenos valores dos números de Strouhal. Isso faz com que as frequências dominantes do ressalto

possam ser associadas com a profundidade total do escoamento (Y) em cada posição, conforme apresentado na Figura 47.

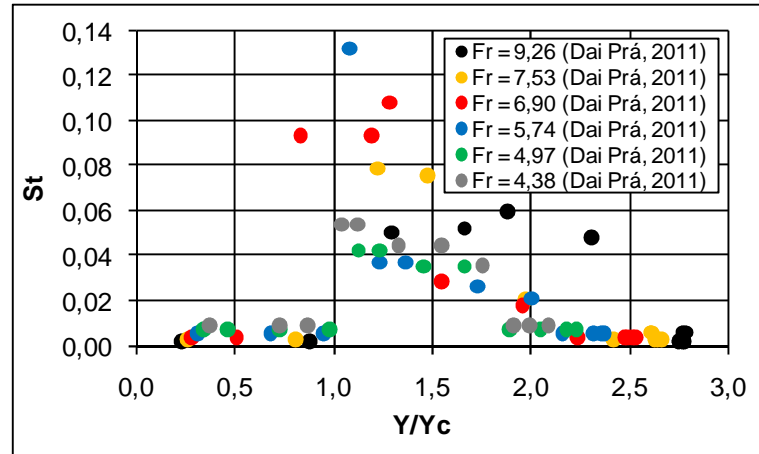


Figura 47 – Avaliação das frequências dominantes do ressalto hidráulico tipo A com a profundidade do escoamento

Avaliando-se a Figura 47, percebe-se que enquanto a profundidade do ressalto hidráulico não atinge uma altura equivalente à altura crítica do escoamento, as frequências se mantêm baixas, representando pequenos números de Strouhal. Imediatamente a jusante, as máximas frequências são detectadas, evidenciando uma zona de forte instabilidade no que tange às pressões atuantes. A partir daí as oscilações periódicas passam a diminuir gradativamente até que a profundidade do ressalto hidráulico seja equivalente a duas vezes a altura crítica do escoamento, quando as frequências voltam a patamares diminutos.

Avalia-se, por fim, a resposta em frequência dos ressaltos hidráulicos afogados obtidos pelo presente autor avaliados ao longo da bacia de dissipação, conforme Figura 48. Não foram aqui consideradas as frequências dominantes localizadas na curva de concordância vertical.

Percebe-se pela análise da Figura 47, que os números de Strouhal estabelecidos a partir das frequências dominantes do ressalto hidráulico comportam-se de forma semelhante e independente do grau de afogamento, a partir de valores máximos em torno das posições adimensionais 1 e 2, decrescendo rapidamente até a posição adimensional 4, onde a energia das flutuações de pressão não mais se manifestam para frequências de maior magnitude.

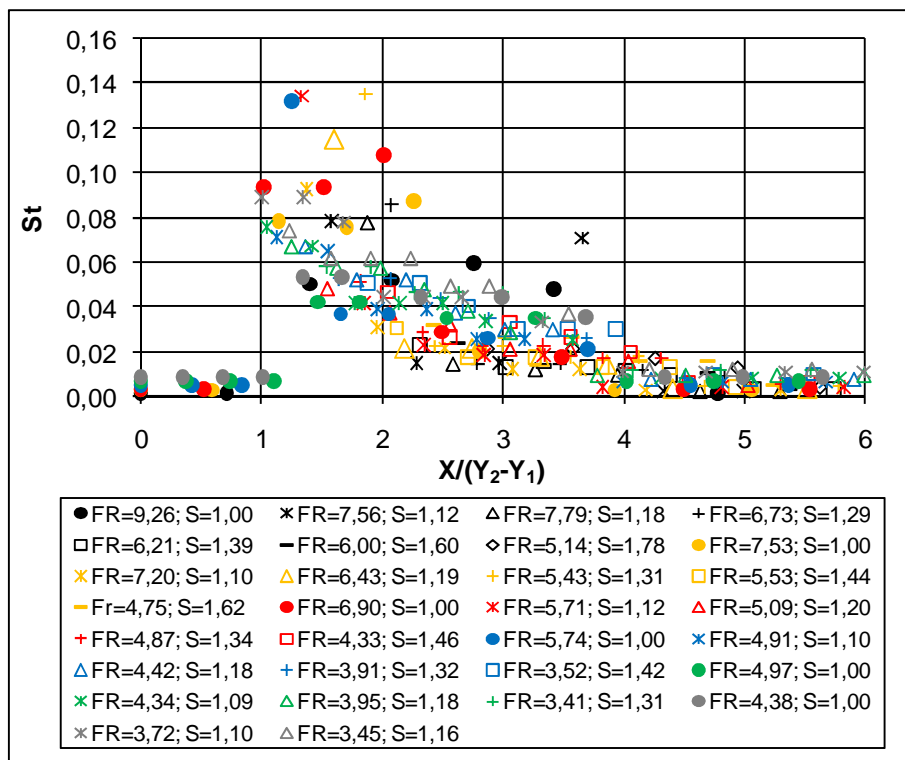


Figura 48 – Comparação das frequências dominantes em ressaltos hidráulicos tipos A e B

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No capítulo anterior conduziu-se análise comparativa crítica acerca dos dados experimentais obtidos neste estudo e dos aspectos metodológicos utilizados para a obtenção desses dados.

As características externas dos ressaltos hidráulicos tipos A e B foram avaliadas na ótica das alturas conjugadas, do comportamento dos níveis médios da superfície livre d'água, dos comprimentos característicos do rolo e do ressalto. As características internas também foram analisadas, notadamente aquelas relacionadas com as pressões atuantes junto ao fundo da bacia de dissipação, tanto em termos médios quanto flutuantes e extremos, e com ênfase na interpretação estatística dos resultados experimentais.

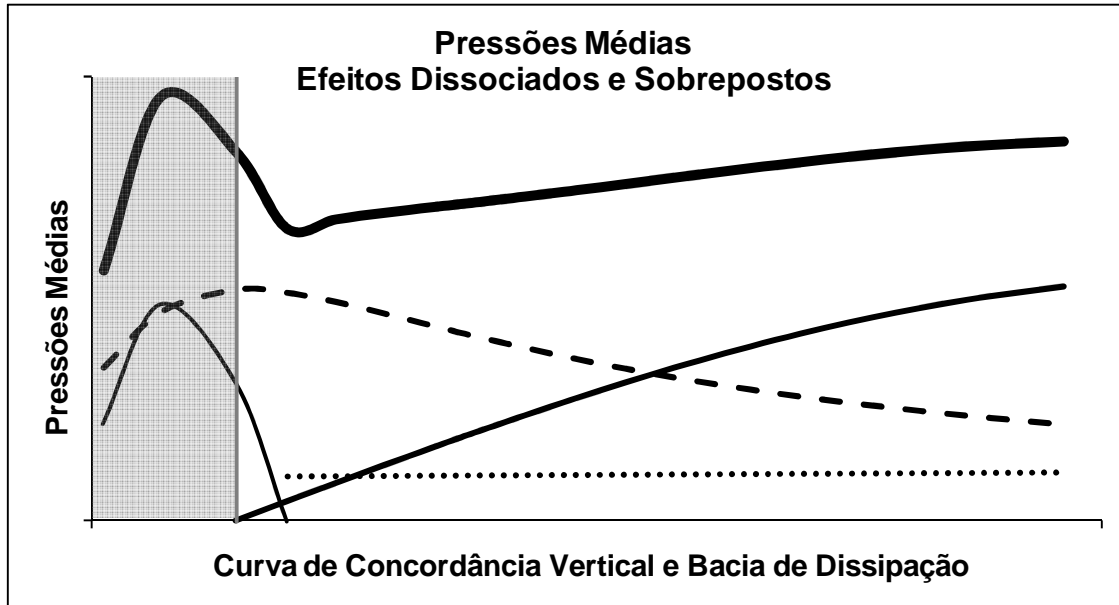
A partir deste ponto, então, será apresentada a análise da macroturbulência do ressalto hidráulico através da identificação e previsão das características médias, flutuantes e extremas de pressões junto ao piso de uma bacia de dissipação. Tal análise será conduzida por uma abordagem que considera o ressalto hidráulico como uma sobreposição de efeitos hidráulicos avaliados individualmente a partir de distintas condições de escoamento.

Os efeitos hidráulicos globais presentes no ressalto hidráulico tipos A e B serão dissociados, visando identificar padrões de comportamentos distintos do escoamento, a partir de quatro etapas:

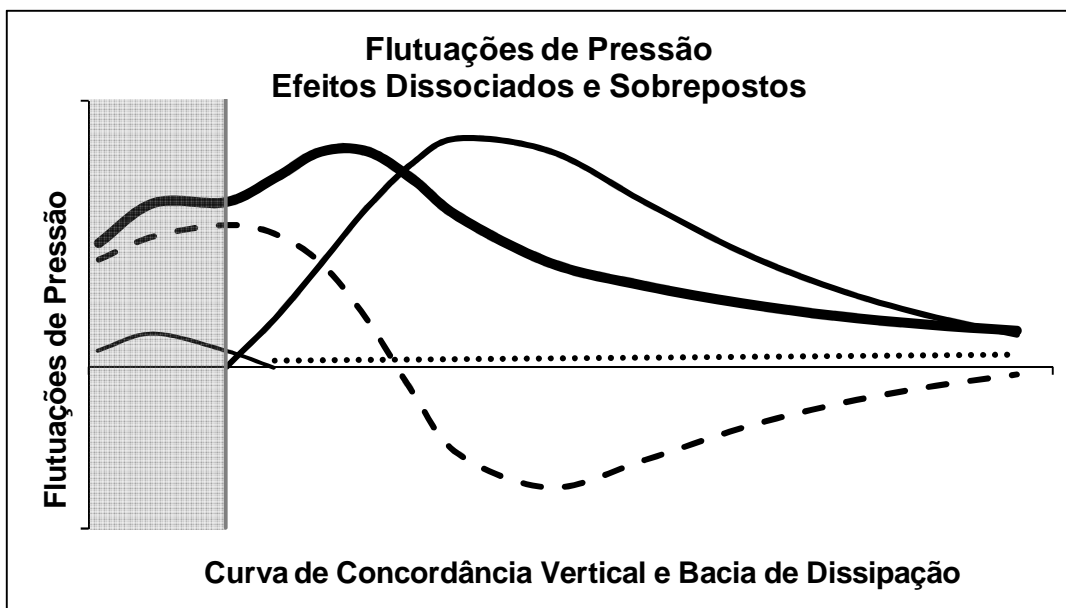
- i) A identificação da região de influência da curva de concordância vertical entre o perfil vertente e a bacia de dissipação.
- ii) A identificação das características hidráulicas do escoamento livre ao longo da bacia de dissipação e da curva de concordância vertical.
- iii) A individualização dos esforços de pressão induzidos exclusivamente pelo ressalto hidráulico livre (Tipo A).
- iv) A individualização dos esforços de pressão induzidos exclusivamente pelo afogamento do ressalto hidráulico.

A dissociação dos efeitos hidráulicos culmina com uma metodologia de previsão de valores médios e flutuantes de pressões junto ao fundo de bacias de

dissipação, conforme ilustrado pela Figura 49a – pressões médias – e pela Figura 49b – flutuações de pressão.



(a)



(b)

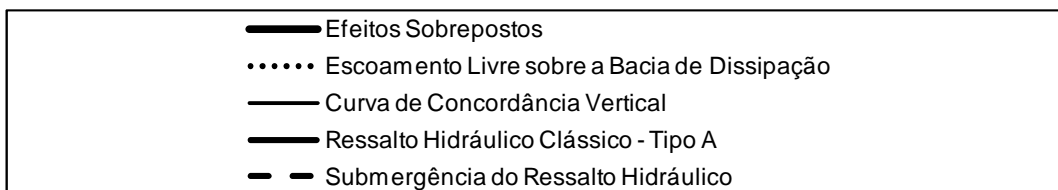


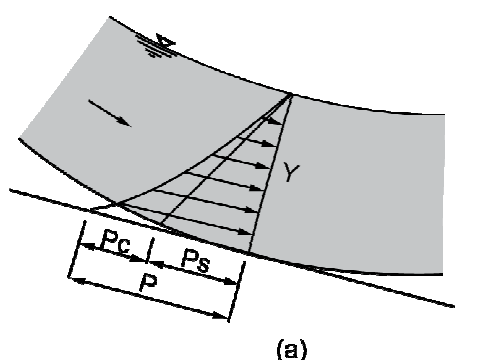
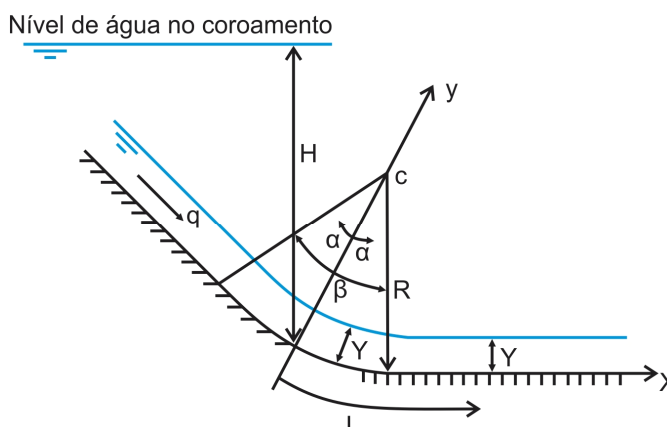
Figura 49 – Dissociação e sobreposição de efeitos: a) pressões médias e b) flutuações de pressão

Este capítulo se encerra, então, com o estabelecimento dos coeficientes estatísticos de distribuição de probabilidades ($N_{x\%}$) representativos das pressões extremas identificadas experimentalmente. Assim conclui-se, a partir da proposta de Marques *et. al* (1996), o processo de previsão de esforços extremos em bacias de dissipação submetidas a ressaltos hidráulicos tipos A e B a jusante de vertedouros, para as condições hidráulicas que compõem o escopo deste trabalho.

5.1 Escoamento ao Longo da Curva de Concordância Vertical e Respectiva Região de Influência

Para avaliar os efeitos da curva de concordância sobre o escoamento livre é preciso estabelecer a região de influência, ou comprimento ao longo da bacia de dissipação, sobre o qual o escoamento tem as suas características hidráulicas distintas daquelas esperadas em um escoamento em regime rápido ao longo de um canal.

A simbologia utilizada segue de acordo com a Figura 18 e com a Figura 19, aqui rerepresentada.

 <p>(a)</p>	
<p>Figura 18 – Distribuição de pressões em curvas côncavas e convexas, adaptado de Baptista e Lara (2002).</p>	<p>Figura 19 – Parâmetros utilizados por LinFu e Jie (1985) na avaliação de escoamentos em curvas de concordância vertical.</p>

5.1.1 AVALIAÇÃO DAS PRESSÕES MÉDIAS

A avaliação da região de influência da curva de concordância será efetuada a partir da proposta de LinFu e Jie (1985), e como etapa inicial serão estabelecidos os coeficientes de pressões médias máximas (C_{pCM}) devidos à aceleração centrífuga, que se manifestam no ponto central da curva de concordância vertical.

Observou-se no item 4.6.1 que as pressões atuantes no centro da curva de concordância não se ajustam adequadamente à proposta dos autores dada as condições do escoamento a montante do perfil Creager. Isso posto, propõe-se aqui a inclusão de um fator de correção (α_{CM}) na proposta de LinFu e Jie (1985) adaptando-a para a determinação das pressões médias máximas no centro da soleira curva devido à aceleração centrífuga, de acordo com a Equação 44.

$$C_{p_{CM}} = 1 - \alpha_{CM} \left(\frac{R - Y}{R} \right)^2 \quad \text{Equação 44}$$

$$C_{p_{CM}} = \frac{P_{CM}/\gamma}{H - Y} \quad \text{Equação 40}$$

Onde:

P_{CM} = valor da máxima pressão devida à força centrífuga.

A Figura 50 apresenta graficamente a adaptação proposta, para $\alpha_{CM} = 0,95$, mostrando que um decréscimo de 5% no termo que relaciona a lâmina d'água com o raio da curva de concordância vertical, adapta de forma consistente a proposta de LinFu e Jie (1985), incluindo na mesma os efeitos advindos da região a montante da curva de concordância vertical.

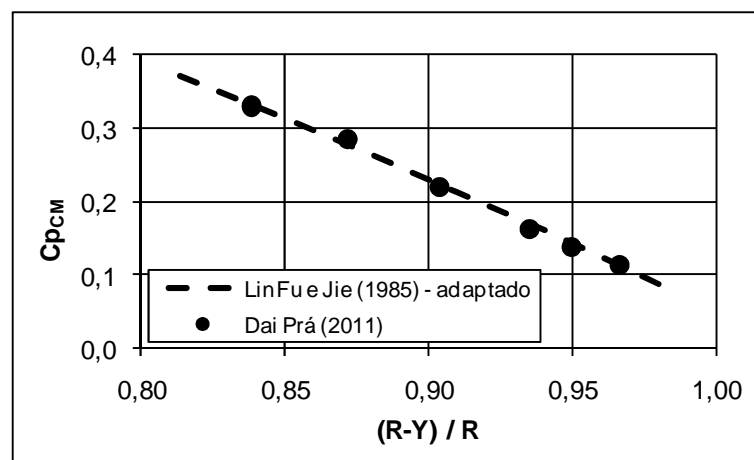


Figura 50 – Adaptação da proposta de LinFu e Jie (1985) para a determinação das pressões médias máximas na curva de concordância vertical devida aos efeitos da força centrífuga.

Uma vez estabelecido o valor da pressão média máxima na curva de concordância vertical, pode-se avaliar a distância, tomada a partir do centro da curva, ao longo da qual os efeitos dessa concordância se propagam.

Para avaliar o comprimento de influência da curva de concordância sobre o escoamento livre, do ponto de vista das pressões médias atuantes, conduziu-se a adimensionalização proposta por LinFu e Jie (1985), correlacionando os coeficientes de pressões médias máximas (C_{pCM}) devidos à força centrífuga e os coeficientes de pressões médias (C_{pC}) igualmente advindos da força centrífuga.

A Figura 51 apresenta os resultados experimentais avaliados ao longo do comprimento longitudinal (L), tendo como posição inicial o centro da curva de concordância vertical, adimensionalizado pela energia cinética do escoamento imediatamente no início da bacia de dissipação.

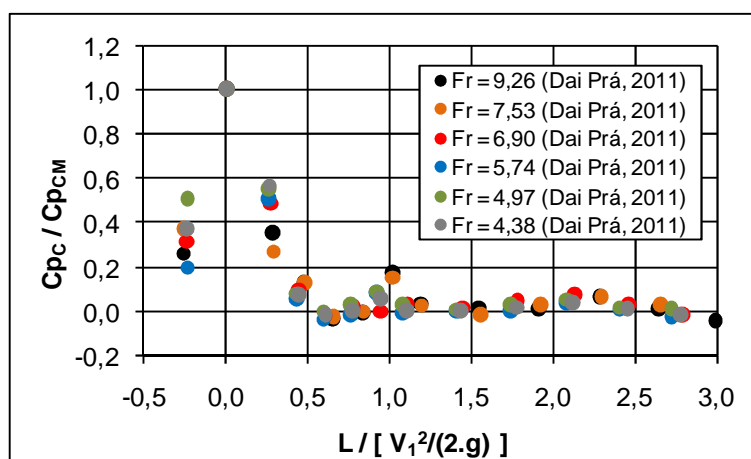


Figura 51 – Comprimento de influência da curva de concordância nas pressões médias

Observa-se pela análise da Figura 51 que os dados adimensionalizados apresentam um crescimento até um valor máximo no centro da curva de concordância, decrescendo ao longo da curva até a posição adimensional 0,5 a partir da qual os valores estabilizam-se em torno de zero. Admite-se, com isso, que a influência da curva de concordância no que diz respeito às pressões médias atuantes se faz presente até a distância equivalente a 50% da energia cinética do escoamento verificado no início da bacia de dissipação.

A partir da Figura 51 é possível extrair o comprimento de influência da curva de concordância vertical (L_c), para as avaliações experimentais deste estudo e

comparar esses resultados com a proposta de LinFu e Jie (1985), conforme apresentado na Figura 52.

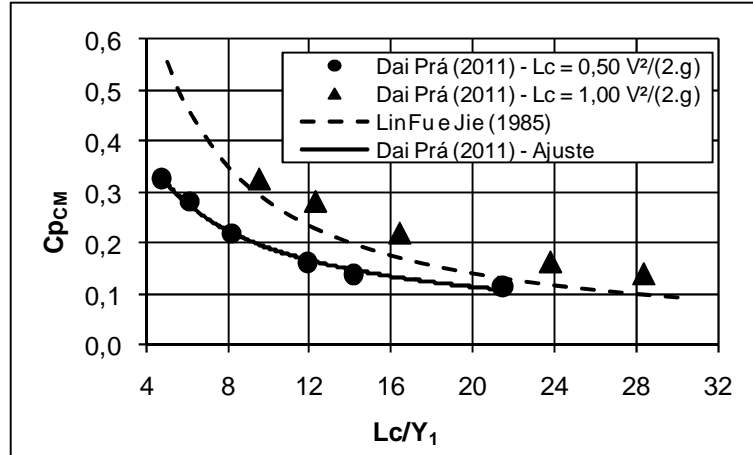


Figura 52 – Comprimento de influência da curva de concordância nas pressões médias

Pela avaliação da Figura 52 percebe-se que o critério estabelecido por LinFu e Jie (1985) admite que os efeitos devidos à curva de concordância vertical se propagam mais a jusante do que o detectado neste estudo, tendo como envoltórias aqueles valores compreendidos entre 50% e 100% da energia cinética do escoamento.

Este trabalho propõe, então, a Equação 45 ($R^2=0,98$) como representativa do comprimento de influência da curva de concordância ao longo da bacia de dissipação a partir do coeficiente de pressão média máxima identificado no ponto central desta curva e provocada pela força centrífuga.

$$Cp_{CM} = 1,05 \left(\frac{Y_1}{Lc} \right)^{-0,743} \quad \text{Equação 45}$$

$$Lc = 0,5 \frac{V_1^2}{2g} \quad \text{Equação 46}$$

A Equação 45 pode ser reescrita em função do número de Froude (Fr_1) do escoamento conforme Equação 47.

$$Cp_{CM} = 1,05 \left(\frac{Fr_1}{2} \right)^{1,486}$$

Equação 47

Uma vez avaliado o comprimento total de influência da curva de concordância vertical, faz-se necessário estabelecer a previsão das pressões médias ao longo dessa curva.

Para tal propõe-se a avaliação adimensional (Ψ_C) das pressões médias atuantes a partir do estabelecimento das pressões médias teóricas, composta por uma parcela hidrostática (P_s) e por um parcela devida à força centrífuga (P_c), adimensionalizadas pelas pressões médias detectadas experimentalmente (P_x), conforme Equação 48. A Figura 53 apresenta graficamente os resultados obtidos.

$$\Psi_C = \left(\frac{P_s + P_c}{P_x} \right)$$

Equação 48

Onde:

$$P_s = \gamma Y$$

Equação 49

$$P_c = \frac{\gamma Y}{R} \frac{V^2}{g}$$

Equação 50

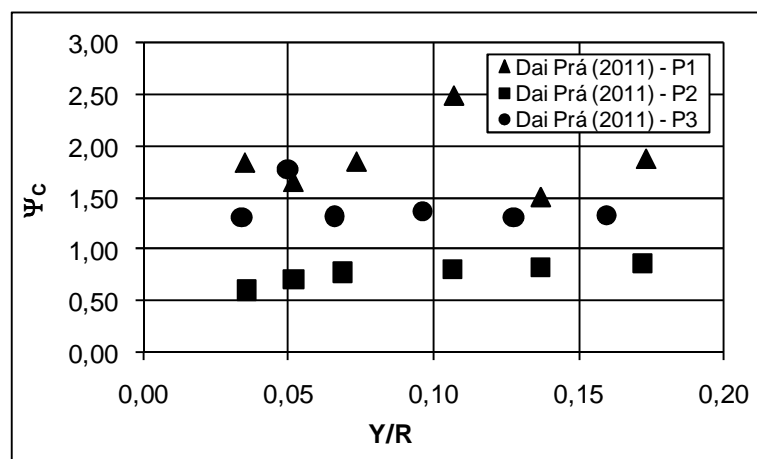


Figura 53 – Pressões médias atuantes na curva de concordância vertical.

Tendo em vista que essa avaliação adimensional proposta não conduziu ao agrupamento dos resultados experimentais, propõe-se a correção do mesmo a partir do fator de proporcionalidade (K_C) (Equação 51), o qual contempla uma parcela de correção da pressão hidrostática, função da posição longitudinal do ponto em análise (α), uma parcela de correção da pressão centrífuga, função do ângulo total da curva de concordância vertical (β) e o número de Froude do escoamento (Fr_1).

$$K_C = \frac{\cos(\alpha)}{Fr_1^2(1 + \sin(\beta))} \quad \text{Equação 51}$$

A Figura 54 ilustra os resultados obtidos com a adimensionalização proposta plotados frente à profundidade relativa do escoamento com relação ao raio de curvatura da curva de concordância vertical, mostrando que o fator de correção (K_C) incorporado na análise agrupa satisfatoriamente os resultados experimentais.

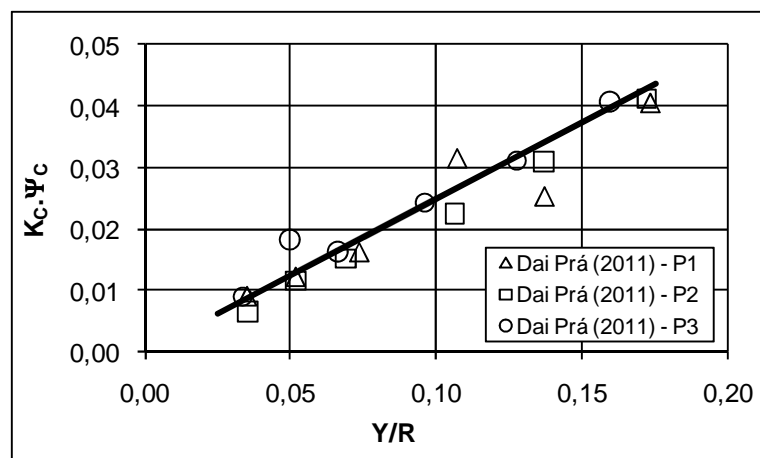


Figura 54 – Pressões médias atuantes na curva de concordância vertical corrigidas pelo fator K_C .

Este trabalho propõe, então, a Equação 52 ($R^2=0,935$) representativa das pressões médias atuantes ao longo da curva de concordância vertical.

$$K_C \Psi_C = \frac{1}{4} \frac{Y}{R} \quad \text{Equação 52}$$

5.1.2 AVALIAÇÃO DAS FLUTUAÇÕES DE PRESSÃO

No que tange à avaliação das flutuações de pressão, tanto ao longo da curva de concordância quanto ao longo da bacia de dissipação, cabe salientar, inicialmente, que as amplitudes médias das flutuações de pressão verificadas experimentalmente apresentaram valores bastante diminutos, da mesma ordem de grandeza da incerteza de medição dos transdutores de pressão utilizados neste estudo, com exceção dos resultados experimentais verificados no centro da curva de concordância, que assumem valores superiores.

Independente desse fato, ainda que de relevada importância, optou-se por conduzir a análise das flutuações de pressão devidas ao escoamento livre uma vez que, quando da utilização dos adimensionais propostos, se pode detectar comportamentos que induzam a alguma percepção quanto à influência da curva de concordância nas flutuações de pressão verificadas ao longo da bacia de dissipação.

Procede-se, então, a referida avaliação a partir da adimensionalização das flutuações de pressão de forma semelhante àquela apresentada por LinFu e Jie (1985) quando da análise das pressões médias. Salienta-se, contudo, que nesta análise, as flutuações estão sendo avaliadas de forma global, não conduzindo nenhum tipo de separação de efeitos como aqueles realizados na avaliação das pressões médias, quando as parcelas hidrostática e devida à força centrífuga foram consideradas separadamente.

A Equação 53 representa a razão entre a flutuação de pressão no ponto em análise e a energia disponível a montante.

$$C\sigma = \frac{\sigma/\gamma}{H - Y}$$

Equação 53

Onde:

$C\sigma$ = coeficiente de flutuação de pressão na curva de concordância vertical,

σ = amplitude média da flutuação de pressão no ponto em análise,

H = diferença de cota entre o nível do reservatório e a cota da estrutura de descarga no ponto considerado, e

Y = a profundidade do escoamento no ponto considerado.

A partir disso, os coeficientes de flutuação de pressão ($C\sigma$) são correlacionados pelo coeficiente de máxima flutuação de pressão identificada na curva de concordância ($C\sigma_M$).

Aqui, cabe ressaltar que as máximas flutuações de pressão foram identificadas no ponto central da curva, não concordando com as afirmações de LinFu e Jie (1985), que registram as flutuações máximas no ponto de tangência entre a curva de concordância e a bacia de dissipação. Neste estudo as flutuações de pressão registradas no ponto de tangência representam, em termos médios absolutos, metade daquelas flutuações identificadas no ponto central da curva.

A Figura 55 apresenta, então, a razão entre os coeficientes de flutuação de pressão avaliados ao longo do comprimento longitudinal (L), tendo como posição inicial o centro da curva de concordância vertical, adimensionalizado pela energia cinética do escoamento imediatamente no início da bacia de dissipação.

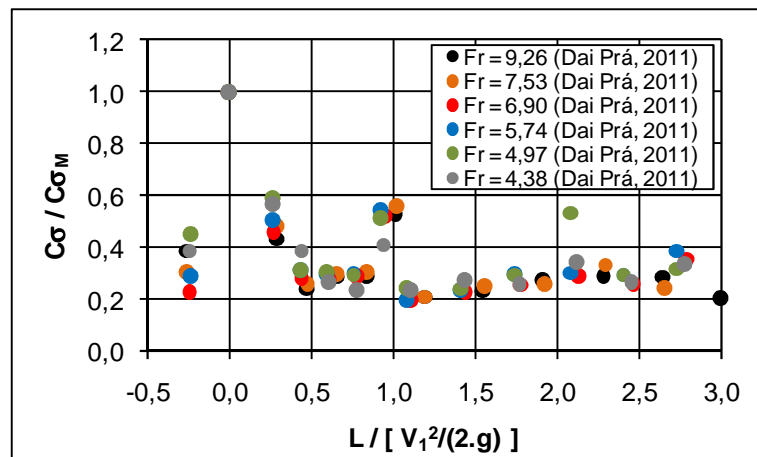


Figura 55 – Comprimento da influência da curva de concordância nas flutuações de pressão

Pela análise da Figura 55, observa-se um crescimento até o ponto central da curva de concordância a partir do qual a sua influência passa a decrescer até a posição adimensional 0,5. A partir desse ponto, as flutuações de pressão identificadas junto ao fundo estabilizam-se em torno do valor correspondente a 30% das flutuações máximas verificadas no centro da curva de concordância.

Novamente, conforme apresentado na avaliação das pressões médias, a influência da curva se faz presente até a distância equivalente a 50% da energia

cinética disponível no início da bacia de dissipação, confirmando o critério adotado anteriormente, apresentado na Equação 47.

A avaliação individualizada do comportamento das flutuações de pressão nas três tomadas de pressão localizadas na curva vertical fica comprometida, especialmente nas seções tangentes, tendo em vista que os valores detectados (da ordem de 1 a 3mm.c.a.) encontram-se dentro da faixa de erro dos transdutores de pressão utilizados nas medições experimentais.

Por outro lado, as flutuações de pressão no ponto central da curva de concordância vertical, e, portanto, as máximas flutuações de pressão, ainda que de pequeno valor absoluto (da ordem de 6mm.c.a.), mostraram relação bastante consistente na comparação com a energia cinética do escoamento na saída da curva de concordância.

Na Figura 56 estão apresentados os coeficientes de pressão máxima (Equação 54) detectados experimentalmente.

$$C_{Pm\acute{a}x} = \frac{\sigma_{Cm\acute{a}x}/\gamma}{V_1^2/(2g)} \quad \text{Equação 54}$$

Onde:

$C_{Pm\acute{a}x}$ = coeficiente de pressão máximo,

$\sigma_{Cm\acute{a}x}$ = amplitude máxima da flutuação de pressão, e

V_1 = velocidade na seção terminal da curva de concordância vertical.

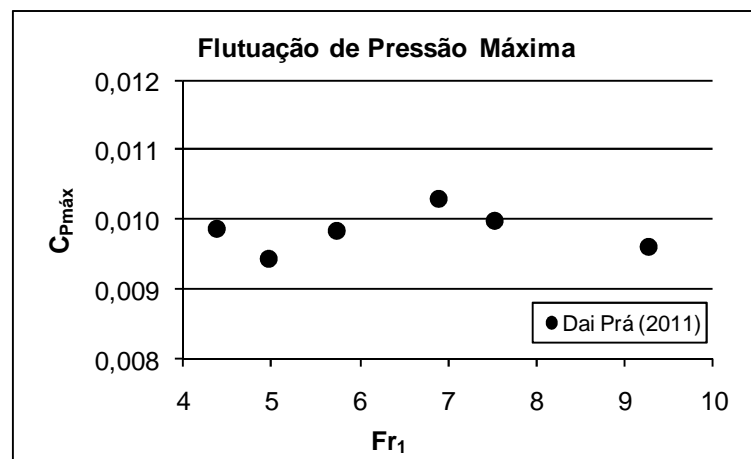


Figura 56 – Flutuação de pressão no ponto de central da curva de concordância

Pela avaliação da Figura 56, percebe-se que o máximo coeficiente de pressão verificado no ponto central da curva de concordância é da ordem de 1% da energia cinética na seção terminal da curva, conforme Equação 55, quando $\varepsilon = 0,01$.

$$\frac{\sigma_{Cm\acute{a}x}}{\gamma} = \varepsilon \frac{V_1^2}{2g} \quad \text{Equação 55}$$

Segundo LinFu e Jie (1985), $\varepsilon < 0,10$, para as flutuações máximas de pressão que são verificadas na tangente de jusante de curvas de concordância verticais. Os mesmos autores afirmam que em paredes lisas e sem descolamento de fluxo, as flutuações de pressão são da ordem de 5% da energia cinética ($\varepsilon = 0,05$) do escoamento.

Observa-se, com isso, que as máximas flutuações de pressão verificadas neste estudo (no ponto central da curva), se por um lado concordam com os referidos autores por serem inferiores a 10% da energia cinética, por outro, apresentam valores bastante inferiores àqueles previstos por LinFu e Jie (1985), da ordem de 5% no extremo de jusante da curva.

Cabe salientar, por fim, que as flutuações de pressão detectadas neste estudo no extremo de jusante da curva de concordância vertical apresentou valores em média equivalentes à 0,5% da energia cinética do escoamento.

Com a realização da análise da região de influência da curva de concordância vertical sobre as pressões médias e flutuantes ao longo da bacia de dissipação, conclui-se a primeira etapa, dentre as quatro que este estudo se propõe a investigar individualmente, visando à descrição dos efeitos de pressão devidas ao ressalto hidráulico afogado (tipo B) sobre uma bacia de dissipação.

5.2 Escoamento Livre ao Longo da Bacia de Dissipação

No presente tópico será apresentada a avaliação do escoamento livre ao longo da bacia de dissipação, após o final da influência da curva de concordância vertical, conforme apresentado no item 5.1. Serão conduzidas, então, análises acerca das pressões médias e flutuantes devidas ao escoamento em regime rápido.

5.2.1 AVALIAÇÃO DAS PRESSÕES MÉDIAS

A caracterização do escoamento livre ao longo da bacia de dissipação consiste em avaliar o escoamento gradualmente variado em regime rápido ao longo de um plano horizontal, a partir da análise da curva de remanso determinada a partir das profundidades médias do escoamento adquiridas experimentalmente.

Foram consideradas, nessa avaliação, duas seções de controle: a seção de montante, onde foi tomada a profundidade média do escoamento imediatamente a jusante da curva de concordância vertical entre o perfil vertente e a bacia de dissipação, e a seção de jusante considerada aquela seção transversal na distância longitudinal para a qual ocorreria o final do ressalto hidráulico tipo A, caso as condições de jusante fossem adequadas para o seu estabelecimento.

Conduzindo a análise da linha d'água pelo cálculo do remanso, tendo como condição de contorno a linha d'água média da superfície do escoamento, obtiveram-se os coeficientes de rugosidade de Manning para todas as vazões ensaiadas.

A partir da Figura 57, estima-se um coeficiente médio de rugosidade representativo das condições do contorno sólido do modelo físico da ordem de 0,0092. Salienta-se que a laje de fundo representativa da bacia de dissipação do modelo físico foi executada pela oficina de modelagem do LAHE/FURNAS, a partir de uma mistura de cimento e gesso com posterior processo de tratamento superficial, com a utilização de lixas de distintas granulometrias, visando imprimir à superfície a menor rugosidade absoluta possível.

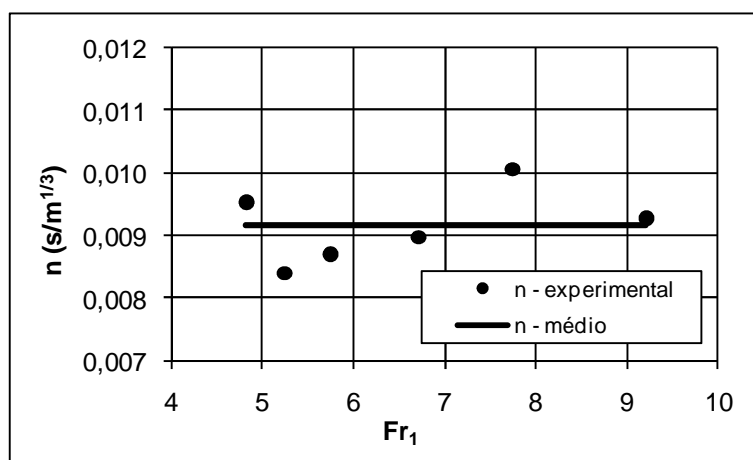


Figura 57 – Valores experimentais do coeficiente “n” de Manning

Se, por outro lado, forem tomados os níveis d'água médios do escoamento livre obtidos experimentalmente, admitindo que em cada ponto as pressões são puramente hidrostáticas, tendo em vista que a alteração da altura d'água de seção a seção é suave e, portanto, a curvatura das linhas de corrente podem ser assumidas como paralelas, obtêm-se os resultados da Figura 58, os quais são representativos das pressões médias atuantes ao longo da bacia de dissipação.

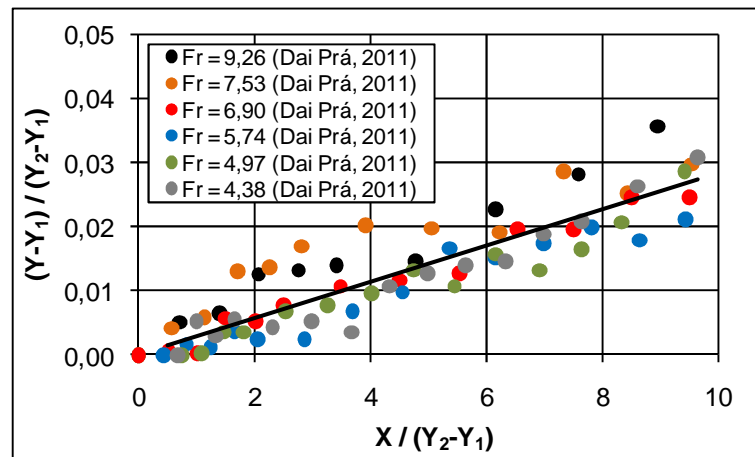


Figura 58 – Níveis d'água médios adimensionalizados adaptado da proposta de Marques *et al.* (1996)

Nessa figura, propôs-se a utilização dos parâmetros adimensionais estabelecidos por Marques *et al.* (1996) para as pressões médias (adaptado aqui para níveis médios da superfície livre d'água) ao longo do ressalto hidráulico tipo A, com o único objetivo de uniformizar a apresentação dos dados, visando, posteriormente, a sua aplicação imediata no método proposto neste trabalho que pressupõe a superposição de efeitos avaliados individualmente.

Observa-se que os dados distribuem-se em torno de uma linha de tendência linear, independente do número de Froude verificado na seção de montante, conforme Equação 56 ($R^2=0,79$).

$$\frac{Y - Y_1}{Y_2 - Y_1} = 0,0028 \left(\frac{X}{Y_2 - Y_1} \right)$$

Equação 56

A comparação entre as pressões médias detectadas experimentalmente junto ao fundo da bacia de dissipação submetida ao escoamento livre e os nível médios da superfície livre d'água está apresentada na Figura 59, na forma adimensionalizada, conforme descrito anteriormente.

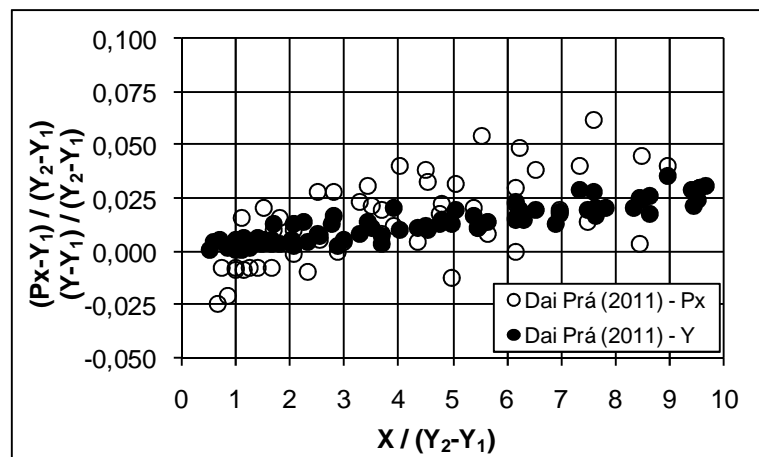


Figura 59 – Comparação adimensional entre as pressões médias e as profundidades do escoamento verificadas ao longo da bacia de dissipação, adaptado da proposta de Marques *et al.* (1996)

Pela análise da Figura 59, fica claro que os dados de pressões médias (P_x) apresentam-se bem mais dispersos que aqueles relativos à altura d'água em cada seção (Y), apesar de ambos apresentarem a mesma tendência crescente ao longo da bacia de dissipação. Essa maior dispersão pode ser atribuída às perturbações normais ao escoamento em regime rápido e à consideração – válida – de que as pressões no escoamento em regime gradualmente variado podem ser assumidas como hidrostáticas.

A partir das avaliações conduzidas neste item 5.2.1 é possível estimar as pressões médias devidas ao escoamento em regime rápido junto ao piso da bacia de dissipação, tanto através da Equação 56 quanto pelo cálculo do remanso a partir do coeficiente “n” de Manning médio.

5.2.2 AVALIAÇÃO DAS FLUTUAÇÕES DE PRESSÃO

Com a identificação do final da influência da curva vertical de concordância entre o perfil vertente e a bacia de dissipação, apresentado no item 5.1.2, obtém-se um trecho no qual se admite que as flutuações de pressão assumem comportamento semelhante àquele verificado no escoamento em regime rápido.

Conduziu-se, então, a avaliação das flutuações de pressão ao longo do escoamento, novamente de acordo com os adimensionais propostos por Marques *et al.* (1996), com os mesmos objetivos de uniformizar a apresentação dos dados, especialmente no eixo das abscissas, visando, posteriormente, a sua aplicação imediata no método da superposição de efeitos proposta neste estudo.

Para tanto, na elaboração da Figura 60, foram utilizados os valores experimentais de perda de carga no ressalto hidráulico tipo A (Ht) e as alturas conjugadas (Y_2 e Y_1), ainda que no escoamento livre, sem a ocorrência do ressalto hidráulico, tais características não sejam relevantes.

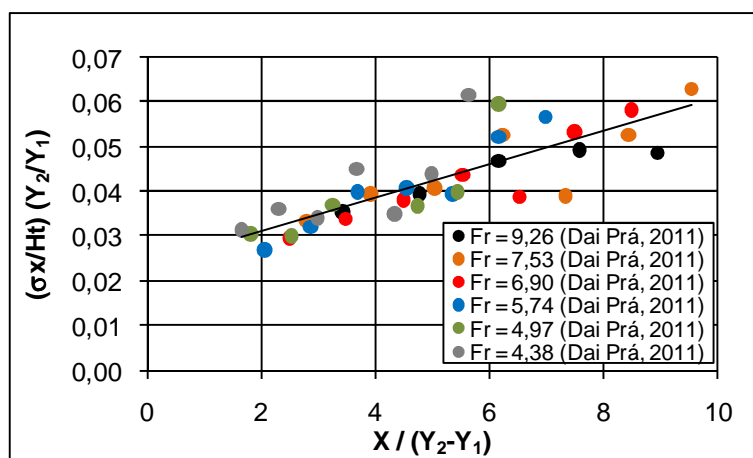


Figura 60 – Comportamento das flutuações de pressão identificadas ao longo da bacia de dissipação, longe da região de influência da curva de concordância vertical

A partir da análise da Figura 60, admite-se que o comportamento das flutuações de pressão possa ser representado pela Equação 57. Assume-se, ainda, que tal comportamento pode ser extrapolado para montante, na região de influência da curva vertical, onde não é possível adquirir experimentalmente valores livres desta influência.

$$\left(\frac{\sigma_X}{Ht}\right)\left(\frac{Y_2}{Y_1}\right) = 0,0038 \left(\frac{X}{Y_2 - Y_1}\right) + 0,0233$$

Equação 57

Conduzindo, agora, a avaliação da amplitude média das flutuações de pressão ao longo da bacia de dissipação sobre a qual ocorre escoamento em regime rápido (a jusante da região de influência da curva de concordância), identifica-se pela Figura 61 a tendência crescente no comportamento do coeficiente de pressão tradicional (C_p) com a magnitude dos mesmos, não ultrapassando a 0,5% ($\varepsilon=0,005$) da energia cinética do escoamento imediatamente a jusante da curva de concordância vertical, para os pontos de medição deste estudo.

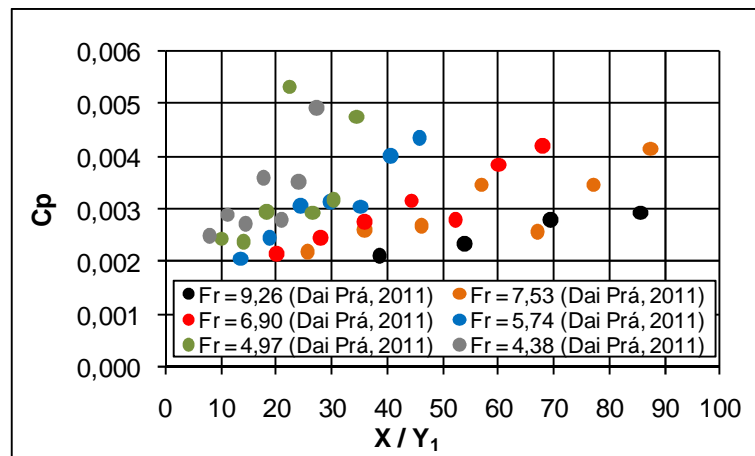


Figura 61 – Comportamento dos coeficientes de pressão (C_p) identificadas ao longo da bacia de dissipação, longe da região de influência da curva de concordância vertical

Verifica-se que para escoamentos com menor número de Froude, as flutuações de pressão junto ao piso da bacia de dissipação tendem a crescer mais acentuadamente do que em escoamentos com maior número de Froude. Isso pode ser atribuído ao efeito da propagação das flutuações de pressão para posições mais a jusante, especialmente em escoamentos com maior velocidade média, e, portanto, maior instabilidade junto ao contorno sólido.

Cabe ressaltar, mais uma vez, quanto às diminutas magnitudes das flutuações de pressão obtidas experimentalmente (dentro da faixa de incerteza dos sensores de pressão utilizados), fato que pode conduzir a resultados errôneos quantitativamente, ainda que qualitativamente seja possível tecer alguns comentários.

Com a análise das pressões médias e flutuantes ao longo da bacia de dissipação a jusante da região de influência da curva de concordância vertical, conclui-se a segunda etapa, dentre as quatro que este estudo se propõe a investigar individualmente, visando a descrição dos efeitos de pressão do ressalto hidráulico afogado (tipo B) sobre uma bacia de dissipação.

5.3 Efeitos Macroturbulentos do Ressalto Hidráulico Tipo A

As pressões junto ao fundo de bacias de dissipação, tanto em termos médios quanto flutuantes, são abordadas na revisão bibliográfica como a resposta hidrodinâmica do regime rapidamente variado responsável pela transição do escoamento em regime rápido para regime lento.

Ainda que correta e verdadeira, essa abordagem considera o ressalto hidráulico como um fenômeno isolado e de comportamento hidrodinâmico próprio, cuja macroturbulência se confunde com a turbulência associada ao fluxo em regime rápido ingressante no ressalto hidráulico.

Com a dissociação dos efeitos da curva de concordância vertical e do escoamento livre ao longo da bacia de dissipação, objetiva-se avaliar exclusivamente os aspectos macroturbulentos produzidos pela mudança brusca de regime de escoamento.

5.3.1 AVALIAÇÃO DAS PRESSÕES MÉDIAS

Visando essa avaliação dissociada de efeitos, conduziu-se a adimensionalização da diferença entre as pressões médias detectadas no ressalto hidráulico livre e entre as pressões médias detectadas no escoamento livre. Cabe salientar que as pressões médias detectadas no escoamento livre já contemplam intrinsecamente aqueles esforços adicionais que têm como origem a curva de concordância vertical.

Apresenta-se, então, a Figura 62, na qual podem ser identificadas as pressões médias devidas exclusivamente aos efeitos macroturbulentos presentes no ressalto hidráulico, na forma adimensional (Ψ_R e Γ) adaptada de Marques *et al.* (1996), conforme Equação 58 e Equação 59.

$$\Psi_R = \frac{P_x/\gamma - P_{x_L}/\gamma}{Y_2 - Y_1} \quad \text{Equação 58}$$

$$\Gamma = \frac{X}{Y_2 - Y_1} \quad \text{Equação 59}$$

onde:

P_x = pressão média junto ao fundo da bacia de dissipação devida ao ressalto hidráulico tipo A.

P_{x_L} = pressão média junto ao fundo da bacia de dissipação devida ao escoamento livre incluídos os efeitos da curva de concordância vertical.

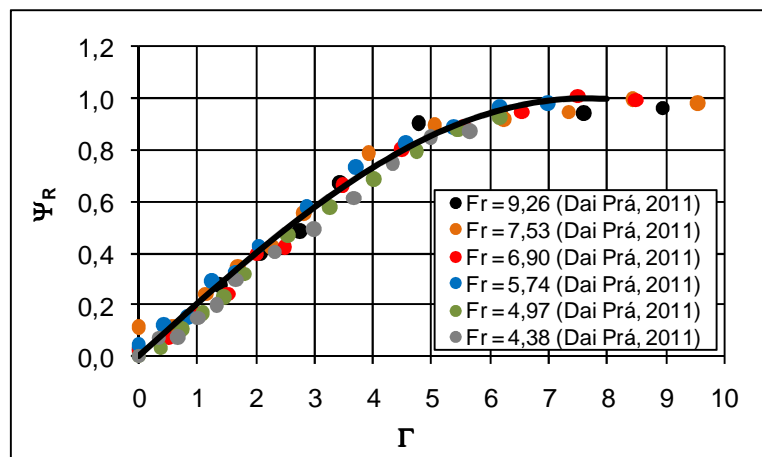


Figura 62 – Influência da macroturbulência do ressalto hidráulico sobre as pressões médias.

Pela análise da Figura 62, percebe-se a evolução das pressões médias ao longo da bacia de dissipação, desde zero, no início do ressalto hidráulico, até o máximo, correspondente à diferença entre as alturas conjugadas ($Y_2 - Y_1$) na posição adimensional igual a 8,0, onde se encerra a transição do regime rápido para o regime lento.

Fica evidente, como esperado, que o comportamento é praticamente idêntico àquele apresentado na Figura 36. A diferença fundamental consiste na consideração dos efeitos da curva de concordância vertical e dos efeitos da curva de remanso do escoamento livre em regime rápido ao longo da bacia de dissipação quando da

utilização de P_{xL}/γ na Figura 62, e da consideração hidrostática pura, propagada ao longo de todo o ressalto hidráulico, quando da consideração de Y_1 na Figura 36.

Essa alteração tem como resultado imediato amenizar a dispersão dos dados, especialmente, mas não exclusivamente, nas seções iniciais do ressalto hidráulico, onde o efeito da curva de concordância é mais pronunciado.

Propõe-se, então, a Equação 60 ($R^2=0,99$) como representativa do comportamento das pressões médias devidas exclusivamente ao ressalto hidráulico.

$$\Psi_R = \text{sen}\left(\frac{2 \pi \Gamma}{30,688} + 12,566\right) \quad \text{Equação 60}$$

5.3.2 AVALIAÇÃO DAS FLUTUAÇÕES DE PRESSÃO

As flutuações de pressão, de forma idêntica às pressões médias, foram adimensionalizadas a partir da proposta de Marques *et al.* (1996), considerando, contudo, a diferença entre as flutuações de pressão no ressalto hidráulico livre e as flutuações de pressão detectadas no escoamento livre. Objetiva-se, com isso, avaliar isoladamente as flutuações induzidas junto ao fundo da bacia de dissipação exclusivamente como efeito macroturbulento do ressalto hidráulico tipo A.

Na consideração adimensional, conforme Equação 61, a presença dos efeitos da curva de concordância vertical nas flutuações de pressão já estão consideradas quando da utilização dos valores obtidos a partir do escoamento livre (σ_{XL}).

$$\Omega_R = \left(\frac{\sigma_X/\gamma - \sigma_{XL}/\gamma}{Ht}\right) \left(\frac{Y_2}{Y_1}\right) \quad \text{Equação 61}$$

Onde:

σ_X = flutuação de pressão junto ao fundo da bacia de dissipação devida ao ressalto hidráulico tipo A,

σ_{XL} = flutuação de pressão junto ao fundo da bacia de dissipação devida ao escoamento livre incluídos os efeitos da curva de concordância vertical, e

Ht = dissipação total de energia ao longo do ressalto hidráulico tipo A.

Apresenta-se, então, a Figura 63, na qual podem ser identificados os esforços devidos às flutuações de pressão originadas pelos efeitos macroturbulentos do ressalto hidráulico tipo A.

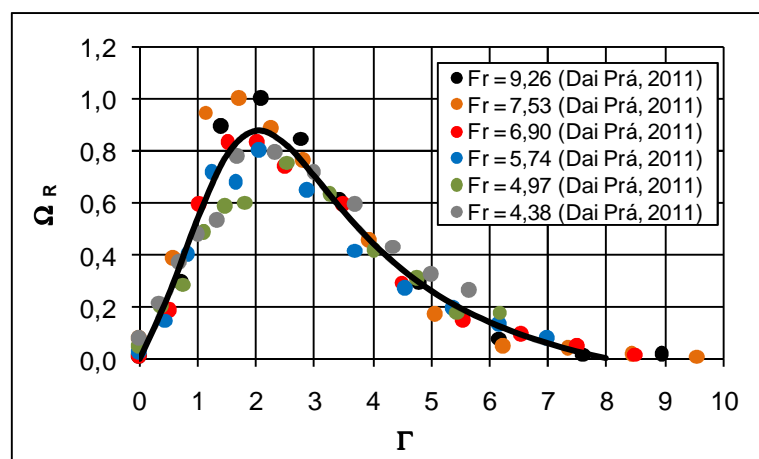


Figura 63 – Influência da macroturbulência do ressalto hidráulico sobre as flutuações de pressão.

Pela análise da Figura 63, percebe-se o rápido crescimento das flutuações de pressão induzidas no fundo da bacia de dissipação pela macroturbulência do ressalto hidráulico, a partir do valor zero, uma vez que as flutuações induzidas pela curva de concordância vertical estão descontadas no parâmetro (Ω_R). Esse rápido crescimento atinge valores máximos entre as posições adimensionalizadas 1 e 2, confirmando o comportamento identificado por Marques *et al.* (1996) quando da sua afirmação de que as máximas flutuações de pressão estavam situadas próximas à posição adimensional 1,75.

A partir da posição de máximas flutuações de pressão, a decomposição de esforços mostra uma clara tendência de decaimento até a completa dissipação ao longo do ressalto hidráulico, na posição adimensional igual a 8, quando as flutuações de pressão devidas exclusivamente aos efeitos macroturbulentos do ressalto hidráulico não se fazem mais presentes.

Na comparação da Figura 63 com a Figura 37, as diferenças são pouco perceptíveis, dadas as diminutas magnitudes das flutuações de pressão. Observe-se, contudo, alguma melhora na avaliação das máximas flutuações de pressão, ainda que nessa região a dispersão se mantenha elevada, e que os resultados

experimentais detectados neste estudo tenham se mostrado superiores àqueles detectados por outros autores.

A Equação 62 ($R^2=0,925$) representa o ajuste matemático efetuado sobre os efeitos atribuídos unicamente à macroturbulência do fenômeno.

$$\Omega_R = \frac{0,418 \cdot \Gamma - 0,052 \cdot \Gamma^2}{1 - 0,505 \cdot \Gamma + 0,182 \cdot \Gamma^2} \quad \text{Equação 62}$$

Com a avaliação individualizada das pressões médias e flutuantes apresentadas neste item 5.3, conclui-se a terceira etapa da decomposição de esforços prevista neste trabalho, restando por avaliar, na sequência, a influência dos níveis d'água a jusante do ressalto hidráulico causando afogamento do mesmo junto ao perfil vertente e/ou curva de concordância vertical.

5.4 Efeitos do Afogamento do Ressalto Hidráulico

Seguindo a linha investigativa proposta neste estudo, os efeitos do afogamento do ressalto hidráulico serão avaliados a partir da dissociação dos demais efeitos apresentados anteriormente, como forma de proporcionar parâmetros adimensionais capazes de representar isoladamente os efeitos dos níveis de jusante, responsáveis pela formação dos ressaltos hidráulicos afogados tipo B.

Nos ressaltos hidráulicos tipo A, a seção de início apresenta-se bem definida e estabelecida, em termos médios, junto ao pé do vertedouro, imediatamente a jusante da curva de concordância vertical. Já nos ressaltos hidráulicos tipo B, a seção de início, ainda que de fácil identificação e localização, é função do nível d'água a jusante do ressalto hidráulico.

Assim, a avaliação dos efeitos do afogamento do ressalto hidráulico será conduzida a partir de duas etapas distintas: (i) avaliação da posição de início do ressalto hidráulico afogado, e (ii) avaliação dos esforços (pressões médias e flutuantes) induzidos pelo afogamento do ressalto.

5.4.1 POSIÇÃO DE INÍCIO DO RESSALTO HIDRÁULICO AFOGADO

A definição da posição do início do ressalto hidráulico se faz necessária tendo em vista os parâmetros considerados ao longo das adimensionalizações, as quais serão, também, aqui utilizadas visando à máxima uniformização possível ao longo da dissociação dos efeitos atuantes junto ao fundo da bacia de dissipação.

Dessa forma, para que o adimensional da posição (Γ) seja definido, faz-se necessária a identificação da posição do início do ressalto hidráulico afogado visando a sua correlação com as demais posições avaliadas ao longo da bacia de dissipação (X).

Cabe salientar que, independente dos adimensionais utilizados neste estudo, tais parâmetros hidráulicos têm importância do ponto de vista do projeto do sistema extravasador, uma vez que os mesmos condicionam a altura dos pilares do vertedouro, o posicionamento dos munhões das comportas ou mesmo a altura dos muros guias do vertedouro.

A partir dessas considerações, conduziu-se a adimensionalização das posições de início do ressalto hidráulico (P_i), tomadas em planta, e contadas positivamente, para montante, a partir do ponto de tangência entre a curva de concordância vertical e a bacia de dissipação. Correlacionou-se essa posição com o comprimento do ressalto hidráulico tipo A, representado pelas profundidades conjugadas (Y_1 e Y_2), conforme Equação 63.

Avaliou-se, também, o afogamento do ressalto hidráulico a partir da diferença entre o nível d'água a jusante do mesmo (T_w) e a sua profundidade conjugada lenta (Y_2), adimensionalizadas pela profundidade do escoamento na entrada do ressalto hidráulico livre (Y_1), conforme Equação 64.

$$S_R = \frac{T_w - Y_2}{Y_1} \quad \text{Equação 63}$$

$$\Gamma_i = \frac{P_i}{Y_2 - Y_1} \quad \text{Equação 64}$$

A Figura 64 apresenta os dados experimentais deste estudo, a partir dos quais se propõe o ajuste da Equação 65 ($R^2=0,97$) como representativa da posição de início do ressalto hidráulico.

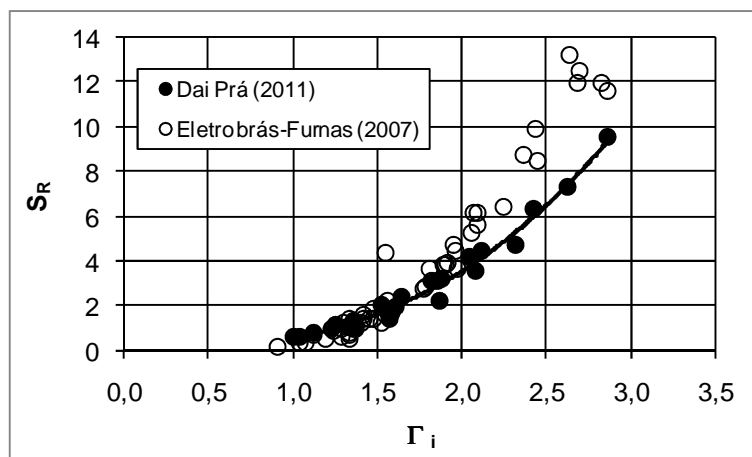


Figura 64 – Posição de início do ressalto hidráulico afogado (tipo B).

$$S_R = 0,5442 (\Gamma_i)^{2,7035}$$

Equação 65

Pela análise da Figura 64, observa-se que as posições de início do ressalto seguem uma linha de tendência bem definida e apresenta-se como função apenas do nível d'água verificado a jusante do ressalto hidráulico afogado (tipo B) e das profundidades características do ressalto hidráulico tipo A.

Na comparação entre os resultados deste estudo e aqueles apresentados por Eletrobrás-Furnas (2007), observa-se alguma diferença de tendência dos resultados experimentais, especialmente para posições adimensionais superiores a 2,0, ou ainda, em direção aos maiores afogamentos. Essa diferença pode ser atribuída à presença de pilares na estrutura avaliada por Eletrobrás-Furnas (2007).

Essa diferença pode ser atribuída às características dos modelos físicos utilizados nos estudos de Eletrobrás-Furnas (2007), já que os mesmos consistiam de vertedouros controlados por comportas e com piso a jusante da bacia de dissipação em cota superior à mesma. Devido a essas características geométricas, a imposição do ressalto hidráulico tipo A não foi possível nos estudos de Eletrobrás-Furnas (2007), impedindo a identificação experimental das profundidades conjugadas do ressalto hidráulico tipo A. Com isso foi necessária a estimativa

analítica das mesmas, a partir da consideração das perdas de carga entre o nível d'água a montante e a seção imediatamente a jusante da curva de concordância vertical.

Cabe salientar que os dados experimentais de Eletrobrás-Furnas (2007), na Figura 64, foram adquiridos a partir de modelos físicos de estruturas descarregadoras semelhantes, mas em diferentes escalas (1:100, 1:50 e 1:32), e com mesmo raio de concordância vertical, quando avaliadas as dimensões do protótipo.

Com o estabelecimento da posição de início do ressalto, conforme Equação 65, pode-se avaliar a carga hidráulica disponível a montante desse ponto e, conseqüentemente, estimar a profundidade do escoamento na seção de entrada do ressalto hidráulico tipo B.

5.4.2 AVALIAÇÃO DAS PRESSÕES MÉDIAS

A individualização dos esforços relacionados às pressões médias atuantes na bacia de dissipação foi conduzida a partir da avaliação direta da diferença entre as pressões médias devidas ao ressalto hidráulico tipo A e entre as pressões médias obtidas com a imposição de ressaltos hidráulicos afogados (tipo B) para as condições de ensaio apresentadas na Tabela 6.

A condução da análise desenvolveu-se através da busca por um parâmetro adimensional representativo desta diferença de pressões avaliada do ponto de vista da diferença entre as alturas conjugadas do ressalto hidráulico tipo A, adaptando essa decomposição de efeitos na proposta de Marques *et al.* (1996), conforme Equação 66.

$$\Psi_A = \left(\frac{Px_A/\gamma - Px/\gamma}{Y_2 - Y_1} \right) \quad \text{Equação 66}$$

Onde:

Px_A = pressão média junto ao fundo da bacia de dissipação devida ao ressalto hidráulico afogado tipo B,

P_x = pressão média junto ao fundo da bacia de dissipação devida ao ressalto hidráulico tipo A, e

Essa análise não conduziu a resultados consistentes quanto ao estabelecimento de uma forma geral de comportamento dos efeitos de pressão média dissociados. Para tanto, buscou-se um fator de proporcionalidade no qual estivessem contemplados parâmetros relacionados com o afogamento do ressalto. Obteve-se, então, por inspeção, a Equação 67, estabelecida como função apenas no grau de submergência do escoamento ($S=Tw/Y_2$).

$$K_A = \left(\frac{1}{S-1}\right)^{0,5} \left(\frac{1}{S+1}\right)^2 \quad \text{Equação 67}$$

A Figura 65 apresenta os resultados experimentais deste estudo seguindo a proposta adimensional apresentada. Cabe salientar que o parâmetro adimensional Γ , dado pela Equação 64, segue sendo função das profundidades características do ressalto hidráulico tipo A (Y_1 e Y_2) e da posição do ponto em análise (X) em relação à posição de início do ressalto hidráulico afogado (P_i).

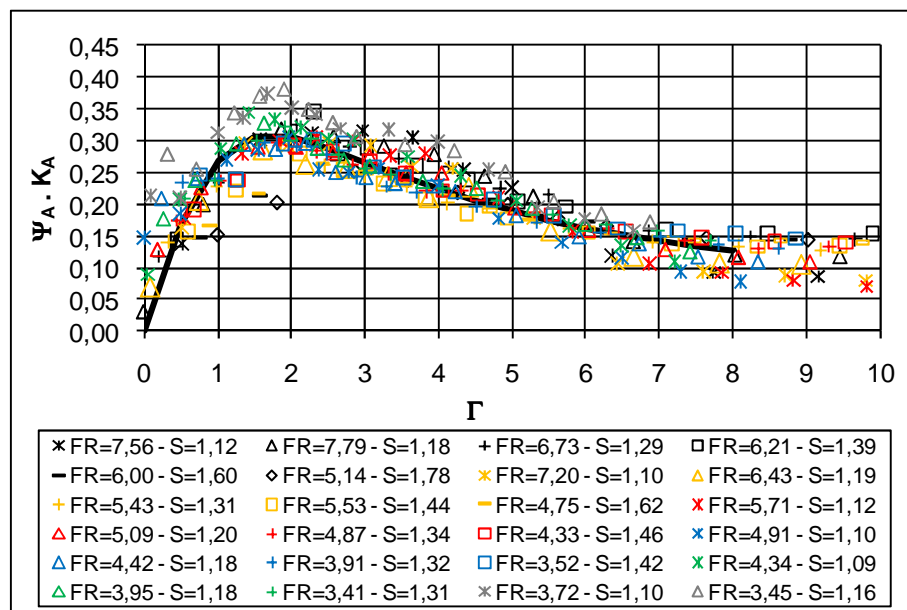


Figura 65 – Influência do afogamento do ressalto hidráulico sobre as pressões médias

Observa-se que o afogamento do ressalto hidráulico influencia as pressões médias junto ao fundo da bacia de dissipação de forma crescente até em torno das posições adimensionais 1 e 2, indicando que essa posição adimensional, além de representar o ponto de maior flutuação de pressão do ressalto hidráulico tipo A, conforme identificado no item 5.3.2, também refere-se à região de máxima influência do afogamento do ressalto hidráulico quanto ao comportamento das pressões médias.

A partir dessa posição, a influência do afogamento torna-se gradativamente menor até estabilizar a partir da posição adimensional 8, quando cessa a sua influência. Obviamente o final da influência do ressalto hidráulico afogado não faz com que as pressões atuantes a jusante do mesmo assumam valores idênticos aos verificados a jusante do ressalto hidráulico tipo A, uma vez que os níveis d'água (T_w) se mantém superiores à altura conjugada lenta (Y_2).

Em termos médios, pode-se apresentar um ajuste para os dados experimentais apresentados na Figura 65 como um indicativo da tendência de comportamento das pressões médias induzidas pelo afogamento do ressalto hidráulico, conforme apresentado pela Equação 68 ($R^2=0,73$).

$$\Psi_A \cdot K_A = \frac{0,361 \cdot \Gamma}{1 + 0,314 \cdot \Gamma^2} \quad \text{Equação 68}$$

5.4.3 AVALIAÇÃO DAS FLUTUAÇÕES DE PRESSÃO

O comportamento das flutuações de pressão induzidas pelo afogamento do ressalto hidráulico foi avaliado conforme a proposta de Marques *et al.* (1996), associando essas flutuações ao total de energia dissipada no ressalto hidráulico.

Uma vez que este trabalho vem conduzindo a dissociação dos efeitos, será considerada, agora, a diferença entre as flutuações de pressão identificadas experimentalmente entre os ressaltos hidráulicos tipos A e B.

O adimensional apresentado na Equação 69 (Ω_A) tem estreita semelhança com aquele adotado no item 5.3.2 (Equação 61). A diferença substancial é que aqui, onde o interesse reside no afogamento do ressalto, propõe-se a utilização do nível d'água a jusante do mesmo (T_w), ao passo que quando o interesse reside na

avaliação do ressalto hidráulico tipo A, o parâmetro adotado corresponde à altura conjugada lenta (Y_2), que nada mais é que o nível d'água a jusante do ressalto não afogado.

$$\Omega_A = \left(\frac{\sigma_{XA}/\gamma - \sigma_X/\gamma}{Ht} \right) \left(\frac{Tw}{Y_1} \right) \quad \text{Equação 69}$$

Onde:

σ_{XA} = flutuação de pressão junto ao fundo da bacia de dissipação devida ao ressalto hidráulico tipo B.

σ_X = flutuação de pressão junto ao fundo da bacia de dissipação devida ao ressalto hidráulico tipo A.

Ht = dissipação total de energia ao longo do ressalto hidráulico tipo A.

A Figura 66 apresenta os resultados experimentais deste estudo a partir da proposta adimensional apresentada.

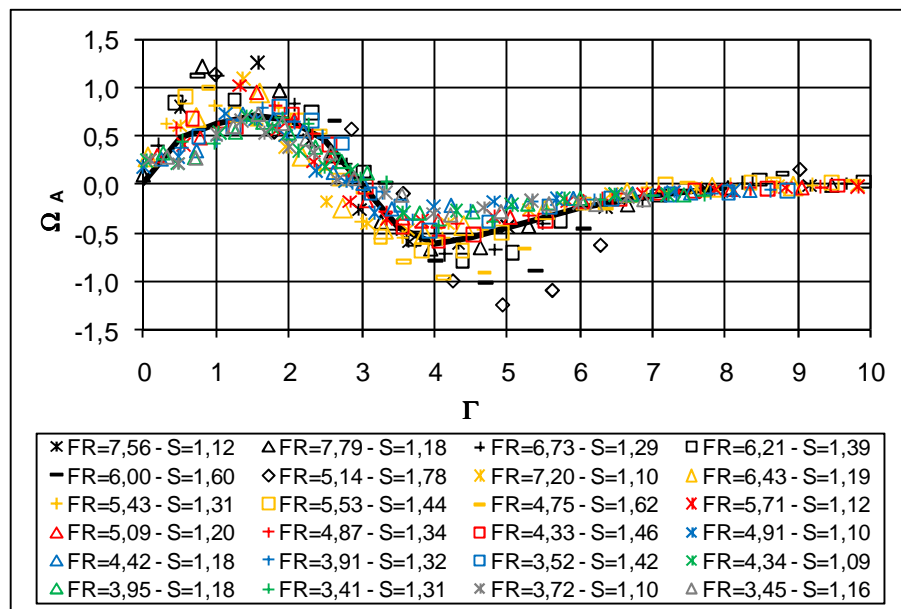


Figura 66 – Influência do afogamento do ressalto hidráulico sobre as flutuações de pressão

De acordo com a Figura 66 podem ser observadas algumas peculiaridades quanto ao comportamento das flutuações de pressão ao longo da bacia de dissipação.

O afogamento do ressalto provoca, inicialmente, um acréscimo nas flutuações de pressão, atingindo o valor máximo entre as posições adimensionalizadas 1 e 2. Tal comportamento vem ao encontro do que se verifica no ressalto hidráulico tipo A quando da avaliação das pressões flutuantes.

Após esse valor máximo, o afogamento passa a ter sua influência reduzida, mas ainda no sentido de amplificar as flutuações de pressão até a posição adimensional 3,0, onde o comportamento dos ressaltos tipos A e B são idênticos. A partir desse ponto, o afogamento atua como agente redutor das flutuações presentes no ressalto tipo A, aumentando gradativamente a atenuação até o máximo identificado entre as posições adimensionais 4 e 5.

A partir desse ponto as flutuações tendem ao comportamento semelhante ao ressalto tipo A, culminando com o final da influência do afogamento na posição adimensional igual a 8, onde cessa a transição do regime.

A Equação 70 ($R^2=0,8035$) representa o ajuste matemático dos dados experimentais apresentados na Figura 66 reforçando a idéia de que esse ajuste serve como indicativo do comportamento médio das flutuações de pressão atribuídas exclusivamente ao afogamento do ressalto hidráulico.

$$\Omega_A = \frac{2,002.\Gamma - 0,908.\Gamma^2 + 0,080.\Gamma^3}{1 + 1,866.\Gamma - 1,228.\Gamma^2 + 0,211.\Gamma^3} \quad \text{Equação 70}$$

Uma vez avaliados os esforços devidos às pressões flutuantes junto ao fundo da bacia de dissipação do ponto de vista individualizado do afogamento do ressalto hidráulico, conclui-se a dissociação de efeitos em quatro parcelas distintas:

- i) Região de influência da curva de concordância vertical entre o perfil vertente e a bacia de dissipação (item 5.1),
- ii) escoamento livre ao longo da bacia de dissipação e da curva de concordância vertical (item 5.2),
- iii) Ressalto hidráulico livre (tipo A) (item 5.3), e
- iv) Afogamento do ressalto hidráulico (item 5.4).

5.5 Avaliação das Pressões Extremas Atuantes no Ressalto Hidráulico

As pressões extremas serão aqui avaliadas do ponto de vista proposto por Marques *et al.* (1996) quando da consideração de que as pressões com determinada probabilidade de não-excedência estão relacionadas com as pressões médias e flutuantes, ponderadas por um coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades (N).

Conforme abordado no item 4.10, no que tange ao coeficiente N, percebe-se que os resultados experimentais deste estudo concordam quase que em sua totalidade com os ajustes propostos por Trierweiller (2006) a partir de funções polinomiais quadráticas propostas pelo autor.

Visando avaliar a influência da curva de concordância vertical sobre as pressões extremas atuantes na bacia de dissipação, propõe-se a avaliação dos coeficientes de assimetria (Figura 67) e de curtose (Figura 68) das amostras de pressão obtidas ao longo do escoamento livre, incluindo a curva de concordância vertical (posições adimensionais negativas).

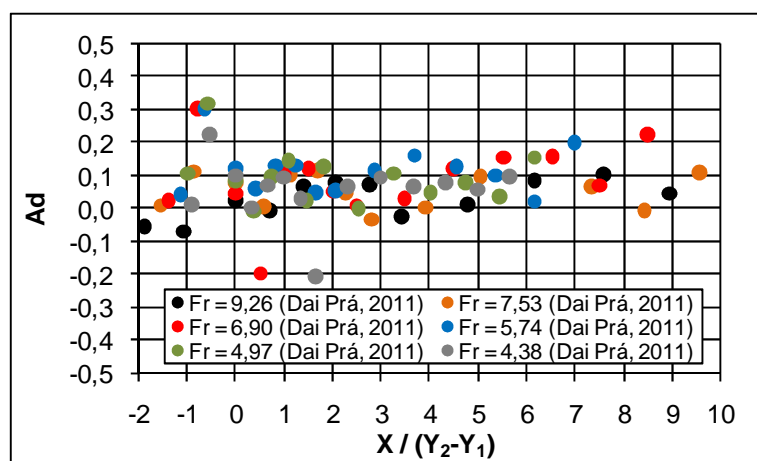


Figura 67 – Coeficientes de assimetria das amostras de pressão obtidas ao longo da curva de concordância vertical e da bacia de dissipação.

Pela análise da Figura 67, pode-se observar que as assimetrias ao longo da curva de concordância e da bacia de dissipação assumem valor médio próximo de zero, indicando uma distribuição simétrica das probabilidades em torno do valor médio das amostras. Notam-se alguns valores de assimetria próximos à posição

adimensional 0,5 da ordem de 0,3, indicando que no ponto central da curva de concordância vertical existe alguma assimetria na distribuição das probabilidades.

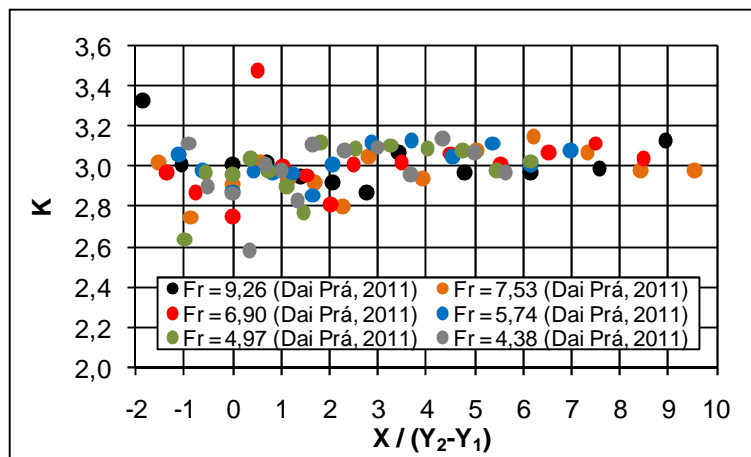
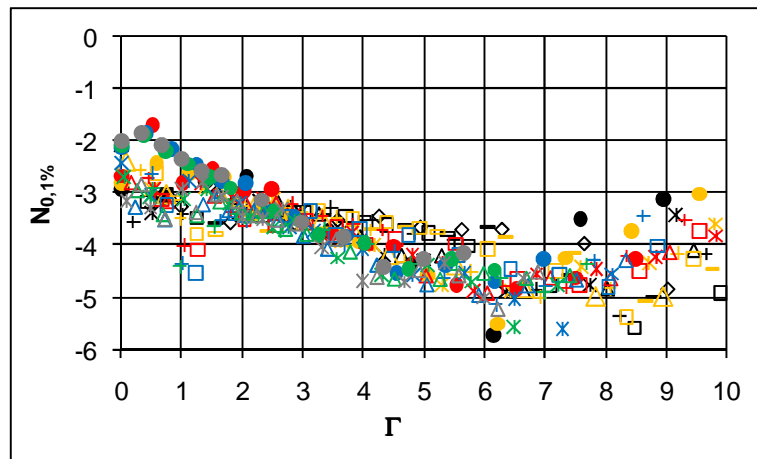


Figura 68 – Coeficientes de curtose das amostras de pressão obtidas ao longo da curva de concordância vertical e da bacia de dissipação.

Avaliando-se, agora, a Figura 68, nota-se que os valores do coeficiente de curtose agrupam-se em torno do valor 3,0, novamente com alguma discrepância no ponto central da curva de concordância vertical.

A partir dos coeficientes de assimetria e curtose identificados, pode-se admitir que o escoamento livre ao longo da bacia de dissipação tem a sua distribuição de probabilidades segundo uma lei gaussiana. Com isso, assume-se que as alterações verificadas nas pressões extremas nas posições iniciais do ressalto hidráulico, quando da comparação com os estudos de Trierweiller (2006), devem ser atribuídas às pressões médias e flutuantes induzidas pela curva de concordância (conforme abordado no item 5.1), e não ao comportamento estatístico das amostras de pressão do escoamento livre ao longo desta curva.

Visando identificar, agora, os efeitos do afogamento do ressalto hidráulico sobre o comportamento longitudinal do coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades, propõe-se a comparação direta dos valores de N obtidos nos ressaltos hidráulicos tipos A e B, para probabilidades idênticas. Apresentam-se, aqui, as probabilidades de 0,1% (Figura 69) e 99,9% (Figura 70) como representativas das pressões extremas mínimas e máximas. As demais probabilidades estão apresentadas no Anexo D.



● Fr=9,26; S=1,00	× Fr=7,56; S=1,12	△ Fr=7,79; S=1,18	+ Fr=6,73; S=1,29	□ Fr=6,21; S=1,39
— Fr=6,00; S=1,60	◇ Fr=5,14; S=1,78	● Fr=7,53; S=1,00	× Fr=7,20; S=1,10	△ Fr=6,43; S=1,19
+ Fr=5,43; S=1,31	□ Fr=5,53; S=1,44	— Fr=4,75; S=1,62	● Fr=6,90; S=1,00	× Fr=5,71; S=1,12
△ Fr=5,09; S=1,20	+ Fr=4,87; S=1,34	□ Fr=4,33; S=1,46	● Fr=5,74; S=1,00	× Fr=4,91; S=1,10
△ Fr=4,42; S=1,18	+ Fr=3,91; S=1,32	□ Fr=3,52; S=1,42	● Fr=4,97; S=1,00	× Fr=4,34; S=1,09
△ Fr=3,95; S=1,18	+ Fr=3,41; S=1,31	● Fr=4,38; S=1,00	× Fr=3,72; S=1,10	△ Fr=3,45; S=1,16

Figura 69 – Coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades ($N_{0,1\%}$).

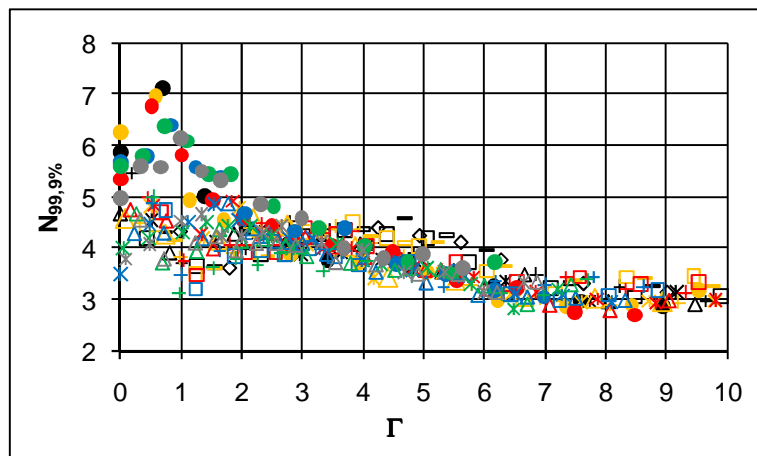


Figura 70 – Coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades ($N_{99,9\%}$).

Pela análise das Figuras 69 e 70, bem como do Anexo D, pode-se identificar que em torno da posição adimensional 3, para todas as probabilidades de ocorrência, o coeficiente N tem o mesmo comportamento para ressaltos hidráulicos livres e afogados.

A montante dessa posição, o coeficiente N em ressaltos hidráulicos tipo A é superior, indicando que o afogamento do ressalto é diretamente responsável pela atenuação das pressões extremas atuantes na bacia de dissipação. Esse comportamento é de extrema relevância, uma vez que a região de máxima flutuação

de pressão, identificada na posição adimensional 1,75, é, por assim dizer, protegida pelo afogamento do ressalto.

Verifica-se, ainda, que nesta região na qual se identifica a atenuação das pressões extremas, o coeficiente N pode ser assumido como constante até que o seu comportamento assumira as características do ressalto hidráulico tipo A, em torno da posição adimensional 3.

Por outro lado, a jusante da posição adimensional 3, de forma geral o comportamento do coeficiente N mantém-se idêntico para as condições de ressalto hidráulico livre e afogado, permitindo a indução de que o afogamento, aqui, já não tem mais papel preponderante sobre o comportamento das pressões extremas, máximas e mínimas.

Na Tabela 12, então, estão apresentados os coeficientes de ajuste das funções quadráticas válidas para ressaltos hidráulicos tipo A (Equação 71) e para ressaltos tipo B, no domínio $3 < \Gamma < 8$. Também estão apresentados os valores constantes identificados na região de influência do afogamento do ressalto hidráulico afogado (Equação 72), válida no domínio $\Gamma < 3$.

Tabela 12 – Coeficientes de ajuste representativo do comportamento do coeficiente estatístico N em ressaltos hidráulicos livres e afogados.

Ressalto	Ressalto Livre (Tipo A) – $0 < \Gamma < 8$ Ressalto Afogado (Tipo B) – $3 < \Gamma < 8$				Ressalto Tipo B $0 < \Gamma < 3$
	A	B	C	R ²	D
P _{x%}					
0,1%	0,0748	-0,9396	-1,5084	0,8565	-3,395
1%	0,0296	-0,3960	-1,4013	0,9310	-2,312
5%	0,0094	-0,1403	-1,175	0,8848	-1,556
10%	0,0030	-0,0545	-1,0193	0,7208	-1,198
90%	0,0018	-0,0177	1,2405	0,1481	1,232
95%	0,0067	-0,0957	1,8808	0,8041	1,670
99%	0,0200	-0,3349	3,5645	0,9319	2,665
99,9%	0,0498	-0,8486	6,5028	0,8974	4,161

Onde:

$$N_{X\%} = A \cdot \Gamma^2 + B \cdot \Gamma + C$$

Equação 71

$$N_{X\%} = D$$

Equação 72

A Figura 71 apresenta o ajuste do coeficiente N para a probabilidade de 5% ilustrando o domínio de validade de cada uma das equações apresentadas na Tabela 12, tanto no ressalto hidráulico livre quanto no ressalto hidráulico afogado.

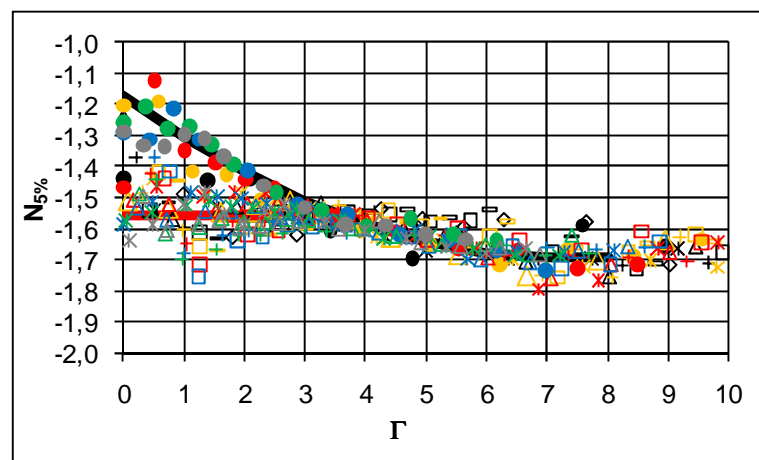


Figura 71 – Coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades ($N_{5\%}$) para as condições de ressalto hidráulico livre e afogado. A legenda corresponde àquela apresentada na Figura 69.

No item 6, apresentado a seguir, será aplicado o método de previsão de pressões médias e flutuantes a partir da superposição de efeitos desenvolvido neste estudo, bem como serão identificadas as pressões extremas máximas e mínimas a partir da proposição de Marques *et al.* (1996), objetivando a descrição das pressões atuantes em uma bacia de dissipação por ressalto hidráulico.

6 RESUMO DA METODOLOGIA DE DISSOCIAÇÃO DE ESFORÇOS NA PREVISÃO DE PRESSÕES

Neste capítulo será apresentada a aplicação da metodologia desenvolvida neste trabalho visando a estimativa das pressões médias, flutuantes e com diferentes probabilidades de ocorrência atuantes em uma bacia de dissipação por ressalto hidráulico.

No decorrer deste capítulo estão apresentadas as equações desenvolvidas ao longo do Capítulo 5 identificando cada uma das parcelas que compõe o esforço total atuante sobre o piso da bacia. Ao final de cada item, consta um exemplo numérico a partir das condições de ensaio impostas em modelo físico visando a avaliação da eficiência do método da dissociação de esforços.

De forma a exemplificar a aplicação do método proposto neste trabalho, propõe-se a determinação das pressões médias, flutuantes e com distintas probabilidades para uma estrutura de descarga e dissipação operando sob as seguintes condições hidráulicas (valores de modelo):

Nível d'Água à Montante do Vertedouro = 0,78m

Cota da Bacia de Dissipação = 0,00m

Grau de Submergência – $S = 1,3$

Vazão Específica – $q = 0,174\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$

Raio da Curva de Concordância Vertical – $R = 0,39\text{m}$

6.1 Estimativa das Pressões Médias

A Tabela 13 apresenta as equações desenvolvidas neste trabalho visando a estimativa das pressões médias.

Tabela 13 – Determinação das pressões médias – resumo analítico.

Comprimento de Influência da Curva de Concordância Vertical	$L_c = 0,5 \frac{V_1^2}{2g}$	Equação 45
Efeito da curva de concordância vertical (nota 1)	$K_C \Psi_C = \frac{1}{4} \frac{Y}{R}$	Equação 51
	$\Psi_C = \left(\frac{P_s + P_c}{P_x} \right)$	Equação 47
	$P_s = \gamma Y$	Equação 48
	$P_c = \frac{\gamma Y}{R} \frac{V^2}{g}$	Equação 49
	$K_C = \frac{\cos(\alpha)}{Fr_1^2 (1 + \sin(\beta))}$	Equação 50
	$Fr_1 = \frac{V_1}{\sqrt{gY_1}}$	Equação 2
Efeito do Escoamento em Regime Rápido (nota 2)	$\frac{Y - Y_1}{Y_2 - Y_1} = 0,0028 \left(\frac{X}{Y_2 - Y_1} \right)$	Equação 55
Efeito do Ressalto Hidráulico Tipo A (notas 3 e 4)	$\Psi_R = \text{sen} \left(\frac{2 \pi \Gamma}{30,6882} + 12,5664 \right)$	Equação 59
	$\Psi_R = \frac{P_x/\gamma - P_{xL}/\gamma}{Y_2 - Y_1}$	Equação 57
	$\Gamma = \frac{X}{Y_2 - Y_1}$	Equação 58
Efeito do Afogamento do Ressalto Hidráulico (notas 4, 5 e 6)	$\Psi_A \cdot K_A = \frac{0,3608 \cdot \Gamma}{1 + 0,3413 \cdot \Gamma^2}$	Equação 67
	$\Psi_A = \left(\frac{P_{xA}/\gamma - P_x/\gamma}{Y_2 - Y_1} \right)$	Equação 65
	$K_A = \left(\frac{1}{S-1} \right)^{0,5} \left(\frac{1}{S+1} \right)^2$	Equação 66
	$S = \frac{Tw}{Y_2}$	Equação 26
	$S_R = 0,5442 (\Gamma_i)^{2,7035}$	Equação 64
	$S_R = \frac{Tw - Y_2}{Y_1}$	Equação 62
	$\Gamma_i = \frac{Pi}{Y_2 - Y_1}$	Equação 63

Nota 1: A profundidade do escoamento no ponto em análise (Y), pela teoria dos círculos concêntricos, pode ser admitida como constante ao longo de toda a curva de concordância, e sendo assim, admite-se o uso da profundidade do escoamento na seção terminal da curva (Y_1).

Nota 2: Apesar de se tratar da análise do escoamento rápido ao longo da bacia de dissipação, optou-se pela adimensionalização da profundidade do escoamento (Y) e da posição (X) pelos parâmetros Y_1 e Y_2 do ressalto hidráulico caso houvesse condições hidráulicas a jusante que induzissem a transição de regime rápido para regime lento a partir da formação do ressalto hidráulico tipo A.

Nota 3: $P_x/\gamma - P_{x_L}/\gamma =$ pressão média devida aos efeitos do ressalto hidráulico tipo A.

Nota 4: A coordenada X corresponde à distância relativa entre o ponto de análise e a posição de início do ressalto hidráulico (P_i).

Nota 5: $P_i =$ posição de início do ressalto hidráulico afogado, tomada em planta positivamente para montante, a partir do ponto de tangência entre a curva de concordância vertical e a bacia de dissipação

Nota 6: $P_{x_A}/\gamma - P_x/\gamma =$ pressão média devida ao afogamento do ressalto hidráulico.

Para o exemplo proposto, a distribuição longitudinal das pressões médias ao longo da bacia de dissipação está apresentada na Figura 72, juntamente com cada uma das parcelas que a compõem.

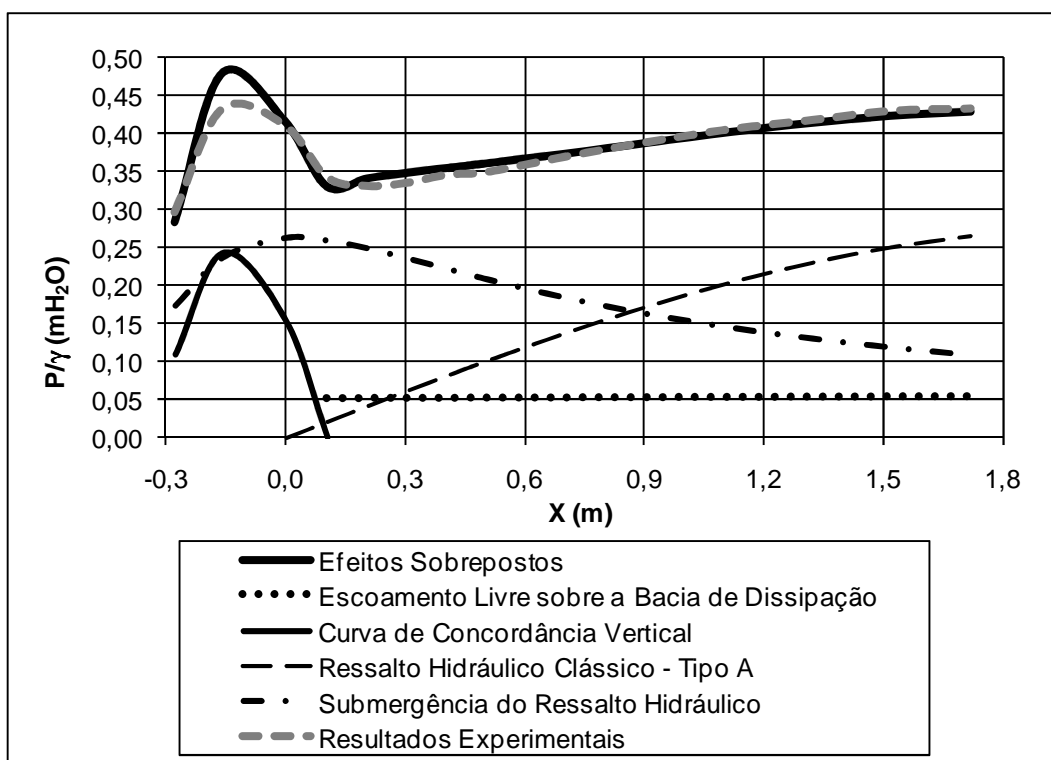


Figura 72 – Comparação entre as pressões médias estimadas e obtidas experimentalmente.

Percebe-se, pela Figura 72, que os resultados experimentais e aqueles obtidos a partir do método desenvolvido neste trabalho apresentam correspondência, com exceção do ponto de máxima pressão média, para a qual, na situação proposta neste exemplo, o método apresentou como resultado valores superiores aos verificados experimentalmente.

Na Tabela 14 estão apresentadas as diferenças absolutas em mH₂O ($\Delta P/\gamma$) (Equação 73) e relativas ($\Delta P\%$) (Equação 74), onde,

$$\frac{\Delta P}{\gamma} = \frac{P}{\gamma} \text{ experimental} - \frac{P}{\gamma} \text{ estimado} \quad \text{Equação 73}$$

$$\Delta P\% = \frac{\frac{P}{\gamma} \text{ experimental} - \frac{P}{\gamma} \text{ estimado}}{\left| \frac{P}{\gamma} \text{ experimental} \right|} \quad \text{Equação 74}$$

Tabela 14 – Comparação entre as pressões médias (experimentais e estimadas) para o caso em análise

X (m)	-0,277	-0,157	0,000	0,105	0,206	0,307	0,408
$\Delta P/\gamma$ (mH ₂ O)	0,014	-0,047	-0,005	0,013	-0,009	-0,013	-0,008
$\Delta P\%$	4,7%	-10,8%	-1,2%	3,8%	-2,8%	-3,7%	-2,4%

X (m)	0,506	0,707	0,911	1,122	1,323	1,520	1,721
$\Delta P/\gamma$ (mH ₂ O)	-0,011	-0,003	0,002	0,004	0,004	0,007	0,005
$\Delta P\%$	-3,1%	-0,9%	0,4%	1,1%	1,0%	1,7%	1,1%

Os demais resultados comparativos para as pressões médias estão apresentados no Anexo E.

6.2 Estimativa das Pressões Flutuantes

A Tabela 15 apresenta as equações desenvolvidas neste trabalho visando a estimativa das pressões médias.

Tabela 15 – Determinação das flutuações de pressão – resumo analítico

Efeito da curva de concordância vertical (Nota 1)	$\frac{\sigma_{Cm\acute{a}x}}{\gamma} = 0,01 \frac{V_1^2}{2g}$	Equação 54
Efeito do Escoamento em Regime Rápido (Nota 2)	$\left(\frac{\sigma_X}{Ht}\right)\left(\frac{Y_2}{Y_1}\right) = 0,0038 \left(\frac{X}{Y_2 - Y_1}\right) + 0,0233$	Equação 56
Efeito do Ressalto Hidráulico Tipo A (Nota 3)	$\Omega_R = \frac{0,418 \Gamma - 0,052 \Gamma^2}{1 - 0,505 \Gamma + 0,182 \Gamma^2}$	Equação 61
	$\Omega_R = \left(\frac{\sigma_X/\gamma - \sigma_{XL}/\gamma}{Ht}\right)\left(\frac{Y_2}{Y_1}\right)$	Equação 60
Efeito do Afogamento do Ressalto Hidráulico (Nota 4)	$\Omega_A = \frac{2,0025 \Gamma - 0,9085 \Gamma^2 + 0,0801 \Gamma^3}{1 + 1,8660 \Gamma - 1,2285 \Gamma^2 + 0,2112 \Gamma^3}$	Equação 69
	$\Omega_A = \left(\frac{\sigma_{XA}/\gamma - \sigma_X/\gamma}{Ht}\right)\left(\frac{Tw}{Y_1}\right)$	Equação 68

Nota 1: Para as demais posições ao longo da curva de concordância vertical, admite-se que as flutuações de pressão decrescem em direção aos pontos de tangência atingindo valores da ordem de 0,5% da energia cinética disponível na seção de início da bacia de dissipação.

Nota 2: Apesar de tratar-se da análise o escoamento rápido ao longo da bacia de dissipação, optou-se pela adimensionalização das flutuações de pressão e da posição (X) pelos parâmetros Ht, Y₁ e Y₂ do ressalto hidráulico caso houvesse condições hidráulicas a jusante que induzissem a transição de regime rápido para regime lento a partir da formação do ressalto hidráulico tipo A.

Nota 3: $\sigma_X/\gamma - \sigma_{XL}/\gamma$ = flutuação de pressão devida aos efeitos do ressalto hidráulico tipo A.

Nota 4: $\sigma_{XA}/\gamma - \sigma_X/\gamma$ = flutuação de pressão devida ao afogamento do ressalto hidráulico.

Para o exemplo proposto, a distribuição longitudinal das flutuações de pressão está apresentada na Figura 73, juntamente com cada uma das parcelas que a compõe.

Percebe-se, pela Figura 73, que os resultados experimentais e aqueles obtidos a partir do método desenvolvido neste trabalho apresentam correspondência, com alguma diferença identificada na região da curva de concordância vertical, contudo no sentido de previsão de valores superiores aos experimentais. Identifica-se, para a situação em análise, que o método considera a posição de máxima flutuação de pressão mais a montante do que os resultados experimentais.

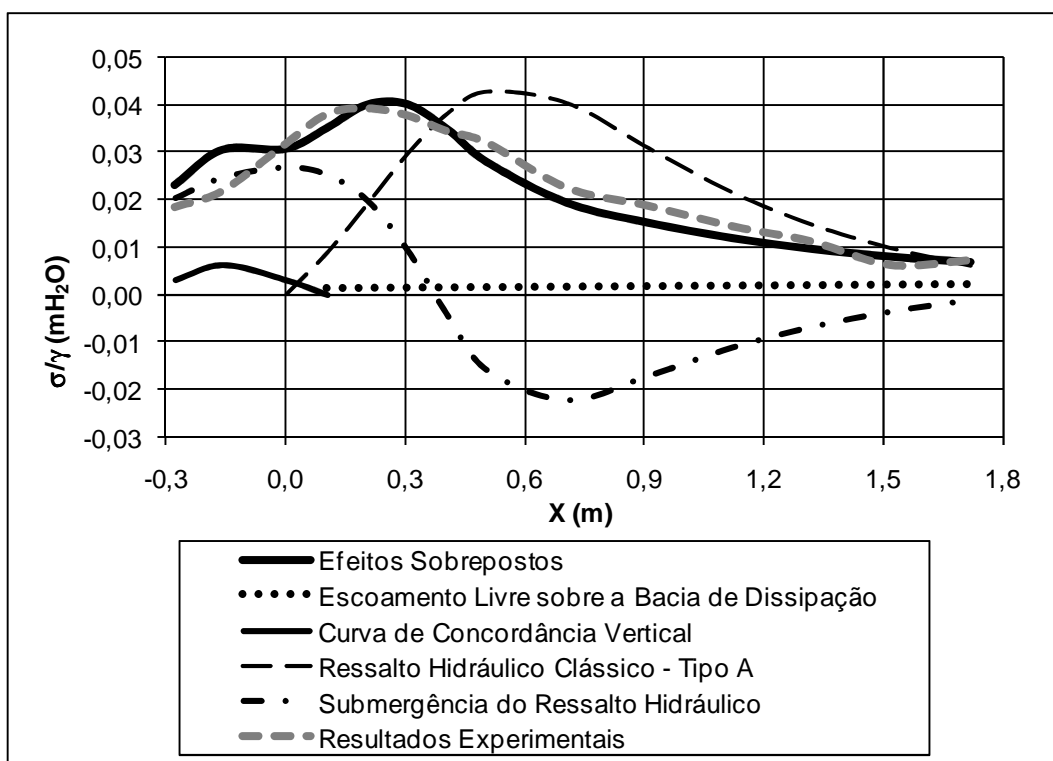


Figura 73 – Comparação entre as flutuações de pressão estimadas e obtidas experimentalmente

Na Tabela 16 estão apresentadas as diferenças absolutas em mH₂O ($\Delta P/\gamma$) e relativas.

Tabela 16 – Comparação entre as flutuações de pressão (experimentais e estimadas) para o caso em análise

X	-0,277	-0,157	0,000	0,105	0,206	0,307	0,408
$\Delta\sigma/\gamma$	-0,005	-0,009	0,001	0,003	-0,001	-0,003	-0,001
$\Delta\sigma\%$	-26,1%	-40,7%	2,1%	6,8%	-2,9%	-7,2%	-2,3%

X	0,506	0,707	0,911	1,122	1,323	1,520	1,721
$\Delta\sigma/\gamma$	0,004	0,003	0,003	0,002	0,001	-0,002	0,000
$\Delta\sigma\%$	11,8%	13,1%	18,2%	16,4%	12,8%	-28,9%	4,6%

Do ponto de vista percentual, por vezes, as diferenças apresentam-se bastante elevadas, contudo há de se considerar a magnitude absoluta das flutuações de pressão identificadas experimentalmente. Para tanto, recomenda-se a

análise, também, das diferenças relativas, que, por vezes, podem ter maior representatividade do ponto de vista da verificação do método proposto.

Os demais resultados comparativos para a distribuição longitudinal das flutuações de pressão estão apresentados no Anexo E.

6.3 Estimativa das Pressões com Distintas Probabilidades de Ocorrência

A Tabela 17 apresenta as equações utilizadas neste trabalho visando a estimativa das pressões com distintas probabilidades de ocorrência.

Tabela 17 – Determinação das pressões com distintas probabilidades de ocorrência – resumo analítico

Pressões com distintas probabilidades de ocorrência	$P_{X\%} = P_X + N_{X\%} \cdot \sigma_X$	Equação 25
Coeficiente de distribuição de probabilidades (nota 1)	$N_{X\%} = A \cdot \Gamma^2 + B \cdot \Gamma + C$	Equação 71
	$N_{X\%} = D$	Equação 72

Nota 1: as constantes de ajustes A, B, C e D são dadas pela Tabela 12 aqui rerepresentada.

Tabela 12 – Coeficientes de ajuste para definição do comportamento do coeficiente estatístico N em ressalto hidráulicos livres e afogados.

Ressalto	Ressalto Livre (Tipo A) – $0 < \Gamma < 8$ Ressalto Afogado (Tipo B) – $3 < \Gamma < 8$				Ressalto Tipo B $0 < \Gamma < 3$
	A	B	C	R ²	D
0,1%	0,0748	-0,9396	-1,5084	0,8565	-3,395
1%	0,0296	-0,3960	-1,4013	0,9310	-2,312
5%	0,0094	-0,1403	-1,175	0,8848	-1,556
10%	0,0030	-0,0545	-1,0193	0,7208	-1,198
90%	0,0018	-0,0177	1,2405	0,1481	1,232
95%	0,0067	-0,0957	1,8808	0,8041	1,670
99%	0,0200	-0,3349	3,5645	0,9319	2,665
99,9%	0,0498	-0,8486	6,5028	0,8974	4,161

Para o exemplo proposto, estão apresentadas na Figura 74 as distribuições longitudinais das pressões com probabilidade de não excedência equivalentes à 0,1%, 1%. Na Figura 75 apresentam-se as pressões com probabilidade de não excedência equivalentes à 99% e 99,9% atuantes sobre o piso da bacia de dissipação.

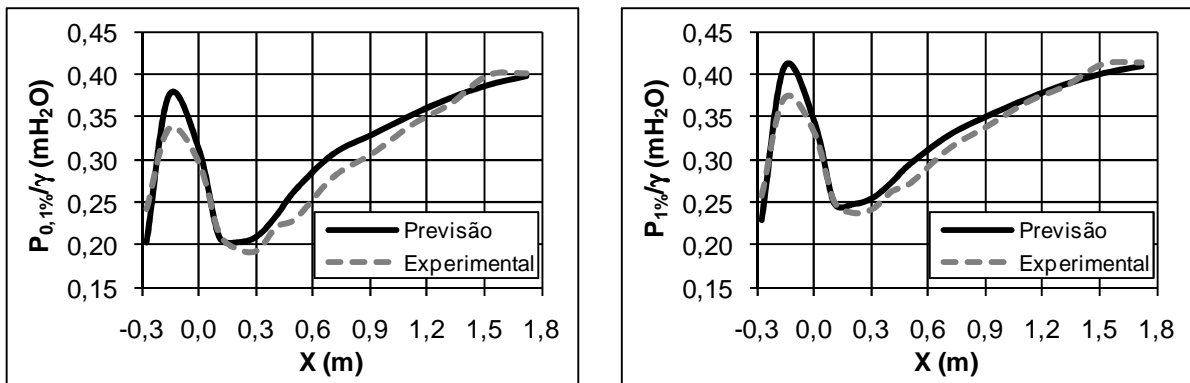


Figura 74 – Distribuição longitudinal das pressões com probabilidade de não excedência de 0,1% e 1%.

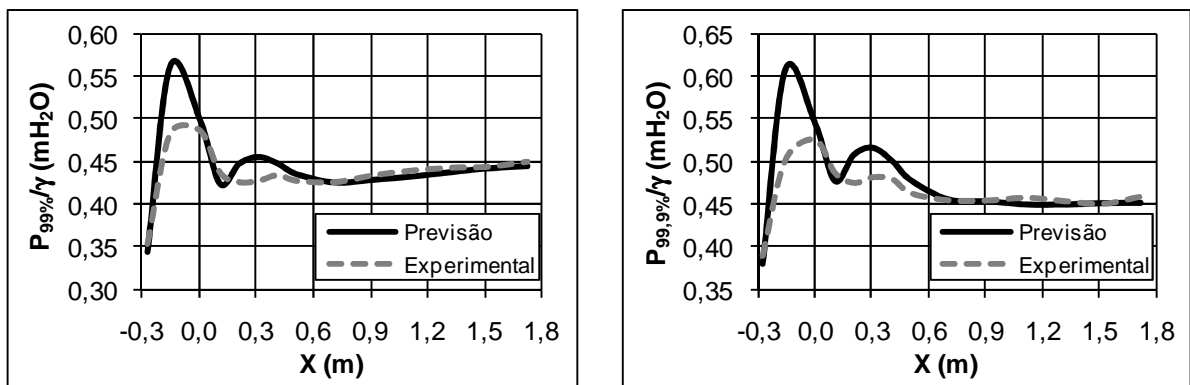


Figura 75 – Distribuição longitudinal das pressões com probabilidade de não excedência de 99% e 99,9%.

Os resultados comparativos entre as pressões estimadas e verificadas experimentalmente estão apresentadas na Tabela 18, na qual estão apresentadas as diferenças absolutas ($\Delta P/\gamma$) e relativas ($\Delta P\%$). As pressões estão aqui representadas pelas probabilidades de não excedência de 0,1%, 1%, 99% e 99,9%.

As diferenças verificadas na Tabela 18 são atribuídas principalmente ao fato de que, quando da estimativa das flutuações de pressão, estas assumiram valores

superiores aos experimentais. Essa, por assim dizer, superestimativa propaga-se para a determinação analítica das pressões extremas aqui apresentadas.

Tabela 18 – Comparativo entre as pressões extremas máximas e mínimas obtidas experimentalmente e estimadas segundo o método proposto.

X	-0,277		-0,157		0,000		0,105		0,206	
$P_{X\%}/\gamma$	$\Delta P/\gamma$	$\Delta P\%$	$\Delta P/\gamma$	$\Delta P\%$	$\Delta P/\gamma$	$\Delta P\%$	$\Delta P/\gamma$	$\Delta P\%$	$\Delta P/\gamma$	$\Delta P\%$
$P_{0,1\%}/\gamma$	0,039	16,1%	-0,039	-11,5%	-0,015	-5,1%	0,004	2,1%	-0,008	-4,2%
$P_{1\%}/\gamma$	0,030	11,5%	-0,036	-9,7%	-0,013	-3,8%	0,003	1,3%	-0,009	-3,7%
$P_{99\%}/\gamma$	0,008	2,4%	-0,079	-16,3%	-0,012	-2,5%	0,013	3,0%	-0,022	-5,1%
$P_{99,9\%}/\gamma$	0,010	2,5%	-0,106	-21,2%	-0,019	-3,7%	0,010	2,0%	-0,033	-7,0%

X	0,307		0,408		0,506		0,707		0,911	
$P_{X\%}/\gamma$	$\Delta P/\gamma$	$\Delta P\%$	$\Delta P/\gamma$	$\Delta P\%$	$\Delta P/\gamma$	$\Delta P\%$	$\Delta P/\gamma$	$\Delta P\%$	$\Delta P/\gamma$	$\Delta P\%$
$P_{0,1\%}/\gamma$	-0,016	-8,4%	-0,013	-5,9%	-0,033	-14,4%	-0,027	-9,5%	-0,022	-7,1%
$P_{1\%}/\gamma$	-0,012	-4,8%	-0,010	-3,7%	-0,022	-8,0%	-0,015	-4,7%	-0,011	-3,3%
$P_{99\%}/\gamma$	-0,028	-6,6%	-0,014	-3,2%	-0,008	-1,9%	0,000	0,0%	0,005	1,2%
$P_{99,9\%}/\gamma$	-0,034	-7,1%	-0,021	-4,4%	-0,015	-3,2%	-0,001	-0,1%	0,001	0,2%

X	1,122		1,323		1,520		1,721	
$P_{X\%}/\gamma$	$\Delta P/\gamma$	$\Delta P\%$	$\Delta P/\gamma$	$\Delta P\%$	$\Delta P/\gamma$	$\Delta P\%$	$\Delta P/\gamma$	$\Delta P\%$
$P_{0,1\%}/\gamma$	-0,011	-3,2%	-0,006	-1,7%	0,012	3,0%	0,004	1,0%
$P_{1\%}/\gamma$	-0,003	-0,9%	-0,001	-0,4%	0,011	2,7%	0,004	1,1%
$P_{99\%}/\gamma$	0,007	1,5%	0,005	1,1%	0,002	0,4%	0,005	1,1%
$P_{99,9\%}/\gamma$	0,008	1,8%	0,004	0,9%	-0,001	-0,1%	0,007	1,6%

Os demais resultados estão apresentados no Anexo F quanto às pressões com probabilidades de não excedência de 0,1%, 1%, 5%, 10%, 90%, 95%, 99% e 99,9%, para todas as condições de ensaio deste estudo, seja em ressaltado hidráulico tipo A ou tipo B.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo deste trabalho é avaliar as pressões médias, flutuantes e extremas atuando junto ao piso de bacias de dissipação por ressalto hidráulico, a partir de uma abordagem que considera o ressalto hidráulico como uma composição de efeitos hidráulicos identificados individualmente a partir de distintas condições de escoamento.

A dissociação de efeitos aqui conduzida buscou individualizar os efeitos de pressão devidos (i) à curva de concordância vertical, (ii) ao escoamento livre sobre a bacia de dissipação, (iii) o ressalto hidráulico livre (Tipo A) e (iv) o afogamento do ressalto hidráulico.

Uma vez acumulados os efeitos estima-se as pressões com distintas probabilidades de não-excedência a partir do coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades (N), conforme proposição de Marques *et al.* (1999).

7.1 Efeitos da Curva de Concordância Vertical

Verificou-se que a influência da curva de concordância vertical entre o perfil vertente e a bacia de dissipação, tanto para as pressões médias quanto para as flutuações de pressão, cessam na mesma posição.

Desta forma, a partir do ponto central da curva de concordância, posição de máxima pressão média, o comprimento total de influência se prolonga até a distância equivalente a 50% da energia cinética do escoamento no ponto de tangência terminal da curva.

A estimativa das pressões médias ao longo da curva de concordância consiste em avaliar, em cada ponto, a pressão hidrostática e a pressão devida à força centrífuga. Identificou-se, contudo, a necessidade da inclusão de um fator de correção estabelecido como função (i) do número de Froude do escoamento (Fr_1), (ii) do ângulo total entre os pontos de tangência da curva de concordância (β) e (iii) da posição do ponto em análise, em relação ao ponto central da curva de concordância, representado pelo ângulo formado entre ambos (α).

As flutuações máximas de pressão foram identificadas no centro da curva de concordância vertical, e assumem valores da ordem de 1% da energia cinética do escoamento no ponto de tangência terminal da curva.

7.2 Efeitos do Escoamento Livre sobre a Bacia de Dissipação

Avaliando comparativamente as pressões médias e os níveis médios da superfície livre d'água ao longo da bacia de dissipação identificou-se comportamento semelhante entre ambos.

Desta forma, cessada a influência da curva de concordância vertical, o escoamento em regime rápido sobre a bacia de dissipação pode ser abordado da forma clássica, a partir das curvas tradicionais de remanso, a partir de um coeficiente de rugosidade representativo da superfície sobre a qual ocorre o escoamento.

Considera-se, assim, o comportamento hidrostático das pressão ao longo de toda a bacia de dissipação quando a mesma está operando sem a formação do ressalto hidráulico.

As flutuações de pressão induzidas pelo escoamento em regime rápido apresentaram-se bastante diminutas, não excedendo a 0,5% da energia cinética do escoamento no ponto de tangência terminal da curva, contudo, apresentando crescimento de montante para jusante.

7.3 Efeitos do Ressalto Hidráulico Livre (Tipo A)

As pressões médias atribuídas ao ressalto hidráulico livre (Tipo A) seguem forma semelhante àquela apresentada por Marques *et al.* (1996), contudo, com a dissociação dos efeitos da curva de concordância vertical e do escoamento em regime rápido sobre a bacia de dissipação, obteve-se menor dispersão dos pontos, especialmente nas seções iniciais do ressalto hidráulico.

A influência do ressalto hidráulico sobre as pressões médias atuantes na estrutura estende-se, evidentemente, até cessar a transição do regime rápido para o regime lento, na posição adimensional $\Gamma = 8$.

As flutuações de pressão atribuídas à transição de regime foram avaliadas pela diferença entre os valores flutuantes verificados no ressalto livre e aqueles verificados no escoamento livre sobre a curva de concordância e bacia de dissipação. A adimensionalização desta diferença pela dissipação total de energia ao longo do ressalto hidráulico, aplicando a abordagem de Marques et. al. (1996) aos efeitos dissociados, mostrou melhor agrupamento dos resultados experimentais, especialmente nas seções iniciais do ressalto hidráulico.

Confirma-se que as máximas flutuações de pressão, ainda que dispersas, ocorrem, em média, na posição adimensional $\Gamma = 1,75$, quando as mesmas passam a decrescer em direção ao final da transição do regime.

O ajuste polinomial proposto representa apenas uma estimativa média do comportamento longitudinal das flutuações de pressão, devendo ser utilizado com critério e com vistas à dispersão natural dos resultados experimentais aqui apresentados.

7.4 Efeitos do Afogamento do Ressalto Hidráulico

Para identificar os efeitos atribuídos ao afogamento do ressalto hidráulico estabeleceu-se, inicialmente, uma relação representativa da posição de início do ressalto hidráulico. Para tanto, por um lado, correlacionou-se o aumento do nível d'água devido ao afogamento do ressalto pela altura rápida do ressalto hidráulico livre e por outro, correlacionou-se a posição onde se inicia o ressalto hidráulico afogado (de jusante para montante a partir do final da curva de concordância vertical) pela diferença entre as alturas conjugadas do ressalto hidráulico livre.

O comportamento longitudinal das pressões médias devidas exclusivamente ao afogamento do ressalto mostrou-se função do fator de submergência (T_w/Y_2) e apresentou crescimento acentuado, em média, até a posição de máxima flutuação do ressalto hidráulico livre. A partir dessa região de máxima influência do afogamento, as pressões médias passam a decrescer em direção ao final do ressalto, estabilizando em torno da distância equivalente a 8 vezes a diferença entre as alturas conjugadas do ressalto hidráulico livre.

Quanto às flutuações de pressão, o afogamento apresentou máxima influência na região onde se identificou, também, a máxima flutuação de pressão do

ressalto hidráulico livre. A partir deste ponto a influência passa a diminuir até a posição adimensional $\Gamma = 3$, quando passa a amortecer as flutuações verificadas no ressalto hidráulico livre. A influência do afogamento segue amortecendo as flutuações até o final do ressalto hidráulico, atingindo o máximo amortecimento na posição adimensional $\Gamma = 4$.

7.5 Coeficiente Estatístico de Distribuição de Probabilidades (N)

Na avaliação do coeficiente de distribuição de probabilidades identificou-se que até a posição adimensional $\Gamma = 3$, onde o afogamento não tem influência sobre as flutuações de pressão, as pressões distribuem-se probabilisticamente de forma distinta nos ressaltos hidráulicos tipos A e B.

Para ressaltos hidráulicos afogados, o coeficiente N assume características constantes para cada uma das probabilidades, ao passo que para ressaltos hidráulicos livres o coeficiente N mostra-se decrescente.

A partir da posição adimensional $\Gamma = 3$, as probabilidades distribuem-se de forma idêntica tanto para ressaltos hidráulicos livres quanto afogados.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Visando a continuidade dos estudos acerca do ressalto hidráulico formado a jusante de vertedouros, citam-se alguns temas a serem investigados, tanto para agregar novos conhecimentos e parâmetros ao ressalto hidráulico, como para ratificar algumas das questões desenvolvidas neste estudo

- Avaliação da influência da curva de concordância vertical com distintos raios de curvatura, com ênfase na avaliação das pressões extremas atuantes nesta região.

- Incorporação de características bifásicas (escoamento água-ar) na análise do ressalto hidráulico e sua influência sobre os esforços hidrodinâmicos atuantes na bacia de dissipação.

- Mapeamento espacial do campo de pressões sobre a bacia de dissipação, visando identificar estruturas macroturbulentas transversais ao fluxo principal.

- Análise das flutuações de nível, notadamente nas seções iniciais do ressalto hidráulico onde se identificam as máximas flutuações de pressão, visando a associação destas flutuações à frequências dominantes do fenômeno.

- Mapeamento das componentes de velocidade, não apenas junto ao fundo, mas no interior do ressalto hidráulico, visando agregar conhecimento científico sobre os aspectos turbulentos do escoamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AKBARI, M. E.; MITTAL, M. K.; PANDE, P. K. (1982) Pressure Fluctuations on the Floor of Free and Forced Hydraulic Jumps. International Conference on the Hydraulic Modelling of Civil Engineering Structures. Coventry, England, September, 22-24, pp. 87-96.
2. 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, vol. 38, 359-368.
3. BAPTISTA, M. B. E LARA, M. M. (2002) Fundamentos de Engenharia Hidráulica. Ed. UFMG, Belo Horizonte, 440p.
4. BÉLANGER, J. B. (1828). Essai sur la Solution Numérique de Quelques Problèmes Relatifs au Mouvement Permanent des Eaux Courantes. Paris, Chez Carilian-Goeury, 46p.
5. 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, vol. 8, n. 2, pp. 34-44.
6. BIDONE, G. (1820). Expériences sur le Remou et sur la Propagation des Ondes. Memorie della Reale Accademia delle Scienze di Torino, 25 (1820), 21–112.
7. BRESSE, J. A. C. (1868). Cours de Mécanique Appliquée. Seconde Partie. Hydraulique. Gauthier-Villars, Paris, 590p.
8. 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. Instituto de Pesquisas Hidráulica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 179p.
9. CHANSON, H. (1995a). Air-Water Gas Transfer at Hydraulic Jump with Partially Developed Inflow. Water Resources, Vol. 29, nº 10, 2247-2254.
10. CHANSON, H. (2006) Air Bubble Entrainment in Hydraulic Jumps - Similitude e Scale Effects. Report CH 57/05. The University of Queensland, Australia, 119p.

11. CHOW, V. T. (1959). Open Channel Hydraulics. McGraw-Hill Book Co., Inc., 393-438.
12. ELEVATORSKY, E. A. (1959). Hydraulic Energy Dissipators. New-York, McGraw-Hill, 214p.
13. ELETROBRÁS-FURNAS (2007). Análise Geral dos Dados e Diretrizes para Projeto. Relatório de Produto de Pesquisa - P&D Análise da Macroturbulência em Dissipadores por Ressalto Hidráulico. Rio de Janeiro, 70p.
14. ENDRES, L. A. M. (1990). Contribuição ao Desenvolvimento de um Sistema para Aquisição e Tratamento de Dados de Pressões Instantâneas em Laboratório. Dissertação de Mestrado, IPH/UFRGS, Porto Alegre, 112 p.
15. EPE (2010) Balanço Energético Nacional – Ano Base 2009. Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro: EPE, 2010, 276p.
16. FIOROTTO, V E RINALDO, A. (1992). Fluctuating Uplift and Linings Design in Spillway Stilling Basins. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, vol. 118, nº 4, 578-596.
17. GOMES, J. F. (2000). Visualização de escoamento Macroturbulento – Ressalto Hidráulico a Jusante de uma Comporta. Dissertação de Mestrado. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 90p.
18. GOVINDA RAO, N. S.; RAJARATNAM, N. (1963). The Submerged Hydraulic Jump. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, vol. 89, n. HY1, pp. 139-162.
19. HAGER, W. H. (1988). B-Jump in Sloping Channel. Journal of Hydraulic Research, vol. 26, n. 5, 539-558.
20. HAGER, W. H. (1992). Energy Dissipators and Hydraulic Jump. Water Science and Technology Library, Kluwer Academic Publishers, 289 p.
21. HAGER, W. H.; BREMEN, R. (1989). Classical Hydraulic Jump: Sequent Depths. Journal of Hydraulic Research, vol. 27, n. 5, pp. 565-585.
22. HAGER, W. H.; BREMEN, R.; KAWAGOSHI, N. (1990). Classical Hydraulic Jump: Length of Roller. Journal of Hydraulic Research, vol. 28, nº5, 591-605.
23. HAGER, W. H.; HUTTER, K. (1983) Approximate Treatment of the Plane Hydraulic Jump with Separation Zone above the Flow Zone. Journal of Hydraulic Research, vol. 21, n. 3, pp. 195-204.

24. ICOLD/CBDB (2002). Large Brazilian Spillways – Overview of Brazilian Practice and Experience in designing and Building Spillways for Large Dams.
25. ICOLD (2008). As Barragens e a Água do Mundo – Um livro educativo que explica como as barragens ajudam a administrar a água do mundo. Comissão Internacional de Grandes Barragens – Comitê Brasileiro de Barragens – Núcleo Regional do Paraná, 2008, 74p.
26. IEA (2010) Key World Energy Statistics. International Energy Agency, Paris, 2010, 82p.
27. KADER, M. H. A.; ELANGO, K. (1974). Turbulent Pressure Beneath a Hydraulic Jump. Journal of Hydraulic Research, vol. 12, nº 4, 469-489.
28. KOBUS, H. (1991) Introduction to air-water-flows. In: Air Entrainment in Free Surface Flow, IAHR, A. A. Balkema, Rotterdam.
29. LEUTHEUSSER, H. J.; KARTHA, V. C. (1972). Effects of Inflow Condition on Hydraulic Jump. Journal of the Hydraulic Division, ASCE, vol. 98, n. HY8, pp. 1367-1385.
30. LINFU, Z.; JIE, X. (1985) Estudo das Características Hidráulicas e de Cavitação de Curvas Verticais em Canais considerando o escoamento bidimensional. Shuili xuebao, Beijing (6), Junho, 1984, p. 19-27; Traduzido do chinês por J. A. Pinto de Campos, Engenharia Civil, Técnico Assessor - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1985.
31. LIU, M.; ZHU, D.Z.; RAJARATNAM, N. (2002). Evaluation of ADV measurements in bubbly two-phase flows. In: Hydraulic Proceedings of the Measurements and Experimental Methods Conference, ASCE, EWRI, Estes Park (CO), USA.
32. LONG, D.; STEFFLER, P. M.; RAJARATNAM, N. (1990) LDA Study of Flow Structure in Submerged Hydraulic Jumps. Journal of Hydraulic Research, vol. 28, nº 4, 437-460.
33. LONG, D.; RAJARATNAM, N.; STEFFLER, P. M.; SMY, P. R. (1991). Structure of Flow in Hydraulic Jumps. Journal of Hydraulic Research, Vol. 29, nº 2, 207-218.
34. LOPARDO, R. A. (1986) Notas sobre Fluctuaciones Macroturbulentas de Presion, Medicion, Analisis y Aplicacion al Resalto Hidraulico. In: Curso No 1

- Turbulencia, Cavitation y Aireacion de Fenomenos Hidraulicos. São Paulo, 35p.
35. LOPARDO, R. A.; FATTOR, C. A.; CASADO, J. M.; LOPARDO, M. C. (2004a) Uma Aproximación por Turbulencia Remanente de la Longitud del Resalto Sumergido. In: XXI Congresso Latino Americano de Hidráulica, 9p.
36. LOPARDO, R. A.; FATTOR, C. A.; LOPARDO, M. C.; CASADO, J. M. (2004b) Instantaneous Pressure Field on a Submerged Jump Stilling Basins. *Hydraulics of Dams and River Structures*. Farhard Yazdandood & Jalal Attari, A. A. Balkema Publishers, Londo, U. K., pp. 133-138.
37. LOPARDO, R. A. (2005a). Una Aproximación al Estudios de Flujos Macroturbulentos en Resalto Hidráulico. In: *Escoamentos Macroturbulentos – Extensão Universitária modalidade “Curso Presencial”*. Departamento de Obras Hidráulicas, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 40p.
38. LOPARDO, R. A.; LOPARDO, M. C.; CANELLAS, A. V.; MARQUES, M. G. (2006). *Ascultação em Estruturas Hidráulicas*. V Simpósio Brasileiro sobre Pequenas e Médias Centrais Hidrelétricas, Florianópolis, 25p.
39. MARQUES, M.G. (1995). *Nouvelle approche pour le Dimensionnement des Dissipateurs à Auge*. Tese. Faculte de Sciencse et Genie de la Universite Laval, Canadá.
40. MARQUES, M. G., DRAPEAU, J. E VERRETTE, J. L. (1996). Flutuação de pressão em um ressalto hidráulico. In.: XVII Congresso Latino Americano de Hidráulica, Guayaquil, Equador.
41. 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: XVIII Congresso Latino Americano de Hidráulica, Oaxaca, México.
42. MARQUES, M. G.; ALMEIDA, F. M.; ENDRES, L. A. M. (1999). Adimensionalização de Pressões Médias em Bacias de Dissipação por Ressalto Hidráulico. XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Belo Horizonte, Novembro.
43. 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, vol. 9, n. 1, p. 127-153.
44. MARQUES, M. G.; TRIERWEILER, E. F. N. ; ENDRES, L. A. M. ; TEIXEIRA, E. D. (2004b) Determinação Analítica da Linha de Separação de Escoamentos para o Ressalto Hidráulico. In: XXI Congresso Latino Americano de Hidráulica, São Pedro, Brasil.
45. MME (2007) Plano Nacional de Energia 2030. Ministério de Minas e Energia – Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME : EPE, 2007, 12 Vol.
46. MOLLER, S. V.; SILVESTRINI, J. H. (2004) Turbulência: Fundamentos. IV Escola de Transição e Turbulência. Porto Alegre, RS, Brasil, 2004, 32p.
47. MOSSA, M. (1999). On the Oscillating Characteristics of Hydraulic Jumps. Journal of Hydraulic Research, IAHR, Vol. 37, No. 4, pp. 541-558.
48. NARAYANAM, R. (1978) Pressure Fluctuations Beneath Submerged Jump. Journal of the Hydraulic Division, vol. 104, n. HY9, pp. 1331-1342.
49. OHTSU, I.; YASUDA, Y. (1991) Hydraulic Jump in Sloping Channels. Journal of Hydraulic Engineering, vol. 117, n°7, 905-921.
50. OHTSU, I.; YASUDA, Y. (1994). Characteristics of Supercritical Flow below Sluice Gate. Journal Hydraulic Engineering, vol.120, n. 3, p.332-346.
51. 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. I Escola Primavera Transição e Turbulência, Rio de Janeiro, vol. 1, pp. 293-320.
52. PETERKA, A J. (1974). Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators. US Department Interior, Bureau of Reclamation, Engineering Monograph 25, Denver.
53. PINHEIRO, A. A. N. (1995). Acções Hidrodinâmicas em Soleiras de Bacia de Dissipação de Energia por Ressalto. Tese, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
54. PINTO, L. C. S.; VASCONCELLOS, J. E.; SEYSSEL, R. L. (1988). XXIII Congresso Latinoamericano de Hidráulica, Havana, Cuba, pp. 182-194.
55. RAJARATNAM, N. (1965a). Submerged Hydraulic Jump. ASCE, Journal of Hyraulic Division, vol. 91, HY4, April, 71-96.

56. RAJARATNAM, N. (1965b) The Hydraulic jump as a Wall Jet. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, vol. 91, n. HY5, pp. 107-132.
57. RAJARATNAM, N. (1967) Hydraulic Jumps. Advances in Hydrosience. 4:197-280. Ed. V. T. Chow, Academic Press: New York.
58. RAJARATNAM, N.; SUBRAMANYA, K. (1968) Profile of the Hydraulic Jump. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, vol. 94, n. HY3, May, 663-673.
59. RESCH, F. J.; LEUTHEUSSER, H. J. (1971) Mesures de Turbulence dans le Ressaut Hydraulique. La Houille Blanche, n. 1, pp. 17-31.
60. RESCH, F. J.; LEUTHEUSSER, H. J.; ALEMU, S. (1974). Bubbly Two-Phase Flow in Hydraulic Jump. Journal of the Hydraulic Division, ASCE, vol. 100, n. HY1, pp. 137-150.
61. SAUMA HADDAD, J. C.; DE LIO, J. C.; LOPARDO, R. A. (1992). Una aproximación Analítica para la Superficie Libre del Resalto Hidráulico. XV Congresso Latinoamericano de Hidráulica, Cartagena, Colombia, 11p.
62. SARMA, K. V. N.; NEWNHAM, D. A. (1973) Surface Profiles of Hydraulic Jump for Froude Numbers less than Four. Water Power, april, pp. 139-142.
63. SENTURK, F. (1998) Hydraulics of Dams and Reservoirs Water Resources, Publications.
64. TEIXEIRA, E. D. (2003) Previsão dos Valores de Pressão Junto ao Fundo em Bacias de Dissipação por Ressonância Hidráulica. Dissertação de Mestrado. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 116p.
65. TEIXEIRA, E. D. (2008) Efeito de Escala na Previsão dos Valores Extremos de Pressão Junto ao Fundo em Bacias de Dissipação por Ressonância Hidráulica. Tese de Doutorado. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 293p.
66. TENNEKES, H.; LUMLEY, J. L. (1972) A First Course in Turbulence. Cambridge, MA: MIT Press.
67. TOSO, J. E BOWERS, E. C. (1988). Extreme Pressure in Hydraulic Jump Stilling Basins. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, vol. 114, n° 8, pp. 829-843.
68. TRIERWEILER, E. F. N. (2006). Avaliação do Campo de Pressões em Ressonância Hidráulica formado à Jusante de uma Comporta com Diferentes

- Graus de Submergência. Dissertação de Mestrado. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 194p.
69. WANIEWSKI, T. A.; HUNTER, C.; BRENNEN, C. (2001). Bubble Measurements Downstream of Hydraulic Jumps. *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 27, 1271-1284.
70. WIEST, R. A.; MARQUES, M. G.; TEIXEIRA, E. D.; MEES, A. A. A.; DAI PRÁ, M.; ENDRES, L. A. M.; CANELLAS, A. V. B.; FERAUDY FILHO, R. P. (2005). Influência da Submergência na Determinação do Coeficiente Estatístico de Distribuição de Probabilidade para Pressões Extremas em Bacias de Dissipação por Ressalto Hidráulico. In: XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, João Pessoa. 15p.
71. WIEST, R. A. (2008). Avaliação do Campo de Pressões em Ressalto Hidráulico formado à Jusante de um vertedouro com diferentes graus de submergência. Dissertação de Mestrado. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 141p.

ANEXOS

ANEXO A – CARACTERIZAÇÃO TÉCNICA DOS TRANSMISSORES DE PRESSÃO



• Transmissor de Pressão Industrial

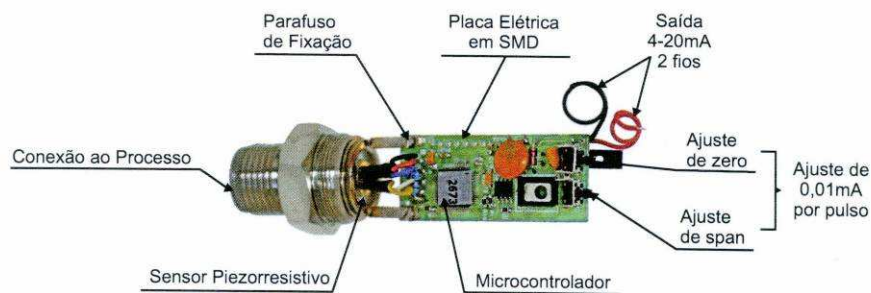
O PSI.420 é um transmissor de alta performance, seu sensor é totalmente em aço inox AISI 316/304. Compatível com a grande parte dos fluidos industriais em processos pneumáticos, hidráulicos, gases corrosivos. A eletrônica microcontrolada, garante precisão e durabilidade aliada a um sensor Piezorresistivo, onde as técnicas de fabricação são as mais atuais.

Características:

- Grau de proteção do Invólucro IP-65 (opcional IP-68 prensa cabo)
- Material do Invólucro aço inox AISI 304 (316 opcional)
- Faixa: de vácuo a 1600 Bar
- Vedações anéis o'ring, borracha nitrílica
- Conector DIN 43650
- Tipo de Sensor Piezorresistivo
- Sobrepressão (em pico) 1 x Fundo de escala (outra especificar)
- Sinal de Saída 4 - 20mA
- Precisão do Sinal 0,1%
- Resolução da Saída Analógica Infinita
- Temperatura do Fluido -10 +80°C (opcional até 400°C)
- Temperatura do Invólucro 55°C
- Zero e Span Ajustáveis 20% F.E. (Por PUSH BUTTON)
Ajuste de 0,01mA por pulso
- Vida Útil 70 x 10⁶
- Precisão, Histerese, Repetibilidade, Linearidade 0,25% F.E.
(Opcional: 0,05% F.E. ou 0,1% F.E.)
- Alimentação 9 a 30 Vcc
- Proteção total contra a rádio frequência (RF) e inversão de polaridade

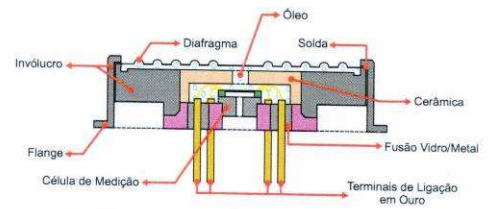
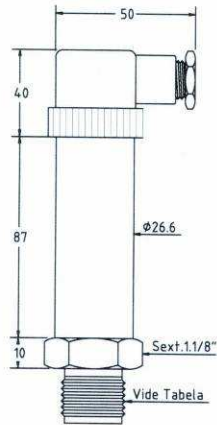
Aplicações

Processos: Hidráulicos, Pneumáticos, Líquidos e Gases corrosivos ou não





Dimensões



Esquema de Ligação

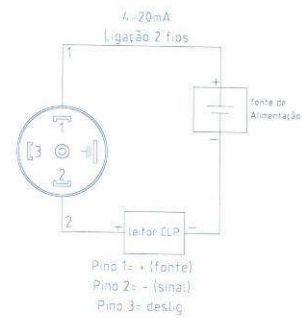
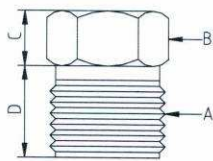


Tabela A - Conexões ao Processo



Cód.	A	B	C	D
14-B	1/4" BSP	Sext. 22,22	10	13
14-N	1/4" NPT	Sext. 22,22	10	13
12-B	1/2" BSP	Sext. 22,22	10	17
12-N	1/2" NPT	Sext. 22,22	10	17
34-B	3/4" BSP	Sext. 22,22	10	18
34-N	3/4" NPT	Sext. 22,22	10	18
1-N	1" NPT	Sext. 22,22	10	22
1-N	1" NPT	Sext. 22,22	10	22
Outra, especificar				

Tabela B - Pressão Relativa/Absoluta

Cód.	Pressão Relativa		
	Bar	Kgf/cm ²	PSI
020	0,2	0,2	3,0
1	1	1,02	14,51
7	7	7,14	101,57
14	14	14,28	203,14
21	21	21,42	304,71
70	70	71,4	1015,7
140	140	142,8	2031,4
200	200	204	2902
350	350	357	5078,5
700	700	714	10157
1000	1000	1020	14510
1600	1600	1632	23216
Cód.	Pressão Absoluta		
	Bar	Kgf/cm ²	PSI
1A	1	1,02	14,51
3A	3	3,06	43,53
7A	7	7,14	101,57
10A	10	10,2	145,1

Nota: Para outros sinais de saída ver modelo PSI.010 (0-10/0-5/1 à 5).

Código para pedido:

PSI.420

34-B

200

Transmissor de pressão

Tabela A
Conexões ao processo

Tabela B
Pressão Relativa/Absoluta

Obs.: Para grau de proteção IP-68 informar comprimento do cabo

ANEXO B – CARACTERIZAÇÃO TÉCNICA DO CALIBRADOR DE PRESSÕES

717/718/718Ex/719 Pressure Calibrators

FLUKE®

New



Fluke 719



Fluke 717



Fluke 718Ex



Fluke 718



Included Accessories

Fluke 717, 718, 718Ex and 719.
Yellow Holster (718Ex red holster), TL75 Test leads, AC72 Alligator Clips, Single 9V alkaline battery (two 9V batteries in 718 and 719), User manual on CD ROM.
719 also includes: Push fit connectors, Translucent test hose.

Ordering Information

Fluke 719 30G	Electric Pressure Calibrator
Fluke 719 100G	Electric Pressure Calibrator
Fluke 718 1G	Pressure Calibrator
Fluke 718 30G	Pressure Calibrator
Fluke 718 100G	Pressure Calibrator
Fluke 718 300G	Pressure Calibrator
Fluke 717 1G	Pressure Calibrator
Fluke 717 30G	Pressure Calibrator
Fluke 717 100G	Pressure Calibrator
Fluke 717 300G	Pressure Calibrator
Fluke 717 500G	Pressure Calibrator
Fluke 717 1000G	Pressure Calibrator
Fluke 717 1500G	Pressure Calibrator
Fluke 717 3000G	Pressure Calibrator
Fluke 717 5000G	Pressure Calibrator

11528-eng Rev. 01

Pump up the pressure

717 Pressure Calibrators

- Measure pressure, 0.05% of full scale with internal sensor
- 1/8 NPT pressure fitting
- Compatible with non-corrosive gasses and liquids
- Pressure measurement to 700 bar using any of the Fluke-700Pxx Pressure Modules
- Wide range of selectable measurement units for pressure
- Current measurement with 0.015% accuracy and 0.001mA resolution
- Simultaneous pressure and current measurement for easy P/I testing
- 24 volt loop power supply
- Zero, Min-Max, Hold and Damping functions
- Pressure switch test captures set, reset and deadband values

718 Pressure Calibrators

- Same features as Fluke 717 plus:
- Newly designed built-in pressure/vacuum hand pump with vernier and bleed valve helps protect the pump from damage and is easier to clean

719 Electric Pressure Calibrator

- Same features as Fluke 717 plus:
- Electric pump for one handed operation
- mA source for calibrating I/P devices and 4-20 mA I/O
- Best in class pressure measurement accuracy of 0.025%

Specifications

Model	Range	Resolution	Over Pressure
719 30G	-850 mbar to 2.4 bar	0.1 mbar	Over pressure 2xFS
719 100G	-850 mbar to 8 bar	1 mbar	Over Pressure 2xFS
718 1G	-68.9 mbar to 68.9 mbar	0.001 mbar	Over Pressure 5xFS
718 30G	-850 mbar to 2 bar	0.1 mbar	Over Pressure 2xFS
718 100G	-850 mbar to 7 bar	0.1 mbar	Over Pressure 2xFS
718 300G	-850 mbar to 20 bar	1 mbar	Over Pressure 375 PSI, 25 bar
717 1G	-68.9 mbar to 68.9 mbar	0.001 mbar	Over Pressure 5xFS
717 30G	-850 mbar to 2 bar	0.1 mbar	Over Pressure 2xFS
717 100G	-850 mbar to 7 bar	0.1 mbar	Over Pressure 2xFS
717 300G	-850 mbar to 20 bar	1 mbar	Over Pressure 375 PSI, 25 bar
717 500G	0 mbar to 34.5 bar	1 mbar	Over Pressure 2xFS
717 1000G	0 mbar to 69 bar	1 mbar	Over Pressure 2xFS
717 1500G	0 bar to 103.4 bar	0.01 bar	Over Pressure 2xFS
717 3000G	0 bar to 207 bar	0.01 bar	Over Pressure 2xFS
717 5000G	0 bar to 345 bar	0.01 bar	Over Pressure 2xFS

For Fluke 717/718/719 models: Supported Pressure Units; psi, in. H₂O(4°C), in. H₂O(20°C), cm H₂O(4°C), cm H₂O(20°C), bar mBar, kPa, inHg, mmHg, kg/cm²

Functions: Zero, Min, Max, Hold, Damp functions

Max. Voltage: 30 V

Operating temperature: -10°C to 55°C

Safety: CSA C22.2 No. 1010.1:1992

EMC: EN50082-1:1992 and EN55022:1994 Class B

Fluke 717: For use with non corrosive gasses and liquids

Fluke 718/719: For use with non corrosive gasses

717

Size (HxWxD): 201 mm x 98 mm x 52 mm

Weight: 0.6 kg

Three Year Warranty

719

Size (HxWxD): 210 mm x 87 mm x 60 mm

Weight: 0.912 kg

Three Year Warranty (Pump one year)

718/718Ex

Size (HxWxD): 216 mm x 94 mm x 66 mm

Weight: 0.992 kg

Warranty: Three years

Recommended Accessories

(Not for hazardous zones)



C43 (718)



C125 (717)



TL220



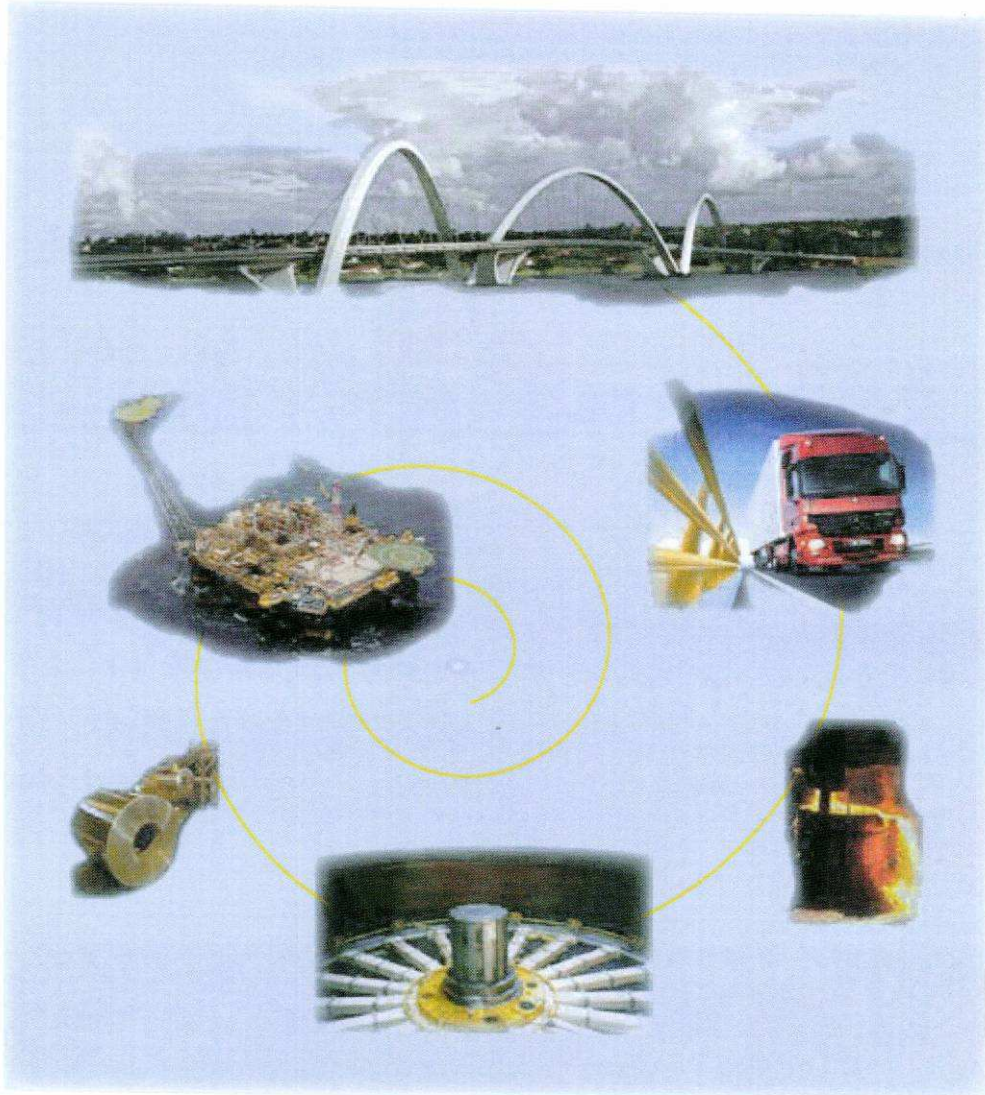
700P27



700 LTP-1

ANEXO C – CARACTERIZAÇÃO TÉCNICA DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Aquisição de Dados Lynx



Simplicidade e versatilidade na
obtenção de dados experimentais



www.lynxtec.com.br

Lynx Tecnologia Eletrônica

Pesquisadores, engenheiros e técnicos realizam, na sua atividade diária, medições e ensaios necessários às mais diversas áreas do conhecimento, das ciências da vida às operações industriais. A aquisição de dados por computador é uma ferramenta cada vez mais utilizada por estes profissionais em seu trabalho. Seja para o estudo de sinais biológicos ou na análise de vibrações em estruturas, a Lynx fornece diversas soluções para aquisição de dados usando computadores desktop ou notebooks. São componentes individuais ou na forma de sistemas integrados: conversores A/D, condicionadores de sinais e programas.

AqDados

O AqDados é um programa de aquisição de dados de uso geral, versátil e simples de usar. Com diversos recursos para facilitar o trabalho de configuração e calibração, o AqDados permite ainda gravar diretamente no disco (*streaming to disk*). Este recurso permite gravar sinais continuamente durante longos períodos, mesmo em altas velocidades de aquisição de dados.

Calibração e ajuste:

- ▣ controle do hardware (depende do recurso estar disponível no condicionador utilizado): seleção de tipo de entrada, ganho, balanceamento, offset, filtro;
- ▣ regressão linear da escala;
- ▣ linearização de sinais (termopares);
- ▣ compensação de junta fria (termopares);
- ▣ fundo de escala ajustado por ganho: basta informar o ganho do sensor para determinar o fundo de escala.

Suporte a entrada de pulsos:

- ▣ contagem;
- ▣ período;
- ▣ frequência.

Taxa de aquisição programável:

- ▣ desde mili-Hertz a dezenas de kHz (depende do computador e do equipamento de aquisição utilizado).

Duração do ensaio programável:

- ▣ desde segundos até horas.

Gravação programável:

- ▣ imediata;
- ▣ a intervalos periódicos;
- ▣ disparo por cruzamento de nível.

Visualização do sinal em tempo real:

- ▣ gráficos variável x tempo (x×t) e variável x variável (x×y);
- ▣ a organização por pastas (até 16 pastas com até 8 sinais em cada) permite rápido acesso a grupos de sinais;
- ▣ ajuste de velocidade de varredura na tela (zoom horizontal);
- ▣ zoom vertical;
- ▣ ajuste de offset visual (centralização do sinal);
- ▣ analisador de espectro em tempo real: janelamento, média exponencial e linear.

Facilidade de uso

Com o AqDados é fácil fazer aquisição de dados. Você não precisa ser um especialista em eletrônica ou programação. Você desempacota e começa a usar:

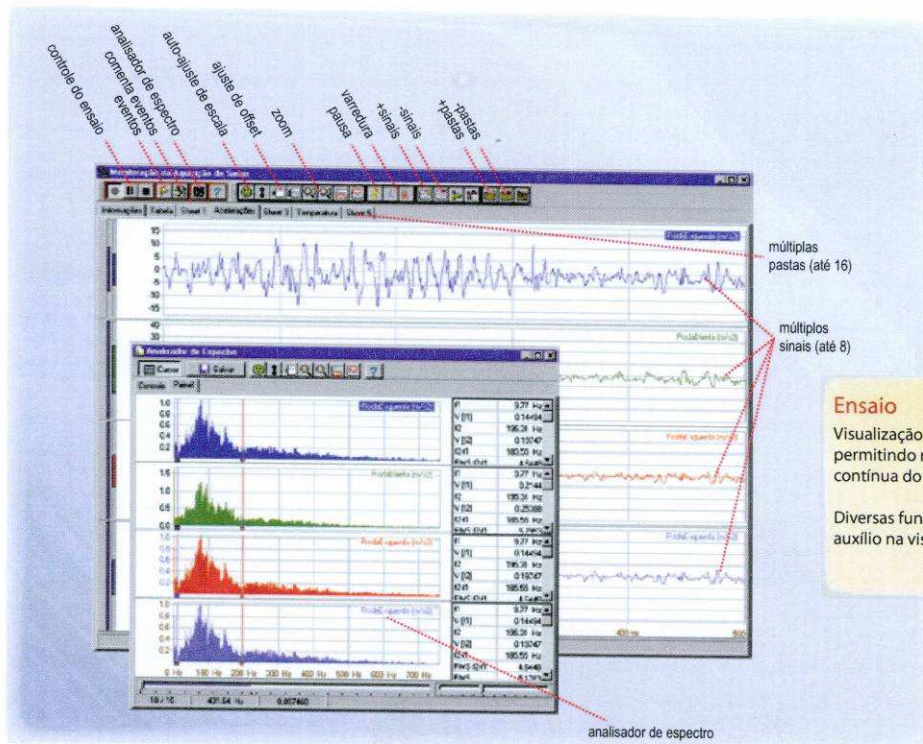
- ◇ configure os canais;
- ◇ calibre;
- ◇ escolha o nome do arquivo;
- ◇ defina a velocidade de aquisição;
- ◇ inicie a gravação;
- ◇ os seus dados estão prontos para visualização, processamento e análise.

Registro de eventos durante o ensaio:

- ▣ tabela de comentários personalizáveis;
- ▣ comentário manual;
- ▣ até 32 eventos em um ensaio.

Help online:

- ▣ diagramas de conexão dos sinais;
- ▣ configurações de jumpers/chaves (para os condicionadores configurados manualmente);
- ▣ comandos e funções disponíveis.



Ensaio
Visualização em tempo real, permitindo monitoração contínua do ensaio.
Diversas funções para auxílio na visualização.

AqDAnalysis

O AqDAnalysis é o módulo de análise e processamento de sinais que acompanha o AqDados.

Visualização em pastas:

- trabalha com o conceito de pastas. Cada pasta apresenta um conjunto de gráficos de um mesmo tipo;
- são até 16 pastas diferentes com 16 gráficos cada;
- as pastas são agrupadas em até 4 consultas, comportando até 1024 gráficos;
- Selecione os sinais arrastando-os para a tela.

Tipos de sinais:

- no domínio do tempo;
- no domínio da frequência;
- estatísticas (padrão, Markov e Rainflow).

Formas de apresentação gráfica:

- sinais temporais: no tempo e x-y, sobrepostos ou separados, modo polígrafo (aparência de registrador gráfico);
- espectros (potência, densidade de potência, parte real e imaginária) na forma de linha/barras; diagramas de Nichols e Nyquist;
- estatísticas de Markov e Rainflow.

Diversas ferramentas para ajuste dos gráficos na tela:

- vide figura.

Análise dos sinais:

- espectral: janelamento (Retangular, Hanning, Hamming, Bartlett, Blackman), de 256 até 8192 raia. Espectro cruzado, função de transferência e coerência;
- Rainflow / Markov (para análise de materiais);
- estatísticas do sinal por trecho (máximo, mínimo, média, RMS, desvio padrão);
- análise de fadiga de materiais a partir da análise de Rainflow;
- análise de conforto (ISO2631).

Filtragem de sinais:

- integração;
- derivação;
- passa-alta;
- passa-baixa;
- passa-banda.

Edição de sinais:

- ponto a ponto;
- splines.

Exportação e importação de dados:

- exporta e importa ASCII (texto);
- importa arquivo RPC (MTS).

Versatilidade e Economia

Na concepção dos produtos Lynx, o máximo esforço de projeto é feito para atender as necessidades presentes e futuras dos clientes, resultando em produtos versáteis que maximizam o valor do investimento do cliente.

Esta versatilidade permite a um mesmo produto atender a diversas aplicações, evitando a compra de acessórios adicionais.

Relatórios:

- copie os gráficos para a área de transferência e cole em seu relatório ou apresentação;
- utilize os relatórios pré-definidos que permitem mesclar vários tipos de gráficos e personalizar os cabeçalhos.

Ajuste as cores de acordo com a sua preferência.

Operações aritméticas:

+, -, *, /	soma/ subtração/ multiplicação/ divisão
k, Pi	constantes numéricas, π
t	variável tempo
Abs (x)	valor absoluto de x
Exp (x)	exponencial de x
Ln (x)	logaritmo natural de x
Sqrt (x)	raiz quadrada de x
Sqr (x)	x^2
Tan (x)	tangente de x
ATan (x)	arco tangente de x
Tanh (x)	tangente hiperbólica de x
Sin (x)	seno de x
ASin (x)	arc seno de x
Sinh (x)	seno hiperbólico de x
Cos (x)	coseno de x
ACos (x)	arco coseno de x
Cosh (x)	coseno hiperbólico de x
Sign (x)	senal de x
Rand (x)	número aleatório

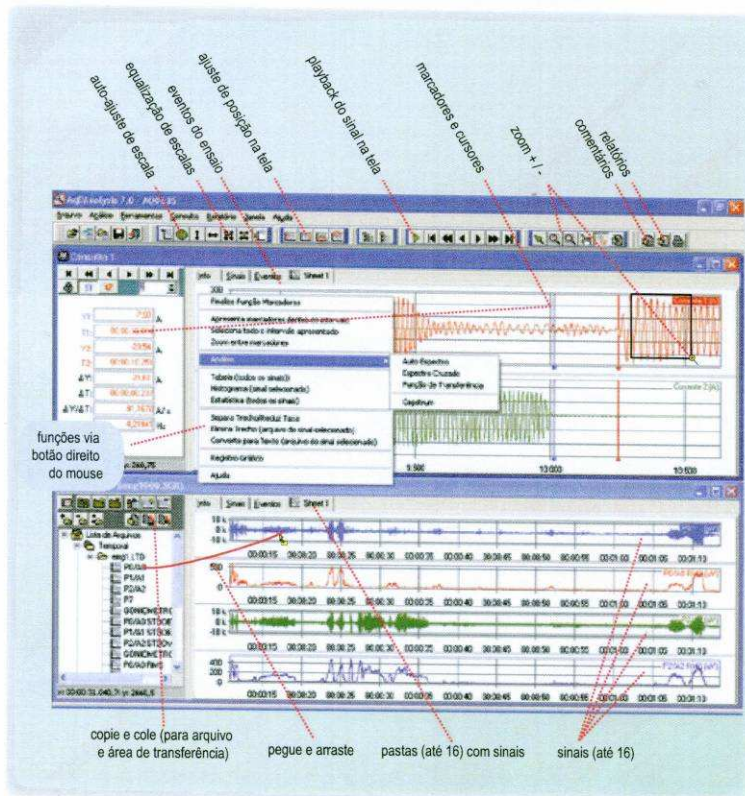
Alta Tecnologia

Nossos produtos são o resultado de anos de investimentos em pesquisa e desenvolvimento.

São produtos que incorporam os melhores componentes, as mais avançadas tecnologias de hardware e software.

Tecnologias que acompanham a tendência mundial: redes Ethernet e DSPs (Digital Signal Processors).

Interface gráfica com apresentação de alta qualidade.



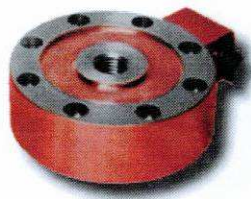
Aplicações

Os produtos de aquisição de dados Lynx encontram aplicação em uma vasta gama de atividades científicas e tecnológicas: da pesquisa básica às atividades industriais, englobando várias áreas da engenharia e das ciências biológicas. A lista a seguir apresenta casos reais utilizando nossos sistemas:

Engenharia Ferroviária	ensaios em laboratório de componentes estruturais ensaio de freios	ensaios em composições (dinâmica) comissionamento de composições
Engenharia Automotiva	levantamento de curvas características de componentes desempenho dinâmico teste de freios	simulador de estradas análise de fadiga
Engenharia Aeronáutica	teste de componentes e partes estruturais	teste de mísseis
Engenharia Elétrica	teste de disjuntores de alta tensão: tempos de abertura e fechamento teste de perda de isolamento em isoladores	ajuste e comissionamento de equipamentos de geração, turbinas e geradores.
Engenharia Térmica	ajuste de malhas de controle	levantamento de curva de aquecimento
Engenharia Agrícola	ensaios em implementos agrícolas	estudo de processos
Engenharia Naval	ensaio de modelos em tanques de prova	ensaios em escala real em navios e plataformas offshore
Processos industriais	monitoração de máquinas para deteção de falhas manutenção preditiva por vibração ajuste de malhas	registro de sinais do processo para controle de qualidade
Estruturas	vibrações e esforços estruturais	modelamento por elementos finitos
Solos	mecânica de solos	sondagens e monitoração de taludes
Fisiologia	hemodinâmica, eletromiografia	estudo de drogas e farmacocinética

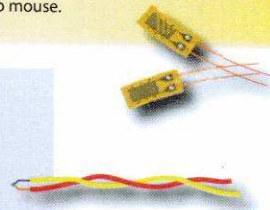
Extensometria

A extensometria é uma técnica de medição de deformações muito utilizada e geralmente envolve muitos sensores, chamados *strain gages*. Com os amplificadores e programas Lynx, medir *gages* se torna uma tarefa fácil. Os amplificadores já possuem resistores de complemento de ponte e circuito preparado para conexão de 3 fios, de forma a permitir a conexão de *gages* em $\frac{1}{2}$ e $\frac{1}{4}$ de ponte de 120 ou 350 Ω . Em alguns condicionadores o balanceamento e a calibração por *shunt* são feitas com um simples clique no mouse.



Sensores

Termopares, Pt100
Células de carga, de torque, de pressão
Potenciômetros, encoders
Sinais de corrente e tensão
Acelerômetros piezo-resistivos
Acelerômetros piezo-elétricos alimentados por corrente
Servo-acelerômetros



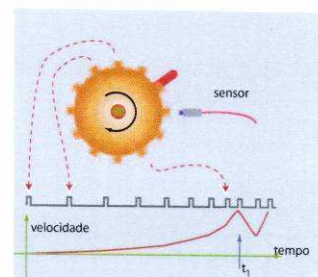
Entrada de pulsos

Este tipo de entrada é muito útil em aplicações onde temos um elemento girante. Uma entrada de pulsos pode ser usada para:

- ▣ contagem;
- ▣ medição de velocidade média;
- ▣ medição de velocidade período a período ("instantânea").

A medição de velocidade período a período é a mais interessante para a análise dinâmica de, por exemplo, cilindros em laminadores, rodas em freios ABS, motores em geral, acoplamentos e outros elementos.

Na figura temos uma roda dentada acelerando, observando-se em t_1 uma rápida oscilação na velocidade angular.



Flexibilidade

Seja qual for o seu problema, a Lynx sempre procura encontrar uma solução para atender a seus requisitos técnicos e comerciais.

Experiência

A Lynx possui uma equipe técnica experiente e especializada em aquisição de dados. São milhares de atendimentos já realizados, envolvendo sensores, condicionadores de sinais, programas e análise de sinais.

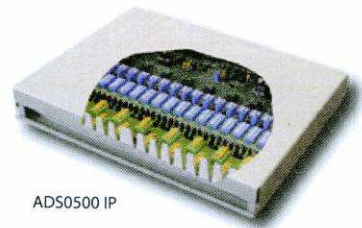
ADS0500 IP

Sistema integrado compacto de baixo custo.
Composto por:

- ▣ gabinete compacto;
- ▣ alimentação de 12V (fonte de alimentação AC externa inclusa);
- ▣ controlador com conversor A/D e comunicação com PC, com condicionador de sinais de baixo custo integrado.

As principais características são:

- ▣ comunicação em rede Ethernet/IP;
- ▣ 16 entradas condicionadas configuradas por jumpers;
- ▣ conversor A/D de 12 bits, 1k amostras/canal;



ADS0500 IP

ADS1000 IP

Conversores A/D e D/A para aplicações especiais.
Composto por:

- ▣ gabinete compacto;
- ▣ alimentação de 12V (fonte de alimentação AC externa inclusa);
- ▣ controlador com conversor A/D e comunicação com PC;
- ▣ expansão de conversão D/A (até 16 canais);

As principais características são:

- ▣ comunicação em rede Ethernet/IP;
- ▣ 16 entradas analógicas;
- ▣ conversor A/D de 12 bits (20k amostras/canal) ou 16 bits (4k amostras/canal);
- ▣ entrada de sinal de pulso;
- ▣ DSP disponível para algoritmos especiais.



ADS1000 IP (modelos AC1120/AC1160)

Atendimento

A Lynx tem uma preocupação muito grande com o atendimento ao cliente. Tendo domínio de todo o ciclo tecnológico e fábrica no Brasil podemos oferecer suporte e manutenção completos.

ADS2000 IP

Sistema integrado compacto, modular, configurável para as mais diversas aplicações.

Composto por:

- ▣ gabinete compacto;
- ▣ alimentação AC (90~240 Vac) e DC (10 a 18 Vdc);
- ▣ fonte 24 Vdc para sensores;
- ▣ condicionadores de sinais;
- ▣ controlador com conversor A/D e comunicação com PC.

As principais características são:

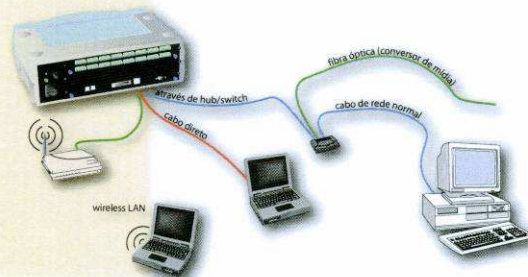
- ▣ comunicação em rede Ethernet/IP;
- ▣ até 2 (4, sob consulta) condicionadores de sinais por gabinete;
- ▣ conversor A/D de 16 bits com tempo de conversão de 12,5 µs/canal;
- ▣ sincronismo de até 4 unidades, permitindo até 128 canais (256 com gabinete para 4 condicionadores);
- ▣ entrada para 6 sinais de pulso (opcional);
- ▣ opções de condicionadores de sinais: AI2080, AI2161 e AI2164.



Ethernet/IP

A tecnologia de rede Ethernet/ protocolo IP abre novas possibilidades em aquisição de dados. Vários produtos Lynx incorporam esta tecnologia, que proporciona as seguintes vantagens:

- ▣ portabilidade e compatibilidade entre sistemas operacionais;
- ▣ distância entre equipamento e computador: 100 m para ligação direta, maior com uso de hubs/switches;
- ▣ uso em redes locais cabeadas (LAN);
- ▣ uso em rede locais sem fio (Wireless LAN).



Controladores de aquisição

	CAD12/32-IP	ADS0500	AC1120	AC1160	AC2122
interface	IP(Ethernet)	IP(Ethernet)	IP(Ethernet)	IP(Ethernet)	IP(Ethernet)
conversor A/D	12 bits	12 bits	12 bits	16 bits	16 bits
resolução	16 simples	16 simples	16 simples	16 simples	16 simples
quantidade de canais	10 μ s	10 μ s	2 μ s	10 μ s	12,5 μ s
tempo de conversão					
conversor D/A	2 x 16 bits OPC	2 x 16 bits OPC	2 x 16 bits OPC	2 x 16 bits OPC	N.D.
quantidade x resolução			16 x 16 bits OPC	16 x 16 bits OPC	
tensão de saída	± 10 V	± 10 V	± 10 V	± 10 V	
entradas/saídas digitais	16e/ 16s/ TTL	16e/ 16s/ TTL	16e/ 16s/ TTL	16e/ 16s/ TTL	8e/ 8s/ TTL
entradas de pulsos	1 (ct)	1 (ct)	1 (ct/f _{MD} /f _{PP})	1 (ct/f _{MD} /f _{PP})	6 OPC (ct/f _{MD} /f _{PP})
interrupção	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	NA.
DMA	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.

Condicionadores de sinais

	ADS0500	MCS1000-V3	AI2080	AI2161	AI2164
família	ADS500 (integrado)	ADS1000/uso avulso	ADS2000	ADS2000	ADS2000
canais	8/16	8/16	8	16	8/16
tipo de entrada	V, I, ponte R, tp, pot Pt100 OPC, IPz OPC	V, I, ponte R, tp, pot	V, I, ponte R, tp, pot, Pt100	V, I, ponte R, tp, pot, Pt100 OPC, IPz OPC	V, I, ponte R, tp, pot
ganhos	1/100/200/300/600 (manual)	1/100/200/300/600 (manual)	1/2/5/10/100 (manual)	1 a 5000, seq 1/2/ 5 (semi-ssw)	1 a 5000, seq 1/2/5 (ssw)
filtros	20 Hz (alterável)	20 Hz (alterável)	35 Hz (alterável)	5/ 20/100/200/2kHz (ssw)	3/30/100/1k/3kHz (ssw)
alimentação de sensores	2,5/5/10 V	2,5/5 /10 V	5/12 V	0,25/0,5/0,75/2,5/5 /7,5 V	0,125/2,5/5 7,5/10 V
balanço	manual	manual	manual	ssw	ssw
shunt cal	manual	manual	N.D.	1 para terra (ssw)	3 para terra/Vexc (ssw)
isolação galvânica	N.D.	N.D.	500 V _{AC}	N.D.	N.D.

Legenda:

OPC: opcional N.A.: não aplicável N.D.: não disponível ssw: selecionável por software
 ct: contagem f_{MD}: frequência média f_{PP}: frequência período a período

Tipos de entrada:

V:	tensão até ± 10 V
I:	corrente
ponte R:	ponte resistiva: completa, 1/2, 1/4 em 120 e 350 Ω
tp:	termopar
pot:	potenciômetro
IPz:	sensores piezoelétricos alimentados por corrente
Pt100	sensor de temperatura de platina

Requisitos:

AqDados /AqDAnalysis 7

- ☒ Sistema operacional XP, Vista (32 ou 64 bits) ou 7 (32 ou 64 bits)
- ☒ Interface de rede para sistemas IP;
- ☒ Unidade de disco com capacidade para arquivamento dos dados (vide abaixo).

Para calcular o espaço necessário para arquivamento, use a seguinte equação para calcular o espaço ocupado por um arquivo:

$$\text{Tamanho (aprox)} = 2 * [\text{frequência}] * [\text{número de canais}] * [\text{duração}]$$

Exemplo:

100 amostras/seg
 32 canais
 1 hora = 3600 seg
 Tamanho = 2*100*32*3600 = 23 MBytes



Lynx Tecnologia Eletrônica Ltda
 Rua Dr José Elias, 358/368
 05083-030 São Paulo - SP - Brasil

fone: (55) (11) 3839-5910
 fax: (55) (11) 3839-5919
 www.lynxtec.com.br
 lynxtec@lynxtec.com.br



gabinete com 64 canais

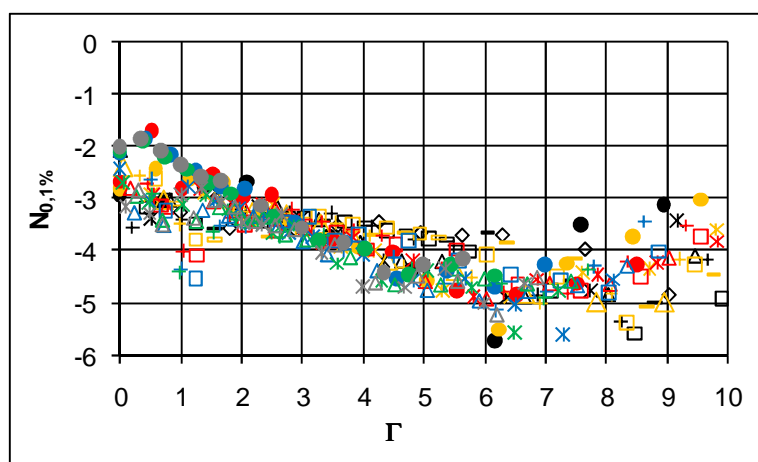
As características apresentadas poderão ser alteradas a qualquer tempo. Fotos meramente ilustrativas.

MARCO/2011

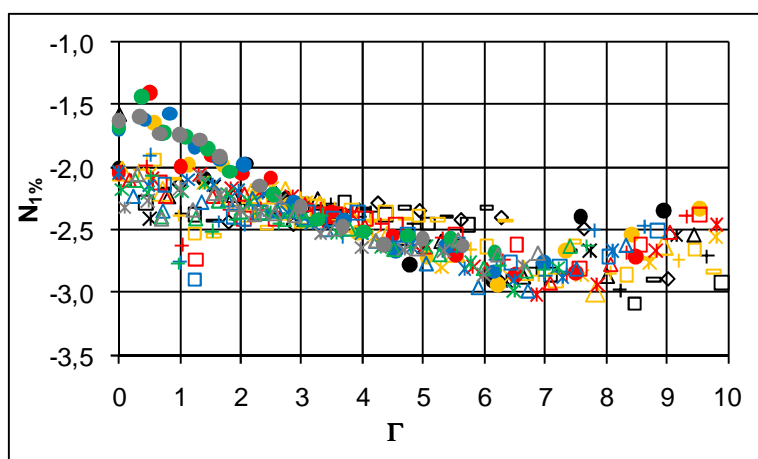
ANEXO D – COEFICIENTE ESTATÍSTICO DE DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADES

● Fr=9,26; S=1,00	× Fr=7,56; S=1,12	△ Fr=7,79; S=1,18	+ Fr=6,73; S=1,29	□ Fr=6,21; S=1,39
— Fr=6,00; S=1,60	◇ Fr=5,14; S=1,78	● Fr=7,53; S=1,00	× Fr=7,20; S=1,10	△ Fr=6,43; S=1,19
+ Fr=5,43; S=1,31	□ Fr=5,53; S=1,44	— Fr=4,75; S=1,62	● Fr=6,90; S=1,00	× Fr=5,71; S=1,12
△ Fr=5,09; S=1,20	+ Fr=4,87; S=1,34	□ Fr=4,33; S=1,46	● Fr=5,74; S=1,00	× Fr=4,91; S=1,10
△ Fr=4,42; S=1,18	+ Fr=3,91; S=1,32	□ Fr=3,52; S=1,42	● Fr=4,97; S=1,00	× Fr=4,34; S=1,09
△ Fr=3,95; S=1,18	+ Fr=3,41; S=1,31	● Fr=4,38; S=1,00	× Fr=3,72; S=1,10	△ Fr=3,45; S=1,16

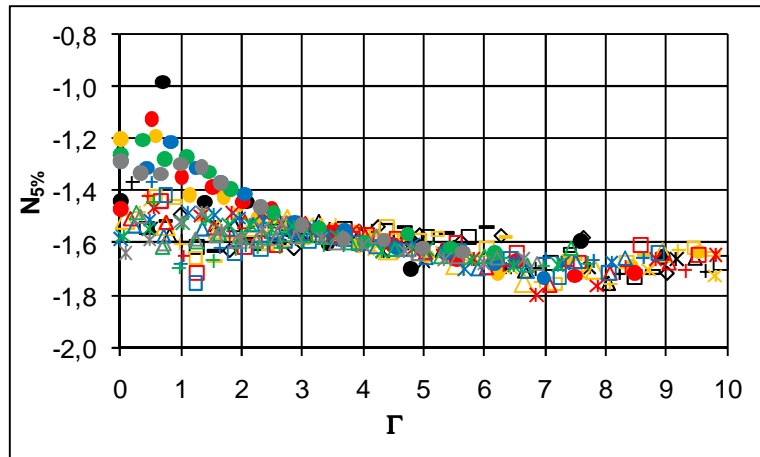
Legenda



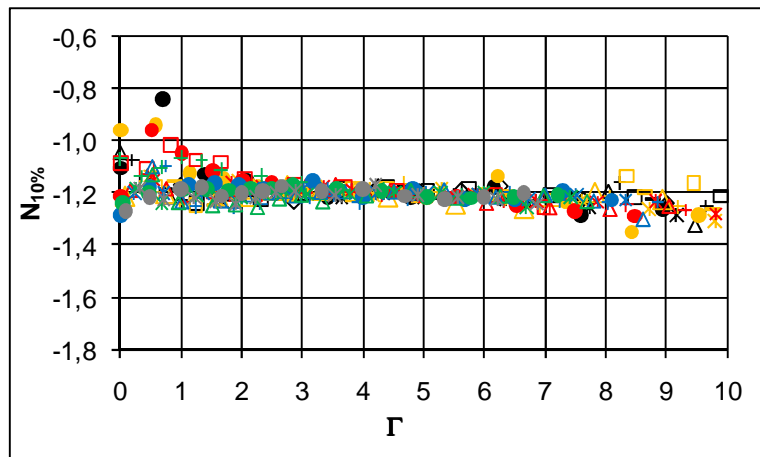
Coeficiente Estatístico $N_{0,1\%}$



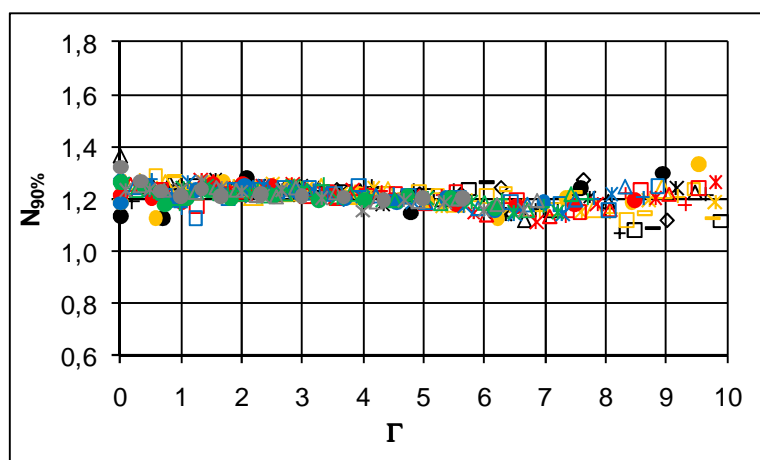
Coeficiente Estatístico $N_{1\%}$



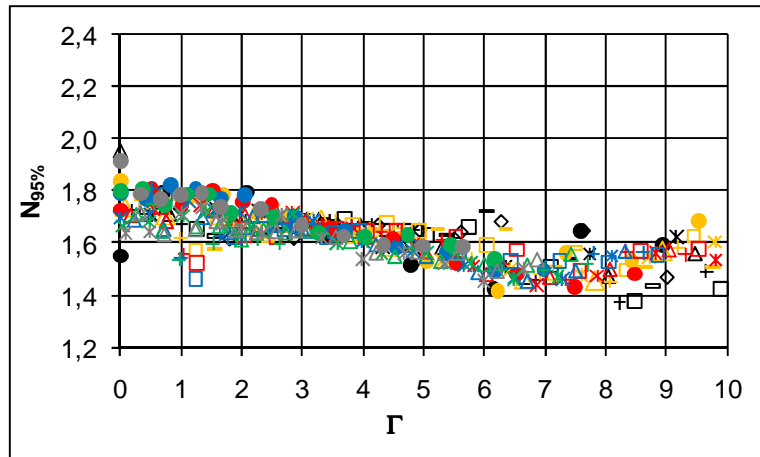
Coeficiente Estadístico $N_{5\%}$



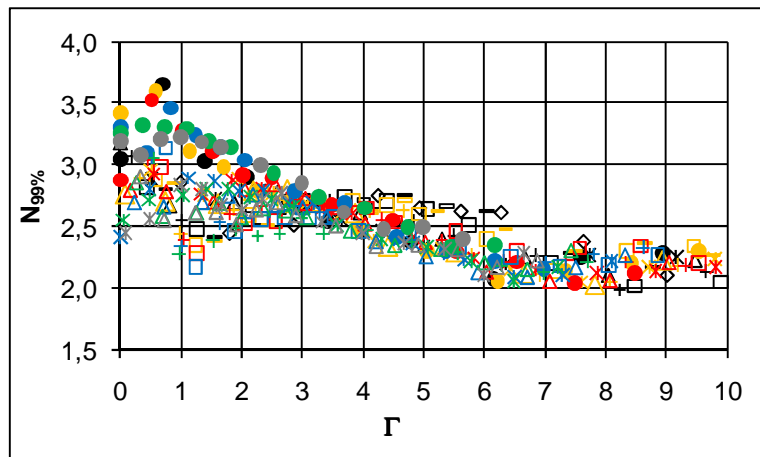
Coeficiente Estadístico $N_{10\%}$



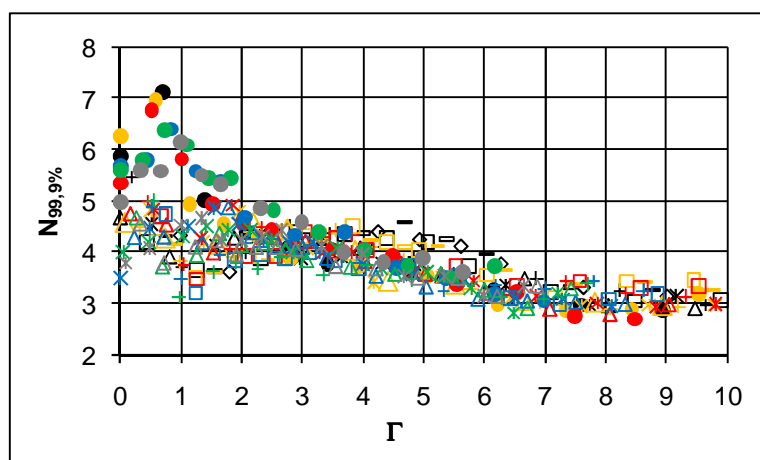
Coeficiente Estadístico $N_{90\%}$



Coefficiente Estadístico $N_{95\%}$



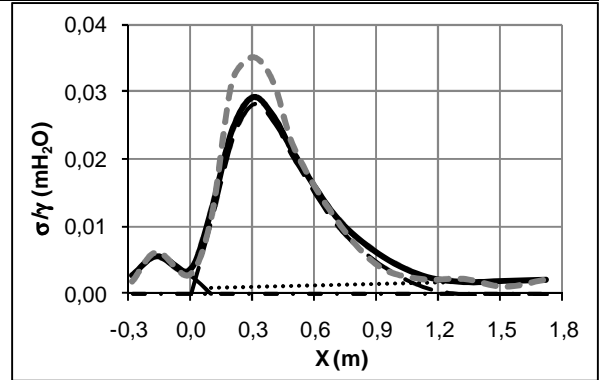
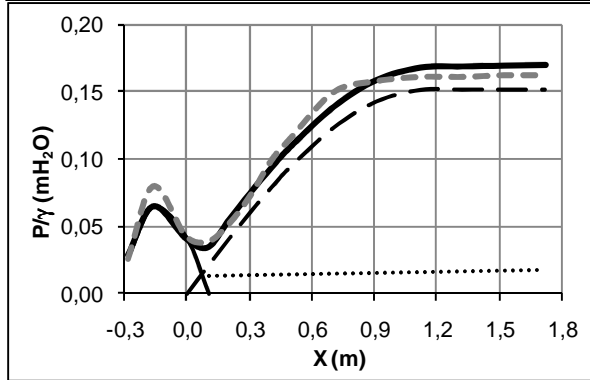
Coefficiente Estadístico $N_{99\%}$



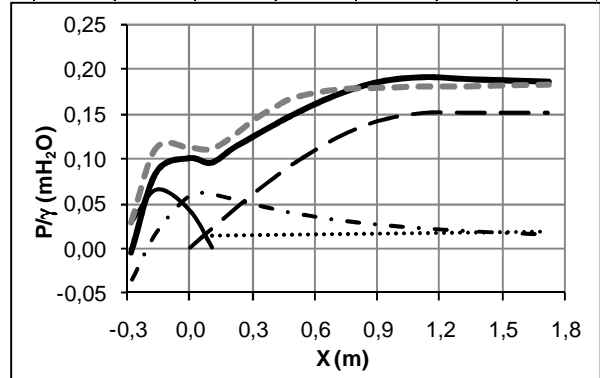
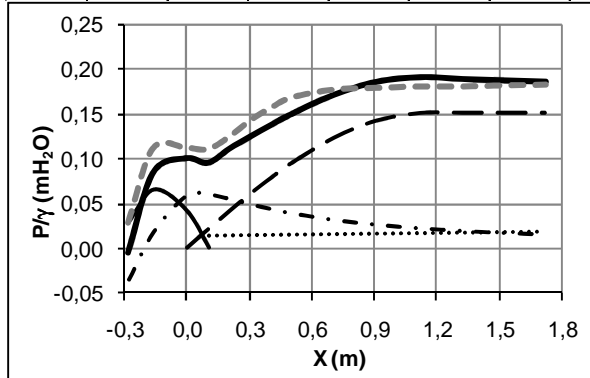
Coefficiente Estadístico $N_{99,9\%}$

**ANEXO E – VALORES EXPERIMENTAIS E ESTIMADOS PARA AS PRESSÕES
MÉDIAS E FLUTUANTES**

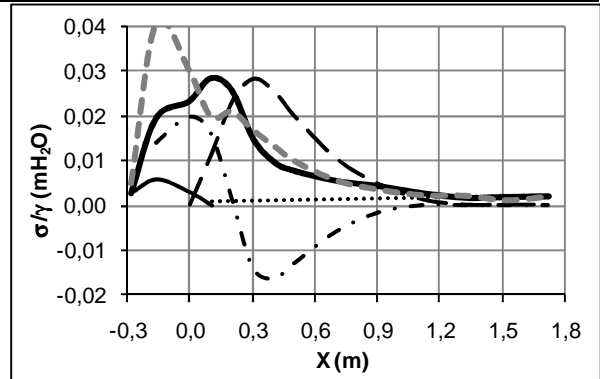
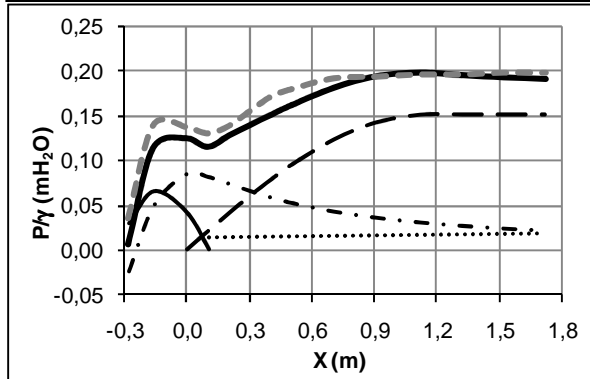
X	-0,277	-0,157	0,000	0,105	0,206	0,307	0,408	0,506	0,707	0,911	1,122	1,323	1,520	1,721
Pressões Médias - Ressalto Hidráulico Livre - $q = 0,043\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ - $Fr_1 = 9,26$ - $S = 1,00$														
$\Delta P/\gamma$	-	-	0,002	0,005	-0,003	-0,002	0,006	0,007	0,011	-0,001	-0,007	-0,008	-0,007	-0,007
$\Delta P\%$	-	-	4,8%	11,6%	-5,4%	-2,6%	5,8%	5,6%	7,4%	-0,4%	-4,2%	-4,7%	-4,2%	-4,6%
Flutuações de Pressão - Ressalto Hidráulico Livre - $q = 0,043\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ - $Fr_1 = 9,26$ - $S = 1,00$														
$\Delta\sigma/\gamma$	-	-	-0,001	-0,001	0,007	0,006	0,005	0,001	0,000	-0,002	-0,001	0,000	-0,001	0,000
$\Delta\sigma\%$	-	-	-23,7%	-9,9%	23,0%	16,9%	15,9%	3,9%	-3,2%	-42,8%	-23,6%	20,5%	-77,3%	2,7%



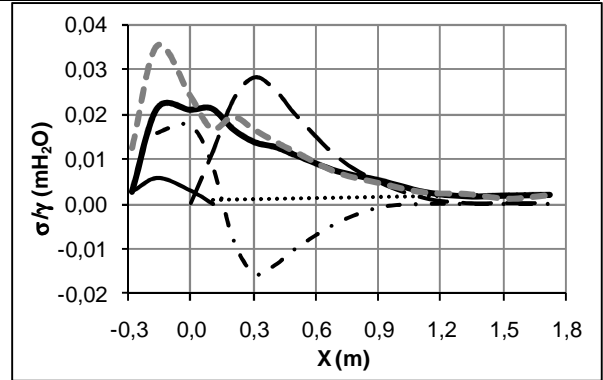
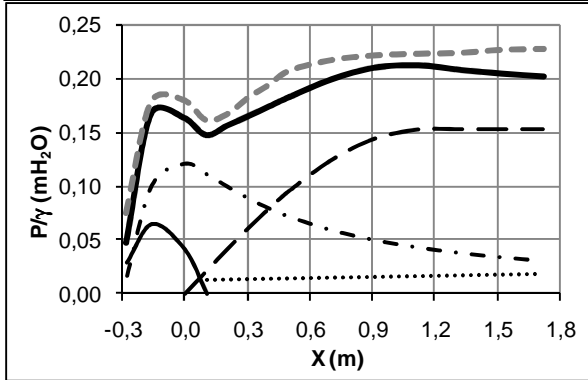
Pressões Médias - Ressalto Hidráulico Afogado - $q = 0,043\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ - $Fr_1 = 7,56$ - $S = 1,12$														
$\Delta P/\gamma$	-	0,027	0,011	0,015	0,013	0,018	0,019	0,018	0,006	-0,007	-0,011	-0,008	-0,006	-0,003
$\Delta P\%$	-	23,9%	10,1%	13,4%	10,5%	12,3%	12,1%	10,8%	3,2%	-3,9%	-5,8%	-4,7%	-3,0%	-1,9%
Flutuações de Pressão - Ressalto Hidráulico Afogado - $q = 0,043\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ - $Fr_1 = 7,56$ - $S = 1,12$														
$\Delta\sigma/\gamma$	-	0,014	0,016	-0,007	-0,010	-0,002	0,004	0,003	0,000	-0,001	-0,001	0,000	-0,001	0,000
$\Delta\sigma\%$	-	47,7%	40,6%	-29,8%	-42,0%	-11,0%	34,4%	38,9%	9,8%	-37,0%	-54,4%	1,2%	-99,8%	-18,9%



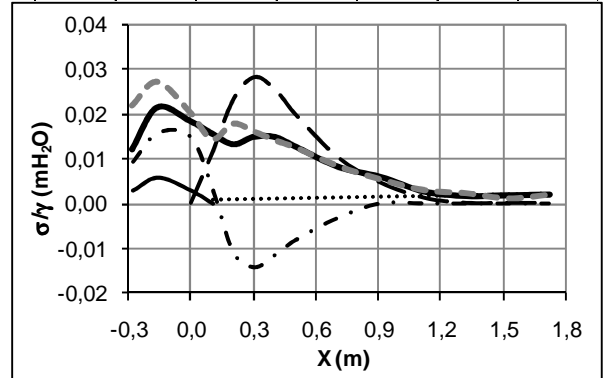
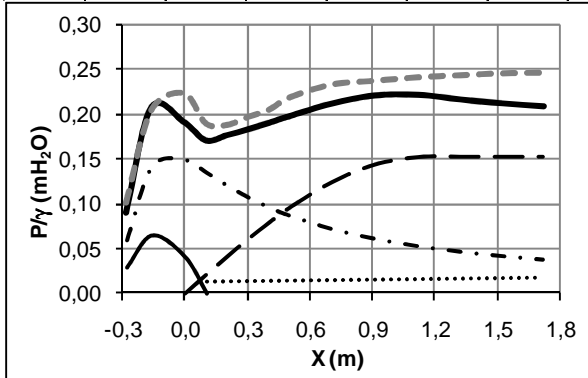
Pressões Médias - Ressalto Hidráulico Afogado - $q = 0,043\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ - $Fr_1 = 7,79$ - $S = 1,18$														
$\Delta P/\gamma$	-	0,025	0,013	0,015	0,011	0,016	0,020	0,018	0,010	-0,001	-0,003	0,000	0,005	0,007
$\Delta P\%$	-	17,9%	9,1%	11,4%	7,6%	10,0%	11,7%	9,7%	5,3%	-0,5%	-1,3%	0,2%	2,4%	3,3%
Flutuações de Pressão - Ressalto Hidráulico Afogado - $q = 0,043\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ - $Fr_1 = 7,79$ - $S = 1,18$														
$\Delta\sigma/\gamma$	-	0,021	0,007	-0,009	-0,005	0,003	0,002	0,000	0,000	-0,001	-0,001	0,000	-0,001	0,000
$\Delta\sigma\%$	-	51,5%	22,2%	-45,8%	-24,4%	9,1%	25,0%	19,3%	-4,9%	-34,8%	-35,6%	5,9%	-99,8%	-20,2%



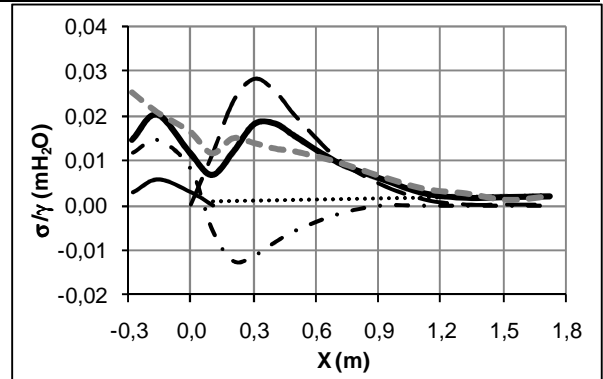
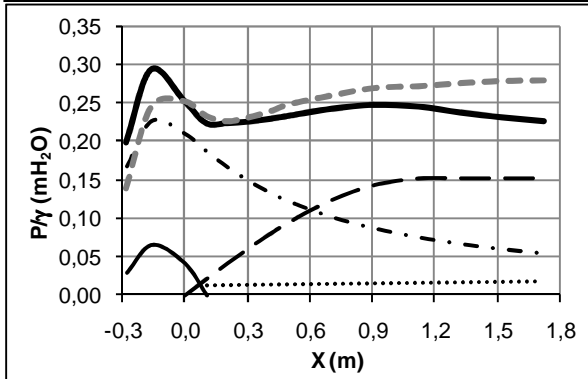
X	-0,277	-0,157	0,000	0,105	0,206	0,307	0,408	0,506	0,707	0,911	1,122	1,323	1,520	1,721
Pressões Médias - Ressalto Hidráulico Afogado - $q = 0,043\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ - $Fr_1 = 7,73$ - $S = 1,29$														
$\Delta P/\gamma$	0,030	0,011	0,017	0,015	0,011	0,018	0,021	0,025	0,018	0,011	0,011	0,016	0,022	0,026
$\Delta P\%$	38,9%	6,5%	9,4%	9,1%	6,8%	9,7%	10,7%	11,9%	8,3%	5,2%	4,9%	7,1%	9,8%	11,3%
Flutuações de Pressão - Ressalto Hidráulico Afogado - $q = 0,043\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ - $Fr_1 = 7,73$ - $S = 1,29$														
$\Delta\sigma/\gamma$	0,005	0,014	0,003	-0,005	0,003	0,003	0,001	0,001	0,000	-0,001	0,000	0,000	-0,001	0,000
$\Delta\sigma\%$	38,7%	39,4%	13,0%	-27,5%	13,8%	16,0%	7,8%	4,8%	-6,6%	-16,9%	-11,8%	15,8%	-77,9%	-12,1%



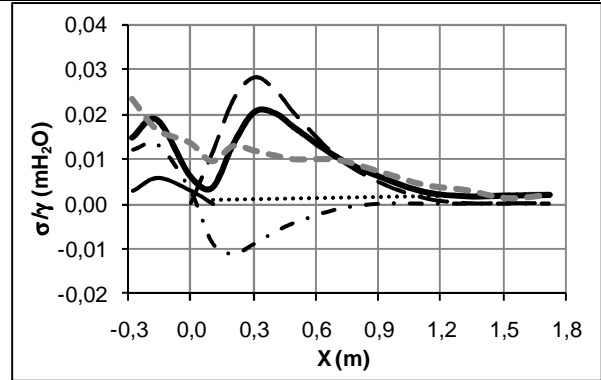
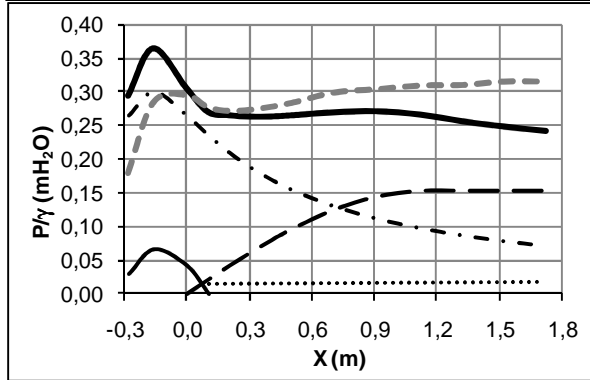
Pressões Médias - Ressalto Hidráulico Afogado - $q = 0,043\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ - $Fr_1 = 6,21$ - $S = 1,39$														
$\Delta P/\gamma$	0,012	-0,002	0,033	0,020	0,012	0,015	0,016	0,022	0,022	0,017	0,020	0,028	0,034	0,039
$\Delta P\%$	12,2%	-1,1%	14,8%	10,5%	6,6%	7,5%	7,6%	9,9%	9,5%	7,3%	8,4%	11,5%	14,0%	15,6%
Flutuações de Pressão - Ressalto Hidráulico Afogado - $q = 0,043\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ - $Fr_1 = 6,21$ - $S = 1,39$														
$\Delta\sigma/\gamma$	0,010	0,006	0,002	-0,001	0,005	0,001	-0,001	0,000	0,000	-0,001	0,000	0,000	-0,001	0,000
$\Delta\sigma\%$	44,9%	21,7%	10,3%	-8,4%	26,0%	7,6%	-4,8%	-1,5%	1,5%	-12,0%	5,2%	19,6%	-79,1%	-9,0%



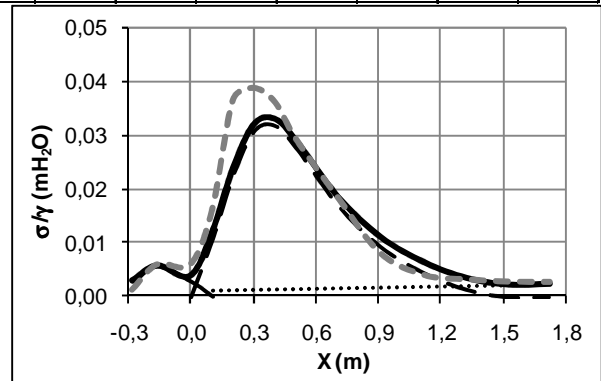
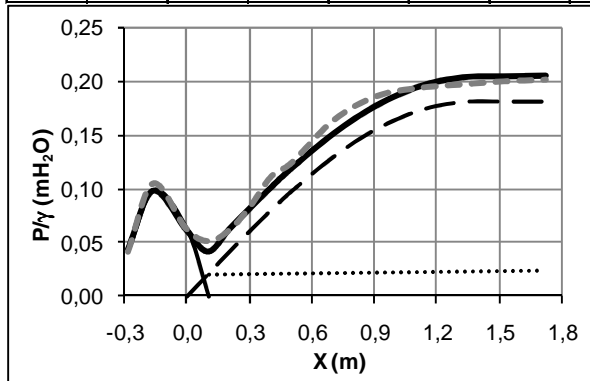
Pressões Médias - Ressalto Hidráulico Afogado - $q = 0,043\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ - $Fr_1 = 6,00$ - $S = 1,60$														
$\Delta P/\gamma$	-0,058	-0,048	0,000	0,011	0,004	0,007	0,011	0,016	0,019	0,023	0,028	0,039	0,048	0,054
$\Delta P\%$	-41,5%	-19,5%	0,1%	4,6%	1,7%	3,0%	4,5%	6,5%	7,1%	8,6%	10,2%	14,3%	17,3%	19,4%
Flutuações de Pressão - Ressalto Hidráulico Afogado - $q = 0,043\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ - $Fr_1 = 6,00$ - $S = 1,60$														
$\Delta\sigma/\gamma$	0,011	0,001	0,005	0,005	0,003	-0,004	-0,005	-0,003	0,000	0,001	0,001	0,001	-0,001	0,000
$\Delta\sigma\%$	42,3%	3,3%	29,0%	41,5%	20,8%	-29,6%	-43,1%	-27,1%	0,6%	7,9%	24,5%	31,8%	-60,8%	-3,1%



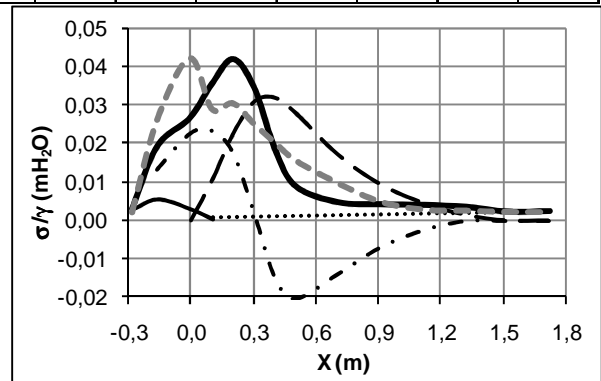
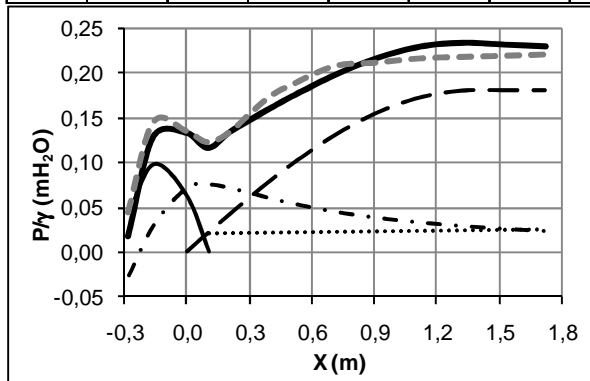
X	-0,277	-0,157	0,000	0,105	0,206	0,307	0,408	0,506	0,707	0,911	1,122	1,323	1,520	1,721
Pressões Médias - Ressalto Hidráulico Afogado - $q = 0,043\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ - $Fr_1 = 5,14$ - $S = 1,78$														
$\Delta P/\gamma$	-0,114	-0,081	-0,011	0,007	0,006	0,010	0,015	0,019	0,029	0,033	0,043	0,054	0,067	0,074
$\Delta P\%$	-63,5%	-28,6%	-3,8%	2,5%	2,4%	3,8%	5,2%	6,6%	9,9%	10,8%	14,0%	17,4%	21,3%	23,4%
Flutuações de Pressão - Ressalto Hidráulico Afogado - $q = 0,043\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ - $Fr_1 = 5,14$ - $S = 1,78$														
$\Delta\sigma/\gamma$	0,009	-0,002	0,007	0,006	0,000	-0,008	-0,009	-0,007	0,000	0,001	0,002	0,001	-0,001	0,000
$\Delta\sigma\%$	36,7%	-12,9%	53,6%	62,2%	-2,1%	-71,2%	-86,1%	-67,8%	-4,7%	16,1%	35,8%	42,9%	-38,9%	2,4%



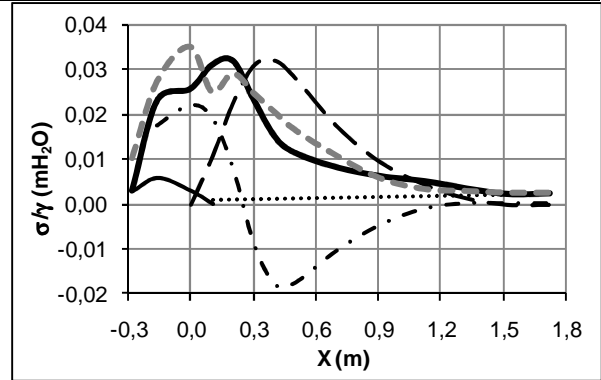
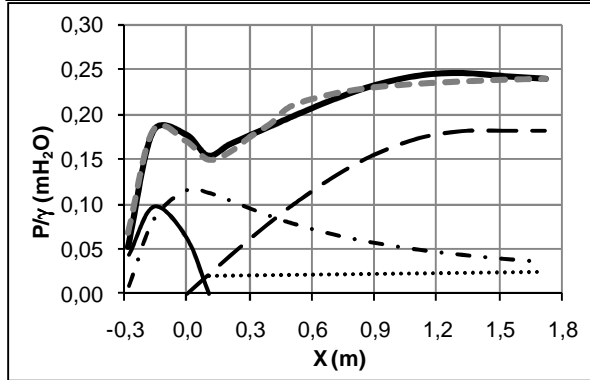
Pressões Médias - Ressalto Hidráulico Livre - $q = 0,065\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ - $Fr_1 = 7,53$ - $S = 1,00$														
$\Delta P/\gamma$	-	-	0,002	0,010	0,000	0,002	0,010	0,006	0,013	0,009	-0,001	-0,006	-0,005	-0,004
$\Delta P\%$	-	-	2,5%	20,1%	-0,3%	2,3%	9,4%	4,5%	7,7%	4,8%	-0,7%	-3,2%	-2,3%	-1,8%
Flutuações de Pressão - Ressalto Hidráulico Livre - $q = 0,065\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ - $Fr_1 = 7,53$ - $S = 1,00$														
$\Delta\sigma/\gamma$	-	-	0,002	0,004	0,013	0,007	0,003	0,000	0,000	-0,003	-0,002	0,000	0,001	0,000
$\Delta\sigma\%$	-	-	37,9%	26,2%	34,8%	17,4%	8,7%	1,2%	-0,5%	-36,5%	-56,9%	-5,0%	25,8%	17,7%



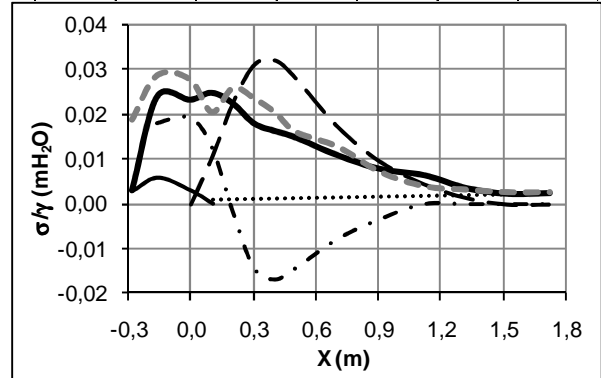
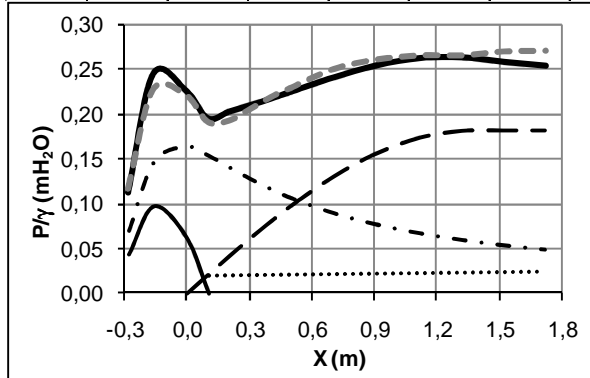
Pressões Médias - Ressalto Hidráulico Afogado - $q = 0,065\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ - $Fr_1 = 7,20$ - $S = 1,10$														
$\Delta P/\gamma$	-	0,017	0,003	0,007	0,001	0,008	0,015	0,014	0,012	-0,003	-0,011	-0,014	-0,011	-0,007
$\Delta P\%$	-	11,8%	2,0%	5,7%	0,6%	5,1%	8,4%	7,7%	5,6%	-1,5%	-5,2%	-6,4%	-4,9%	-3,3%
Flutuações de Pressão - Ressalto Hidráulico Afogado - $q = 0,065\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ - $Fr_1 = 7,20$ - $S = 1,10$														
$\Delta\sigma/\gamma$	-	0,007	0,016	-0,006	-0,011	-0,009	0,002	0,007	0,005	0,001	-0,001	-0,001	0,000	0,000
$\Delta\sigma\%$	-	27,6%	37,6%	-21,4%	-36,5%	-36,4%	10,5%	44,6%	53,9%	18,8%	-35,8%	-28,7%	8,9%	1,4%



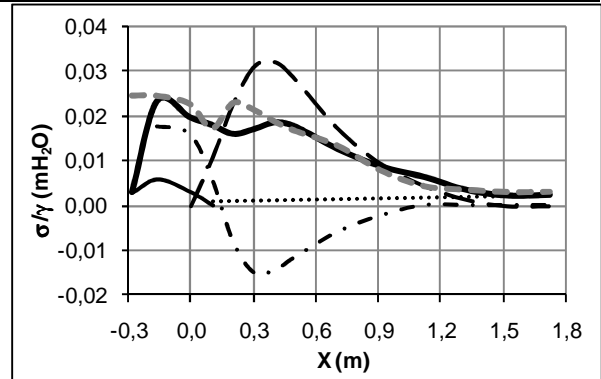
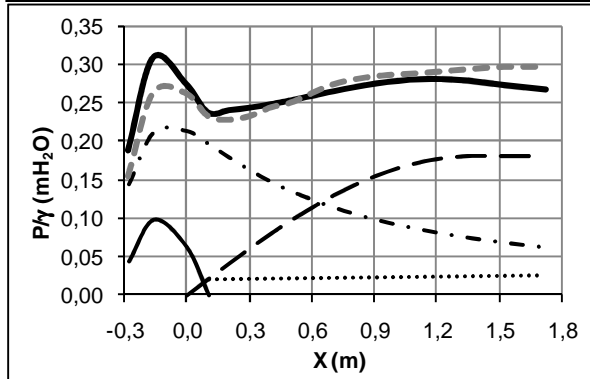
X	-0,277	-0,157	0,000	0,105	0,206	0,307	0,408	0,506	0,707	0,911	1,122	1,323	1,520	1,721
Pressões Médias - Ressalto Hidráulico Afogado - $q = 0,065\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ - $Fr_1 = 6,43$ - $S = 1,19$														
$\Delta P/\gamma$	0,017	0,002	-0,007	-0,004	-0,008	-0,001	0,003	0,012	0,006	-0,003	-0,009	-0,009	-0,004	0,000
$\Delta P\%$	24,4%	0,8%	-4,1%	-2,5%	-5,3%	-0,9%	1,8%	5,9%	2,8%	-1,1%	-3,9%	-4,0%	-1,7%	-0,1%
Flutuações de Pressão - Ressalto Hidráulico Afogado - $q = 0,065\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ - $Fr_1 = 6,43$ - $S = 1,19$														
$\Delta\sigma/\gamma$	0,004	0,004	0,009	-0,006	-0,003	0,002	0,006	0,005	0,003	0,000	-0,002	-0,001	0,000	0,000
$\Delta\sigma\%$	40,3%	15,9%	27,1%	-24,1%	-9,5%	6,4%	27,4%	31,3%	24,1%	-8,6%	-55,3%	-20,3%	14,3%	7,1%



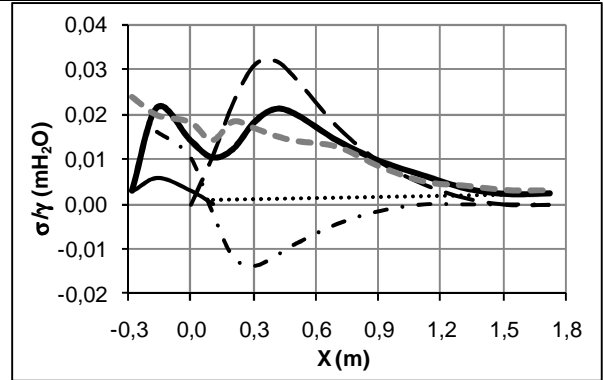
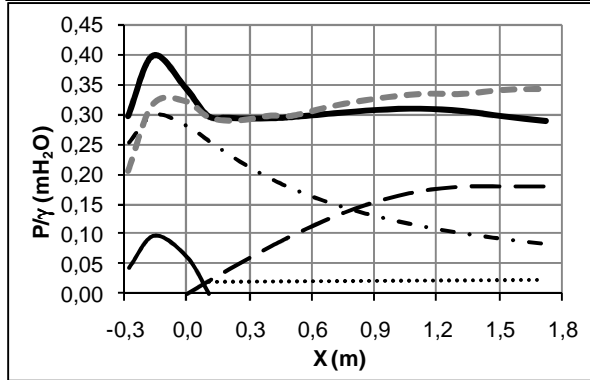
Pressões Médias - Ressalto Hidráulico Afogado - $q = 0,065\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ - $Fr_1 = 5,43$ - $S = 1,31$														
$\Delta P/\gamma$	0,004	-0,017	-0,005	-0,004	-0,010	-0,004	0,002	0,005	0,010	0,007	0,004	0,003	0,013	0,018
$\Delta P\%$	3,3%	-7,3%	-2,0%	-1,9%	-5,0%	-1,9%	1,1%	2,3%	4,1%	2,8%	1,5%	1,2%	4,6%	6,5%
Flutuações de Pressão - Ressalto Hidráulico Afogado - $q = 0,065\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ - $Fr_1 = 5,43$ - $S = 1,31$														
$\Delta\sigma/\gamma$	0,004	0,005	0,005	-0,004	0,004	0,006	0,004	0,001	0,002	-0,001	-0,002	0,000	0,000	0,000
$\Delta\sigma\%$	23,7%	17,4%	17,3%	-20,1%	14,4%	24,8%	21,3%	9,0%	16,2%	-8,6%	-63,5%	-9,3%	16,5%	10,5%



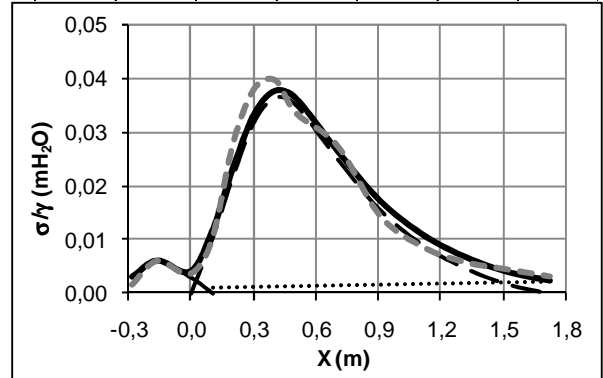
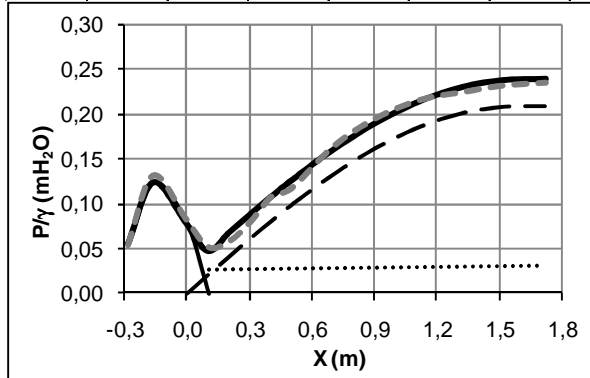
Pressões Médias - Ressalto Hidráulico Afogado - $q = 0,065\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ - $Fr_1 = 5,53$ - $S = 1,44$														
$\Delta P/\gamma$	-0,035	-0,047	-0,013	-0,006	-0,013	-0,012	-0,005	-0,004	0,009	0,009	0,007	0,013	0,023	0,029
$\Delta P\%$	-23,0%	-17,7%	-5,0%	-2,4%	-5,8%	-5,0%	-2,0%	-1,4%	3,1%	3,1%	2,5%	4,5%	7,8%	9,7%
Flutuações de Pressão - Ressalto Hidráulico Afogado - $q = 0,065\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ - $Fr_1 = 5,53$ - $S = 1,44$														
$\Delta\sigma/\gamma$	0,008	0,001	0,003	-0,001	0,007	0,004	0,000	-0,001	0,001	-0,001	-0,002	0,000	0,001	0,001
$\Delta\sigma\%$	32,7%	5,0%	13,5%	-4,1%	30,7%	20,5%	1,1%	-5,1%	6,2%	-10,2%	-45,2%	5,0%	31,2%	27,2%



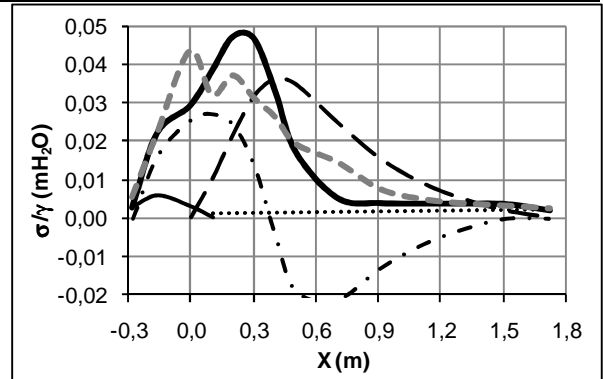
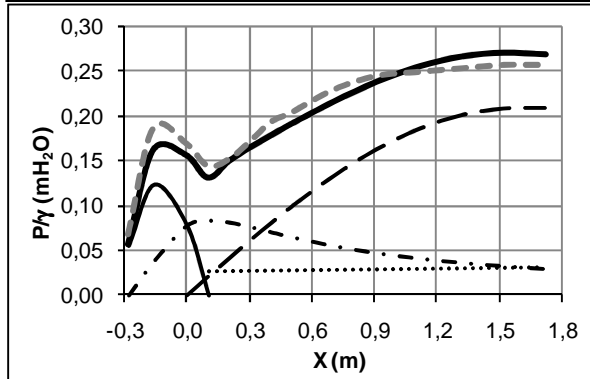
X	-0,277	-0,157	0,000	0,105	0,206	0,307	0,408	0,506	0,707	0,911	1,122	1,323	1,520	1,721
Pressões Médias - Ressalto Hidráulico Afogado - $q = 0,065 \text{ m}^3/\text{s/m}$ - $Fr_1 = 4,75$ - $S = 1,62$														
$\Delta P/\gamma$	-0,092	-0,081	-0,022	-0,003	-0,006	-0,002	0,003	0,001	0,012	0,018	0,024	0,028	0,043	0,052
$\Delta P\%$	-45,2%	-25,8%	-7,0%	-0,9%	-2,1%	-0,7%	1,2%	0,4%	3,7%	5,5%	7,1%	8,3%	12,7%	15,3%
Flutuações de Pressão - Ressalto Hidráulico Afogado - $q = 0,065 \text{ m}^3/\text{s/m}$ - $Fr_1 = 4,75$ - $S = 1,62$														
$\Delta\sigma/\gamma$	0,007	-0,002	0,004	0,004	0,006	-0,001	-0,006	-0,006	-0,001	-0,001	-0,001	0,001	0,001	0,001
$\Delta\sigma\%$	29,0%	-9,6%	21,6%	27,1%	33,4%	-8,2%	-40,2%	-42,9%	-10,5%	-13,5%	-21,8%	20,5%	36,1%	30,9%



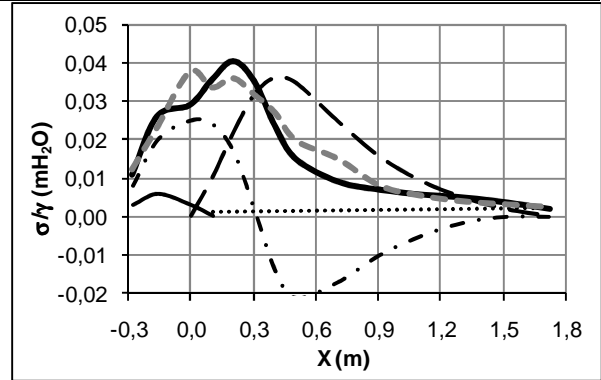
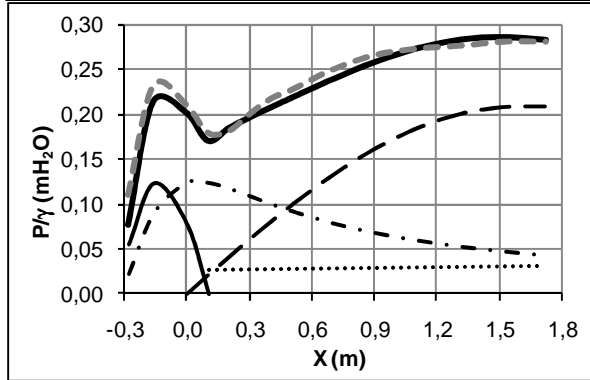
Pressões Médias - Ressalto Hidráulico Livre - $q = 0,087 \text{ m}^3/\text{s/m}$ - $Fr_1 = 6,90$ - $S = 1,00$														
$\Delta P/\gamma$	-	-	0,004	0,004	-0,011	-0,009	-0,001	-0,009	0,003	0,005	0,001	-0,006	-0,006	-0,004
$\Delta P\%$	-	-	5,0%	7,9%	-18,5%	-12,1%	-0,5%	-7,9%	2,0%	2,5%	0,6%	-2,6%	-2,6%	-1,8%
Flutuações de Pressão - Ressalto Hidráulico Livre - $q = 0,087 \text{ m}^3/\text{s/m}$ - $Fr_1 = 6,90$ - $S = 1,00$														
$\Delta\sigma/\gamma$	-	-	0,000	-0,001	0,005	0,005	0,002	-0,003	0,001	-0,003	-0,002	-0,001	0,001	0,001
$\Delta\sigma\%$	-	-	-6,7%	-13,7%	16,5%	12,5%	5,0%	-8,0%	3,8%	-18,6%	-24,2%	-12,7%	14,7%	30,4%



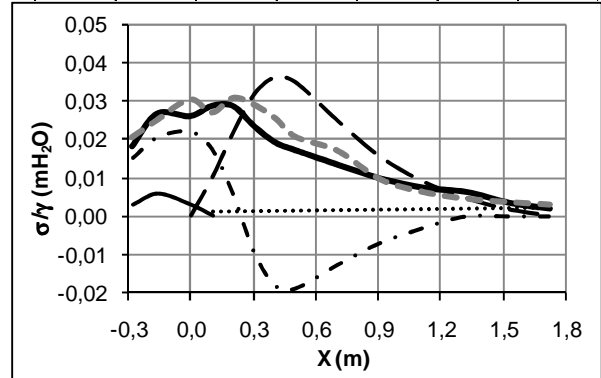
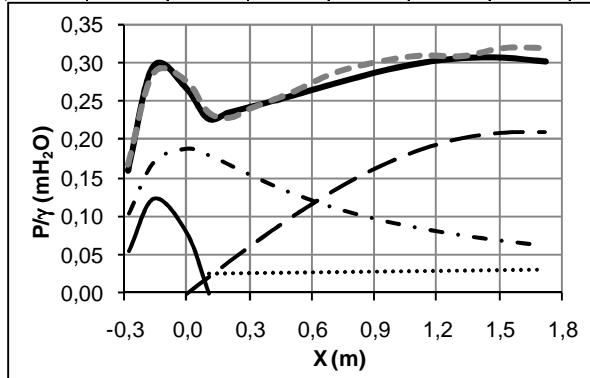
Pressões Médias - Ressalto Hidráulico Afogado - $q = 0,087 \text{ m}^3/\text{s/m}$ - $Fr_1 = 5,71$ - $S = 1,12$														
$\Delta P/\gamma$	-	0,026	0,015	0,015	0,004	0,008	0,016	0,014	0,014	0,007	-0,006	-0,013	-0,014	-0,012
$\Delta P\%$	-	13,7%	8,6%	10,2%	2,5%	4,8%	8,2%	6,6%	6,1%	2,9%	-2,4%	-5,1%	-5,3%	-4,6%
Flutuações de Pressão - Ressalto Hidráulico Afogado - $q = 0,087 \text{ m}^3/\text{s/m}$ - $Fr_1 = 5,71$ - $S = 1,12$														
$\Delta\sigma/\gamma$	-	0,000	0,014	-0,007	-0,011	-0,016	-0,007	0,002	0,009	0,003	0,001	0,000	-0,001	0,000
$\Delta\sigma\%$	-	-1,2%	32,0%	-20,7%	-28,6%	-51,1%	-27,2%	8,8%	62,7%	44,8%	17,3%	-5,1%	-20,1%	10,9%



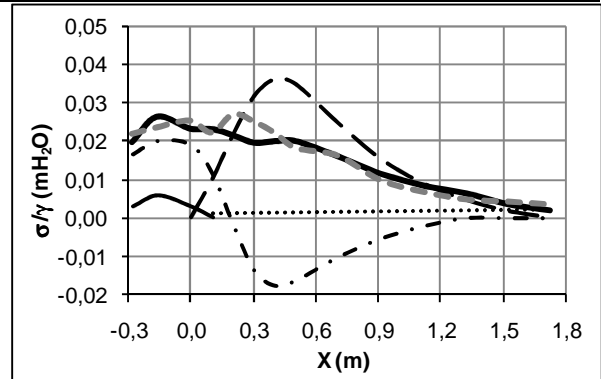
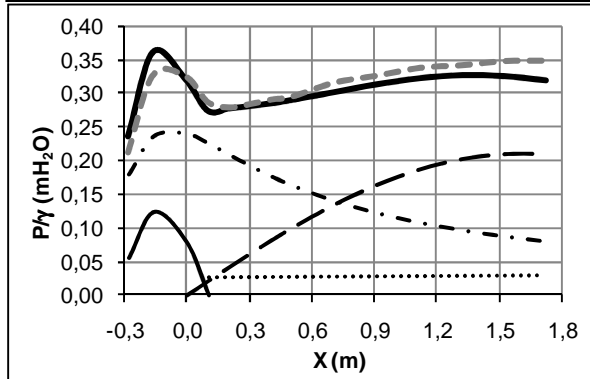
X	-0,277	-0,157	0,000	0,105	0,206	0,307	0,408	0,506	0,707	0,911	1,122	1,323	1,520	1,721
Pressões Médias - Ressalto Hidráulico Afogado - $q = 0,087\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ - $Fr_1 = 5,09$ - $S = 1,20$														
$\Delta P/\gamma$	0,032	0,017	0,008	0,008	-0,004	0,003	0,009	0,008	0,010	0,007	-0,001	-0,007	-0,005	-0,002
$\Delta P\%$	29,2%	7,5%	4,0%	4,6%	-2,1%	1,7%	4,3%	3,7%	4,2%	2,7%	-0,4%	-2,6%	-1,9%	-0,8%
Flutuações de Pressão - Ressalto Hidráulico Afogado - $q = 0,087\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ - $Fr_1 = 5,09$ - $S = 1,20$														
$\Delta\sigma/\gamma$	0,001	-0,003	0,009	-0,002	-0,004	-0,003	0,004	0,005	0,006	0,001	0,000	-0,001	-0,001	0,000
$\Delta\sigma\%$	10,8%	-11,3%	23,5%	-5,0%	-11,1%	-10,2%	13,4%	24,2%	38,9%	11,4%	-8,3%	-29,4%	-18,2%	13,7%



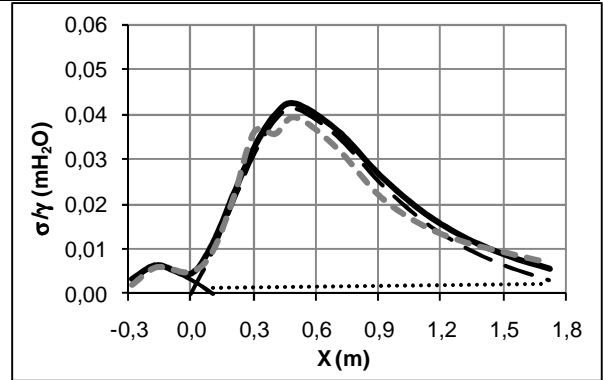
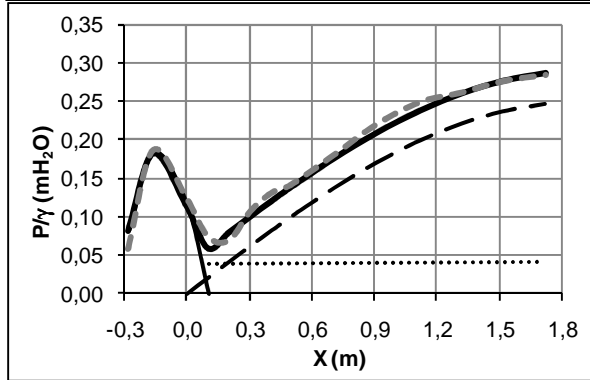
Pressões Médias - Ressalto Hidráulico Afogado - $q = 0,087\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ - $Fr_1 = 4,87$ - $S = 1,34$														
$\Delta P/\gamma$	0,006	-0,010	0,009	0,008	-0,008	-0,003	0,000	0,003	0,013	0,012	0,009	0,002	0,012	0,017
$\Delta P\%$	3,9%	-3,6%	3,3%	3,4%	-3,6%	-1,3%	0,1%	1,3%	4,5%	4,1%	2,9%	0,5%	3,7%	5,2%
Flutuações de Pressão - Ressalto Hidráulico Afogado - $q = 0,087\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ - $Fr_1 = 4,87$ - $S = 1,34$														
$\Delta\sigma/\gamma$	0,002	-0,002	0,004	-0,002	0,002	0,005	0,006	0,003	0,003	-0,001	-0,001	-0,002	0,000	0,001
$\Delta\sigma\%$	10,3%	-7,6%	13,5%	-7,3%	6,0%	18,2%	23,7%	15,6%	19,6%	-5,5%	-22,7%	-45,0%	-5,1%	24,8%



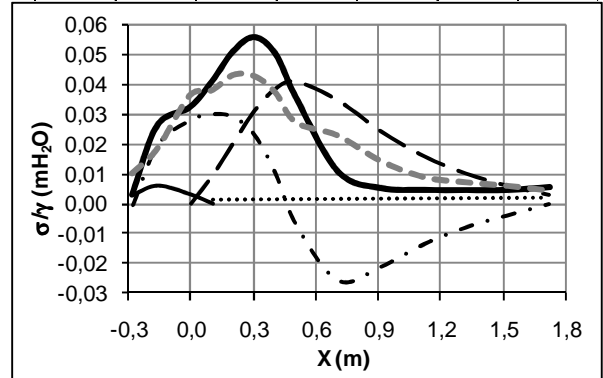
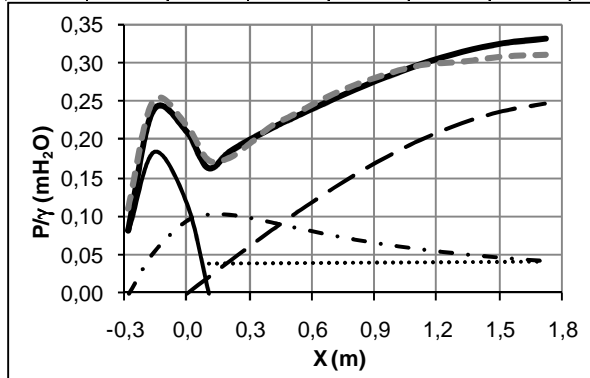
Pressões Médias - Ressalto Hidráulico Afogado - $q = 0,087\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ - $Fr_1 = 4,33$ - $S = 1,46$														
$\Delta P/\gamma$	-0,022	-0,033	0,006	0,015	0,003	0,005	0,007	0,006	0,016	0,014	0,017	0,016	0,023	0,030
$\Delta P\%$	-10,2%	-10,0%	2,0%	5,1%	1,1%	1,6%	2,4%	2,2%	4,9%	4,4%	4,9%	4,7%	6,7%	8,7%
Flutuações de Pressão - Ressalto Hidráulico Afogado - $q = 0,087\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ - $Fr_1 = 4,33$ - $S = 1,46$														
$\Delta\sigma/\gamma$	0,002	-0,002	0,002	-0,001	0,006	0,006	0,002	-0,002	0,000	-0,002	-0,002	-0,002	0,000	0,001
$\Delta\sigma\%$	10,4%	-10,5%	9,1%	-3,1%	21,0%	22,5%	10,0%	-9,0%	0,7%	-19,2%	-29,1%	-41,4%	5,3%	32,5%



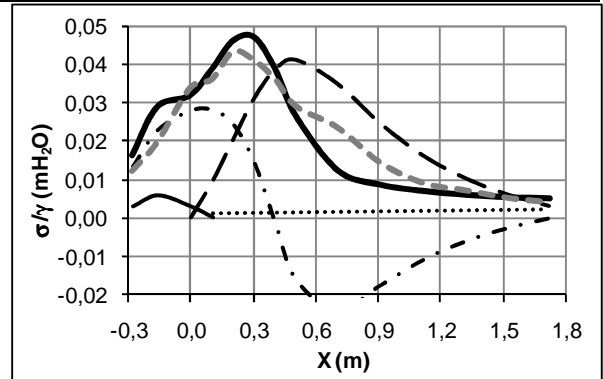
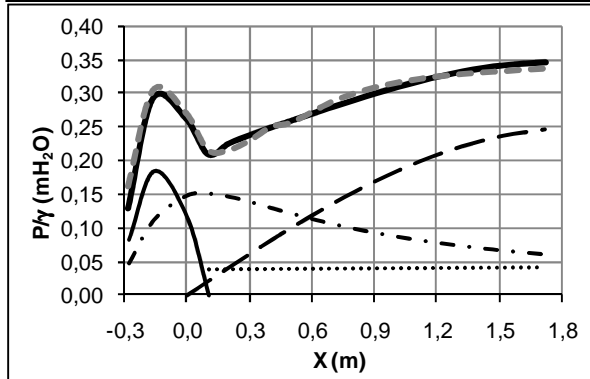
X	-0,277	-0,157	0,000	0,105	0,206	0,307	0,408	0,506	0,707	0,911	1,122	1,323	1,520	1,721
Pressões Médias - Ressalto Hidráulico Livre - $q = 0,130\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ - $Fr_1 = 5,74$ - $S = 1,00$														
$\Delta P/\gamma$	-	-	0,010	0,016	-0,010	0,007	0,011	0,003	0,004	0,010	0,010	0,000	-0,002	-0,004
$\Delta P\%$	-	-	8,2%	21,2%	-13,7%	6,4%	8,2%	2,1%	2,4%	4,7%	3,9%	-0,1%	-0,7%	-1,5%
Flutuações de Pressão - Ressalto Hidráulico Livre - $q = 0,130\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ - $Fr_1 = 5,74$ - $S = 1,00$														
$\Delta\sigma/\gamma$	-	-	0,001	-0,002	-0,001	0,004	-0,004	-0,003	-0,004	-0,005	-0,003	-0,001	0,001	0,001
$\Delta\sigma\%$	-	-	11,9%	-18,4%	-3,6%	9,7%	-12,1%	-7,6%	-12,1%	-21,0%	-18,4%	-7,2%	8,8%	21,3%



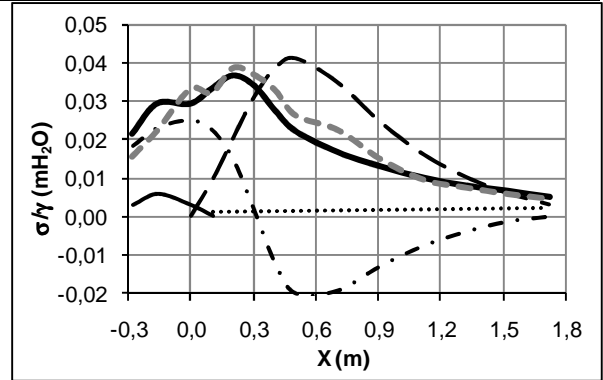
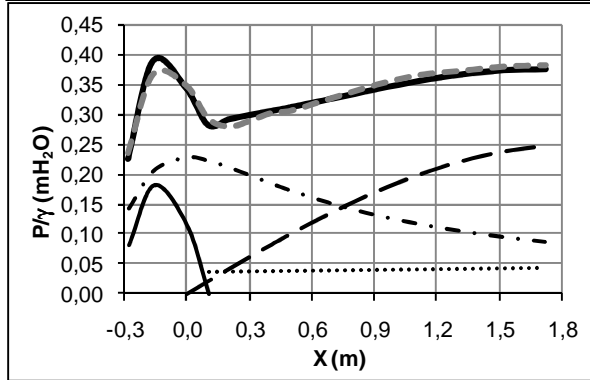
Pressões Médias - Ressalto Hidráulico Afogado - $q = 0,130\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ - $Fr_1 = 4,91$ - $S = 1,10$														
$\Delta P/\gamma$	-	0,014	0,009	0,012	-0,007	-0,004	0,004	0,005	0,008	0,006	0,000	-0,011	-0,016	-0,019
$\Delta P\%$	-	5,5%	4,2%	6,8%	-3,7%	-1,9%	2,0%	2,1%	3,2%	2,2%	0,1%	-3,7%	-5,1%	-6,1%
Flutuações de Pressão - Ressalto Hidráulico Afogado - $q = 0,130\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ - $Fr_1 = 4,91$ - $S = 1,10$														
$\Delta\sigma/\gamma$	-	-0,008	0,004	-0,003	-0,008	-0,013	-0,013	-0,009	0,012	0,009	0,004	0,003	0,001	-0,001
$\Delta\sigma\%$	-	-43,5%	10,4%	-8,5%	-19,3%	-31,6%	-35,9%	-32,0%	52,8%	64,6%	49,6%	37,8%	24,5%	-27,2%



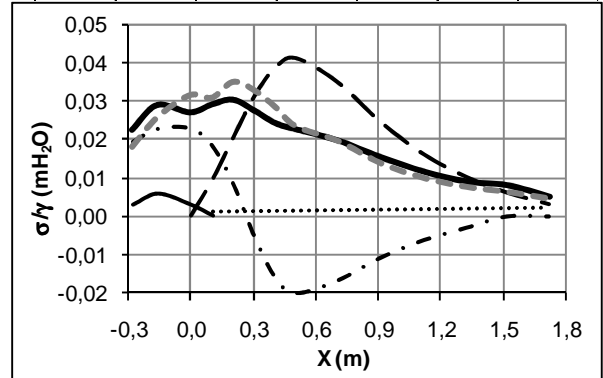
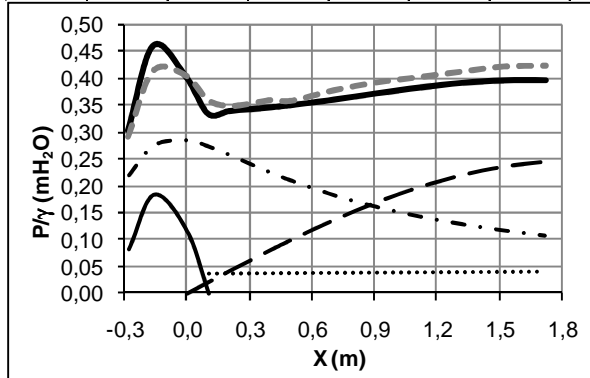
Pressões Médias - Ressalto Hidráulico Afogado - $q = 0,130\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ - $Fr_1 = 4,42$ - $S = 1,18$														
$\Delta P/\gamma$	0,035	0,012	0,009	0,007	-0,009	-0,007	0,002	-0,002	0,008	0,009	0,003	-0,004	-0,009	-0,010
$\Delta P\%$	21,3%	3,9%	3,2%	3,4%	-4,1%	-3,1%	0,6%	-0,9%	2,9%	2,9%	0,9%	-1,3%	-2,7%	-2,8%
Flutuações de Pressão - Ressalto Hidráulico Afogado - $q = 0,130\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ - $Fr_1 = 4,42$ - $S = 1,18$														
$\Delta\sigma/\gamma$	-0,004	-0,009	0,002	-0,002	-0,003	-0,006	-0,002	0,003	0,011	0,006	0,002	0,001	0,000	-0,001
$\Delta\sigma\%$	-32,0%	-45,5%	5,9%	-6,8%	-6,1%	-14,1%	-6,7%	8,9%	47,1%	39,6%	22,1%	15,8%	-2,4%	-23,1%



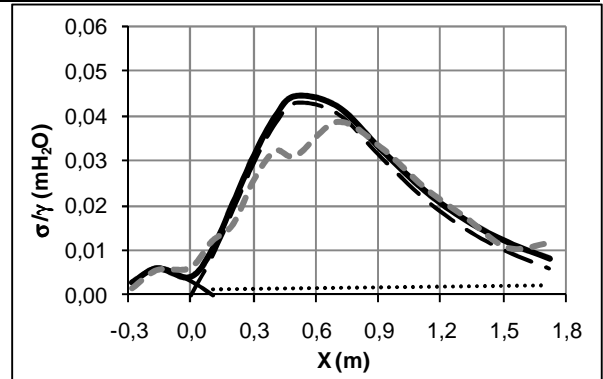
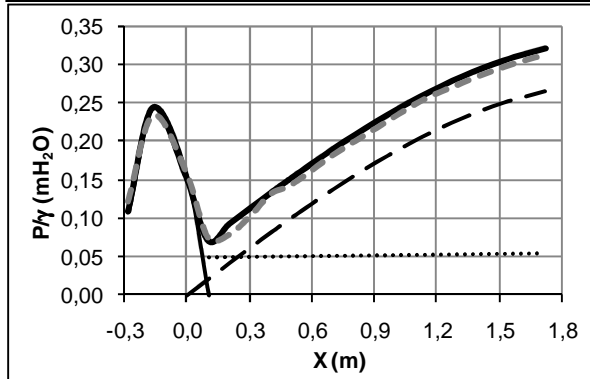
X	-0,277	-0,157	0,000	0,105	0,206	0,307	0,408	0,506	0,707	0,911	1,122	1,323	1,520	1,721
Pressões Médias - Ressalto Hidráulico Afogado - $q = 0,130\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ - $Fr_1 = 3,91$ - $S = 1,32$														
$\Delta P/\gamma$	0,010	-0,023	0,004	0,012	-0,012	-0,010	-0,003	-0,006	0,001	0,007	0,010	0,006	0,006	0,006
$\Delta P\%$	4,4%	-6,2%	1,3%	4,0%	-4,3%	-3,3%	-1,1%	-1,9%	0,3%	2,1%	2,6%	1,6%	1,6%	1,6%
Flutuações de Pressão - Ressalto Hidráulico Afogado - $q = 0,130\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ - $Fr_1 = 3,91$ - $S = 1,32$														
$\Delta\sigma/\gamma$	-0,006	-0,007	0,004	-0,001	0,002	0,003	0,005	0,004	0,006	0,002	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001
$\Delta\sigma\%$	-39,3%	-32,3%	11,0%	-3,9%	4,8%	7,3%	15,8%	15,0%	24,8%	11,4%	-8,0%	-10,2%	-18,6%	-17,1%



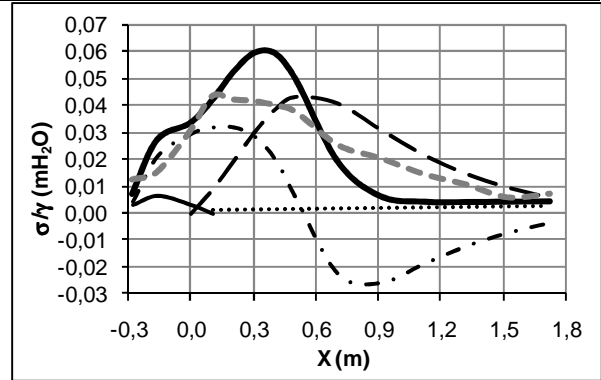
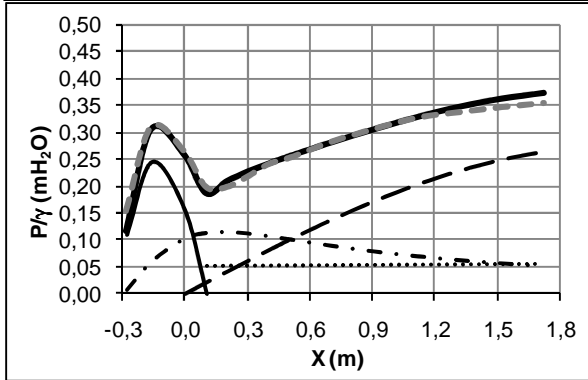
Pressões Médias - Ressalto Hidráulico Afogado - $q = 0,130\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ - $Fr_1 = 3,52$ - $S = 1,42$														
$\Delta P/\gamma$	-0,011	-0,047	0,001	0,025	0,009	0,010	0,013	0,008	0,017	0,020	0,019	0,020	0,025	0,026
$\Delta P\%$	-3,9%	-11,4%	0,4%	7,0%	2,6%	2,7%	3,6%	2,1%	4,4%	5,0%	4,6%	5,0%	5,9%	6,2%
Flutuações de Pressão - Ressalto Hidráulico Afogado - $q = 0,130\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ - $Fr_1 = 3,52$ - $S = 1,42$														
$\Delta\sigma/\gamma$	-0,004	-0,003	0,005	0,002	0,005	0,006	0,004	0,001	0,000	-0,002	-0,002	-0,002	-0,002	-0,001
$\Delta\sigma\%$	-24,0%	-11,7%	14,8%	6,4%	14,0%	16,8%	15,2%	3,9%	-0,4%	-11,6%	-17,8%	-19,8%	-30,5%	-16,2%



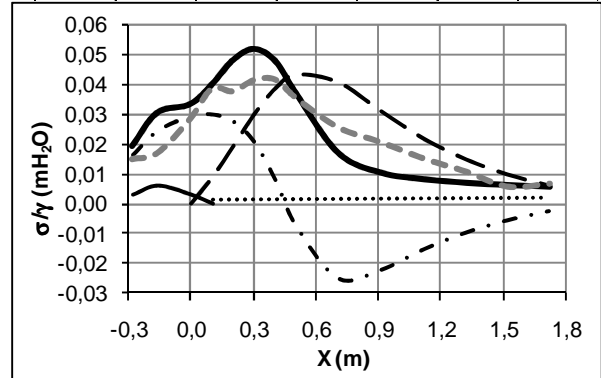
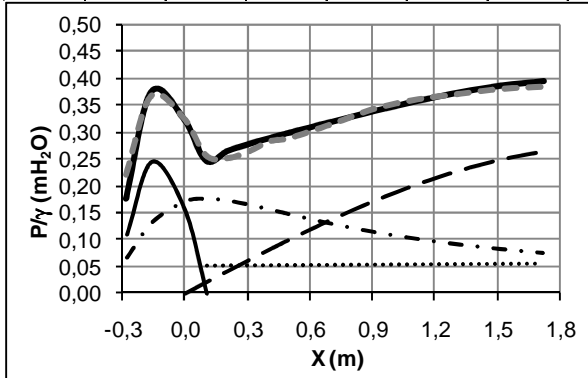
Pressões Médias - Ressalto Hidráulico Livre - $q = 0,174\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ - $Fr_1 = 4,97$ - $S = 1,00$														
$\Delta P/\gamma$	-	-	0,006	0,002	-0,015	-0,011	-0,002	-0,009	-0,007	-0,008	-0,005	-0,007	-0,006	-0,005
$\Delta P\%$	-	-	3,9%	2,6%	-19,5%	-11,0%	-1,6%	-6,4%	-4,1%	-3,6%	-1,9%	-2,4%	-2,1%	-1,7%
Flutuações de Pressão - Ressalto Hidráulico Livre - $q = 0,174\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ - $Fr_1 = 4,97$ - $S = 1,00$														
$\Delta\sigma/\gamma$	-	-	0,002	0,002	-0,005	-0,005	-0,008	-0,013	-0,003	0,000	0,001	0,000	-0,001	0,003
$\Delta\sigma\%$	-	-	32,1%	15,7%	-29,8%	-21,1%	-23,9%	-42,9%	-9,0%	1,1%	2,5%	2,9%	-11,7%	29,2%



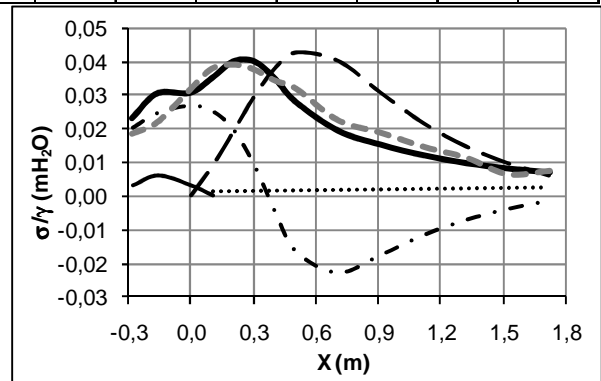
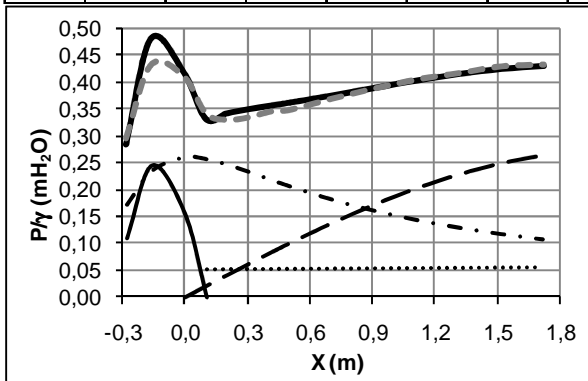
X	-0,277	-0,157	0,000	0,105	0,206	0,307	0,408	0,506	0,707	0,911	1,122	1,323	1,520	1,721
Pressões Médias - Ressalto Hidráulico Afogado - $q = 0,174\text{m}^3/\text{s/m}$ - $Fr_1 = 4,34$ - $S = 1,09$														
$\Delta P/\gamma$	0,037	0,005	0,007	0,012	-0,010	-0,008	0,000	-0,002	0,002	0,001	0,000	-0,009	-0,015	-0,017
$\Delta P\%$	24,3%	1,7%	2,6%	6,2%	-5,3%	-3,8%	-0,1%	-0,9%	0,7%	0,5%	-0,1%	-2,7%	-4,2%	-4,9%
Flutuações de Pressão - Ressalto Hidráulico Afogado - $q = 0,174\text{m}^3/\text{s/m}$ - $Fr_1 = 4,34$ - $S = 1,09$														
$\Delta\sigma/\gamma$	0,005	-0,012	-0,003	0,002	-0,010	-0,018	-0,019	-0,012	0,006	0,014	0,010	0,007	0,002	0,003
$\Delta\sigma\%$	43,1%	-76,9%	-9,4%	3,9%	-23,6%	-42,7%	-47,9%	-31,9%	24,9%	69,4%	71,2%	61,5%	28,4%	40,3%



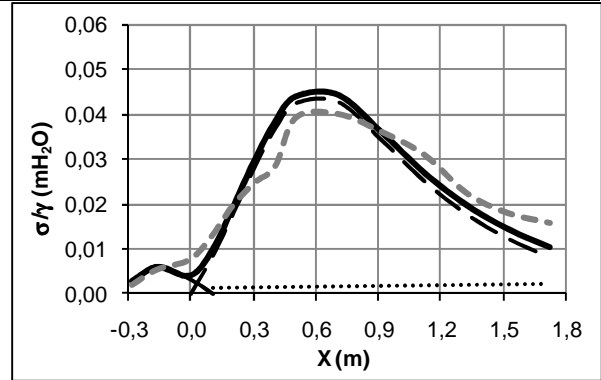
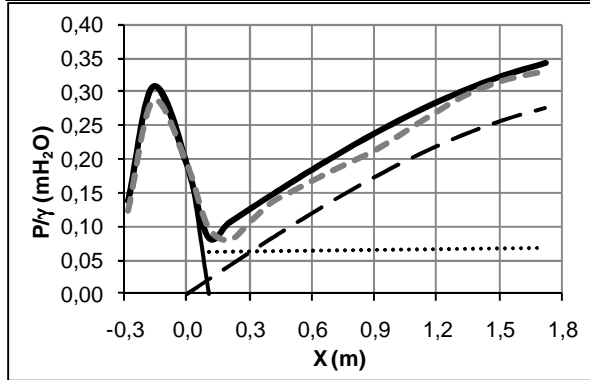
Pressões Médias - Ressalto Hidráulico Afogado - $q = 0,174\text{m}^3/\text{s/m}$ - $Fr_1 = 3,95$ - $S = 1,18$														
$\Delta P/\gamma$	0,043	-0,009	0,000	0,008	-0,015	-0,016	-0,008	-0,012	-0,006	0,003	0,001	-0,004	-0,008	-0,012
$\Delta P\%$	19,6%	-2,5%	-0,1%	3,3%	-5,9%	-6,1%	-2,9%	-4,1%	-1,8%	0,8%	0,4%	-1,2%	-2,0%	-3,1%
Flutuações de Pressão - Ressalto Hidráulico Afogado - $q = 0,174\text{m}^3/\text{s/m}$ - $Fr_1 = 3,95$ - $S = 1,18$														
$\Delta\sigma/\gamma$	-0,004	-0,013	-0,005	-0,001	-0,010	-0,010	-0,006	-0,001	0,009	0,010	0,007	0,004	0,000	0,001
$\Delta\sigma\%$	-27,6%	-77,5%	-16,5%	-2,9%	-26,5%	-24,0%	-13,9%	-3,7%	33,6%	49,8%	45,8%	35,0%	-7,3%	15,8%



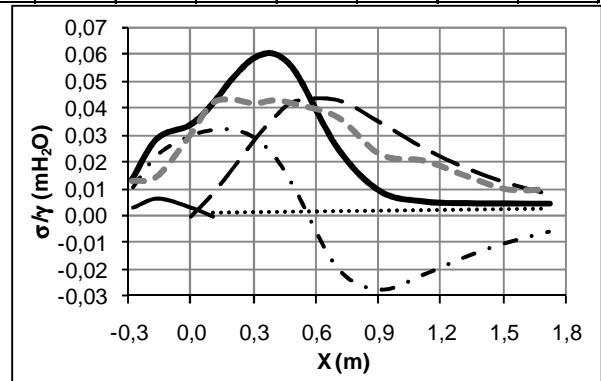
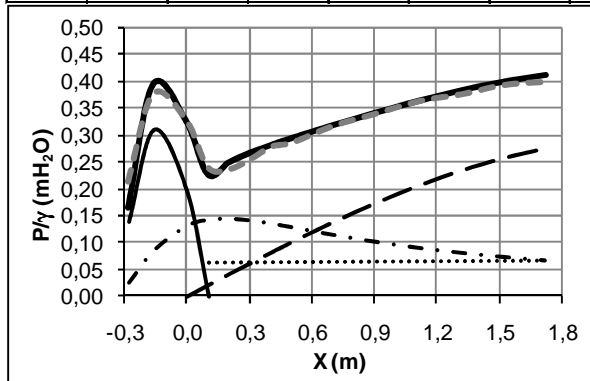
Pressões Médias - Ressalto Hidráulico Afogado - $q = 0,174\text{m}^3/\text{s/m}$ - $Fr_1 = 3,41$ - $S = 1,31$														
$\Delta P/\gamma$	0,014	-0,047	-0,005	0,013	-0,009	-0,013	-0,008	-0,011	-0,003	0,002	0,004	0,004	0,007	0,005
$\Delta P\%$	4,7%	-10,8%	-1,2%	3,8%	-2,8%	-3,7%	-2,4%	-3,1%	-0,9%	0,4%	1,1%	1,0%	1,7%	1,1%
Flutuações de Pressão - Ressalto Hidráulico Afogado - $q = 0,174\text{m}^3/\text{s/m}$ - $Fr_1 = 3,41$ - $S = 1,31$														
$\Delta\sigma/\gamma$	-0,005	-0,009	0,001	0,003	-0,001	-0,003	-0,001	0,004	0,003	0,003	0,002	0,001	-0,002	0,000
$\Delta\sigma\%$	-26,1%	-40,7%	2,1%	6,8%	-2,9%	-7,2%	-2,3%	11,8%	13,1%	18,2%	16,4%	12,8%	-28,9%	4,6%



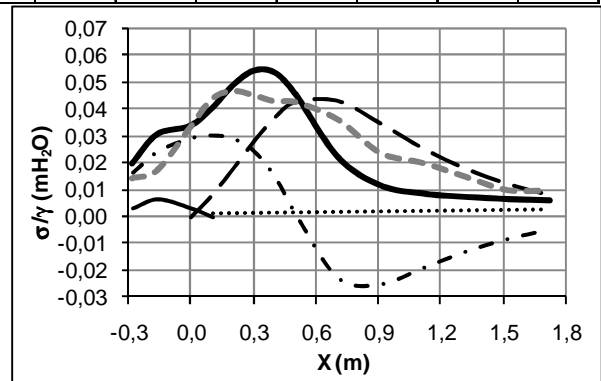
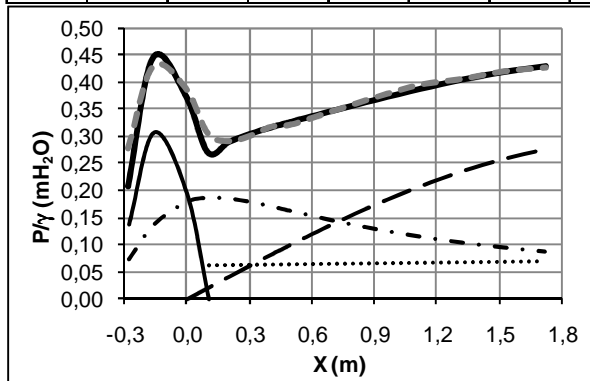
X	-0,277	-0,157	0,000	0,105	0,206	0,307	0,408	0,506	0,707	0,911	1,122	1,323	1,520	1,721
Pressões Médias - Ressalto Hidráulico Livre - $q = 0,217\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ - $Fr_1 = 4,38$ - $S = 1,00$														
$\Delta P/\gamma$	-	-	0,001	0,014	-0,027	-0,020	-0,012	-0,015	-0,021	-0,026	-0,018	-0,008	-0,007	-0,011
$\Delta P\%$	-	-	0,5%	14,0%	-35,1%	-19,3%	-9,0%	-9,8%	-11,2%	-12,0%	-7,0%	-2,9%	-2,1%	-3,4%
Flutuações de Pressão - Ressalto Hidráulico Livre - $q = 0,217\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ - $Fr_1 = 4,38$ - $S = 1,00$														
$\Delta\sigma/\gamma$	-	-	0,003	0,003	0,000	-0,005	-0,010	-0,005	-0,004	0,000	0,004	0,003	0,004	0,005
$\Delta\sigma\%$	-	-	45,3%	25,2%	1,7%	-19,7%	-34,7%	-11,7%	-10,4%	0,1%	13,0%	11,9%	19,5%	33,8%



Pressões Médias - Ressalto Hidráulico Afogado - $q = 0,217\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ - $Fr_1 = 3,72$ - $S = 1,10$														
$\Delta P/\gamma$	0,048	-0,018	0,002	0,013	-0,014	-0,013	-0,004	-0,009	-0,002	-0,002	-0,001	-0,007	-0,006	-0,012
$\Delta P\%$	22,4%	-4,8%	0,6%	5,4%	-5,9%	-5,1%	-1,3%	-3,2%	-0,5%	-0,6%	-0,2%	-2,0%	-1,6%	-3,1%
Flutuações de Pressão - Ressalto Hidráulico Afogado - $q = 0,217\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ - $Fr_1 = 3,72$ - $S = 1,10$														
$\Delta\sigma/\gamma$	0,000	-0,014	-0,004	0,001	-0,008	-0,017	-0,017	-0,012	0,012	0,014	0,015	0,010	0,005	0,005
$\Delta\sigma\%$	-3,6%	-92,8%	-12,1%	1,2%	-18,0%	-39,4%	-39,1%	-28,0%	31,6%	60,1%	73,4%	67,4%	52,8%	53,5%



Pressões Médias - Ressalto Hidráulico Afogado - $q = 0,217\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ - $Fr_1 = 3,45$ - $S = 1,16$														
$\Delta P/\gamma$	0,070	-0,014	0,016	0,036	0,002	-0,003	0,002	-0,004	0,001	0,006	0,009	0,003	0,003	-0,001
$\Delta P\%$	25,0%	-3,3%	4,0%	11,6%	0,7%	-0,9%	0,7%	-1,3%	0,3%	1,7%	2,3%	0,8%	0,7%	-0,2%
Flutuações de Pressão - Ressalto Hidráulico Afogado - $q = 0,217\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ - $Fr_1 = 3,45$ - $S = 1,16$														
$\Delta\sigma/\gamma$	-0,005	-0,013	-0,001	0,003	-0,002	-0,009	-0,011	-0,003	0,014	0,012	0,011	0,007	0,003	0,004
$\Delta\sigma\%$	-39,2%	-78,9%	-2,2%	7,6%	-5,0%	-21,0%	-25,3%	-6,9%	38,5%	51,3%	57,4%	50,7%	33,9%	38,5%



**ANEXO F – PRESSÕES COM DISTINTAS PROBABILIDADES DE NÃO
EXCEDÊNCIA – COMPARATIVO ENTRE OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E
ESTIMADOS**

X	-0,277	-0,157	0,000	0,105	0,206	0,307	0,408	0,506	0,707	0,911	1,122	1,323	1,520	1,721														
Ressalto Hidráulico Livre - q = 0,043m³/s/m - Fr₁ = 9,26 - S = 1,00																												
P _{X%} /γ	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%
P _{0,1%} /γ	-	-	-	-	0,006	16,4%	0,012	248,2%	-0,008	-23,3%	0,003	15,1%	-0,011	-168,6%	0,005	13,7%	0,011	11,2%	0,002	1,5%	-0,002	-1,6%	-0,007	-4,8%	-0,004	-2,2%	-0,008	-5,4%
P _{1%} /γ	-	-	-	-	0,004	11,9%	0,014	68,6%	-0,013	-94,3%	-0,004	-98,4%	-0,004	-98,4%	0,004	5,9%	0,010	8,4%	0,003	2,3%	-0,005	-2,9%	-0,008	-5,2%	-0,005	-2,9%	-0,008	-5,0%
P _{5%} /γ	-	-	-	-	0,003	8,8%	0,013	44,9%	-0,011	-150,9%	-0,007	-32,0%	-0,002	-3,3%	0,004	4,7%	0,011	8,3%	0,002	1,6%	-0,006	-3,5%	-0,008	-5,3%	-0,005	-3,4%	-0,008	-4,8%
P _{10%} /γ	-	-	-	-	0,003	7,8%	0,010	33,1%	-0,009	-54,6%	-0,008	-23,4%	0,000	-0,5%	0,004	4,9%	0,011	8,3%	0,002	1,2%	-0,006	-3,9%	-0,008	-5,1%	-0,006	-3,5%	-0,008	-4,7%
P _{90%} /γ	-	-	-	-	0,001	2,0%	0,002	3,8%	0,007	7,3%	0,007	5,9%	0,012	8,8%	0,008	5,7%	0,010	6,2%	-0,003	-1,8%	-0,007	-4,4%	-0,007	-4,1%	-0,008	-4,8%	-0,007	-4,5%
P _{95%} /γ	-	-	-	-	0,001	1,2%	0,004	6,8%	0,013	11,8%	0,012	9,1%	0,015	9,8%	0,008	5,2%	0,010	5,9%	-0,004	-2,4%	-0,007	-4,4%	-0,007	-4,1%	-0,008	-4,9%	-0,007	-4,4%
P _{99%} /γ	-	-	-	-	0,001	2,6%	0,013	15,8%	0,028	18,9%	0,022	12,6%	0,020	11,1%	0,006	3,5%	0,009	5,3%	-0,006	-3,4%	-0,008	-4,6%	-0,006	-3,8%	-0,009	-5,2%	-0,007	-4,4%
P _{99,9%} /γ	-	-	-	-	0,004	6,9%	0,033	27,8%	0,054	25,7%	0,031	13,4%	0,024	10,4%	0,000	0,1%	0,009	4,9%	-0,006	-3,6%	-0,008	-4,9%	-0,006	-3,7%	-0,009	-5,6%	-0,008	-4,6%
Ressalto Hidráulico Afogado - q = 0,043m³/s/m - Fr₁ = 7,56 - S = 1,12																												
P _{X%} /γ	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%
P _{0,1%} /γ	-	-	-0,022	-230,6%	-0,023	-775,2%	0,045	142,2%	0,047	106,7%	0,018	23,7%	-0,007	-6,4%	0,001	0,9%	0,001	0,7%	-0,003	-2,1%	-0,005	-2,6%	-0,007	-4,0%	-0,002	-1,1%	-0,004	-2,1%
P _{1%} /γ	-	-	-0,010	-24,5%	-0,020	-76,2%	0,035	61,9%	0,036	51,8%	0,020	20,3%	0,005	3,8%	0,008	5,5%	0,003	2,0%	-0,004	-2,4%	-0,008	-4,3%	-0,008	-4,7%	-0,003	-1,8%	-0,003	-1,9%
P _{5%} /γ	-	-	0,005	7,2%	-0,013	-26,2%	0,027	37,3%	0,028	32,5%	0,020	17,5%	0,011	8,1%	0,012	7,7%	0,005	2,8%	-0,005	-3,1%	-0,009	-5,0%	-0,009	-4,8%	-0,004	-2,2%	-0,003	-1,7%
P _{10%} /γ	-	-	0,011	14,6%	-0,009	-14,0%	0,024	29,6%	0,025	26,0%	0,020	16,1%	0,014	9,6%	0,014	8,7%	0,005	3,0%	-0,006	-3,3%	-0,009	-5,2%	-0,008	-4,7%	-0,004	-2,4%	-0,003	-1,8%
P _{90%} /γ	-	-	0,044	29,6%	0,033	20,2%	0,006	4,3%	0,001	0,8%	0,015	9,2%	0,024	13,8%	0,022	12,4%	0,006	3,3%	-0,008	-4,4%	-0,012	-6,4%	-0,008	-4,6%	-0,007	-3,7%	-0,004	-2,2%
P _{95%} /γ	-	-	0,052	31,8%	0,041	22,5%	0,004	2,4%	-0,003	-1,9%	0,014	8,0%	0,025	14,2%	0,023	12,5%	0,006	3,3%	-0,008	-4,6%	-0,012	-6,5%	-0,008	-4,6%	-0,007	-3,9%	-0,004	-2,2%
P _{99%} /γ	-	-	0,071	36,0%	0,057	25,7%	-0,002	-1,0%	-0,014	-7,4%	0,010	5,5%	0,028	14,9%	0,024	12,9%	0,006	3,1%	-0,009	-4,9%	-0,013	-6,8%	-0,008	-4,5%	-0,008	-4,2%	-0,004	-2,4%
P _{99,9%} /γ	-	-	0,097	39,3%	0,077	27,9%	-0,013	-5,8%	-0,035	-16,1%	0,005	2,4%	0,033	15,8%	0,027	13,3%	0,006	3,2%	-0,011	-5,7%	-0,013	-7,0%	-0,008	-4,5%	-0,008	-4,5%	-0,005	-2,7%
Ressalto Hidráulico Afogado - q = 0,043m³/s/m - Fr₁ = 7,79 - S = 1,18																												
P _{X%} /γ	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%
P _{0,1%} /γ	-	-	-0,031	-178,4%	-0,001	-1,5%	0,050	72,5%	0,028	40,1%	0,003	3,3%	-0,001	-1,1%	0,007	4,7%	0,008	4,8%	0,003	1,6%	0,001	0,6%	0,000	0,2%	0,008	4,3%	0,006	3,2%
P _{1%} /γ	-	-	-0,020	-41,3%	0,000	-0,6%	0,038	43,0%	0,023	25,3%	0,011	9,8%	0,009	6,7%	0,011	7,1%	0,009	5,3%	0,002	0,9%	0,000	-0,2%	0,000	0,0%	0,007	3,7%	0,007	3,5%
P _{5%} /γ	-	-	-0,008	-10,5%	0,003	3,2%	0,030	29,5%	0,019	17,9%	0,013	10,1%	0,015	9,6%	0,014	8,4%	0,010	5,6%	0,001	0,4%	-0,001	-0,7%	0,000	0,0%	0,006	3,2%	0,007	3,6%
P _{10%} /γ	-	-	-0,001	-0,7%	0,004	4,3%	0,026	24,0%	0,017	14,6%	0,014	10,2%	0,016	10,4%	0,015	8,9%	0,010	5,6%	0,001	0,3%	-0,002	-0,9%	0,000	0,1%	0,006	3,0%	0,007	3,5%
P _{90%} /γ	-	-	0,052	27,2%	0,021	12,0%	0,004	2,7%	0,005	2,8%	0,017	9,9%	0,024	12,7%	0,020	10,3%	0,010	4,8%	-0,002	-1,2%	-0,003	-1,7%	0,001	0,3%	0,003	1,7%	0,006	3,1%
P _{95%} /γ	-	-	0,061	29,3%	0,024	12,7%	0,001	0,4%	0,003	1,5%	0,018	9,8%	0,025	12,8%	0,020	10,2%	0,009	4,6%	-0,003	-1,5%	-0,004	-1,9%	0,001	0,3%	0,003	1,6%	0,006	2,9%
P _{99%} /γ	-	-	0,080	32,5%	0,031	14,2%	-0,007	-3,7%	-0,001	-0,6%	0,019	9,4%	0,027	13,0%	0,020	9,8%	0,009	4,2%	-0,004	-2,0%	-0,004	-2,1%	0,001	0,3%	0,002	1,2%	0,006	2,8%
P _{99,9%} /γ	-	-	0,101	33,9%	0,043	16,2%	-0,018	-8,4%	-0,008	-3,4%	0,020	9,1%	0,028	12,8%	0,019	8,7%	0,008	4,0%	-0,005	-2,7%	-0,005	-2,4%	0,001	0,3%	0,002	0,9%	0,005	2,3%
Ressalto Hidráulico Afogado - q = 0,043m³/s/m - Fr₁ = 7,73 - S = 1,29																												
P _{X%} /γ	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%
P _{0,1%} /γ	0,011	35,3%	-0,036	-61,8%	0,009	9,3%	0,033	30,5%	0,004	4,3%	0,006	5,2%	0,012	8,3%	0,021	13,2%	0,016	8,7%	0,011	5,5%	0,013	5,9%	0,015	7,0%	0,025	11,4%	0,025	11,4%
P _{1%} /γ	0,021	42,1%	-0,022	-23,7%	0,010	7,9%	0,026	21,2%	0,006	4,5%	0,011	7,6%	0,016	10,2%	0,021	11,9%	0,018	9,0%	0,012	5,9%	0,012	5,4%	0,015	6,9%	0,024	10,8%	0,026	11,5%
P _{5%} /γ	0,024	41,4%	-0,011	-9,4%	0,011	8,0%	0,022	16,5%	0,007	5,4%	0,014	8,8%	0,019	10,8%	0,023	12,2%	0,018	8,9%	0,013	5,9%	0,011	5,2%	0,015	6,9%	0,024	10,5%	0,026	11,6%
P _{10%} /γ	0,025	40,5%	-0,006	-4,6%	0,013	8,4%	0,021	14,6%	0,008	5,6%	0,015	9,0%	0,020	11,0%	0,024	12,2%	0,018	8,9%	0,013	5,9%	0,011	5,1%	0,015	7,0%	0,023	10,3%	0,026	11,5%
P _{90%} /γ	0,035	38,5%	0,029	13,2%	0,021	10,0%	0,009	5,1%	0,015	7,6%	0,021	10,5%	0,022	10,5%	0,026	11,6%	0,017	7,7%	0,010	4,4%	0,010	4,7%	0,016	7,2%	0,021	9,3%	0,025	11,1%
P _{95%} /γ	0,038	39,3%	0,035	14,6%	0,022	10,2%	0,008	4,0%	0,016	8,1%	0,022	10,6%	0,022	10,3%	0,025	11,2%	0,016	7,3%	0,010	4,2%	0,010	4,5%	0,016	7,2%	0,021	9,1%	0,025	10,9%
P _{99%} /γ	0,047	41,5%	0,044	16,5%	0,024	9,8%	0,004	1,9%	0,019	8,7%	0,024	10,8%	0,022	9,6%	0,023	9,9%	0,016	6,8%	0,008	3,7%	0,010	4,4%	0,017	7,4%	0,020	8,8%	0,025	10,8%
P _{99,9%} /γ	0,066	45,7%	0,053	17,2%	0,025	9,2%	0,001	0,6%	0,026	10,4%	0,027	10,9%	0,021	8,6%	0,019	7,8%	0,015	6,4%	0,009	3,9%	0,010	4,3%	0,017	7,4%	0,020	8,5%	0,024	10,4%

X	-0,277	-0,157	0,000	0,105	0,206	0,307	0,408	0,506	0,707	0,911	1,122	1,323	1,520	1,721														
Ressalto Hidráulico Afogado - q = 0,043m³/s/m - Fr₁ = 6,21 - S = 1,39																												
P _{X%} /y	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%		
P _{0,1%} /y	-0,016	-51,6%	-0,025	-22,8%	0,025	16,4%	0,024	17,1%	-0,004	-3,4%	0,007	5,0%	0,013	8,3%	0,020	11,7%	0,017	8,9%	0,014	6,8%	0,018	8,0%	0,027	11,5%	0,037	15,4%	0,037	15,5%
P _{1%} /y	-0,010	-19,3%	-0,018	-12,7%	0,027	15,5%	0,023	14,6%	0,002	1,5%	0,011	6,8%	0,015	8,9%	0,021	11,3%	0,020	9,4%	0,017	7,7%	0,019	8,3%	0,027	11,3%	0,037	15,0%	0,038	15,8%
P _{5%} /y	-0,003	-4,0%	-0,013	-8,2%	0,029	15,2%	0,022	13,0%	0,005	3,3%	0,013	7,5%	0,016	8,9%	0,022	10,8%	0,021	9,8%	0,018	8,0%	0,020	8,5%	0,027	11,4%	0,036	14,6%	0,039	15,8%
P _{10%} /y	0,001	1,7%	-0,011	-6,2%	0,030	15,1%	0,021	12,3%	0,007	4,3%	0,014	7,6%	0,017	8,8%	0,022	10,6%	0,022	9,8%	0,018	7,9%	0,020	8,5%	0,028	11,4%	0,035	14,5%	0,039	15,9%
P _{90%} /y	0,025	19,3%	0,005	2,3%	0,036	14,4%	0,018	8,9%	0,018	8,6%	0,016	7,4%	0,015	6,5%	0,022	9,4%	0,022	9,0%	0,016	6,5%	0,020	8,3%	0,029	11,6%	0,033	13,5%	0,038	15,4%
P _{95%} /y	0,030	21,7%	0,007	2,9%	0,036	14,1%	0,018	8,5%	0,017	9,4%	0,016	7,3%	0,014	6,1%	0,022	9,1%	0,022	8,8%	0,015	6,3%	0,020	8,3%	0,029	11,7%	0,033	13,3%	0,038	15,3%
P _{99%} /y	0,042	25,7%	0,008	3,1%	0,037	13,3%	0,017	7,5%	0,026	11,0%	0,019	7,7%	0,013	5,5%	0,019	7,7%	0,020	8,1%	0,014	5,8%	0,020	8,2%	0,029	11,7%	0,033	13,1%	0,038	15,2%
P _{99,9%} /y	0,054	27,8%	0,008	2,7%	0,036	11,8%	0,016	6,3%	0,035	13,2%	0,021	8,1%	0,013	4,9%	0,014	5,5%	0,019	7,3%	0,014	5,6%	0,021	8,4%	0,030	11,9%	0,032	12,7%	0,037	14,7%
Ressalto Hidráulico Afogado - q = 0,043m³/s/m - Fr₁ = 6,00 - S = 1,60																												
P _{X%} /y	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%		
P _{0,1%} /y	-0,083	-127,2%	-0,054	-31,5%	-0,017	-8,9%	-0,006	-3,1%	-0,008	-4,7%	0,017	9,7%	0,024	12,8%	0,030	14,9%	0,015	7,0%	0,017	7,3%	0,023	9,0%	0,032	12,3%	0,051	18,7%	0,053	19,3%
P _{1%} /y	-0,079	-93,4%	-0,052	-26,6%	-0,012	-5,5%	-0,001	-0,3%	-0,004	-2,0%	0,016	8,2%	0,022	10,8%	0,025	11,2%	0,018	7,6%	0,020	8,2%	0,025	9,5%	0,037	13,9%	0,050	18,2%	0,053	19,4%
P _{5%} /y	-0,074	-72,7%	-0,050	-23,9%	-0,008	-3,4%	0,003	1,5%	-0,001	-0,5%	0,014	6,5%	0,019	8,8%	0,021	9,2%	0,018	7,5%	0,022	8,5%	0,026	9,8%	0,038	14,0%	0,050	17,9%	0,054	19,6%
P _{10%} /y	-0,071	-64,4%	-0,050	-22,6%	-0,006	-2,5%	0,005	2,3%	0,000	0,2%	0,012	5,7%	0,017	7,7%	0,020	8,4%	0,018	7,4%	0,023	8,6%	0,027	10,0%	0,039	14,1%	0,049	17,8%	0,054	19,5%
P _{90%} /y	-0,044	-25,9%	-0,047	-17,3%	0,006	2,3%	0,017	6,8%	0,007	3,0%	0,010	0,5%	0,004	1,5%	0,013	4,9%	0,019	6,9%	0,023	8,3%	0,029	10,4%	0,041	14,5%	0,047	16,9%	0,054	19,2%
P _{95%} /y	-0,039	-21,3%	-0,048	-17,0%	0,008	2,9%	0,019	7,6%	0,009	3,6%	0,000	0,0%	0,001	0,5%	0,012	4,4%	0,018	6,6%	0,023	8,3%	0,029	10,5%	0,041	14,5%	0,047	16,8%	0,054	19,1%
P _{99%} /y	-0,026	-12,3%	-0,051	-17,3%	0,012	4,1%	0,024	9,0%	0,013	4,8%	-0,003	-1,1%	-0,004	-1,4%	0,007	2,5%	0,017	6,1%	0,024	8,3%	0,030	10,6%	0,041	14,6%	0,047	16,6%	0,054	18,9%
P _{99,9%} /y	-0,010	-4,0%	-0,056	-17,5%	0,018	5,6%	0,031	10,9%	0,020	6,8%	-0,004	-1,5%	-0,011	-3,7%	-0,001	-0,3%	0,016	5,4%	0,025	8,6%	0,032	11,2%	0,042	14,9%	0,046	16,3%	0,053	18,6%
Ressalto Hidráulico Afogado - q = 0,043m³/s/m - Fr₁ = 5,14 - S = 1,78																												
P _{X%} /y	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%		
P _{0,1%} /y	-0,140	-134,9%	-0,077	-34,2%	-0,038	-15,6%	-0,014	-5,9%	0,007	3,0%	0,036	15,7%	0,043	18,0%	0,045	18,4%	0,034	13,2%	0,025	9,2%	0,033	11,6%	0,043	14,9%	0,069	22,2%	0,071	23,2%
P _{1%} /y	-0,130	-100,1%	-0,078	-32,2%	-0,030	-11,5%	-0,007	-2,9%	0,007	3,0%	0,029	12,0%	0,035	13,8%	0,035	13,4%	0,032	11,6%	0,028	10,0%	0,038	12,9%	0,050	16,5%	0,068	21,9%	0,072	23,4%
P _{5%} /y	-0,126	-86,8%	-0,079	-30,8%	-0,023	-8,6%	-0,002	-0,9%	0,007	2,8%	0,023	9,2%	0,029	11,0%	0,029	10,7%	0,031	10,8%	0,031	10,5%	0,041	13,5%	0,052	17,0%	0,068	21,7%	0,073	23,5%
P _{10%} /y	-0,124	-81,2%	-0,079	-30,1%	-0,020	-7,3%	0,000	-0,1%	0,007	2,8%	0,021	8,0%	0,026	9,7%	0,026	9,7%	0,030	10,4%	0,031	10,6%	0,042	13,8%	0,052	17,2%	0,068	21,6%	0,073	23,5%
P _{90%} /y	-0,103	-49,5%	-0,084	-27,5%	-0,002	-0,7%	0,014	5,0%	0,006	2,1%	0,000	-0,1%	0,003	1,0%	0,011	3,7%	0,030	9,5%	0,034	10,8%	0,045	14,3%	0,055	17,7%	0,066	21,0%	0,073	23,1%
P _{95%} /y	-0,098	-44,8%	-0,086	-27,6%	0,000	0,1%	0,017	5,8%	0,006	2,1%	-0,004	-1,3%	-0,001	-0,4%	0,008	2,7%	0,029	9,3%	0,034	10,8%	0,045	14,4%	0,056	17,8%	0,066	20,8%	0,073	23,0%
P _{99%} /y	-0,087	-35,4%	-0,090	-27,9%	0,006	1,9%	0,022	7,4%	0,007	2,2%	-0,012	-4,0%	-0,011	-3,5%	0,000	0,0%	0,028	8,6%	0,034	10,7%	0,046	14,6%	0,057	18,0%	0,066	20,7%	0,073	22,9%
P _{99,9%} /y	-0,075	-27,0%	-0,099	-29,0%	0,016	4,5%	0,030	9,5%	0,008	2,5%	-0,024	-7,4%	-0,025	-7,7%	-0,015	-4,6%	0,024	7,4%	0,036	11,0%	0,050	15,4%	0,058	18,2%	0,065	20,4%	0,073	22,6%
Ressalto Hidráulico Livre - q = 0,065m³/s/m - Fr₁ = 7,53 - S = 1,00																												
P _{X%} /y	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%		
P _{0,1%} /y	-	-	-	-	-0,003	-5,6%	0,012	87,5%	-0,015	-45,1%	0,006	31,4%	0,002	21,5%	0,003	12,0%	0,015	16,1%	0,020	13,2%	0,004	2,6%	-0,005	-2,9%	-0,006	-3,4%	-0,004	-1,9%
P _{1%} /y	-	-	-	-	0,000	0,6%	0,011	44,3%	-0,017	-170,4%	-0,001	-10,7%	0,007	21,2%	0,005	9,0%	0,012	10,5%	0,016	9,8%	0,004	2,1%	-0,006	-3,1%	-0,006	-3,2%	-0,004	-2,2%
P _{5%} /y	-	-	-	-	0,000	0,3%	0,010	29,6%	-0,015	-144,5%	-0,004	-12,1%	0,007	12,7%	0,006	6,9%	0,012	9,1%	0,014	7,9%	0,002	1,2%	-0,006	-3,1%	-0,006	-2,9%	-0,004	-2,2%
P _{10%} /y	-	-	-	-	0,000	0,5%	0,010	25,8%	-0,013	-60,5%	-0,004	-10,6%	0,008	10,8%	0,005	5,5%	0,012	8,8%	0,012	7,1%	0,002	1,0%	-0,006	-3,2%	-0,006	-2,9%	-0,004	-2,1%
P _{90%} /y	-	-	-	-	0,004	5,7%	0,014	19,9%	0,016	14,5%	0,011	8,6%	0,015	9,3%	0,006	4,0%	0,013	7,0%	0,005	2,7%	-0,004	-2,2%	-0,007	-3,3%	-0,004	-1,9%	-0,003	-1,3%
P _{95%} /y	-	-	-	-	0,006	8,4%	0,019	23,7%	0,025	19,7%	0,017	11,4%	0,017	9,9%	0,007	4,0%	0,013	6,6%	0,004	2,0%	-0,005	-2,7%	-0,007	-3,2%	-0,004	-1,7%	-0,003	-1,2%
P _{99%} /y	-	-	-	-	0,012	14,3%	0,036	33,4%	0,050	28,4%	0,032	16,0%	0,023	10,9%	0,008	3,7%	0,011	5,2%	0,001	0,6%	-0,007	-3,6%	-0,007	-3,4%	-0,003	-1,4%	-0,002	-1,1%
P _{99,9%} /y	-	-	-	-	0,023	23,1%	0,072	44,5%	0,081	33,5%	0,045	17,2%	0,028	10,5%	-0,001	-0,5%	0,008	3,5%	-0,001	-0,4%	-0,009	-4,4%	-0,007	-3,5%	-0,003	-1,2%	-0,002	-0,8%

X	-0,277	-0,157	0,000	0,105	0,206	0,307	0,408	0,506	0,707	0,911	1,122	1,323	1,520	1,721														
Ressalto Hidráulico Afogado - q = 0,065m³/s/m - Fr₁ = 7,20 - S = 1,10																												
P _{X%} /y	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%		
P _{0,1%} /y	-	-	0,005	6,9%	-0,030	-214,5%	0,037	110,8%	0,047	121,8%	0,034	52,3%	-0,003	-3,2%	-0,019	-15,0%	-0,017	-10,4%	-0,010	-5,2%	-0,007	-3,3%	-0,011	-5,2%	-0,010	-4,9%	-0,006	-2,9%
P _{1%} /y	-	-	0,007	7,5%	-0,026	-57,6%	0,025	41,9%	0,031	45,8%	0,030	30,4%	0,006	4,9%	-0,006	-3,8%	-0,004	-2,4%	-0,007	-3,4%	-0,009	-4,3%	-0,012	-5,7%	-0,011	-5,2%	-0,007	-3,2%
P _{5%} /y	-	-	0,009	8,3%	-0,019	-26,7%	0,019	23,5%	0,020	22,4%	0,023	19,5%	0,011	7,7%	0,002	1,5%	0,003	1,5%	-0,005	-2,4%	-0,010	-4,6%	-0,013	-6,0%	-0,011	-5,2%	-0,007	-3,3%
P _{10%} /y	-	-	0,010	8,7%	-0,016	-18,7%	0,016	17,5%	0,015	15,1%	0,019	15,4%	0,012	8,2%	0,006	3,5%	0,005	2,8%	-0,004	-2,1%	-0,010	-4,7%	-0,013	-6,1%	-0,011	-5,1%	-0,007	-3,3%
P _{30%} /y	-	-	0,026	14,7%	0,024	12,5%	-0,001	-0,5%	-0,012	-7,0%	-0,003	-1,6%	0,017	8,5%	0,023	11,2%	0,018	8,1%	-0,002	-1,0%	-0,013	-5,8%	-0,015	-6,7%	-0,011	-4,8%	-0,007	-3,1%
P _{95%} /y	-	-	0,031	16,3%	0,032	15,4%	-0,002	-1,2%	-0,016	-8,7%	-0,007	-3,4%	0,018	8,6%	0,025	11,8%	0,019	8,7%	-0,002	-1,0%	-0,013	-5,9%	-0,015	-6,8%	-0,010	-4,6%	-0,007	-3,1%
P _{99%} /y	-	-	0,044	19,7%	0,049	19,3%	-0,003	-1,6%	-0,026	-11,8%	-0,016	-7,1%	0,019	8,3%	0,028	12,7%	0,023	9,9%	-0,002	-1,0%	-0,014	-6,4%	-0,016	-7,0%	-0,010	-4,5%	-0,007	-3,0%
P _{99,9%} /y	-	-	0,064	23,7%	0,070	22,4%	-0,001	-0,4%	-0,042	-15,8%	-0,032	-12,6%	0,019	7,6%	0,032	13,1%	0,028	11,6%	-0,002	-0,9%	-0,015	-6,7%	-0,016	-7,2%	-0,010	-4,4%	-0,007	-3,0%
Ressalto Hidráulico Afogado - q = 0,065m³/s/m - Fr₁ = 6,43 - S = 1,19																												
P _{X%} /y	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%
P _{0,1%} /y	0,013	29,2%	-0,003	-3,5%	-0,026	-39,0%	0,020	28,5%	0,003	5,2%	-0,009	-10,5%	-0,024	-21,6%	-0,018	-12,8%	-0,008	-4,3%	-0,003	-1,6%	-0,003	-1,4%	-0,009	-3,9%	-0,004	-1,8%	0,000	0,1%
P _{1%} /y	0,010	21,1%	-0,005	-4,4%	-0,026	-27,4%	0,013	13,2%	0,001	1,4%	-0,005	-4,4%	-0,012	-8,6%	-0,003	-2,0%	-0,002	-1,0%	-0,002	-1,1%	-0,005	-2,4%	-0,008	-3,3%	-0,005	-2,0%	0,000	-0,1%
P _{5%} /y	0,011	20,4%	-0,005	-3,3%	-0,021	-18,4%	0,006	5,7%	-0,003	-2,4%	-0,004	-2,6%	-0,006	-3,5%	0,003	1,8%	0,001	0,6%	-0,002	-1,1%	-0,006	-2,8%	-0,008	-3,6%	-0,005	-1,9%	-0,001	-0,2%
P _{10%} /y	0,012	20,8%	-0,004	-2,6%	-0,019	-14,7%	0,004	3,1%	-0,004	-3,5%	-0,003	-2,2%	-0,003	-1,9%	0,006	3,1%	0,003	1,3%	-0,002	-1,0%	-0,007	-3,0%	-0,009	-3,7%	-0,004	-1,9%	0,000	-0,2%
P _{30%} /y	0,022	27,0%	0,007	3,5%	0,006	2,6%	-0,012	-6,4%	-0,012	-6,1%	0,001	0,3%	0,010	4,6%	0,019	8,1%	0,009	3,9%	-0,003	-1,4%	-0,011	-4,8%	-0,010	-4,2%	-0,003	-1,4%	0,000	0,0%
P _{95%} /y	0,024	28,1%	0,010	4,2%	0,010	4,4%	-0,013	-6,9%	-0,012	-5,8%	0,002	0,7%	0,012	5,3%	0,019	8,3%	0,010	4,0%	-0,004	-1,7%	-0,012	-5,1%	-0,010	-4,2%	-0,003	-1,4%	0,000	0,1%
P _{99%} /y	0,029	29,6%	0,014	5,5%	0,019	7,2%	-0,017	-7,5%	-0,012	-4,9%	0,004	1,5%	0,017	7,0%	0,021	8,3%	0,010	4,0%	-0,005	-2,2%	-0,014	-5,8%	-0,011	-4,3%	-0,003	-1,2%	0,000	0,1%
P _{99,9%} /y	0,038	32,9%	0,022	7,5%	0,032	10,2%	-0,019	-7,0%	-0,012	-4,0%	0,007	2,6%	0,024	8,7%	0,022	8,2%	0,010	4,0%	-0,007	-2,7%	-0,015	-6,2%	-0,011	-4,5%	-0,003	-1,2%	0,001	0,2%
Ressalto Hidráulico Afogado - q = 0,065m³/s/m - Fr₁ = 5,43 - S = 1,31																												
P _{X%} /y	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%
P _{0,1%} /y	0,004	6,2%	-0,036	-28,5%	-0,017	-12,9%	0,014	11,2%	-0,022	-20,5%	-0,025	-20,4%	-0,019	-12,9%	-0,014	-9,0%	-0,004	-2,1%	0,005	2,4%	0,013	5,3%	0,005	2,0%	0,012	4,5%	0,017	6,6%
P _{1%} /y	-0,001	-1,3%	-0,030	-19,0%	-0,016	-9,9%	0,006	4,3%	-0,017	-12,3%	-0,018	-11,8%	-0,010	-5,9%	-0,002	-1,0%	0,003	1,4%	0,007	3,1%	0,010	3,9%	0,004	1,5%	0,012	4,5%	0,017	6,5%
P _{5%} /y	-0,002	-1,9%	-0,026	-14,1%	-0,013	-7,1%	0,003	1,6%	-0,015	-9,6%	-0,012	-7,2%	-0,005	-2,5%	0,003	1,4%	0,006	2,6%	0,008	3,1%	0,008	3,0%	0,004	1,5%	0,012	4,5%	0,017	6,5%
P _{10%} /y	-0,001	-1,1%	-0,024	-12,4%	-0,011	-5,8%	0,001	0,9%	-0,014	-8,6%	-0,010	-5,7%	-0,003	-1,3%	0,004	1,9%	0,007	3,2%	0,008	3,1%	0,007	2,7%	0,004	1,4%	0,012	4,5%	0,017	6,4%
P _{30%} /y	0,010	7,1%	-0,010	-3,8%	0,002	0,7%	-0,009	-4,2%	-0,005	-2,3%	0,003	1,4%	0,008	3,1%	0,007	2,7%	0,013	4,7%	0,006	2,4%	0,001	0,3%	0,003	1,1%	0,013	4,8%	0,018	6,7%
P _{95%} /y	0,013	8,7%	-0,010	-3,5%	0,004	1,3%	-0,010	-4,6%	-0,003	-1,3%	0,006	2,5%	0,009	3,7%	0,007	2,9%	0,013	4,7%	0,006	2,2%	0,000	0,0%	0,003	1,1%	0,013	4,9%	0,018	6,6%
P _{99%} /y	0,020	11,7%	-0,010	-3,2%	0,007	2,5%	-0,012	-4,9%	0,002	0,9%	0,012	4,3%	0,013	4,7%	0,008	3,1%	0,012	4,2%	0,004	1,5%	-0,002	-0,8%	0,003	1,0%	0,014	5,0%	0,019	6,7%
P _{99,9%} /y	0,028	14,0%	-0,006	-1,8%	0,009	2,6%	-0,017	-5,9%	0,013	4,3%	0,026	8,5%	0,019	6,3%	0,006	2,2%	0,010	3,4%	0,002	0,7%	-0,005	-1,6%	0,002	0,9%	0,014	5,1%	0,018	6,6%
Ressalto Hidráulico Afogado - q = 0,065m³/s/m - Fr₁ = 5,53 - S = 1,44																												
P _{X%} /y	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%
P _{0,1%} /y	-0,043	-48,7%	-0,060	-35,4%	-0,023	-12,5%	-0,004	-2,3%	-0,036	-24,1%	-0,029	-18,4%	-0,009	-4,8%	-0,005	-2,8%	0,005	2,2%	0,011	4,5%	0,012	4,5%	0,013	4,6%	0,022	7,6%	0,026	9,2%
P _{1%} /y	-0,045	-42,2%	-0,055	-27,2%	-0,022	-10,5%	-0,005	-2,7%	-0,030	-17,0%	-0,022	-12,2%	-0,006	-3,2%	-0,003	-1,3%	0,005	1,9%	0,009	3,4%	0,012	4,3%	0,013	4,6%	0,021	7,3%	0,027	9,3%
P _{5%} /y	-0,044	-37,5%	-0,051	-22,9%	-0,019	-8,3%	-0,005	-2,5%	-0,024	-12,7%	-0,019	-9,3%	-0,005	-2,3%	-0,003	-1,2%	0,007	2,6%	0,009	3,4%	0,010	3,7%	0,013	4,6%	0,022	7,4%	0,028	9,5%
P _{10%} /y	-0,044	-35,6%	-0,049	-21,2%	-0,017	-7,4%	-0,005	-2,3%	-0,022	-10,8%	-0,017	-8,1%	-0,005	-2,2%	-0,003	-1,2%	0,007	2,8%	0,010	3,6%	0,010	3,5%	0,013	4,6%	0,022	7,5%	0,028	9,5%
P _{30%} /y	-0,024	-13,0%	-0,045	-15,5%	-0,009	-3,2%	-0,007	-2,6%	-0,005	-1,9%	-0,007	-2,7%	-0,005	-1,8%	-0,005	-1,7%	0,010	3,3%	0,008	2,6%	0,005	1,6%	0,013	4,5%	0,024	8,1%	0,030	10,0%
P _{95%} /y	-0,019	-9,8%	-0,047	-15,5%	-0,008	-2,8%	-0,007	-2,6%	-0,002	-0,7%	-0,005	-1,7%	-0,004	-1,6%	-0,005	-1,9%	0,010	3,3%	0,007	2,4%	0,004	1,4%	0,014	4,6%	0,025	8,1%	0,030	10,1%
P _{99%} /y	-0,009	-4,0%	-0,051	-16,0%	-0,007	-2,1%	-0,008	-2,7%	0,006	2,1%	0,001	0,3%	-0,004	-1,4%	-0,007	-2,3%	0,008	2,8%	0,005	1,7%	0,003	1,0%	0,014	4,7%	0,025	8,4%	0,031	10,2%
P _{99,9%} /y	0,005	1,8%	-0,058	-16,6%	-0,006	-1,7%	-0,005	-1,5%	0,020	6,0%	0,013	4,1%	-0,003	-1,0%	-0,009	-2,9%	0,007	2,0%	0,003	1,0%	0,002	0,8%	0,015	5,0%	0,027	8,9%	0,031	10,2%

X	-0,277	-0,157	0,000	0,105	0,206	0,307	0,408	0,506	0,707	0,911	1,122	1,323	1,520	1,721														
Ressalto Hidráulico Afogado - q = 0,065m³/s/m - Fr₁ = 4,75 - S = 1,62																												
P _{X%} /γ	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%
P _{0,1%} /γ	-0,109	-83,2%	-0,083	-34,3%	-0,042	-16,6%	-0,020	-8,2%	-0,032	-14,6%	-0,002	-1,0%	0,020	8,3%	0,017	6,8%	0,020	7,4%	0,024	8,4%	0,026	8,3%	0,024	7,5%	0,040	12,2%	0,050	15,0%
P _{1%} /γ	-0,103	-66,6%	-0,082	-30,7%	-0,035	-12,6%	-0,014	-5,3%	-0,022	-9,0%	-0,001	-0,3%	0,016	6,2%	0,013	5,1%	0,016	5,6%	0,021	7,0%	0,027	8,4%	0,025	7,8%	0,040	12,1%	0,050	15,0%
P _{5%} /γ	-0,101	-59,0%	-0,081	-28,5%	-0,030	-10,2%	-0,009	-3,4%	-0,016	-6,1%	0,000	0,1%	0,013	4,6%	0,010	3,8%	0,014	4,7%	0,020	6,3%	0,026	7,9%	0,027	8,1%	0,041	12,3%	0,050	15,0%
P _{10%} /γ	-0,100	-56,2%	-0,080	-27,5%	-0,028	-9,3%	-0,007	-2,6%	-0,013	-5,0%	0,000	0,0%	0,011	3,9%	0,008	3,0%	0,013	4,4%	0,019	6,0%	0,025	7,7%	0,027	8,1%	0,042	12,4%	0,051	15,1%
P _{90%} /γ	-0,083	-35,1%	-0,084	-24,7%	-0,018	-5,3%	0,002	0,5%	0,001	0,4%	-0,004	-1,3%	-0,004	-1,4%	-0,006	-2,0%	0,011	3,2%	0,017	5,0%	0,022	6,5%	0,028	8,4%	0,045	13,0%	0,054	15,5%
P _{95%} /γ	-0,079	-31,8%	-0,086	-24,9%	-0,017	-4,9%	0,003	1,0%	0,003	1,1%	-0,005	-1,5%	-0,007	-2,3%	-0,009	-2,9%	0,010	3,0%	0,016	4,8%	0,022	6,4%	0,029	8,5%	0,045	13,0%	0,054	15,5%
P _{99%} /γ	-0,070	-25,5%	-0,092	-25,4%	-0,015	-4,0%	0,007	2,0%	0,010	2,9%	-0,007	-2,0%	-0,012	-3,6%	-0,016	-4,7%	0,007	2,1%	0,015	4,2%	0,022	6,3%	0,030	8,7%	0,046	13,2%	0,054	15,6%
P _{99,9%} /γ	-0,064	-21,1%	-0,100	-25,9%	-0,012	-3,0%	0,013	3,6%	0,024	6,4%	-0,006	-1,8%	-0,023	-6,4%	-0,025	-6,9%	0,002	0,7%	0,013	3,7%	0,021	6,1%	0,031	9,1%	0,047	13,4%	0,055	15,7%
Ressalto Hidráulico Livre - q = 0,087m³/s/m - Fr₁ = 6,90 - S = 1,00																												
P _{X%} /γ	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%
P _{0,1%} /γ	-	-	-	-	0,008	10,5%	0,026	75,3%	-0,010	-47,1%	0,006	35,1%	0,009	88,9%	0,015	83,8%	0,000	0,3%	0,018	13,4%	0,007	4,0%	-0,005	-2,5%	-0,010	-4,8%	-0,009	-3,9%
P _{1%} /γ	-	-	-	-	0,006	7,6%	0,016	44,1%	-0,012	-817,9%	-0,005	-85,3%	0,005	19,9%	0,005	9,9%	0,002	2,1%	0,012	7,6%	0,006	3,4%	-0,005	-2,2%	-0,009	-3,9%	-0,007	-3,1%
P _{5%} /γ	-	-	-	-	0,005	6,2%	0,011	26,4%	-0,012	-60,8%	-0,010	-40,6%	0,001	1,6%	-0,002	-3,2%	0,001	1,0%	0,009	5,4%	0,005	2,3%	-0,004	-2,1%	-0,007	-3,3%	-0,006	-2,6%
P _{10%} /γ	-	-	-	-	0,004	5,6%	0,008	19,4%	-0,012	-42,6%	-0,012	-33,7%	-0,001	-1,9%	-0,005	-6,1%	0,001	1,0%	0,008	4,6%	0,004	1,9%	-0,005	-2,3%	-0,007	-3,1%	-0,006	-2,4%
P _{90%} /γ	-	-	-	-	0,004	4,3%	0,002	3,2%	-0,006	-6,9%	-0,003	-2,1%	0,003	1,8%	-0,012	-7,5%	0,005	2,6%	0,002	0,8%	-0,001	-0,7%	-0,007	-3,0%	-0,005	-2,3%	-0,003	-1,3%
P _{95%} /γ	-	-	-	-	0,004	4,4%	0,003	4,5%	-0,001	-0,8%	0,004	2,4%	0,006	3,5%	-0,011	-6,4%	0,006	2,7%	0,001	0,5%	-0,002	-1,0%	-0,007	-3,1%	-0,006	-2,3%	-0,003	-1,2%
P _{99%} /γ	-	-	-	-	0,004	4,5%	0,009	10,4%	0,019	12,6%	0,020	10,2%	0,015	6,6%	-0,009	-4,1%	0,006	2,6%	-0,001	-0,3%	-0,004	-1,7%	-0,008	-3,2%	-0,005	-2,2%	-0,002	-0,9%
P _{99,9%} /γ	-	-	-	-	0,007	7,3%	0,024	20,5%	0,054	24,9%	0,040	14,8%	0,024	8,5%	-0,012	-4,5%	0,003	1,2%	-0,003	-1,1%	-0,006	-2,4%	-0,008	-3,2%	-0,005	-2,1%	-0,002	-0,8%
Ressalto Hidráulico Afogado - q = 0,087m³/s/m - Fr₁ = 5,71 - S = 1,12																												
P _{X%} /γ	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%
P _{0,1%} /γ	-	-	0,037	30,1%	-0,008	-16,2%	0,047	101,5%	0,050	133,5%	0,061	93,0%	0,028	30,3%	0,001	0,6%	-0,026	-15,4%	-0,012	-5,9%	-0,011	-4,6%	-0,012	-5,2%	-0,010	-4,2%	-0,012	-4,8%
P _{1%} /γ	-	-	0,031	22,1%	-0,007	-8,5%	0,035	45,8%	0,033	45,8%	0,047	46,0%	0,029	22,6%	0,008	5,2%	-0,011	-5,5%	-0,003	-1,4%	-0,010	-4,2%	-0,013	-5,5%	-0,012	-4,7%	-0,012	-4,8%
P _{5%} /γ	-	-	0,028	18,1%	-0,005	-4,3%	0,027	28,1%	0,023	23,3%	0,034	27,2%	0,027	17,6%	0,011	6,3%	-0,001	-0,5%	0,001	0,6%	-0,008	-3,3%	-0,013	-5,3%	-0,012	-4,9%	-0,012	-4,8%
P _{10%} /γ	-	-	0,027	16,7%	-0,002	-1,5%	0,024	22,1%	0,017	15,7%	0,028	20,4%	0,025	15,3%	0,012	6,4%	0,003	1,4%	0,003	1,3%	-0,007	-2,9%	-0,013	-5,1%	-0,013	-5,0%	-0,012	-4,8%
P _{90%} /γ	-	-	0,025	11,8%	0,033	14,8%	0,006	3,4%	-0,009	-4,3%	-0,011	-5,0%	0,007	3,1%	0,016	6,9%	0,025	10,1%	0,011	4,3%	-0,005	-2,1%	-0,013	-5,2%	-0,014	-5,5%	-0,011	-4,3%
P _{95%} /γ	-	-	0,026	11,8%	0,041	16,7%	0,004	2,2%	-0,012	-5,7%	-0,017	-7,5%	0,004	1,6%	0,016	6,8%	0,028	11,2%	0,012	4,6%	-0,005	-2,1%	-0,014	-5,2%	-0,014	-5,5%	-0,011	-4,3%
P _{99%} /γ	-	-	0,031	12,2%	0,056	19,2%	0,004	1,6%	-0,019	-7,5%	-0,032	-12,5%	-0,004	-1,3%	0,017	6,7%	0,035	13,1%	0,014	5,2%	-0,005	-1,9%	-0,014	-5,3%	-0,015	-5,7%	-0,011	-4,2%
P _{99,9%} /γ	-	-	0,039	13,4%	0,077	21,8%	0,011	3,7%	-0,036	-11,6%	-0,060	-20,1%	-0,018	-6,2%	0,018	6,2%	0,043	15,4%	0,017	6,4%	-0,004	-1,7%	-0,014	-5,3%	-0,016	-5,8%	-0,011	-4,0%
Ressalto Hidráulico Afogado - q = 0,087m³/s/m - Fr₁ = 5,09 - S = 1,20																												
P _{X%} /γ	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%
P _{0,1%} /γ	0,034	46,4%	0,031	20,0%	-0,010	-10,7%	0,020	28,8%	0,016	25,7%	0,009	10,0%	-0,015	-13,0%	-0,019	-12,7%	-0,024	-13,3%	-0,003	-1,2%	0,000	-0,2%	-0,003	-1,0%	-0,002	-0,7%	-0,002	-0,8%
P _{1%} /γ	0,031	37,8%	0,025	14,1%	-0,009	-7,5%	0,015	14,9%	0,009	8,8%	0,011	9,0%	-0,001	-1,0%	-0,006	-3,4%	-0,007	-3,6%	0,003	1,1%	-0,001	-0,6%	-0,004	-1,6%	-0,003	-1,2%	-0,003	-1,1%
P _{5%} /γ	0,030	33,6%	0,022	11,4%	-0,005	-3,3%	0,012	9,5%	0,004	3,1%	0,009	6,3%	0,004	2,1%	0,001	0,3%	0,000	-0,1%	0,005	2,0%	-0,001	-0,4%	-0,005	-2,0%	-0,004	-1,6%	-0,003	-1,1%
P _{10%} /γ	0,030	32,2%	0,021	10,2%	-0,002	-1,4%	0,011	7,8%	0,002	1,3%	0,008	5,0%	0,006	3,1%	0,003	1,3%	0,003	1,2%	0,006	2,3%	-0,001	-0,3%	-0,006	-2,1%	-0,005	-1,7%	-0,003	-1,1%
P _{90%} /γ	0,034	27,1%	0,014	5,3%	0,021	8,0%	0,006	2,7%	-0,009	-3,8%	0,000	-0,2%	0,013	5,2%	0,014	5,7%	0,017	6,4%	0,008	2,8%	-0,002	-0,8%	-0,009	-3,1%	-0,006	-2,1%	-0,002	-0,7%
P _{95%} /γ	0,035	26,5%	0,013	4,8%	0,025	9,1%	0,006	2,7%	-0,009	-3,9%	-0,002	-0,7%	0,014	5,5%	0,015	6,0%	0,019	6,9%	0,008	2,8%	-0,002	-0,9%	-0,009	-3,3%	-0,006	-2,2%	-0,002	-0,6%
P _{99%} /γ	0,037	25,8%	0,013	4,4%	0,033	10,7%	0,008	3,1%	-0,008	-2,9%	-0,003	-1,1%	0,017	6,1%	0,018	6,7%	0,022	7,6%	0,007	2,3%	-0,004	-1,4%	-0,011	-3,7%	-0,007	-2,3%	-0,001	-0,5%
P _{99,9%} /γ	0,045	26,6%	0,015	4,4%	0,039	10,8%	0,016	4,7%	-0,016	-4,8%	-0,009	-2,6%	0,021	6,3%	0,022	7,2%	0,026	8,4%	0,006	2,1%	-0,005	-1,9%	-0,012	-4,3%	-0,007	-2,5%	-0,002	-0,5%

X	-0,277	-0,157	0,000	0,105	0,206	0,307	0,408	0,506	0,707	0,911	1,122	1,323	1,520	1,721														
Ressalto Hidráulico Afogado - q = 0,087m³/s/m - Fr₁ = 4,87 - S = 1,34																												
P _{X%} /γ	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%		
P _{0,1%} /γ	0,013	11,9%	-0,019	-10,4%	-0,004	-2,4%	0,015	10,3%	-0,008	-6,5%	-0,023	-16,2%	-0,026	-16,2%	-0,014	-7,7%	-0,008	-4,0%	0,009	3,4%	0,012	4,5%	0,012	4,1%	0,016	5,2%	0,016	5,1%
P _{1%} /γ	0,008	6,4%	-0,014	-6,2%	-0,001	-0,6%	0,012	6,9%	-0,012	-7,5%	-0,016	-9,2%	-0,015	-9,2%	-0,007	-3,3%	0,002	0,9%	0,012	4,4%	0,012	4,0%	0,007	2,5%	0,014	4,4%	0,015	4,8%
P _{5%} /γ	0,006	4,3%	-0,010	-3,9%	0,002	0,9%	0,010	5,4%	-0,011	-6,3%	-0,011	-5,9%	-0,009	-4,4%	-0,002	-1,0%	0,006	2,5%	0,013	4,4%	0,011	3,7%	0,005	1,7%	0,012	3,9%	0,015	4,9%
P _{10%} /γ	0,005	3,7%	-0,009	-3,4%	0,004	1,5%	0,010	4,9%	-0,011	-5,5%	-0,009	-4,6%	-0,007	-3,2%	-0,001	-0,3%	0,008	3,1%	0,013	4,4%	0,011	3,6%	0,004	1,4%	0,012	3,8%	0,016	5,0%
P _{90%} /γ	0,009	4,9%	-0,014	-4,3%	0,014	4,6%	0,005	2,0%	-0,006	-2,2%	0,003	1,1%	0,007	2,6%	0,007	2,5%	0,017	5,6%	0,012	3,7%	0,007	2,2%	-0,001	-0,2%	0,012	3,6%	0,018	5,5%
P _{95%} /γ	0,012	5,8%	-0,016	-5,0%	0,015	4,7%	0,004	1,4%	-0,005	-1,8%	0,006	2,0%	0,010	3,5%	0,008	2,8%	0,018	5,7%	0,011	3,5%	0,006	1,9%	-0,001	-0,4%	0,012	3,6%	0,018	5,6%
P _{99%} /γ	0,020	8,6%	-0,022	-6,4%	0,018	5,1%	0,003	0,8%	-0,002	-0,7%	0,011	3,6%	0,016	5,1%	0,010	3,1%	0,017	5,3%	0,008	2,6%	0,005	1,5%	-0,003	-1,0%	0,011	3,5%	0,019	5,7%
P _{99,9%} /γ	0,032	11,9%	-0,028	-7,5%	0,023	5,7%	0,008	2,3%	-0,001	-0,3%	0,022	6,1%	0,030	8,3%	0,009	2,6%	0,016	4,6%	0,005	1,4%	0,004	1,3%	-0,004	-1,4%	0,012	3,6%	0,019	5,7%
Ressalto Hidráulico Afogado - q = 0,087m³/s/m - Fr₁ = 4,33 - S = 1,46																												
P _{X%} /γ	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%
P _{0,1%} /γ	-0,024	-16,8%	-0,041	-17,7%	-0,005	-2,0%	0,012	5,7%	-0,020	-10,7%	-0,021	-10,9%	-0,013	-6,6%	0,003	1,3%	0,012	4,9%	0,017	6,2%	0,023	7,4%	0,025	7,7%	0,025	7,5%	0,028	8,4%
P _{1%} /γ	-0,023	-13,7%	-0,037	-14,1%	-0,002	-0,6%	0,014	6,0%	-0,011	-5,2%	-0,010	-4,6%	0,000	-0,1%	0,008	3,0%	0,013	4,7%	0,019	6,2%	0,021	6,5%	0,022	6,6%	0,024	7,1%	0,028	8,2%
P _{5%} /γ	-0,023	-12,6%	-0,033	-11,4%	0,001	0,4%	0,015	5,8%	-0,006	-2,6%	-0,005	-1,9%	0,003	1,3%	0,008	3,2%	0,014	4,9%	0,017	5,5%	0,020	6,0%	0,020	5,9%	0,023	6,8%	0,028	8,3%
P _{10%} /γ	-0,045	-26,9%	-0,066	-25,2%	-0,027	-10,4%	-0,012	-5,0%	-0,035	-16,3%	-0,032	-14,3%	-0,023	-9,5%	-0,015	-5,8%	-0,007	-2,5%	0,003	0,9%	0,009	2,7%	0,012	3,7%	0,018	5,5%	0,025	7,3%
P _{90%} /γ	-0,019	-7,9%	-0,037	-10,5%	0,009	2,5%	0,013	4,3%	0,009	3,0%	0,011	3,5%	0,009	2,9%	0,004	1,3%	0,016	4,8%	0,012	3,6%	0,014	4,1%	0,014	4,0%	0,024	6,7%	0,032	9,0%
P _{95%} /γ	-0,017	-6,6%	-0,040	-11,1%	0,009	2,5%	0,012	3,8%	0,012	3,7%	0,014	4,2%	0,010	3,1%	0,003	1,0%	0,016	4,5%	0,011	3,2%	0,013	3,8%	0,013	3,8%	0,024	6,7%	0,032	9,1%
P _{99%} /γ	-0,009	-3,1%	-0,048	-12,7%	0,009	2,3%	0,010	3,0%	0,019	5,4%	0,020	5,6%	0,013	3,6%	0,000	-0,1%	0,013	3,5%	0,008	2,2%	0,012	3,4%	0,012	3,5%	0,024	6,7%	0,033	9,3%
P _{99,9%} /γ	-0,001	-0,2%	-0,060	-14,5%	0,009	2,2%	0,007	1,7%	0,033	8,4%	0,031	7,9%	0,013	3,5%	-0,008	-2,1%	0,008	2,2%	0,003	0,9%	0,010	2,9%	0,011	3,1%	0,025	7,0%	0,034	9,6%
Ressalto Hidráulico Livre - q = 0,130m³/s/m - Fr₁ = 5,74 - S = 1,00																												
P _{X%} /γ	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%
P _{0,1%} /γ	-	-	-	-	0,014	12,4%	0,036	61,0%	0,019	76,3%	0,029	153,5%	0,048	147,1%	0,036	113,7%	0,016	22,6%	0,031	22,5%	0,017	9,2%	0,004	1,7%	-0,008	-3,3%	-0,009	-3,7%
P _{1%} /γ	-	-	-	-	0,012	10,1%	0,026	43,1%	0,008	20,5%	0,016	38,9%	0,034	54,9%	0,023	35,6%	0,014	13,4%	0,022	13,1%	0,016	7,5%	0,002	1,0%	-0,005	-2,0%	-0,008	-3,1%
P _{5%} /γ	-	-	-	-	0,011	8,9%	0,021	32,8%	-0,001	-2,8%	0,010	17,0%	0,024	29,4%	0,013	15,3%	0,011	8,7%	0,018	9,4%	0,014	6,3%	0,001	0,5%	-0,003	-1,2%	-0,007	-2,5%
P _{10%} /γ	-	-	-	-	0,010	8,4%	0,019	28,8%	-0,005	-10,0%	0,007	10,4%	0,020	21,6%	0,009	9,0%	0,010	7,0%	0,016	8,1%	0,013	5,7%	0,001	0,3%	-0,003	-1,0%	-0,006	-2,2%
P _{90%} /γ	-	-	-	-	0,011	8,2%	0,014	16,3%	-0,011	-11,9%	0,011	7,4%	0,005	2,8%	0,000	0,1%	-0,001	-0,3%	0,005	2,0%	0,006	2,4%	-0,001	-0,4%	-0,001	-0,4%	-0,003	-0,9%
P _{95%} /γ	-	-	-	-	0,012	8,8%	0,014	15,4%	-0,008	-7,1%	0,018	10,2%	0,007	3,6%	0,003	1,2%	-0,001	-0,5%	0,003	1,3%	0,005	2,0%	-0,002	-0,5%	-0,001	-0,4%	-0,002	-0,8%
P _{99%} /γ	-	-	-	-	0,015	10,5%	0,015	15,0%	0,005	3,6%	0,037	16,5%	0,016	6,7%	0,010	3,7%	-0,002	-0,9%	0,000	0,0%	0,002	0,8%	-0,003	-1,0%	-0,001	-0,2%	-0,001	-0,5%
P _{99,9%} /γ	-	-	-	-	0,020	13,0%	0,024	18,6%	0,034	16,7%	0,073	23,5%	0,036	11,2%	0,011	3,3%	-0,007	-2,1%	-0,001	-0,3%	0,000	-0,1%	-0,002	-0,6%	0,001	0,2%	0,000	0,1%
Ressalto Hidráulico Afogado - q = 0,130m³/s/m - Fr₁ = 4,91 - S = 1,10																												
P _{X%} /γ	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%
P _{0,1%} /γ	0,014	16,7%	0,047	24,0%	0,018	15,2%	0,035	59,5%	0,029	74,6%	0,044	81,7%	0,039	47,6%	0,025	19,3%	-0,048	-28,3%	-0,039	-17,9%	-0,021	-8,0%	-0,027	-10,2%	-0,029	-10,4%	-0,015	-5,0%
P _{1%} /γ	0,015	17,0%	0,035	16,5%	0,008	5,6%	0,026	27,5%	0,018	21,5%	0,031	30,8%	0,033	25,4%	0,021	12,8%	-0,024	-11,9%	-0,019	-7,8%	-0,013	-4,6%	-0,020	-7,0%	-0,020	-7,0%	-0,016	-5,3%
P _{5%} /γ	0,018	18,8%	0,027	12,0%	0,006	3,6%	0,019	16,2%	0,009	7,6%	0,019	14,2%	0,025	15,6%	0,019	10,0%	-0,011	-5,1%	-0,009	-3,4%	-0,007	-2,6%	-0,016	-5,4%	-0,018	-6,0%	-0,017	-5,6%
P _{10%} /γ	0,020	20,3%	0,024	10,3%	0,006	3,1%	0,017	13,1%	0,004	3,5%	0,013	8,8%	0,021	11,9%	0,016	8,2%	-0,006	-2,8%	-0,005	-1,8%	-0,005	-1,7%	-0,014	-4,9%	-0,017	-5,7%	-0,018	-5,7%
P _{90%} /γ	0,039	31,5%	0,004	1,5%	0,015	5,6%	0,008	3,6%	-0,016	-7,2%	-0,020	-7,9%	-0,012	-4,6%	-0,006	-2,1%	0,022	7,8%	0,017	5,6%	0,005	1,7%	-0,008	-2,7%	-0,014	-4,5%	-0,020	-6,5%
P _{95%} /γ	0,042	32,6%	0,001	0,5%	0,019	6,5%	0,008	3,5%	-0,018	-7,3%	-0,024	-9,0%	-0,018	-6,5%	-0,009	-3,3%	0,027	9,0%	0,020	6,6%	0,007	2,1%	-0,008	-2,5%	-0,014	-4,4%	-0,021	-6,6%
P _{99%} /γ	0,046	34,2%	-0,005	-1,6%	0,027	8,4%	0,011	3,9%	-0,023	-7,9%	-0,034	-11,0%	-0,030	-9,5%	-0,018	-5,8%	0,035	11,2%	0,026	8,4%	0,009	2,8%	-0,007	-2,2%	-0,013	-4,2%	-0,022	-6,7%
P _{99,9%} /γ	0,053	36,1%	-0,014	-4,1%	0,037	9,6%	0,024	6,8%	-0,024	-6,6%	-0,058	-15,4%	-0,050	-13,3%	-0,030	-8,7%	0,049	14,1%	0,036	10,8%	0,014	4,3%	-0,004	-1,4%	-0,012	-3,6%	-0,023	-7,1%

X	-0,277	-0,157	0,000	0,105	0,206	0,307	0,408	0,506	0,707	0,911	1,122	1,323	1,520	1,721														
Ressalto Hidráulico Afogado - q = 0,130m³/s/m - Fr₁ = 4,42 - S = 1,18																												
P _{X%/y}	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%		
P _{0,1%/y}	0,050	40,7%	0,040	17,1%	0,008	4,7%	0,018	18,6%	0,002	3,2%	0,008	8,7%	-0,006	-5,0%	-0,031	-22,4%	-0,053	-28,5%	-0,026	-10,7%	-0,012	-4,5%	-0,012	-4,1%	-0,010	-3,2%	-0,005	-1,4%
P _{1%/y}	0,045	33,2%	0,032	12,4%	0,005	2,6%	0,015	11,0%	0,000	-0,3%	0,005	3,4%	0,004	2,3%	-0,014	-7,5%	-0,024	-10,5%	-0,010	-3,7%	-0,006	-2,0%	-0,010	-3,1%	-0,009	-2,9%	-0,006	-2,0%
P _{5%/y}	0,041	28,6%	0,026	9,4%	0,006	2,8%	0,012	7,2%	-0,004	-2,4%	0,001	0,9%	0,005	2,6%	-0,007	-3,2%	-0,010	-4,1%	-0,001	-0,5%	-0,001	-0,4%	-0,006	-2,0%	-0,009	-2,7%	-0,008	-2,3%
P _{10%/y}	0,039	26,6%	0,023	8,1%	0,006	2,7%	0,010	6,0%	-0,005	-3,0%	0,000	-0,2%	0,005	2,4%	-0,005	-2,3%	-0,005	-1,9%	0,002	0,6%	0,000	0,1%	-0,006	-1,7%	-0,009	-2,7%	-0,008	-2,5%
P _{90%/y}	0,030	16,7%	0,001	0,2%	0,012	3,8%	0,003	1,3%	-0,012	-4,4%	-0,015	-5,2%	-0,002	-0,6%	0,001	0,2%	0,022	6,8%	0,016	4,8%	0,005	1,5%	-0,003	-0,9%	-0,009	-2,7%	-0,011	-3,1%
P _{95%/y}	0,028	15,3%	-0,004	-1,0%	0,013	4,0%	0,002	0,8%	-0,012	-4,1%	-0,017	-5,6%	-0,003	-1,0%	0,001	0,2%	0,025	7,7%	0,017	5,2%	0,005	1,5%	-0,003	-0,9%	-0,010	-2,8%	-0,011	-3,2%
P _{99%/y}	0,024	12,4%	-0,012	-3,5%	0,015	4,1%	0,004	1,1%	-0,012	-3,7%	-0,023	-6,6%	-0,006	-1,6%	0,002	0,6%	0,031	9,1%	0,019	5,5%	0,005	1,4%	-0,003	-1,0%	-0,010	-2,9%	-0,011	-3,3%
P _{99,9%/y}	0,019	9,0%	-0,023	-6,0%	0,018	4,3%	0,022	5,7%	-0,011	-2,7%	-0,033	-8,2%	-0,011	-2,9%	0,000	0,0%	0,040	10,6%	0,021	6,0%	0,005	1,3%	-0,003	-0,8%	-0,010	-3,0%	-0,013	-3,6%
Ressalto Hidráulico Afogado - q = 0,130m³/s/m - Fr₁ = 3,91 - S = 1,32																												
P _{X%/y}	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%		
P _{0,1%/y}	0,043	22,1%	-0,020	-7,3%	-0,012	-5,2%	0,010	5,8%	-0,019	-13,2%	-0,021	-13,1%	-0,034	-19,5%	-0,035	-17,5%	-0,034	-14,6%	-0,010	-3,5%	0,004	1,3%	0,006	1,9%	0,012	3,3%	0,014	3,9%
P _{1%/y}	0,031	15,0%	-0,016	-5,3%	-0,008	-3,0%	0,010	4,5%	-0,019	-10,3%	-0,018	-8,8%	-0,019	-8,3%	-0,021	-8,9%	-0,018	-6,8%	0,000	0,0%	0,010	3,0%	0,006	1,8%	0,010	2,8%	0,010	2,6%
P _{5%/y}	0,023	10,7%	-0,014	-4,4%	-0,003	-1,2%	0,012	5,0%	-0,016	-7,3%	-0,015	-6,5%	-0,012	-4,8%	-0,013	-5,1%	-0,009	-3,0%	0,004	1,2%	0,010	3,0%	0,007	2,0%	0,008	2,1%	0,008	2,1%
P _{10%/y}	0,019	8,8%	-0,015	-4,4%	-0,001	-0,3%	0,013	5,1%	-0,014	-6,2%	-0,013	-5,5%	-0,010	-3,6%	-0,010	-3,8%	-0,006	-1,8%	0,005	1,6%	0,010	2,9%	0,007	1,9%	0,007	2,0%	0,007	1,9%
P _{90%/y}	0,003	1,4%	-0,033	-8,4%	0,008	2,2%	0,009	2,9%	-0,010	-3,1%	-0,007	-2,0%	0,003	0,8%	-0,002	-0,6%	0,008	2,1%	0,009	2,6%	0,008	2,2%	0,005	1,2%	0,005	1,2%	0,005	1,4%
P _{95%/y}	0,002	0,9%	-0,038	-9,4%	0,009	2,3%	0,008	2,4%	-0,010	-2,9%	-0,006	-1,8%	0,005	1,3%	0,000	0,0%	0,008	2,3%	0,009	2,4%	0,008	2,0%	0,004	1,1%	0,004	1,1%	0,005	1,3%
P _{99%/y}	0,000	0,1%	-0,049	-11,8%	0,009	2,2%	0,005	1,4%	-0,009	-2,3%	-0,003	-0,7%	0,009	2,2%	0,003	0,8%	0,010	2,6%	0,007	1,8%	0,006	1,4%	0,003	0,8%	0,003	0,9%	0,005	1,3%
P _{99,9%/y}	-0,004	-1,3%	-0,068	-15,3%	0,012	2,5%	0,007	1,5%	-0,001	-0,2%	-0,003	-0,6%	0,012	2,7%	0,004	1,0%	0,014	3,4%	0,002	0,5%	0,004	0,9%	0,002	0,6%	0,004	1,0%	0,005	1,3%
Ressalto Hidráulico Afogado - q = 0,130m³/s/m - Fr₁ = 3,52 - S = 1,42																												
P _{X%/y}	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%		
P _{0,1%/y}	0,006	2,7%	-0,066	-22,6%	-0,015	-5,0%	0,021	8,1%	-0,010	-4,3%	-0,008	-3,3%	-0,014	-5,6%	-0,003	-0,9%	0,009	3,0%	0,022	6,7%	0,024	6,6%	0,026	6,8%	0,031	8,0%	0,031	7,8%
P _{1%/y}	0,002	0,7%	-0,055	-16,3%	-0,012	-3,7%	0,019	6,6%	-0,004	-1,4%	-0,005	-1,8%	0,000	0,0%	0,004	1,4%	0,012	3,8%	0,021	6,0%	0,021	5,7%	0,024	6,1%	0,030	7,5%	0,029	7,1%
P _{5%/y}	-0,002	-0,8%	-0,047	-12,9%	-0,008	-2,4%	0,020	6,4%	0,000	0,0%	0,000	0,0%	0,005	1,7%	0,005	1,6%	0,015	4,5%	0,021	5,8%	0,021	5,5%	0,022	5,6%	0,028	6,8%	0,028	6,7%
P _{10%/y}	-0,004	-1,6%	-0,045	-11,8%	-0,006	-1,7%	0,021	6,6%	0,002	0,8%	0,002	0,8%	0,007	2,2%	0,006	1,7%	0,016	4,6%	0,021	5,6%	0,021	5,3%	0,022	5,5%	0,027	6,6%	0,027	6,6%
P _{90%/y}	-0,017	-5,5%	-0,053	-12,1%	0,007	1,6%	0,027	6,9%	0,015	3,9%	0,017	4,3%	0,018	4,6%	0,009	2,4%	0,016	4,1%	0,018	4,4%	0,016	4,0%	0,018	4,4%	0,022	5,2%	0,026	6,0%
P _{95%/y}	-0,017	-5,2%	-0,057	-12,8%	0,008	1,7%	0,028	6,8%	0,016	4,0%	0,018	4,4%	0,019	4,8%	0,009	2,2%	0,015	3,7%	0,016	4,0%	0,015	3,7%	0,018	4,2%	0,022	5,1%	0,025	5,9%
P _{99%/y}	-0,015	-4,2%	-0,068	-14,5%	0,007	1,5%	0,027	6,2%	0,019	4,3%	0,021	4,8%	0,022	5,1%	0,005	1,3%	0,012	2,9%	0,012	2,7%	0,012	2,9%	0,016	3,6%	0,020	4,6%	0,025	5,8%
P _{99,9%/y}	-0,019	-5,1%	-0,084	-17,1%	0,011	2,0%	0,027	5,6%	0,019	3,9%	0,027	5,7%	0,022	4,6%	0,000	-0,1%	0,008	1,7%	0,006	1,3%	0,006	1,4%	0,012	2,8%	0,018	4,1%	0,025	5,7%
Ressalto Hidráulico Livre - q = 0,174m³/s/m - Fr₁ = 4,97 - S = 1,00																												
P _{X%/y}	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%	ΔP/y	ΔP%		
P _{0,1%/y}	-	-	-	-	0,008	5,1%	0,014	26,8%	0,020	46,6%	0,032	81,6%	0,046	103,7%	0,051	95,7%	0,006	10,6%	-0,010	-11,1%	-0,004	-2,9%	-0,011	-5,7%	0,001	0,3%	-0,021	-8,0%
P _{1%/y}	-	-	-	-	0,006	3,7%	0,008	14,5%	0,005	10,1%	0,016	27,7%	0,030	42,2%	0,030	37,4%	0,004	4,2%	-0,010	-7,2%	-0,006	-3,2%	-0,007	-2,8%	-0,002	-0,7%	-0,014	-5,1%
P _{5%/y}	-	-	-	-	0,005	3,3%	0,003	5,4%	-0,003	-5,9%	0,005	6,7%	0,017	19,4%	0,017	16,5%	0,001	0,5%	-0,009	-5,2%	-0,006	-2,7%	-0,006	-2,5%	-0,004	-1,4%	-0,011	-3,6%
P _{10%/y}	-	-	-	-	0,005	3,0%	0,001	2,3%	-0,007	-11,5%	-0,001	-1,0%	0,011	11,1%	0,010	8,9%	-0,001	-1,0%	-0,009	-4,9%	-0,005	-2,4%	-0,007	-2,5%	-0,005	-1,7%	-0,009	-3,1%
P _{90%/y}	-	-	-	-	0,009	5,3%	0,005	5,1%	-0,022	-22,7%	-0,019	-14,0%	-0,012	-6,8%	-0,027	-14,8%	-0,013	-5,5%	-0,008	-3,0%	-0,004	-1,5%	-0,006	-1,9%	-0,008	-2,5%	-0,002	-0,5%
P _{95%/y}	-	-	-	-	0,010	6,1%	0,007	7,1%	-0,022	-20,8%	-0,017	-11,6%	-0,011	-5,9%	-0,030	-15,3%	-0,012	-4,9%	-0,007	-2,7%	-0,003	-1,2%	-0,005	-1,6%	-0,008	-2,5%	0,000	-0,1%
P _{99%/y}	-	-	-	-	0,015	8,4%	0,015	13,2%	-0,018	-13,5%	-0,009	-5,0%	-0,006	-2,4%	-0,030	-12,3%	-0,006	-2,1%	-0,005	-1,6%	-0,001	-0,2%	-0,004	-1,3%	-0,009	-2,9%	0,003	1,0%
P _{99,9%/y}	-	-	-	-	0,023	12,0%	0,030	20,6%	0,000	0,2%	0,016	6,0%	0,007	2,3%	-0,025	-8,1%	0,003	0,9%	-0,002	-0,6%	0,001	0,3%	-0,003	-0,8%	-0,009	-2,6%	0,012	3,3%

X	-0,277	-0,157	0,000	0,105	0,206	0,307	0,408	0,506	0,707	0,911	1,122	1,323	1,520	1,721														
Ressalto Hidráulico Afogado - q = 0,174m³/s/m - Fr₁ = 4,34 - S = 1,09																												
P _{X%} /γ	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%		
P _{0,1%} /γ	0,028	23,2%	0,050	19,2%	0,025	15,0%	0,027	38,0%	0,031	50,7%	0,049	67,7%	0,054	58,0%	0,034	28,4%	-0,041	-23,7%	-0,068	-32,3%	-0,047	-17,8%	-0,042	-14,5%	-0,029	-9,2%	-0,033	-10,2%
P _{1%} /γ	0,026	21,0%	0,034	12,5%	0,017	8,7%	0,016	15,6%	0,017	16,3%	0,034	28,0%	0,042	29,1%	0,024	14,8%	-0,018	-8,3%	-0,038	-14,9%	-0,028	-9,7%	-0,028	-9,0%	-0,021	-6,4%	-0,026	-7,7%
P _{5%} /γ	0,029	21,5%	0,024	8,4%	0,012	5,7%	0,012	8,9%	0,006	4,7%	0,021	13,4%	0,030	16,8%	0,017	8,9%	-0,008	-3,4%	-0,022	-8,2%	-0,017	-5,7%	-0,020	-6,3%	-0,018	-5,2%	-0,022	-6,5%
P _{10%} /γ	0,030	22,0%	0,019	6,7%	0,011	4,7%	0,011	7,3%	0,002	1,3%	0,014	8,2%	0,023	12,2%	0,013	6,3%	-0,005	-2,0%	-0,016	-5,6%	-0,013	-4,2%	-0,017	-5,3%	-0,017	-4,9%	-0,021	-6,0%
P _{30%} /γ	0,044	26,2%	-0,009	-2,9%	0,004	1,2%	0,015	6,0%	-0,023	-9,4%	-0,031	-11,4%	-0,024	-8,4%	-0,016	-5,5%	0,009	2,9%	0,018	5,5%	0,012	3,5%	-0,001	-0,4%	-0,013	-3,7%	-0,014	-3,9%
P _{95%} /γ	0,046	26,6%	-0,014	-4,3%	0,003	1,0%	0,017	6,4%	-0,027	-10,2%	-0,038	-13,4%	-0,032	-10,3%	-0,021	-6,6%	0,011	3,4%	0,023	6,9%	0,016	4,5%	0,001	0,2%	-0,013	-3,5%	-0,013	-3,6%
P _{99%} /γ	0,050	27,1%	-0,026	-7,3%	0,002	0,6%	0,023	7,1%	-0,031	-9,9%	-0,053	-15,8%	-0,049	-14,0%	-0,035	-9,8%	0,015	4,3%	0,034	9,5%	0,023	6,3%	0,005	1,3%	-0,012	-3,4%	-0,011	-3,1%
P _{99,9%} /γ	0,057	28,3%	-0,044	-11,7%	-0,001	-0,2%	0,034	8,7%	-0,041	-10,7%	-0,072	-17,9%	-0,078	-18,9%	-0,059	-14,7%	0,026	6,8%	0,050	13,2%	0,036	9,4%	0,011	3,1%	-0,012	-3,4%	-0,008	-2,1%
Ressalto Hidráulico Afogado - q = 0,174m³/s/m - Fr₁ = 3,95 - S = 1,18																												
P _{X%} /γ	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%
P _{0,1%} /γ	0,064	36,5%	0,035	11,5%	0,015	6,4%	0,021	15,7%	0,020	16,4%	0,019	16,0%	-0,001	-1,0%	-0,022	-14,3%	-0,054	-26,4%	-0,055	-22,4%	-0,036	-12,4%	-0,023	-7,3%	-0,007	-2,0%	-0,018	-5,1%
P _{1%} /γ	0,055	29,7%	0,020	6,1%	0,008	3,0%	0,012	7,4%	0,007	4,1%	0,005	2,8%	0,001	0,4%	-0,013	-6,3%	-0,031	-12,3%	-0,028	-9,7%	-0,019	-5,9%	-0,016	-4,8%	-0,007	-2,0%	-0,014	-4,0%
P _{5%} /γ	0,050	25,7%	0,010	3,1%	0,006	2,1%	0,010	5,0%	0,000	0,0%	-0,002	-0,8%	0,000	0,2%	-0,010	-4,5%	-0,020	-7,5%	-0,015	-4,9%	-0,011	-3,2%	-0,011	-3,0%	-0,007	-1,9%	-0,013	-3,6%
P _{10%} /γ	0,048	23,9%	0,006	1,7%	0,005	1,7%	0,009	4,4%	-0,003	-1,7%	-0,004	-2,0%	-0,001	-0,4%	-0,010	-4,2%	-0,016	-5,8%	-0,010	-3,2%	-0,007	-2,1%	-0,009	-2,5%	-0,007	-1,9%	-0,013	-3,5%
P _{30%} /γ	0,038	15,9%	-0,026	-6,6%	-0,006	-1,7%	0,007	2,2%	-0,028	-9,4%	-0,029	-9,3%	-0,016	-4,8%	-0,013	-4,0%	0,005	1,3%	0,015	4,1%	0,010	2,5%	0,000	0,0%	-0,008	-2,1%	-0,011	-2,7%
P _{95%} /γ	0,036	14,9%	-0,032	-8,1%	-0,008	-2,2%	0,006	1,9%	-0,034	-10,9%	-0,034	-10,2%	-0,019	-5,5%	-0,015	-4,3%	0,007	2,0%	0,018	4,7%	0,011	3,0%	0,001	0,3%	-0,008	-2,2%	-0,010	-2,6%
P _{99%} /γ	0,035	13,2%	-0,046	-11,2%	-0,014	-3,6%	0,006	1,7%	-0,045	-13,1%	-0,044	-11,7%	-0,025	-6,5%	-0,019	-4,9%	0,012	3,2%	0,023	6,0%	0,016	4,0%	0,002	0,6%	-0,010	-2,5%	-0,009	-2,3%
P _{99,9%} /γ	0,033	11,4%	-0,072	-16,8%	-0,026	-6,1%	0,011	2,6%	-0,058	-14,3%	-0,057	-13,2%	-0,037	-8,3%	-0,029	-6,9%	0,018	4,5%	0,032	7,8%	0,024	5,7%	0,006	1,4%	-0,012	-2,9%	-0,008	-1,9%
Ressalto Hidráulico Afogado - q = 0,174m³/s/m - Fr₁ = 3,41 - S = 1,31																												
P _{X%} /γ	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%
P _{0,1%} /γ	0,039	16,1%	-0,039	-11,5%	-0,015	-5,1%	0,004	2,1%	-0,008	-4,2%	-0,016	-8,4%	-0,013	-5,9%	-0,033	-14,4%	-0,027	-9,5%	-0,022	-7,1%	-0,011	-3,2%	-0,006	-1,7%	0,012	3,0%	0,004	1,0%
P _{1%} /γ	0,030	11,5%	-0,036	-9,7%	-0,013	-3,8%	0,003	1,3%	-0,009	-3,7%	-0,012	-4,8%	-0,010	-3,7%	-0,022	-8,0%	-0,015	-4,7%	-0,011	-3,3%	-0,003	-0,9%	-0,001	-0,4%	0,011	2,7%	0,004	1,1%
P _{5%} /γ	0,024	8,7%	-0,036	-9,1%	-0,009	-2,6%	0,007	2,4%	-0,010	-3,7%	-0,011	-3,9%	-0,008	-2,9%	-0,018	-6,1%	-0,009	-2,7%	-0,005	-1,5%	0,000	0,0%	0,002	0,4%	0,010	2,4%	0,004	1,0%
P _{10%} /γ	0,021	7,6%	-0,037	-9,1%	-0,007	-2,0%	0,008	2,8%	-0,010	-3,6%	-0,010	-3,6%	-0,008	-2,5%	-0,017	-5,3%	-0,007	-2,1%	-0,003	-0,8%	0,001	0,3%	0,002	0,6%	0,010	2,3%	0,004	1,0%
P _{30%} /γ	0,008	2,5%	-0,059	-12,8%	-0,004	-1,0%	0,016	4,2%	-0,011	-2,8%	-0,016	-4,2%	-0,009	-2,3%	-0,005	-1,4%	0,000	0,0%	0,006	1,4%	0,007	1,7%	0,006	1,4%	0,005	1,1%	0,005	1,2%
P _{95%} /γ	0,008	2,3%	-0,064	-13,8%	-0,006	-1,3%	0,016	3,9%	-0,013	-3,4%	-0,020	-5,0%	-0,010	-2,4%	-0,006	-1,4%	0,000	0,0%	0,006	1,4%	0,008	1,8%	0,005	1,3%	0,004	0,9%	0,005	1,1%
P _{99%} /γ	0,008	2,4%	-0,079	-16,3%	-0,012	-2,5%	0,013	3,0%	-0,022	-5,1%	-0,028	-6,6%	-0,014	-3,2%	-0,008	-1,9%	0,000	0,0%	0,005	1,2%	0,007	1,5%	0,005	1,1%	0,002	0,4%	0,005	1,1%
P _{99,9%} /γ	0,010	2,5%	-0,106	-21,2%	-0,019	-3,7%	0,010	2,0%	-0,033	-7,0%	-0,034	-7,1%	-0,021	-4,4%	-0,015	-3,2%	-0,001	-0,1%	0,001	0,2%	0,008	1,8%	0,004	0,9%	-0,001	-0,1%	0,007	1,6%
Ressalto Hidráulico Livre - q = 0,217m³/s/m - Fr₁ = 4,38 - S = 1,00																												
P _{X%} /γ	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%	ΔP/γ	ΔP%
P _{0,1%} /γ	-	-	-	-	0,000	-0,1%	0,023	30,5%	-0,003	-7,3%	0,022	46,2%	0,045	73,5%	0,030	63,9%	0,004	6,2%	-0,021	-25,0%	-0,030	-21,8%	-0,025	-12,7%	-0,020	-8,5%	-0,031	-11,6%
P _{1%} /γ	-	-	-	-	-0,002	-1,0%	0,016	19,9%	-0,017	-38,3%	0,005	8,0%	0,026	30,9%	0,011	15,1%	-0,004	-4,5%	-0,025	-19,5%	-0,028	-15,7%	-0,016	-7,0%	-0,015	-5,4%	-0,025	-8,5%
P _{5%} /γ	-	-	-	-	-0,002	-1,3%	0,012	14,3%	-0,024	-45,6%	-0,006	-8,8%	0,010	10,6%	0,000	-0,3%	-0,010	-8,2%	-0,026	-16,7%	-0,025	-12,0%	-0,012	-4,8%	-0,012	-4,2%	-0,020	-6,5%
P _{10%} /γ	-	-	-	-	-0,002	-1,2%	0,011	12,8%	-0,026	-46,0%	-0,011	-14,2%	0,003	3,0%	-0,006	-5,4%	-0,013	-9,4%	-0,026	-15,1%	-0,023	-10,5%	-0,011	-4,2%	-0,011	-3,7%	-0,018	-5,6%
P _{30%} /γ	-	-	-	-	0,006	2,9%	0,018	15,9%	-0,027	-26,4%	-0,027	-19,8%	-0,024	-14,3%	-0,021	-10,7%	-0,026	-11,3%	-0,026	-9,9%	-0,013	-4,4%	-0,005	-1,7%	-0,003	-0,7%	-0,005	-1,4%
P _{95%} /γ	-	-	-	-	0,009	4,1%	0,021	17,1%	-0,025	-22,0%	-0,026	-17,2%	-0,025	-13,6%	-0,020	-9,0%	-0,025	-10,0%	-0,025	-9,1%	-0,011	-3,7%	-0,004	-1,3%	-0,001	-0,3%	-0,003	-0,7%
P _{99%} /γ	-	-	-	-	0,014	6,5%	0,028	20,2%	-0,016	-11,1%	-0,020	-10,5%	-0,024	-10,5%	-0,008	-3,0%	-0,019	-6,1%	-0,021	-6,7%	-0,007	-2,0%	-0,002	-0,5%	0,004	1,0%	0,003	0,7%
P _{99,9%} /γ	-	-	-	-	0,022	9,2%	0,046	26,9%	0,002	0,9%	0,008	3,3%	-0,015	-5,3%	0,011	3,1%	-0,010	-2,7%	-0,018	-4,6%	-0,002	-0,5%	0,004	0,9%	0,013	3,3%	0,012	3,0%

X	-0,277	-0,157	0,000	0,105	0,206	0,307	0,408	0,506	0,707	0,911	1,122	1,323	1,520	1,721														
Ressalto Hidráulico Afogado - q = 0,217m³/s/m - Fr₁ = 3,72 - S = 1,10																												
P _{X%} /h	ΔP/h	ΔP%	ΔP/h	ΔP%	ΔP/h	ΔP%	ΔP/h	ΔP%	ΔP/h	ΔP%	ΔP/h	ΔP%	ΔP/h	ΔP%	ΔP/h	ΔP%	ΔP/h	ΔP%	ΔP/h	ΔP%	ΔP/h	ΔP%	ΔP/h	ΔP%	ΔP/h	ΔP%		
P _{0,1%} /h	0,052	30,6%	0,030	9,3%	0,028	11,8%	0,036	29,5%	0,027	26,3%	0,040	37,0%	0,048	38,3%	0,034	23,0%	-0,065	-39,0%	-0,076	-32,9%	-0,076	-28,7%	-0,052	-16,7%	-0,036	-10,5%	-0,038	-10,9%
P _{1%} /h	0,049	26,7%	0,014	4,2%	0,015	5,6%	0,022	14,3%	0,008	5,7%	0,023	15,0%	0,033	18,8%	0,020	10,4%	-0,037	-16,4%	-0,041	-14,8%	-0,042	-13,7%	-0,035	-10,4%	-0,022	-6,1%	-0,028	-7,5%
P _{5%} /h	0,047	24,7%	0,003	0,8%	0,009	3,1%	0,015	8,6%	-0,001	-0,9%	0,011	6,1%	0,023	10,9%	0,010	4,6%	-0,021	-8,0%	-0,025	-8,3%	-0,026	-7,9%	-0,024	-7,0%	-0,015	-4,1%	-0,021	-5,6%
P _{10%} /h	0,047	24,1%	-0,002	-0,5%	0,007	2,3%	0,013	7,0%	-0,005	-2,8%	0,007	3,2%	0,017	7,4%	0,006	2,5%	-0,015	-5,7%	-0,019	-6,0%	-0,019	-5,7%	-0,020	-5,6%	-0,013	-3,3%	-0,019	-4,8%
P _{90%} /h	0,047	20,6%	-0,035	-8,9%	-0,002	-0,6%	0,015	5,1%	-0,023	-7,9%	-0,033	-11,0%	-0,025	-7,7%	-0,023	-7,0%	0,012	3,2%	0,014	3,7%	0,017	4,4%	0,005	1,2%	0,000	-0,1%	-0,006	-1,5%
P _{95%} /h	0,046	19,8%	-0,042	-10,4%	-0,003	-0,7%	0,016	5,3%	-0,027	-8,7%	-0,041	-12,7%	-0,033	-9,5%	-0,027	-7,6%	0,016	4,2%	0,018	4,9%	0,022	5,7%	0,008	1,9%	0,001	0,2%	-0,004	-1,1%
P _{99%} /h	0,043	17,7%	-0,057	-13,7%	-0,003	-0,6%	0,020	5,6%	-0,034	-9,8%	-0,059	-16,1%	-0,046	-11,6%	-0,036	-8,9%	0,024	5,9%	0,029	7,4%	0,034	8,2%	0,015	3,7%	0,004	0,9%	0,000	0,0%
P _{99,9%} /h	0,041	15,5%	-0,077	-17,7%	-0,002	-0,5%	0,036	8,2%	-0,044	-10,5%	-0,080	-18,5%	-0,067	-14,6%	-0,046	-9,9%	0,045	9,6%	0,049	11,3%	0,050	11,5%	0,027	6,4%	0,009	2,1%	0,006	1,4%
Ressalto Hidráulico Afogado - q = 0,217m³/s/m - Fr₁ = 3,45 - S = 1,16																												
P _{X%} /h	ΔP/h	ΔP%	ΔP/h	ΔP%	ΔP/h	ΔP%	ΔP/h	ΔP%	ΔP/h	ΔP%	ΔP/h	ΔP%	ΔP/h	ΔP%	ΔP/h	ΔP%	ΔP/h	ΔP%	ΔP/h	ΔP%	ΔP/h	ΔP%	ΔP/h	ΔP%	ΔP/h	ΔP%		
P _{0,1%} /h	0,096	40,2%	0,029	7,9%	0,019	6,7%	0,040	22,7%	0,020	14,0%	0,027	18,2%	0,033	19,5%	-0,003	-1,5%	-0,063	-30,2%	-0,060	-22,4%	-0,045	-14,6%	-0,033	-9,6%	-0,020	-5,3%	-0,018	-4,6%
P _{1%} /h	0,086	34,4%	0,015	3,9%	0,016	5,2%	0,032	15,4%	0,008	4,3%	0,016	8,2%	0,024	11,2%	0,000	-0,2%	-0,037	-14,3%	-0,028	-8,8%	-0,022	-6,4%	-0,016	-4,2%	-0,006	-1,5%	-0,010	-2,6%
P _{5%} /h	0,079	30,7%	0,006	1,4%	0,016	4,7%	0,030	12,5%	0,004	1,7%	0,010	4,4%	0,018	7,0%	0,000	-0,2%	-0,022	-7,6%	-0,013	-4,0%	-0,010	-2,7%	-0,009	-2,4%	-0,002	-0,6%	-0,007	-1,7%
P _{10%} /h	0,076	29,1%	0,001	0,4%	0,016	4,5%	0,030	11,9%	0,003	1,1%	0,008	3,1%	0,015	5,6%	-0,001	-0,2%	-0,016	-5,3%	-0,008	-2,3%	-0,005	-1,3%	-0,006	-1,5%	-0,001	-0,3%	-0,005	-1,3%
P _{90%} /h	0,063	21,3%	-0,031	-6,8%	0,015	3,4%	0,040	11,1%	-0,001	-0,2%	-0,015	-4,2%	-0,012	-3,3%	-0,007	-1,9%	0,018	4,5%	0,020	5,1%	0,022	5,3%	0,012	2,8%	0,007	1,6%	0,004	0,8%
P _{95%} /h	0,061	20,2%	-0,037	-8,1%	0,014	3,1%	0,042	10,9%	-0,003	-0,8%	-0,020	-5,3%	-0,017	-4,4%	-0,010	-2,6%	0,022	5,4%	0,024	5,8%	0,026	6,2%	0,014	3,4%	0,007	1,7%	0,005	1,1%
P _{99%} /h	0,058	18,3%	-0,052	-10,9%	0,012	2,5%	0,042	10,0%	-0,011	-2,8%	-0,029	-7,0%	-0,025	-5,9%	-0,015	-3,5%	0,032	7,2%	0,030	6,9%	0,033	7,6%	0,019	4,3%	0,009	2,0%	0,007	1,6%
P _{99,9%} /h	0,052	15,2%	-0,076	-15,4%	0,010	1,9%	0,051	10,5%	-0,018	-3,8%	-0,046	-9,4%	-0,046	-9,4%	-0,021	-4,3%	0,042	8,7%	0,042	9,2%	0,044	9,4%	0,027	5,9%	0,011	2,5%	0,012	2,6%