

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

**EFEITO DE ESCALA NA PREVISÃO DOS VALORES EXTREMOS DE PRESSÃO
JUNTO AO FUNDO EM BACIAS DE DISSIPAÇÃO POR RESSALTO
HIDRÁULICO.**

Autor: EDER DANIEL TEIXEIRA

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

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Giulian Marques
Co-orientador: Prof. Dr. Robin Thomas Clarke

Banca Examinadora

Prof. Dr. Raúl Antonio Lopardo	Universidad Nacional de La Plata
Prof. Dr. Carlos Barreira Martinez	Escola de Engenharia/UFGM
Prof. Dr. Luiz Augusto Magalhães Endres	IPH/UFRGS

Porto Alegre, setembro de 2008.

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia.

Área de Concentração:

Hidráulica

Professor Orientador:

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

Professor Co-orientador:

Prof. Dr. Robin Thomas Clarke (IPH/UFRGS)

Banca Examinadora:

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

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

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

*Com muito amor, à minha esposa Mari.
Obrigado pela força, paciência e dedicação.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Marcelo Giulian Marques, pela confiança depositada, por sua presença ao longo de todo o trabalho, paciência e, principalmente, pela valiosa amizade.

Ao CNPq (Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento), pela oportunidade de desenvolver esta pesquisa através da concessão de uma bolsa de estudos.

À Furnas Centrais Elétricas S.A., pelo apoio e parceria no Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) “Análise da Macroturbulência em Dissipadores por Ressalto Hidráulico”.

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

A minha querida Mari, por sua dedicação, imensa compreensão e, acima de tudo, sua garra.

Aos colegas de Projeto Mauricio Dai Prá e Alexandre Augusto Mees Alves, cujas competências exercidas no P&D foram de extrema importância para a realização desta pesquisa.

Ao querido amigo Rafael André Wiest, pelo companheirismo e indispensáveis contribuições.

Aos Bolsistas de Iniciação Científica, Cassius Palauro e Guilherme Finger, cujas colaborações foram indispensáveis para o desenvolvimento desta pesquisa.

Meus agradecimentos à Cláudia Romeu Marques, esposa do Orientador deste trabalho, pelas inúmeras leituras do texto da Tese.

As Pesquisadoras Simone Cerezer e Daniela Muller, por fornecerem os resultados presentes nos seus trabalhos de Doutorado e também pelo envolvimento durante a pesquisa.

Aos diversos pesquisadores que colaboraram para o desenvolvimento desta pesquisa.

RESUMO

Esta pesquisa foi desenvolvida no Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas, pertencente à Universidade Federal do Rio Grande do Sul com o apoio de Furnas Centrais Elétricas S.A., fazendo parte do Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) intitulado: “Análise da Macroturbulência em Dissipadores por Ressalto Hidráulico”.

O ressalto hidráulico é amplamente utilizado como forma de dissipação de energia a jusante de obras hidráulicas. O conhecimento das flutuações de pressão e, principalmente, dos valores extremos são de elevada importância devido a problemas ocasionados pelos efeitos macroturbulentos do escoamento, tais como, fadiga, cavitação e ressonância.

A presente pesquisa teve como objetivo verificar os possíveis efeitos de escala na previsão de valores extremos de pressões junto ao fundo em bacias de dissipação por ressalto hidráulico a partir de dados experimentais adquiridos em três modelos físicos reduzidos da UHE Porto Colômbia, nas escalas 1:100, 1:50 e 1:32, além das medições realizadas no protótipo. A análise dos dados foi realizada com base nas metodologias propostas por Wiest (2008) e Cerezer (2008), que também fizeram parte do P&D.

De uma forma geral, o trabalho apresenta sugestões de escalas mínimas a serem utilizadas nos modelos reduzidos para a avaliação das pressões médias, das flutuações de pressão, dos coeficientes estatísticos de probabilidade e das pressões extremas ao longo da bacia de dissipação. Também foram investigados, em função da escala da estrutura, os mínimos valores de frequência de aquisição e tamanho de amostra, assim como, os possíveis efeitos da aeração no escoamento.

ABSTRACT

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

The hydraulic jump is widely used as an energy dissipation form downstream hydraulic structures. The knowledge of pressure fluctuations and, mainly, of extremes values are of high importance due to problems caused by the macroturbulent effects of the flow such as fatigue, cavitation and resonance.

This research aimed to check the possible effects of scale in the prediction of extreme pressure values in the bottom of stilling basis structures from experimental data from three reduced scale models of Hydropower plant of Porto Colômbia in 1:100, 1:50 and 1:32 scale were used as well as prototype measurements. Data analysis was based on methodologies proposed by Wiest (2008) and Cerezer (2008), who also were part of this R&D project.

This work suggests the minimum scale to be used in reduced scale models in order to evaluate mean pressures, pressure fluctuations, statistical probability coefficients and extreme pressures along the stilling basin. Due to the structure scale, the minimum values of acquisition frequency and sample size as well as the possible effects on air entrainment flow were investigated.

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO	1
1 APRESENTAÇÃO E JUSTIFICATIVA DO ESTUDO	2
OBJETIVOS DA PESQUISA	6
2 OBJETIVOS DO ESTUDO E SUAS PRINCIPAIS ATIVIDADES	7
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE DISSIPACÃO DE ENERGIA POR RESSALTO HIDRÁULICO	10
3.1 PANORAMA GERAL DOS ESTUDOS REALIZADOS.....	11
3.2 CLASSIFICAÇÃO DO RESSALTO HIDRÁULICO EM FUNÇÃO DA SUA FORMA	13
3.3 RESSALTO HIDRÁULICO LIVRE E SUBMERGIDO	16
3.4 CARACTERÍSTICAS DO RESSALTO HIDRÁULICO.....	18
3.4.1 Alturas conjugadas	18
3.4.2 Comprimento do ressalto.....	20
3.4.3 Comprimento do rolo	22
3.4.4 Dissipação de energia	23
3.5 FLUTUAÇÃO DE PRESSÃO NO RESSALTO HIDRÁULICO	24
3.6 AERAÇÃO NO RESSALTO HIDRÁULICO	37
METODOLOGIA	41
4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL	42
4.1 UHE PORTO COLÔMBIA.....	42
4.2 MODELO FÍSICO REDUZIDO NA ESCALA 1:100.....	45
4.3 MODELO FÍSICO REDUZIDO NA ESCALA 1:50.....	47
4.4 MODELO FÍSICO REDUZIDO NA ESCALA 1:32.....	48
4.5 RESUMO COMPARATIVO ENTRE PROTÓTIPO E MODELOS.....	50
4.6 TEMPO DE AMOSTRAGEM E FREQUÊNCIA DE AQUISIÇÃO	51
4.7 ANÁLISE DE CORRELAÇÃO CRUZADA.....	51
4.8 DETERMINAÇÃO DO INÍCIO DO RESSALTO	51
4.9 ANÁLISES DESCRITIVAS E COMPARATIVAS DAS AMOSTRAS DE PRESSÃO.....	52

4.10	MODELOS TEÓRICO-EXPERIMENTAIS DE PREVISÃO DE VALORES EXTREMOS.....	52
RESULTADOS EXPERIMENTAIS		53
5	TEMPO DE AMOSTRAGEM E FREQUÊNCIA DE AQUISIÇÃO	54
5.1	PROTÓTIPO.....	55
5.2	MODELOS FÍSICOS REDUZIDOS.....	58
5.3	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS	59
6	CORRELAÇÃO CRUZADA ENTRE AS TOMADAS DE PRESSÃO	61
6.1	PROTÓTIPO.....	62
6.2	MODELOS FÍSICOS REDUZIDOS.....	66
6.3	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS	66
7	POSIÇÃO DO INÍCIO DO RESSALTO.....	68
8	ANÁLISE DA PRESSÃO MÉDIA	73
8.1	COMPARAÇÃO DAS AMOSTRAS DE PRESSÃO MÉDIA (OBTIDAS ATRAVÉS DE PIEZÔMETROS E TRANSDUTORES) E DE NÍVEIS D'ÁGUA	73
8.1.1	Pressões médias obtidas através de piezômetros.....	74
8.1.2	Níveis d'água obtidos através de pontas limnimétricas	75
8.1.3	Comparação dos valores de pressão média (através de piezômetros) com níveis d'água	76
8.1.4	Pressão média obtida através dos transdutores.....	78
8.1.5	Comparação dos valores das pressões médias obtidas com piezômetros e transdutores.....	79
8.1.6	Comparação dos valores de pressão média nas diferentes escalas de modelo (obtidos com o uso dos transdutores) com os resultados de Rodrigues (2002)	81
8.2	ANÁLISE DA PRESSÃO MÉDIA OBTIDA NAS DIFERENTES ESCALAS DE MODELO E NO PROTÓTIPO (VALORES OBTIDOS ATRAVÉS DOS TRANSDUTORES)	82
8.2.1	Análise da dispersão natural das amostras de pressão e dos efeitos de escala	87
8.2.2	Análise dos efeitos de escala na pressão média com o uso do ajuste proposto por Wiest (2008).....	100
9	ANÁLISE DA FLUTUAÇÃO DE PRESSÃO.....	105

9.1	ANÁLISE DA FLUTUAÇÃO DE PRESSÃO NAS DIFERENTES ESCALAS DE MODELO E PROTÓTIPO	105
9.2	ANÁLISE DA DISPERSÃO NATURAL DAS AMOSTRAS E DO EFEITO ESCALA NA FLUTUAÇÃO DE PRESSÃO.....	107
9.3	ANÁLISE DOS EFEITOS DE ESCALA NA FLUTUAÇÃO DE PRESSÃO COM O USO DO AJUSTE PROPOSTO POR Wiest (2008).....	115
10	COEFICIENTE ESTATÍSTICO DE DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADES	118
10.1	ANÁLISE DO COEFICIENTE ESTATÍSTICO NAS DIFERENTES ESCALAS DE MODELO E PROTÓTIPO	118
10.2	ANÁLISE DOS EFEITOS DE ESCALA NO COEFICIENTE ESTATÍSTICO COM O USO DO AJUSTE PROPOSTO POR Wiest (2008).....	124
11	PREVISÃO DOS VALORES EXTREMOS DE PRESSÃO COM BASE NA METODOLOGIA PROPOSTA POR Wiest (2008).....	126
11.1	ANÁLISE DAS PRESSÕES EXTREMAS (DADOS AMOSTRAIS) NAS DIFERENTES ESCALAS DE MODELO E PROTÓTIPO.....	126
11.2	ANÁLISE DA DISPERSÃO NATURAL DAS PRESSÕES EXTREMAS E DOS EFEITOS DE ESCALA.....	128
11.3	ANÁLISE DOS EFEITOS DE ESCALA NAS PRESSÕES COM O USO DOS AJUSTES PARA A P_x , A σ_x E O $N_x\%$ PROPOSTOS POR Wiest (2008)	141
12	PREVISÃO DOS VALORES EXTREMOS DE PRESSÃO COM BASE NA METODOLOGIA PROPOSTA POR CEREZER (2008).....	146
12.1	ANÁLISE DOS EFEITOS DE ESCALA NAS PRESSÕES EXTREMAS ATRAVÉS DA METODOLOGIA PROPOSTA POR CEREZER (2008)	150
CONCLUSÕES DA PESQUISA		156
13	CONCLUSÕES, RECOMENDAÇÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	157
13.1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	157
13.2	TEMPO MÍNIMO DE AMOSTRAGEM E CORRELAÇÃO CRUZADA	158
13.3	POSIÇÃO DO INÍCIO DO RESSALTO	158
13.4	ANÁLISE DA PRESSÃO MÉDIA	158
13.5	ANÁLISE DA FLUTUAÇÃO DE PRESSÃO.....	161

13.6	COEFICIENTE ESTATÍSTICO DE DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADES	162
13.7	PREVISÃO DOS VALORES EXTREMOS DE PRESSÃO COM BASE NA METODOLOGIA PROPOSTA POR WIEST (2008).....	163
13.8	PREVISÃO DOS VALORES EXTREMOS DE PRESSÃO COM BASE NA METODOLOGIA PROPOSTA POR CEREZER (2008)	164
13.9	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	165
REFERÊNCIAS.....		166
14	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	167
ANEXOS.....		179
ANEXO A - Tempo de amostragem e frequência de aquisição.....		180
ANEXO B - Correlação cruzada entre as tomadas de pressão.....		187
ANEXO C - Posição do início do resalto.....		196
ANEXO D - Análise da pressão média.....		197
ANEXO E - Análise da flutuação de pressão.....		209
ANEXO F - Coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades.....		217
ANEXO G - Previsão dos valores extremos de pressão com base na metodologia proposta por Wiest (2008).....		245
ANEXO H - Previsão dos valores extremos de pressão com base na metodologia proposta por Cerezer (2008).....		276

SUMÁRIO DE FIGURAS

Figura 1.1 - Danos provocados pela ação da macroturbulência na bacia de dissipação de energia da Barragem de Keban na Turquia. Fonte: Lopardo et al. (2006).	3
Figura 1.2 - Danos provocados pela ação da macroturbulência na bacia de dissipação de energia da Barragem de Bonneville nos Estados Unidos. Fonte: Lopardo et al. (2006).	4
Figura 1.3 - Danos provocados pela ação da macroturbulência na bacia de dissipação de energia da Barragem de Porto Colômbia no Brasil. Fonte: ICOLD/CBDB (2002).	5
Figura 3.1 - Ressalto hidráulico formado a jusante de uma comporta para número de Froude = 5,90.	10
Figura 3.2 - Ressalto hidráulico formado no modelo reduzido da UHE Porto Colômbia (escala 1:50), vazão de 4000 m ³ /s.	11
Figura 3.3 - Ressalto hidráulico formado na UHE de Porto Colômbia, vazão de 4000 m ³ /s.....	11
Figura 3.4 - Aspecto de um ressalto hidráulico e seus principais parâmetros.	14
Figura 3.5 - Classificação do ressalto hidráulico em função do número de Froude.....	15
Figura 3.6 - Classificação do tipo de ressalto a jusante de vertedouro e/ou plano inclinado. Fonte: Hager (1988).	15
Figura 3.7 - Ressalto hidráulico livre e submergido formados a jusante de uma comporta.....	16
Figura 3.8 - Ressalto hidráulico livre e submergido formados a jusante de um vertedouro.....	17
Figura 3.9 - Ressalto livre a jusante de um vertedouro (foto a). Marques (1995). Ressalto livre a jusante de uma comporta (foto b). Trierweiler (2006).	17
Figura 3.10 - Ressalto submergido a jusante de um vertedouro (foto a). Modelo reduzido escala 1:100 da UHE Porto Colômbia. Ressalto submergido a jusante de uma comporta (foto b). Trierweiler (2006).....	17
Figura 3.11 - Relação entre as alturas conjugadas (h_2/h_1) em função do Fr_1 para ressalto livre.	19
Figura 3.12 - Comprimento do ressalto (adimensionalizado a partir de h_1 e h_2) em função de Fr_1	21
Figura 3.13 - Comprimento do rolo (adimensionalizado a partir de h_1 e h_2) em função de Fr_1	22
Figura 3.14 - Dissipação de energia (adimensionalizada a partir de E_1) em função de Fr_1	24
Figura 3.15 - Variação do coeficiente de flutuação de pressão ($C_{p_{ox}}$) em função do Fr_1 e da posição relativa para ressaltos formados a jusante de uma comporta ($S^* = 0,3$). Lopardo et al. (2004b).28	
Figura 3.16 - Variação do coeficiente de flutuação de pressão ($C_{p_{ox}}$) em função do S^* e da posição relativa para ressaltos formados a jusante de uma comporta ($Fr_1 = 3$). Lopardo et al. (2004b)...28	
Figura 3.17 – $C_{p_{máx}}$ máx em função do número de Froude (Fr_1), Marques et al. (2004a).	29
Figura 3.18 - Posição relativa (X/h_1) ao $C_{p_{ox}}$ máx em função do Fr_1 . Marques et al. (2004a).	29
Figura 3.19 - Comparação entre os valores do $C_{p_{ox}}$ obtidos por Trierweiler (2006) com os dados de Lopardo et al. (2004a) e Lopardo et al. (2004b), em função de Fr_1 e da posição relativa (X/h_1)..30	
Figura 3.20 - Pressão média adimensionalizada em função da posição relativa ao início do ressalto hidráulico e das alturas conjugadas.	33

Figura 3.21 - Desvio padrão adimensionalizado em função da posição relativa ao início do ressalto hidráulico, das alturas conjugadas e da perda de energia.....	34
Figura 3.22 - Comparação entre os ajustes propostos para as pressões com probabilidades de 1 % e 99 % e os dados experimentais verificados para o ressalto hidráulico com $Fr_1 = 4,55$ e $S = 1,30$	36
Figura 3.23 - Distribuição da concentração média de ar ao longo do ressalto. Fonte: Rajaratnam (1962).....	38
Figura 3.24 - Distribuição da concentração média de ar ao longo do ressalto hidráulico para $Fr_1 = 4,2$. Fonte: Boller (2006).	40
Figura 4.1 - Instalação dos transdutores de pressão na bacia de dissipação da UHE Porto Colômbia. ICOLD/CBDB (2002).	43
Figura 4.2 - Perfil longitudinal da UHE Porto Colômbia e posição das tomadas de pressão. ICOLD/CBDB (2002).	43
Figura 4.3 - Ressalto hidráulico formado na UHE de Porto Colômbia para a vazão de $4000 \text{ m}^3/\text{s}$	44
Figura 4.4 - Posição das tomadas de pressão no modelo reduzido na escala 1:100.	46
Figura 4.5 - Ressalto hidráulico formado no modelo 1:100 para a vazão equivalente ao protótipo de $4000 \text{ m}^3/\text{s}$	46
Figura 4.6 - Posição das tomadas de pressão no modelo reduzido na escala 1:50.	48
Figura 4.7 - Ressalto hidráulico formado no modelo 1:50 para a vazão equivalente ao protótipo de $4000 \text{ m}^3/\text{s}$	48
Figura 4.8 - Posição das tomadas de pressão no modelo reduzido na escala 1:32.	49
Figura 4.9 - Ressalto hidráulico formado no modelo 1:32 para a vazão equivalente ao protótipo de $4000 \text{ m}^3/\text{s}$	50
Figura 5.1 - Valores da pressão média em função do tempo de amostra (protótipo, tomada “ d_1 ”, $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$).....	56
Figura 5.2 - Valores da pressão com 1 % de probabilidade em função do tempo de amostra (protótipo, tomada “ d_1 ”, $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$).....	56
Figura 5.3 - Valores da pressão com 99 % de probabilidade em função do tempo de amostra (protótipo, tomada “ d_1 ”, $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$).....	57
Figura 5.4 - Tempos mínimos de amostragem em função da escala da estrutura e das freqüências de aquisição	60
Figura 6.1 – Correlação cruzada para amostras com duração de 15 minutos e diferentes freqüências de aquisição (protótipo, tomadas “ $d_1 - d_3$ ”, $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$).....	63
Figura 6.2 - Correlação cruzada para amostras com duração de 5 minutos e diferentes freqüências de aquisição (protótipo, tomadas “ $d_1 - d_3$ ”, $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$).	64
Figura 6.3 - Correlação cruzada para amostras com duração de 1 minuto e diferentes freqüências de aquisição (Protótipo, tomadas “ $d_1 - d_3$ ”, $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$).....	65
Figura 7.1 – Grandezas pertinentes na análise do ressalto submerso.....	68
Figura 7.2 - Pontos experimentais e os ajustes propostos para cada uma das escalas de modelo.....	69

Figura 8.1 - Comparação entre os valores de pressão obtidos através de medições realizadas com piezômetros nos modelos em diferentes escalas ($Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$, valor equivalente no protótipo da UHE Porto Colômbia). As tomadas no trecho curvo estão representadas pelos símbolos vazados (\diamond).	74
Figura 8.2 - Comparação entre os valores de níveis d'água obtidos através de pontas limnimétricas nos modelos em diferentes escalas ($Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$, valor equivalente no protótipo da UHE Porto Colômbia). As tomadas no trecho curvo estão representadas pelos símbolos vazados (\diamond).	75
Figura 8.3 – Comparação entre os valores de pressão (obtidos através de piezômetros) com valores de níveis d'água para a vazão de $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ (valor equivalente ao protótipo da UHE Porto Colômbia) no modelo 1:32. As tomadas no trecho curvo estão representadas pelos símbolos vazados (\diamond).	76
Figura 8.4 – Comparação entre os valores de pressão (obtidos através de piezômetros) com valores de níveis d'água para a vazão de $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ (valor equivalente ao protótipo da UHE Porto Colômbia) no modelo 1:50. As tomadas no trecho curvo estão representadas pelos símbolos vazados (\diamond).	77
Figura 8.5 - Comparação entre os valores de pressão (obtidos através de piezômetros) com valores de níveis d'água para a vazão de $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ (valor equivalente ao protótipo da UHE Porto Colômbia) no modelo 1:100. As tomadas no trecho curvo estão representadas pelos símbolos vazados (\diamond).	77
Figura 8.6 - Comparação entre os valores de pressão média (obtidos através de medições com transdutores) nas diferentes escalas de modelos ($Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$, valor equivalente no protótipo da UHE Porto Colômbia). As tomadas no trecho curvo estão representadas pelos símbolos vazados (\diamond).	78
Figura 8.7 – Comparação entre os valores de pressão média (obtidos através de piezômetros e transdutores) para a vazão de $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ (valor equivalente ao protótipo da UHE Porto Colômbia) no modelo 1:32. As tomadas no trecho curvo estão representadas pelos símbolos vazados (\diamond).	79
Figura 8.8 – Comparação entre os valores de pressão média (obtidos através de piezômetros e transdutores) para a vazão de $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ (valor equivalente ao protótipo da UHE Porto Colômbia) no modelo 1:50. As tomadas no trecho curvo estão representadas pelos símbolos vazados (\diamond).	80
Figura 8.9 - Comparação entre os valores de pressão média (obtidos através de piezômetros e transdutores) para a vazão de $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ (valor equivalente ao protótipo da UHE Porto Colômbia) no modelo 1:100. As tomadas no trecho curvo estão representadas pelos símbolos vazados (\diamond).	80
Figura 8.10 - Comparação entre os valores de pressão média (para $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$) obtidos nas diferentes escalas de modelos, no modelo físico tridimensional na escala 1:100 utilizado por Rodrigues (2002) e no protótipo da UHE Porto Colômbia. As tomadas no trecho curvo estão representadas pelos símbolos vazados (\diamond).	81

Figura 8.11 - Distribuições longitudinais do coeficiente de pressão média (Ψ) observadas na bacia de dissipação da UHE Porto Colômbia, nos modelos nas escalas 1:32; 1:50 e 1:100 e obtidos por Rodrigues (2002) para a vazão de 4000 m ³ /s. As tomadas situadas no trecho curvo estão representadas pelos símbolos vazados (\diamond).	83
Figura 8.12 – Comparação visual da entrada de ar no escoamento entre o protótipo da UHE Porto Colômbia e os modelos reduzidos em diferentes escalas (Q = 4000 m ³ /s).....	86
Figura 8.13 - Pontos característicos da distribuição longitudinal da pressão média para o ressalto submerso, conforme definido por Wiest (2008).	89
Figura 8.14 – Dispersão natural do coeficiente de pressão média (Ψ) considerando as amostras obtidas no modelo na escala 1:32 da UHE Porto Colômbia (Q = 4000 m ³ /s). Os pontos situados no trecho curvo estão representados pelos símbolos vazados (\diamond).	91
Figura 8.15 – Dispersão natural do coeficiente de pressão média (Ψ) considerando as amostras obtidas no modelo na escala 1:50 da UHE Porto Colômbia (Q = 4000 m ³ /s). Os pontos situados no trecho curvo estão representados pelos símbolos vazados (\diamond).	92
Figura 8.16 – Dispersão natural do coeficiente de pressão média (Ψ) considerando as amostras obtidas no modelo na escala 1:100 da UHE Porto Colômbia (Q = 4000 m ³ /s). Os pontos situados no trecho curvo estão representados pelos símbolos vazados (\diamond).	92
Figura 8.17 – Comparação entre a concentração de ar (definida por Rajaratnam, 1962) com os ajustes determinados para a pressão média com base no modelo 1:32 e os valores medidos diretamente no protótipo da UHE porto Colômbia (Q = 4000 m ³ /s).....	93
Figura 8.18 – Distribuição longitudinal das diferenças relativas da pressão média, Q = 4000 m ³ /s, considerando as amostras obtidas nas diferentes escalas de modelo e no protótipo. As envoltórias foram definidas com base nos dados obtidos no modelo 1:32.....	94
Figura 8.19 – Diferenças relativas da pressão média para a tomada de pressão dC, Q = 4000 m ³ /s, considerando as amostras obtidas nas diferentes escalas de modelo e no protótipo. As envoltórias foram definidas com base nos dados obtidos no modelo 1:32.....	96
Figura 8.20 - Diferenças relativas da pressão média para a tomada de pressão d1, Q = 4000 m ³ /s, considerando as amostras obtidas nas diferentes escalas de modelo e no protótipo. As envoltórias foram definidas com base nos dados obtidos no modelo 1:32.....	96
Figura 8.21 - Escalas mínimas sugeridas para a pressão média em função da posição adimensional relativa ao início do ressalto (com base nas amostras obtidas nas campanhas de medição).	97
Figura 8.22 – Escalas mínimas sugeridas para a pressão média em função do número de Froude na entrada e da submersão (com base nas amostras de dados obtidos durante as campanhas de medição).	98
Figura 8.23 – Escalas sugeridas para o estudo da pressão média em função de uma variabilidade da dispersão (com base nas amostras obtidas durante as campanhas de medição).	100
Figura 8.24 – Distribuição longitudinal das diferenças relativas da pressão média, Q = 4000 m ³ /s, considerando os ajustes determinados com base nas diferentes escalas de modelo e no protótipo. As envoltórias foram definidas com base nos dados obtidos no modelo 1:32.	101

Figura 8.25 - Escalas mínimas sugeridas para a pressão média em função da posição adimensional relativa ao início do ressalto (com base nos ajustes determinados para as diferentes escalas).	103
Figura 8.26 - Escalas mínimas sugeridas para a pressão média em função do número de Froude e da submergência (com base nos ajustes determinados para as diferentes escalas).....	103
Figura 9.1 - Distribuições longitudinais dos valores brutos de flutuação de pressão (σ_x) observadas na bacia de dissipação da UHE Porto Colômbia e nos modelos 1:32; 1:50 e 1:100 ($Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$). As tomadas situadas no trecho curvo estão representadas pelos símbolos vazados (\diamond).	106
Figura 9.2 - Distribuições longitudinais do coeficiente de flutuação de pressão (Ω) observadas na bacia de dissipação da UHE Porto Colômbia e nos modelos 1:32; 1:50 e 1:100 ($Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$). As tomadas situadas no trecho curvo estão representadas pelos símbolos vazados (\diamond).	107
Figura 9.3 - Pontos característicos da distribuição longitudinal da flutuação de pressão para o ressalto submerso, de acordo com Wiest (2008).....	108
Figura 9.4 - Dispersão natural do coeficiente de flutuação de pressão (Ω) considerando as amostras obtidas no modelo na escala 1:32 da UHE Porto Colômbia ($Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$). Os pontos situados no trecho curvo estão representados pelos símbolos vazados (\diamond).	110
Figura 9.5 - Dispersão natural do coeficiente de flutuação de pressão (Ω) considerando as amostras obtidas no modelo na escala 1:50 da UHE Porto Colômbia ($Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$). Os pontos situados no trecho curvo estão representados pelos símbolos vazados (\diamond).	111
Figura 9.6 - Dispersão natural do coeficiente de flutuação de pressão (Ω) considerando as amostras obtidas no modelo na escala 1:100 da UHE Porto Colômbia ($Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$). Os pontos situados no trecho curvo estão representados pelos símbolos vazados (\diamond).	111
Figura 9.7 - Distribuição longitudinal das diferenças relativas da flutuação de pressão, $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$, considerando as amostras obtidas nas diferentes escalas de modelo e no protótipo. As envoltórias foram definidas com base nos dados obtidos no modelo 1:32.....	112
Figura 9.8 - Diferenças relativas da flutuação de pressão para a tomada de pressão d1, $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$, considerando as amostras obtidas nas diferentes escalas de modelo e no protótipo. As envoltórias foram definidas com base nos dados obtidos no modelo 1:32.	113
Figura 9.9 - Diferenças relativas da flutuação de pressão para a tomada de pressão d3, $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$, considerando as amostras obtidas nas diferentes escalas de modelo e no protótipo. As envoltórias foram definidas com base nos dados obtidos no modelo 1:32.	113
Figura 9.10 - Distribuição longitudinal das diferenças relativas da flutuação de pressão, $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$, considerando os ajustes determinados para as diferentes escalas. As envoltórias foram definidas com base nas medições realizadas no modelo 1:32.....	116
Figura 10.1 - Distribuição longitudinal do $N_{x\%}$ para os dados do modelo 1:50 (considerando diferentes submergências) em função da posição relativa ao início do ressalto.	119
Figura 10.2 - Ajuste médio proposto para determinação do coeficiente estatístico ($N_{x\%}$) ao longo do ressalto considerando os dados obtidos no modelo 1:50 da UHE Porto Colômbia.	120
Figura 10.3 - Dispersão natural do coeficiente estatístico ($N_{x\%}$) considerando as amostras obtidas no modelo na escala 1:32 da UHE Porto Colômbia.	121

Figura 10.4 - Dispersão natural do coeficiente estatístico ($N_{x\%}$) considerando as amostras obtidas no modelo na escala 1:50 da UHE Porto Colômbia.....	122
Figura 10.5 - Dispersão natural do coeficiente estatístico ($N_{x\%}$) considerando as amostras obtidas no modelo na escala 1:100 da UHE Porto Colômbia.....	122
Figura 10.6 - Distribuição longitudinal das diferenças relativas do coeficiente estatístico ($N_{x1\%}$) para a probabilidade de 1 %, $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$, considerando as amostras obtidas nas diferentes escalas de modelo e no protótipo. As envoltórias foram definidas com base nos dados obtidos no modelo 1:32.....	123
Figura 10.7 - Distribuição longitudinal das diferenças relativas do coeficiente estatístico ($N_{x99\%}$) para a probabilidade de 99 %, $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$, considerando as amostras obtidas nas diferentes escalas de modelo e no protótipo. As envoltórias foram definidas com base nos dados obtidos no modelo 1:32.....	123
Figura 10.8 - Distribuição longitudinal das diferenças relativas do coeficiente estatístico ($N_{x1\%}$) para a probabilidade de 1 %, $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$, considerando os ajustes determinados para as diferentes escalas. As envoltórias foram definidas com base nas medições realizadas no modelo 1:32...	124
Figura 10.9 – Distribuição longitudinal das diferenças relativas do coeficiente estatístico ($N_{x99\%}$) para a probabilidade de 99 %, $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$, considerando os ajustes determinados para as diferentes escalas. As envoltórias foram definidas com base nas medições realizadas no modelo 1:32...	125
Figura 11.1 - Distribuições longitudinais do coeficiente da pressão com 1 % de probabilidade ($\Psi_{1\%}$) observadas na UHE Porto Colômbia e nos modelos nas escalas 1:32; 1:50 e 1:100, para a vazão de $4000 \text{ m}^3/\text{s}$. As tomadas situadas no trecho curvo estão representadas pelos símbolos vazados (\diamond).....	127
Figura 11.2 - Distribuições longitudinais do coeficiente da pressão com 99 % de probabilidade ($\Psi_{99\%}$) observadas na UHE Porto Colômbia e nos modelos nas escalas 1:32; 1:50 e 1:100, para a vazão de $4000 \text{ m}^3/\text{s}$. As tomadas situadas no trecho curvo estão representadas pelos símbolos vazados (\diamond).....	127
Figura 11.3 - Dispersão natural da pressão com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 1 % ($\Psi_{1\%}$) considerando as amostras obtidas no modelo 1:32 da UHE Porto Colômbia ($Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$). Os pontos situados no trecho curvo estão representados pelos símbolos vazados (\diamond).....	129
Figura 11.4 - Dispersão natural da pressão com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 1 % ($\Psi_{1\%}$) considerando as amostras obtidas no modelo 1:50 da UHE Porto Colômbia ($Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$). Os pontos situados no trecho curvo estão representados pelos símbolos vazados (\diamond).....	130
Figura 11.5 - Dispersão natural da pressão com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 1 % ($\Psi_{1\%}$) considerando as amostras obtidas no modelo 1:100 da UHE Porto Colômbia ($Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$). Os pontos situados no trecho curvo estão representados pelos símbolos vazados (\diamond).....	130
Figura 11.6 - Dispersão natural da pressão com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 99 % ($\Psi_{99\%}$) considerando as amostras obtidas no modelo 1:32 da UHE Porto Colômbia	

(Q = 4000 m ³ /s). Os pontos situados no trecho curvo estão representados pelos símbolos vazados (◊).	131
Figura 11.7 - Dispersão natural da pressão com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 99 % ($\Psi_{99\%}$) considerando as amostras obtidas no modelo 1:50 da UHE Porto Colômbia (Q = 4000 m ³ /s). Os pontos situados no trecho curvo estão representados pelos símbolos vazados (◊).	131
Figura 11.8 - Dispersão natural da pressão com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 99 % ($\Psi_{99\%}$) considerando as amostras obtidas no modelo 1:100 da UHE Porto Colômbia (Q = 4000 m ³ /s). Os pontos situados no trecho curvo estão representados pelos símbolos vazados (◊).	132
Figura 11.9 - Distribuição longitudinal das diferenças relativas da pressão com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 1 % ($\Psi_{1\%}$), Q = 4000 m ³ /s, considerando as amostras obtidas nas diferentes escalas de modelo e no protótipo. As envoltórias foram definidas com base nos dados obtidos no modelo 1:32.	133
Figura 11.10 - Distribuição longitudinal das diferenças relativas da pressão com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 99 % ($\Psi_{99\%}$), Q = 4000 m ³ /s, considerando as amostras obtidas nas diferentes escalas de modelo e no protótipo. As envoltórias foram definidas com base nos dados obtidos no modelo 1:32.	133
Figura 11.11 - Diferenças relativas da pressão com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 1 % ($\Psi_{1\%}$), para a tomada de pressão dC, Q = 4000 m ³ /s, considerando as amostras obtidas nas diferentes escalas de modelo e no protótipo. As envoltórias foram definidas com base nos dados obtidos no modelo 1:32.	134
Figura 11.12 - Diferenças relativas da pressão com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 1 % ($\Psi_{1\%}$), para a tomada de pressão d1, Q = 4000 m ³ /s, considerando as amostras obtidas nas diferentes escalas de modelo e no protótipo. As envoltórias foram definidas com base nos dados obtidos no modelo 1:32.	135
Figura 11.13 - Escalas mínimas sugeridas estudo das pressões extremas ao longo do ressalto em função do número de Froude na entrada e da submergência (com base nas amostras de dados obtidos durante as campanhas de medição).....	138
Figura 11.14 - Escalas sugeridas para as pressões extremas mínimas em função de uma variabilidade aceitável da dispersão (com base nas amostras obtidas durante as campanhas de medição).	139
Figura 11.15 - Escalas sugeridas para as pressões extremas máximas em função de uma variabilidade aceitável da dispersão (com base nas amostras obtidas durante as medições). .	140
Figura 11.16 - Distribuição longitudinal das diferenças relativas da pressão com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 1 % ($\Psi_{1\%}$), Q = 4000 m ³ /s, considerando os ajustes determinados para as diferentes escalas. As envoltórias foram definidas com base no modelo 1:32.	142
Figura 11.17 - Distribuição longitudinal das diferenças relativas da pressão com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 99 % ($\Psi_{99\%}$), Q = 4000 m ³ /s, considerando os ajustes determinados para as diferentes escalas. As envoltórias foram definidas com base no modelo 1:32.	142

Figura 11.18 - Escalas mínimas sugeridas estudo das pressões extremas ao longo do ressalto em função do número de Froude na entrada e da submergência (considerando os ajustes determinados para as diferentes escalas).....	145
Figura 12.1 - Distribuição longitudinal das diferenças relativas da pressão com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 1 % ($P_{x1\% Mmat}$), $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$, considerando os valores obtidos pela metodologia de Cerezer (2008), para as diferentes escalas de modelo. As envoltórias foram definidas com base nos dados obtidos no modelo 1:32.	150
Figura 12.2 - Distribuição longitudinal das diferenças relativas da pressão com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 99 % ($P_{x99\% Mmat}$), $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$, considerando os valores obtidos pela metodologia de Cerezer (2008), para as diferentes escalas de modelo. As envoltórias foram definidas com base nos dados obtidos no modelo 1:32.	151
Figura 12.3 - Diferenças relativas da pressão com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 99 %, tomada de pressão dC, $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$, considerando os valores obtidos pela metodologia de Cerezer (2008) para as diferentes escalas de modelo. As envoltórias foram definidas com base nos dados obtidos no modelo 1:32.	152
Figura 12.4 - Diferenças relativas da pressão com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 99 %, tomada de pressão dC, $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$, considerando os valores obtidos pela metodologia de Cerezer (2008) para as diferentes escalas de modelo. As envoltórias foram definidas com base nos dados obtidos no modelo 1:32.	152
Figura 12.5 - Escalas mínimas sugeridas estudo das pressões extremas ao longo do ressalto em função do número de Froude na entrada e da submergência (considerando os valores obtidos pela metodologia proposta por Cerezer, 2008).....	155

SUMÁRIO DE TABELAS

Tabela 3.1 – Resumo dos principais trabalhos sobre ressalto hidráulico.....	12
Tabela 3.2 - Caracterização do ressalto hidráulico a jusante de vertedouro e/ou plano inclinado. Hager (1988).....	16
Tabela 3.3 - Determinação da altura conjugada lenta (h_2) por diferentes pesquisadores, em função de Fr_1	19
Tabela 3.4 - Comprimento do ressalto (L_j) por diferentes pesquisadores (em metros).....	21
Tabela 3.5 – Comprimento do rolo (L_r) por diferentes pesquisadores (em metros).	22
Tabela 3.6 - Dissipação de energia (H_t) por diferentes pesquisadores (em metros).....	23
Tabela 3.7 - Números adimensionais apresentados na equação 3.7.....	25
Tabela 3.8 - Principais resultados sobre o comportamento da flutuação de pressão no ressalto hidráulico utilizando como parâmetro de análise o Cp_{ox}	26
Tabela 3.9 - Descrição dos principais pontos de interesse no ressalto (Marques et al., 1996).	31
Tabela 3.10 - Valores dos coeficientes a, b e c da equação 3.13.	35
Tabela 4.1 - Condições hidráulicas da campanha de medições realizada na UHE Porto Colômbia. ...	45
Tabela 4.2 - Resumo comparativo das características geométricas do protótipo e dos modelos em diferentes escalas.....	50
Tabela 5.1 - Subdivisões de freqüência de aquisição e tempos de amostragem.	55
Tabela 5.2 – Valores de pressão obtidos para a tomada “ d_1 ” considerando amostra de 15 minutos e freqüência de aquisição igual a 100 Hz (protótipo, $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$).	55
Tabela 5.3 - Tempos mínimos de amostragem (em minutos) para freqüência de aquisição igual a 100 Hz (protótipo, tomada “ d_1 ”, $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$).	57
Tabela 5.4 - Freqüência mínima de aquisição e tempo mínimo de amostragem para diferentes probabilidades (protótipo, tomada “ d_1 ”, $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$).	58
Tabela 5.5 - Tempos mínimos de aquisição para coleta de dados de pressão em bacias de dissipação em função da escala da estrutura e das freqüências de aquisição.	59
Tabela 6.1 – Distância entre os pares de tomadas analisadas nos estudos de correlação cruzada para o protótipo e modelos reduzidos em diferentes escalas.	62
Tabela 6.2 - Freqüências de aquisição e tempos de amostragem analisados no estudo de correlação cruzada (válidos para o protótipo e modelos em diferentes escalas).	62
Tabela 6.3 – Correlação cruzada máxima em função do tempo de pico para amostras com duração de 15 minutos e diferentes freqüências de aquisição (protótipo, tomadas “ d_1-d_3 ”, $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$).	63
Tabela 6.4 – Correlação cruzada máxima em função do tempo de pico para amostras com duração de 5 minutos e diferentes freqüências de aquisição (protótipo, tomadas “ $d_1 - d_3$ ”, $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$).	64
Tabela 6.5 – Correlação cruzada máxima em função do tempo de pico para amostras com duração de 1 minuto e diferentes freqüências de aquisição (Protótipo, tomadas “ $d_1 - d_3$ ”, $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$).	65
Tabela 6.6 – Freqüência mínima de aquisição em função do tempo da amostra para estudos de correlação cruzada (protótipo, tomadas $d_1 - d_3$, $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$).	66

Tabela 6.7 - Frequências mínimas de aquisição em função da escala da estrutura e das durações das amostras.	67
Tabela 7.1 - Equações para determinação da posição de início do ressalto submergido.	70
Tabela 7.2 – Parâmetros característicos do ressalto hidráulico para as diferentes escalas de modelo reduzido e protótipo da UHE Porto Colômbia.	71
Tabela 7.3 – Cálculo da posição de início do ressalto (Z) com base nas equações obtidas para cada um dos modelos e pelo ajuste geral, contemplando as condições e parâmetros do escoamento no protótipo.	72
Tabela 8.1 – Possíveis relações entre as escalas de ar e as estruturas.	85
Tabela 8.2 – Coeficientes de ajuste para a distribuição da pressão média ao longo do trecho curvo referentes à metodologia proposta por Wiest (2008) para o modelo 1:50.	90
Tabela 8.3 - Ajustes para determinação das posições relativas dos pontos 4 e 5 referentes à metodologia de distribuição da pressão média proposta por Wiest (2008) para o modelo 1:50.	90
Tabela 8.4 – Escalas mínimas a serem executadas nos modelos reduzidos para obter valores de pressão média similares aos de protótipo (considerando as amostras de dados obtidas durante as campanhas de medição).	97
Tabela 8.5 – Diferenças absolutas máximas nos valores de pressão média em função da variação da dispersão.	100
Tabela 8.6 - Escalas mínimas a serem executadas nos modelos reduzidos para obter valores de pressão média similares aos de protótipo (considerando os ajustes determinados para as diferentes escalas).	102
Tabela 9.1 – Coeficientes de ajuste para a distribuição longitudinal da flutuação de pressão ao longo do trecho curvo referente à metodologia proposta por Wiest (2008) para o modelo 1:50.	109
Tabela 9.2 - Ajustes para os pontos característicos “d”, “e” e “f” e as equações para cálculo de suas posições relativas de acordo com a metodologia proposta por Wiest (2008) para o modelo 1:50.	109
Tabela 9.3 – Escalas mínimas a serem executadas nos modelos reduzidos para obter valores de flutuação de pressão similares aos de protótipo (considerando as amostras de dados obtidas durante as campanhas de medição).	114
Tabela 9.4 – Valores brutos da flutuação de pressão na tomada dA (dados amostrais) considerando as diferentes condições de escoamento.	115
Tabela 9.5 - Escalas mínimas a serem executadas nos modelos reduzidos para obter valores de flutuação de pressão similares aos de protótipo (considerando os ajustes determinados para as diferentes escalas).	116
Tabela 9.6 – Valores brutos da flutuação de pressão na tomada dA (dados provenientes dos ajustes) considerando as diferentes condições de escoamento.	117
Tabela 10.1 – Valores dos coeficientes estatísticos de distribuição de probabilidades ($N_{x\%}$) determinados para o modelo na escala 1:50.	120

Tabela 11.1 - Escalas mínimas a serem executadas nos modelos reduzidos para obter valores de $\Psi_{\%}$ similares aos de protótipo, considerando a vazão de 4000 m ³ /s (considerando as amostras de dados obtidas nas diferentes escalas).	135
Tabela 11.2 - Escalas mínimas a serem executadas nos modelos reduzidos para obter valores de $\Psi_{\%}$ similares aos de protótipo, considerando a vazão de 3000 m ³ /s (considerando as amostras de dados obtidas nas diferentes escalas).	136
Tabela 11.3 - Escalas mínimas a serem executadas nos modelos reduzidos para obter valores de $\Psi_{\%}$ similares aos de protótipo, considerando a vazão de 2000 m ³ /s (considerando as amostras de dados obtidas nas diferentes escalas).	136
Tabela 11.4 - Escalas mínimas a serem executadas nos modelos reduzidos para obter valores de $\Psi_{\%}$ similares aos de protótipo, considerando a vazão de 1000 m ³ /s (considerando as amostras de dados obtidas nas diferentes escalas).	137
Tabela 11.5 – Diferenças absolutas máximas nos valores de pressão com probabilidade de ocorrência de 0,1 % e 1 % em função da variação da dispersão.	140
Tabela 11.6 – Diferenças absolutas máximas nos valores de pressão com probabilidade de ocorrência de 99 % e 99,9 % em função da variação da dispersão.	141
Tabela 11.7 - Escalas mínimas a serem executadas nos modelos reduzidos para obter valores de $\Psi_{\%}$ similares aos de protótipo, considerando a vazão de 4000 m ³ /s (considerando os ajustes determinados para as diferentes escalas).....	143
Tabela 11.8 - Escalas mínimas a serem executadas nos modelos reduzidos para obter valores de $\Psi_{\%}$ similares aos de protótipo, considerando a vazão de 3000 m ³ /s (considerando os ajustes determinados para as diferentes escalas).....	143
Tabela 11.9 - Escalas mínimas a serem executadas nos modelos reduzidos para obter valores de $\Psi_{\%}$ similares aos de protótipo, considerando a vazão de 2000 m ³ /s (considerando os ajustes determinados para as diferentes escalas).....	144
Tabela 11.10 - Escalas mínimas a serem executadas nos modelos reduzidos para obter valores de $\Psi_{\%}$ similares aos de protótipo, considerando a vazão de 1000 m ³ /s (considerando os ajustes determinados para as diferentes escalas).....	144
Tabela 12.1 - Estimativa dos parâmetros da distribuição GEV para os valores extremos máximos de pressão (Mmat. (esc. 1:32), Q = 4000 m ³ /s).	148
Tabela 12.2 - Estimativa dos parâmetros da distribuição GEV para os valores extremos máximos de pressão (Mmat. (esc. 1:50), Q = 4000 m ³ /s).	148
Tabela 12.3 - Estimativa dos parâmetros da distribuição GEV para os valores extremos máximos de pressão (Mmat. (esc. 1:100), Q = 4000 m ³ /s).	148
Tabela 12.4 - Estimativa dos parâmetros da distribuição GEV para os valores extremos mínimos de pressão (Mmat. (esc. 1:32), Q = 4000 m ³ /s).	149
Tabela 12.5 - Estimativa dos parâmetros da distribuição GEV para os valores extremos mínimos de pressão (Mmat. (esc. 1:50), Q = 4000 m ³ /s).	149
Tabela 12.6 - Estimativa dos parâmetros da distribuição GEV para os valores extremos mínimos de pressão (Mmat. (esc. 1:100), Q = 4000 m ³ /s).	149

Tabela 12.7 - Escalas mínimas a serem executadas nos modelos reduzidos para obter valores de $\Psi_{\%Mmat}$ similares aos de protótipo, considerando a vazão de 4000 m³/s, considerando os valores obtidos pela metodologia de Cerezer (2008), para as diferentes escalas de modelo.153

Tabela 12.8 - Escalas mínimas a serem executadas nos modelos reduzidos para obter valores de $\Psi_{\%Mmat}$ similares aos de protótipo, considerando a vazão de 3000 m³/s, considerando os valores obtidos pela metodologia de Cerezer (2008), para as diferentes escalas de modelo.153

Tabela 12.9 - Escalas mínimas a serem executadas nos modelos reduzidos para obter valores de $\Psi_{\%Mmat}$ similares aos de protótipo, considerando a vazão de 2000 m³/s, considerando os valores obtidos pela metodologia de Cerezer (2008), para as diferentes escalas de modelo.154

Tabela 12.10 - Escalas mínimas a serem executadas nos modelos reduzidos para obter valores de $\Psi_{\%Mmat}$ similares aos de protótipo, considerando a vazão de 1000 m³/s, considerando os valores obtidos pela metodologia de Cerezer (2008), para as diferentes escalas de modelo.154

ABREVIATURAS

Símbolo	Descrição
A_d	Coefficiente de assimetria
<i>ABRH</i>	Associação Brasileira de Recursos Hídricos
a, b e c	Coefficientes da equação de grau 2 proposta para determinação do coeficiente estatístico de distribuição de probabilidade
b	Largura do canal
C	Celeridade da onda de gravidade
C_a ou C_{ar}	Concentração média de ar ao longo do ressalto hidráulico
$C_{am\acute{a}x}$	Máxima concentração média de ar ao longo do ressalto hidráulico
C_F	Cota de fundo da estrutura
<i>CEHPAR</i>	Centro de Hidráulica Professor Parigot de Souza
C_{pox}	Coefficiente de flutuação de pressão
$C_{p\ máx}$	Coefficiente de flutuação de pressão máxima
<i>CBDB</i>	Comitê Brasileiro de Barragens
E_1	Energia na seção de entrada do ressalto hidráulico
<i>COPPE</i>	Centro de Pós Graduação de Engenharia da UFRJ
E_2	Energia na seção de saída do ressalto hidráulico
f	Freqüência dominante do fenômeno
Fr	Número de Froude
<i>FCTH</i>	Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica
Fr_1	Número de Froude na entrada do ressalto hidráulico
Fr_2	Número de Froude na saída do ressalto hidráulico
g	Aceleração da gravidade
<i>GEV</i>	Distribuição generalizada de valores extremos
h_c	Altura crítica para a vazão escoada
h_1	Altura de água na seção de entrada do ressalto hidráulico
h_2	Altura de água na seção de saída do ressalto hidráulico
H	Energia total na entrada do ressalto hidráulico
H_1	Energia total na seção de entrada do ressalto hidráulico
H_2	Energia total na seção de saída do ressalto hidráulico
H_t	Perda de energia no ressalto hidráulico
<i>ICOLD</i>	International Commission on Large Dams

Símbolo	Descrição
<i>IPH</i>	Instituto de Pesquisas Hidráulicas
<i>LAHE</i>	Laboratório de Hidráulica Experimental de Furnas Centrais Elétricas S.A.
<i>LNEC</i>	Laboratório Nacional de Engenharia Civil – Universidade de Lisboa
L_d	Ponto de descolamento
L_r	Comprimento do rolo
L_n	Comprimento do ressalto hidráulico
$L_{\sigma máx}$	Ponto de maior flutuação de pressão
$N_{x\%}$	Coefficiente estatístico para uma certa probabilidade ser inferior ou igualada em um ponto X no interior do ressalto
$N_{x\% Prot.}$	Coefficiente estatístico com base nas amostras coletadas nos modelos físicos reduzidos
$N_{x\% Mod.}$	Coefficiente estatístico com base nas amostras coletadas no protótipo da UHE Porto Colômbia
$N_{x\%aj Mod.}$	Coefficiente estatístico obtido através do ajuste proposto por Wiest (2008) nos modelos físicos reduzidos
n	Número de observações
N_m	Nível de montante
N_j	Nível de jusante
$N.A.$	Nível de água
k	Coefficiente de curtose
P_x ou P_x/γ	Pressão média na posição X
$P_{x Prot.}$	Pressão média das amostras coletadas nos modelos físicos reduzidos na posição X
$P_{x Mod.}$	Pressão média das amostras coletadas na UHE Porto Colômbia na posição X
$P_{xaj Mod.}$	Pressão média obtida através do ajuste proposto por Wiest (2008) nos modelos físicos reduzidos na posição X
$P_{x\%aj Mod.}$	Pressão para uma certa probabilidade de ocorrência obtida através do ajuste proposto por Wiest (2008) nos modelos físicos reduzidos na posição X
$P_{x\%}$ ou $P_{x\%}/\gamma$	Pressão para uma certa probabilidade de ocorrência de ser inferior ou igual na posição X
P_i	Pressão instantânea
q	Vazão por unidade de largura do canal
Q	Vazão teórica vertida
q_a	Vazão específica de ar na seção de entrada do ressalto
q_w	Vazão específica de água na seção de entrada do ressalto
RMS	Amplitude média quadrática da flutuação de pressão
R	Raio de curvatura do trecho de concordância entre o vertedouro e a bacia de dissipação

Símbolo	Descrição
Re	Número de Reynolds
Re_1	Número de Reynolds na entrada do ressalto hidráulico
S	Grau de submergência
S_1	Seção na entrada do ressalto hidráulico
S_2	Seção na saída do ressalto hidráulico
Ta	Tempo de aquisição dos dados
t	Tempo
T_w	Altura de água sobre o fundo da bacia a jusante do ressalto hidráulico submergido
UHE	Usina hidrelétrica
V	Velocidade média do escoamento
V_a	Volume de ar
V_1	Velocidade rápida na entrada do ressalto hidráulico
V_w	Volume de água
V_2	Velocidade lenta na saída do ressalto hidráulico
x, y, z	Coordenada do ponto da medida em relação a um ponto de referência
X	Posição do início do ressalto hidráulico em relação ao ponto de tangência do perfil do vertedouro com a bacia de dissipação
Xa	Posição de aeração relativa ao início do ressalto
X_{adm}	Posição relativa adimensional
$X_{Cp\ máx}$	Posição do coeficiente de flutuação de pressão máxima
Z	Altura sobre o plano inclinado em que ocorre o ressalto hidráulico
We	Número de Weber

SÍMBOLOS GREGOS

Símbolo	Descrição
ΔP	Amplitude média da flutuação de pressão
ΔP_x	Varição absoluta da pressão média do ressalto submergido
ΔN_x	Varição absoluta do coeficiente estatístico no ressalto submergido
Γ	Posição adimensionalizada em relação ao início do ressalto hidráulico
Ω	Flutuação de pressão adimensionalizada
Ψ	Pressão média adimensionalizada

Símbolo	Descrição
$\psi_{\%}$	Pressão com ocorrência igual ou inferior a determinada probabilidade na posição X
$\psi_{\% Mmat}$	Pressão extrema adimensionalizada com base no modelo matemático proposto por Cerezer (2008)
θ	Inclinação do paramento reto do vertedouro
γ	Peso específico da água
λ	Escala da estrutura
λ_{ar}	Escala da entrada de ar no escoamento
μ_{adm}	Pressão média da amostra de dados adimensionalizada (Cerezer, 2008)
ν	Viscosidade cinemática da água
ρ	Massa específica da água
σ_x	Flutuação de pressão ou desvio padrão do ponto X
$\sigma_{x Prot.}$	Flutuação de pressão das amostras coletadas nos modelos físicos reduzidos
$\sigma_{x Mod.}$	Flutuação de pressão das amostras coletadas no protótipo da UHE Porto Colômbia
$\sigma_{xaj Mod.}$	Flutuação de pressão obtida através do ajuste proposto por Wiest (2008) nos modelos físicos reduzidos
$\sigma_{x\%aj Mod.}$	Flutuação de pressão para uma certa probabilidade de ocorrência obtida através do ajuste proposto por Wiest (2008) nos modelos físicos reduzidos
σ_{adm}	Desvio padrão da amostra de dados adimensionalizada proposto por Cerezer (2008)
σ_s	Tensão superficial da água
ξ	Parâmetro de forma da amostra, com $\sigma_x > 0$ dada uma posição X no ressalto hidráulico (Cerezer, 2008)
$\xi_{m\acute{a}x}$	Diferença absoluta máxima
ξ_{rel}	Diferença relativa

APRESENTAÇÃO

1 Apresentação e justificativa do estudo

A capacidade hidrelétrica do território brasileiro é de, aproximadamente, 259.000 MW e estão implantados apenas cerca de 26 % (67.000 MW) ¹. Apesar da tendência do aumento de outras fontes, tudo indica que a energia hidráulica continuará sendo, por muitos anos, a principal fonte de energia elétrica do Brasil. No entanto, além da hidroeletricidade, devemos considerar a necessidade da construção de reservatórios naturais destinados aos outros usos da água, podendo citar a irrigação e o abastecimento urbano e rural. Nesse cenário, tem-se a preocupação que o excedente de volume desses reservatórios retorne aos cursos d'água naturais sem causar danos às regiões a jusante e às próprias estruturas hidráulicas.

As obras hidráulicas estão sujeitas à ação de diversos mecanismos que podem colocá-las em situação de risco. A sua segurança está associada ao conhecimento do modo das mesmas se comportar frente às diferentes condições de escoamento a qual poderão estar sujeitas durante a sua operação.

Os modelos físicos reduzidos permitem que se estude a maior parte dos fenômenos hidráulicos e que se verifique o desempenho das obras hidráulicas em sistemas reais. Entretanto, devem ser levados em consideração os efeitos de escala e de laboratório que podem estar envolvidos neste tipo de estudo. A utilização de modelos numéricos tem atraído os projetistas em função dos avanços computacionais e das técnicas de modelação numérica. Todavia, esses modelos não conseguem ainda reproduzir totalmente uma série de fenômenos hidráulicos, podendo citar cavitação, esforços hidrodinâmicos, escoamentos bifásicos, erosão, entre outros, devido ao desconhecimento de algumas leis que regem esses fenômenos. Além disso, deve-se considerar o fato de que os modelos numéricos muitas vezes necessitam de dados que permitam a sua calibração. A associação dos modelos físicos com os modelos numéricos pode possibilitar uma análise das condições do escoamento de forma mais ampla e completa. Entretanto, são imprescindíveis as comparações dos resultados obtidos nos modelos com dados de

¹ Fonte: CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS – ELETROBRÁS, 2003. Sistema de informação do potencial hidroelétrico brasileiro – SIPO. Rio de Janeiro, Brasil. 243 p.

protótipo. O objetivo principal é o conhecimento dos efeitos de escala e de laboratório envolvidos, permitindo saber, se os valores obtidos nos modelos (físicos ou numéricos) condizem com a realidade e se estão ou não a favor da segurança.

Devemos lembrar também que muitas das normas de projeto utilizadas no dimensionamento de obras hidráulicas foram desenvolvidas há mais de meio século, baseadas em critérios de velocidade, de pressões médias e para geometrias específicas de algumas obras, sendo a maior parte das propostas baseadas apenas em obras hidráulicas de pequenas dimensões. A preocupação dos projetistas é que, por muitas vezes, na falta de outra referência na literatura, esses critérios acabam tendo de ser aplicados a obras de grande porte. Os efeitos macroturbulentos do escoamento que podem causar danos a estas estruturas são, principalmente, as flutuações de pressão e seus valores extremos. Por exemplo, alguns casos de deterioração em bacias de dissipação de energia por ação de macroturbulência do escoamento são relatados na publicação do ICOLD/CBCB (2002) e no trabalho de Lopardo *et al.* (2006), conforme pode ser visto na Figura 1.1 e Figura 1.2. Nas referidas publicações é ressaltado que muitos dos danos ocorridos em bacias de dissipação ocorrem para escoamentos bem abaixo das vazões de cheia de projeto.

A presente Tese trata de bacias de dissipação por ressalto hidráulico a jusante de vertedouros. O objetivo principal foi verificar os efeitos de escala nas pressões extremas atuantes, junto a fundo da estrutura, a partir de medições efetuadas em modelos físicos reduzidos (nas escalas geométricas 1:100, 1:50 e 1:32) e da coleta de dados efetuada na UHE Porto Colômbia, pertencente a Furnas Centrais Elétricas S.A (FURNAS).

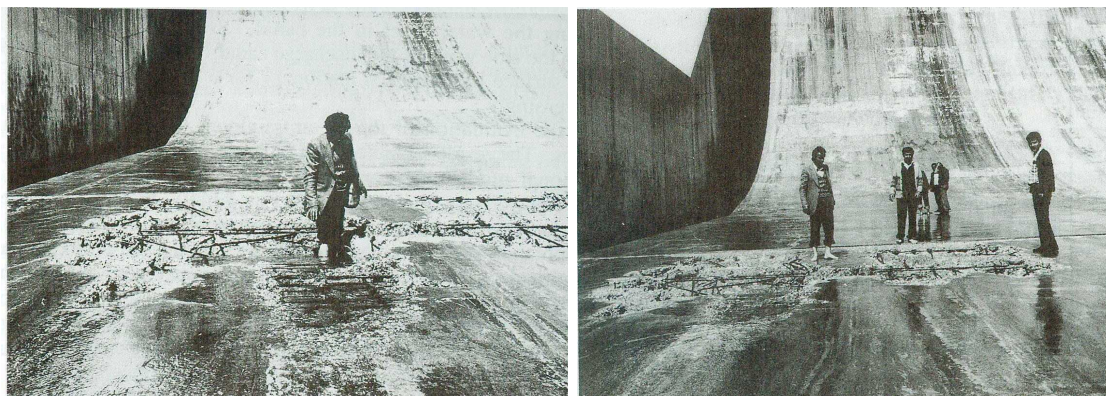


Figura 1.1 - Danos provocados pela ação da macroturbulência na bacia de dissipação de energia da Barragem de Keban na Turquia. Fonte: Lopardo *et al.* (2006).



Figura 1.2 - Danos provocados pela ação da macroturbulência na bacia de dissipação de energia da Barragem de Bonneville nos Estados Unidos. Fonte: Lopardo et al. (2006).

No Brasil ocorreram diversas situações de danos em bacias de dissipação causados pelos efeitos macroturbulentos do escoamento. Dentre eles, podemos citar os seguintes exemplos: a) UHE Jaguará onde ocorreram erosões a jusante do vertedouro. A vazão máxima vertida foi da ordem de $4.600 \text{ m}^3/\text{s}$, correspondendo a 32 % da vazão máxima prevista ($13.600 \text{ m}^3/\text{s}$) e b) UHE Porto Colômbia onde ocorreram danos por cavitação junto aos blocos de dissipação (Figura 1.3). A vazão máxima vertida foi da ordem de $5.700 \text{ m}^3/\text{s}$, correspondendo a 36 % da vazão máxima prevista ($15.800 \text{ m}^3/\text{s}$).

A ocorrência desses problemas reforça a importância, para o dimensionamento hidráulico e estrutural das bacias de dissipação, do conhecimento das características internas e externas do ressalto hidráulico, principalmente no que diz respeito à distribuição de pressões médias, das flutuações de pressão e dos valores extremos de pressão com diferentes probabilidades de ocorrência junto ao fundo da estrutura de dissipação.

Diante desses fatos, a coleta de dados de pressão em protótipo e sua comparação com dados obtidos em modelos reduzidos e/ou numéricos são de grande interesse do empreendedor, das empresas projetistas e dos centros de pesquisa. No entanto, praticamente inexistem dados coletados em protótipo e, ainda mais raros, são os estudos comparativos entre medições de pressões “instantâneas” efetuadas em laboratório com valores obtidos em protótipo. Sendo assim, pela falta

de trabalhos que apresentam tais informações, ainda não são conhecidos os possíveis efeitos de escala e de laboratório na determinação dos esforços hidrodinâmicos que agem sobre as bacias de dissipação por ressalto hidráulico.



Figura 1.3 - Danos provocados pela ação da macroturbulência na bacia de dissipação de energia da Barragem de Porto Colômbia no Brasil. Fonte: ICOLD/CBDB (2002).

Neste sentido, em janeiro de 2005, FURNAS e o Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH) firmaram uma parceria com o objetivo de desenvolver um projeto de pesquisa e desenvolvimento (P&D) intitulado “*Análise da Macroturbulência em Dissipadores por Ressalto Hidráulico*”, no qual a presente Tese está inserida. Esta parceria é decorrente da Lei Federal 9.991 do ano de 2000, que dispõe sobre a realização de investimentos em P&D por parte das empresas concessionárias, permissionárias e autorizadas do setor de energia elétrica.

OBJETIVOS DA PESQUISA

2 Objetivos do estudo e suas principais atividades

O **objetivo principal** desta pesquisa é verificar **os efeitos de escala na previsão de valores extremos de pressões junto ao fundo em bacias de dissipação por ressalto hidráulico**. Foram utilizados dados de pressão instantânea obtidos a partir de uma campanha de medições realizada na UHE Porto Colômbia (pertencente a Furnas Centrais Elétricas S.A.), em 1996, e dados coletados nos modelos físicos reduzidos nas escalas 1:100, 1:50 e 1:32, instalados no Laboratório de Hidráulica Experimental de Furnas (LAHE), no período de 2004 a 2007.

Sendo assim, partindo de uma revisão bibliográfica relativa ao assunto, em conjunto com a análise dos dados obtidos no protótipo da UHE Porto Colômbia e nos modelos físicos bidimensionais, este trabalho pretende verificar os possíveis efeitos de escala, e de laboratório, constantes na determinação dos valores extremos de pressão atuantes nas bacias de dissipação por ressalto hidráulico, além de fixar as condições de realização dos ensaios (em termos de tempo e frequência amostral) e determinar as diferenças relativas entre metodologias de previsão de valores extremos de pressão.

Cabe salientar que as metodologias de previsão de valores extremos de pressão comparadas nesta pesquisa foram desenvolvidas pelos seguintes autores: Wiest (2008) - “Avaliação do campo de pressões em ressalto hidráulico formado a jusante de um vertedouro com diferentes graus de submergência” - e Cerezer (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”.

Para atingir esses objetivos, foram desenvolvidas as seguintes atividades:

- Análise dos dados de pressões obtidos em medições efetuadas na UHE Porto Colômbia e nos modelos físicos reduzidos (escalas 1:100, 1:50 e 1:32), instalados no LAHE. Foi realizada uma análise estatística que abrangeu a determinação das pressões médias (P_x), das flutuações de pressões (σ_x) e das pressões com diferentes probabilidades de ocorrência ($P_{x\%}$);

- Uniformização dos resultados das medições através do processo de adimensionalização e a partir dos parâmetros hidráulicos e geométricos envolvidos;
- Verificação dos valores de pressão com diferentes probabilidades de ocorrência ($P_{x\%}$) junto ao fundo de bacias de dissipação por ressalto hidráulico para os dados de modelo e protótipo;
- Visualização do escoamento nos modelos bidimensionais (escalas 1:100, 1:50 e 1:32) para melhor compreensão do processo de dissipação e determinação das oscilações do escoamento e sua influência nos resultados;
- Determinação do coeficiente estatístico de distribuição de probabilidade ($N_{x\%}$) para os dados coletados em laboratório e a sua comparação com o protótipo;
- Avaliação dos valores mínimos de frequência de aquisição e tamanho de amostra para as diferentes escalas; e
- Efetuar estudos de análise de correlação cruzada (bivariada) das pressões entre as diferentes posições do ressalto hidráulico para um mesmo escoamento.

Dessa forma, espera-se que esta pesquisa venha contribuir para o conhecimento do processo da dissipação de energia e possibilitar a otimização das estruturas.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3 Revisão bibliográfica sobre dissipação de energia por ressalto hidráulico

O ressalto hidráulico é um fenômeno bruscamente variado, caracterizado pela mudança rápida do regime de escoamento (supercrítico para subcrítico) através da perda de energia provocada pela turbulência e incorporação de ar (escoamento bifásico). Essa agitação diminui significativamente após o fim do rolo e chega ao regime normal do escoamento após o fim da zona de subida de bolhas de ar. A Figura 3.1 apresenta o desenvolvimento de um ressalto hidráulico, em modelo reduzido, a jusante de uma comporta.

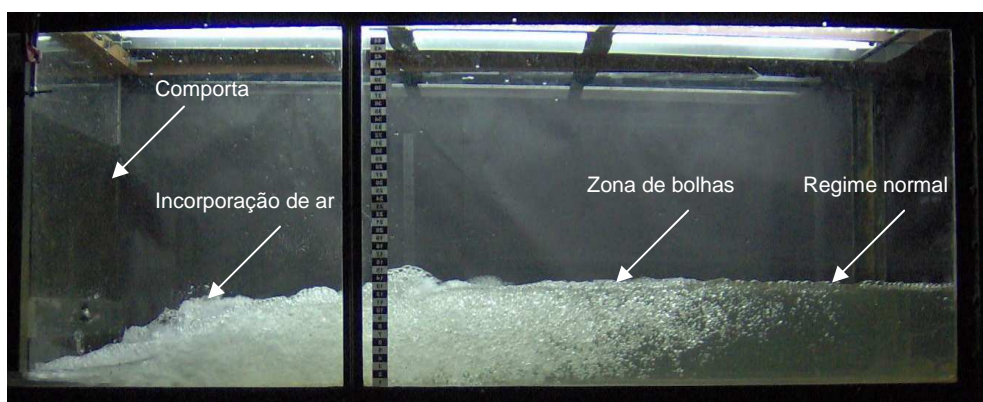


Figura 3.1 - Ressonância hidráulica formada a jusante de uma comporta para número de Froude = 5,90.
Fonte: Trierweiler, 2006.

As intensas flutuações de pressão e de velocidade verificadas no interior do ressalto hidráulico possuem um papel decisivo no processo de dissipação da energia. Essas flutuações podem causar danos significativos à estrutura de dissipação e provocar erosões no leito a jusante do rio por problemas ligados à fadiga, cavitação, ressonância, sobrepressão e variação de pressão. O conhecimento da distribuição das flutuações de pressão e dos valores extremos é importante para a compreensão do processo da dissipação de energia e para o dimensionamento de estruturas mais eficientes.

A Figura 3.2 e a Figura 3.3 ilustram o ressalto hidráulico no modelo físico reduzido, na escala 1:50, e na Usina Hidrelétrica (UHE) de Porto Colômbia, para a vazão de 4000 m³/s (em protótipo).



Figura 3.2 - Ressalto hidráulico formado no modelo reduzido da UHE Porto Colômbia (escala 1:50), vazão de 4000 m³/s.



Figura 3.3 - Ressalto hidráulico formado na UHE de Porto Colômbia, vazão de 4000 m³/s.

3.1 Panorama geral dos estudos realizados

Embora tenha sido primeiramente descrito por Leonardo da Vinci no Século XVI, somente no início do século XIX foram apresentados os primeiros trabalhos teóricos e experimentais sobre o ressalto hidráulico. A Tabela 3.1 apresenta um resumo da evolução e temas das pesquisas sobre o ressalto hidráulico.

Tabela 3.1 – Resumo dos principais trabalhos sobre ressalto hidráulico.

Tema abordado	Ano da publicação	Pesquisadores
Determinação das alturas conjugadas	1820 ²	Bidone
	1828 ²	Bélanger
	1957	Bradley e Peterka
	1988	Hager
	1990	Kawagoshi and Hager
Determinação do comprimento do rolo e do ressalto.	1929 ²	Safranez
	1934 ²	Smetana
	1957	Peterka
	1959	Elevatorsky
	1965	Rajaratnam
	1989	Hager <i>et al.</i>
	1996	Marques <i>et al.</i>
Introdução ao conceito de números adimensionais.	1932 ²	Barkhemetteff
	1934 ²	Rouse
Determinação do campo de velocidades e das características turbulentas do ressalto hidráulico.	1959	Rouse <i>et al.</i>
	1963	Schröder
	1965	Rajaratnam
Inserção de novos métodos de medição de parâmetros hidráulicos do escoamento (anemometria a filme quente e por efeito Doppler).	1970	Resch
Medições de flutuações de pressão (em modelos de ar e na água).	1961	Elder
	1967	Vasiliev
	1974	Abdul-Khader e Elango
	1980	Lopardo e Solari
	1986	Lopardo
	1988	Toso e Bowers
	1990	Endres
	2004	Marques <i>et al.</i>
	2006	Trierweiler
Esforços sobre as estruturas hidráulicas	1992	Fiorotto
	1995	Pinheiro
	2004	Lopardo <i>et al.</i>
	2005	Romagnoli

² Fonte: HAGER, W.H. 1992. Energy dissipators and hydraulic jump. Dordrecht: Kluwer Academic. 289 p.

Tema abordado	Ano da publicação	Pesquisadores
Dissipação de energia	1936 ²	Barkhemetteff e Matzke
	1957	Elevatorsky
	1959	Chow
	1998	Marques <i>et al.</i>
Previsão de valores extremos de pressão em estruturas hidráulicas	2003	Teixeira
	2006	Trierweiler
	2008	Wiest
	2008	Cerezer
Estudos relacionados à aeração.	1962	Rajaratnam
	1972	Resch
	1995	Pinheiro
	2006	Boller
	2006	Chanson

3.2 Classificação do ressalto hidráulico em função da sua forma

O desenvolvimento do ressalto hidráulico ocorre à superfície livre, portanto, está fortemente ligado ao efeito das forças gravitacionais. Esse fenômeno pode ser caracterizado pelo número de Froude (Fr), que representa a relação (equação 3.1) adimensional entre os esforços inerciais e gravitacionais.

$$Fr = \frac{V}{c} \quad (Eq. 3.1)$$

Sendo:

V = velocidade média do escoamento;

c = celeridade da onda de gravidade (função da altura do escoamento).

O número de Froude geralmente utilizado para caracterizar o ressalto hidráulico é determinado na seção de entrada (denominado neste trabalho de Fr_1). Nesta seção o Fr_1 é sempre superior à unidade, caracterizando regime supercrítico. De acordo com a definição de ressalto hidráulico, a sua ocorrência se dá na transição de um escoamento torrencial ou supercrítico para um escoamento fluvial ou

subcrítico. Dessa forma, na seção de saída, o número de Froude (denominado de Fr_2) é inferior à unidade, caracterizando o regime subcrítico. A Figura 3.4 mostra o aspecto habitual de um ressalto hidráulico e seus principais parâmetros característicos.

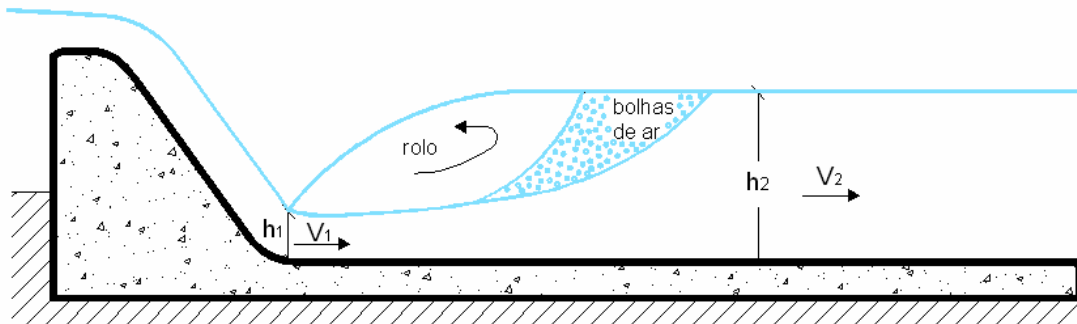


Figura 3.4 - Aspecto de um ressalto hidráulico e seus principais parâmetros.

Onde:

h_1 = altura de água na seção de entrada do ressalto;

V_1 = velocidade do escoamento na seção de entrada do ressalto;

h_2 = altura de água na seção de saída do ressalto;

V_2 = velocidade do escoamento na seção de saída do ressalto;

Distinguem-se diferentes formas de um ressalto hidráulico de acordo com a velocidade na seção de entrada do ressalto (V_1), mais precisamente, com o número de Froude nesta seção (Fr_1). Com base na classificação de Peterka (1974), a Figura 3.5 apresenta, de forma esquemática, quatro tipos diferentes de ressalto de acordo com Fr_1 , considerando o escoamento a jusante de uma comporta.

Os ressaltos com $Fr_1 > 9$, denominados de forte, em geral, não são utilizados nas construções hidráulicas devido a efeitos colaterais sobre as estruturas de dissipação, como processos abrasivos ou mesmo cavitação.

No que diz respeito ao ressalto hidráulico formado a jusante de vertedouros e planos inclinados, a classificação mais consagrada é a proposta por Hager (1988). Na Figura 3.6 e na Tabela 3.2 é apresentada a classificação proposta pelo autor.


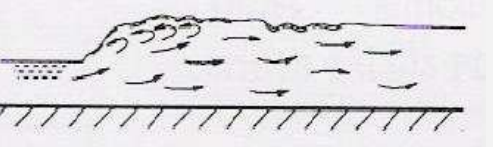
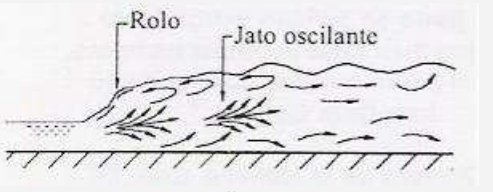

Formas do ressalto	Fr_1	Caracterização do escoamento
 <p>ondulado</p>	$1,0 > Fr_1 > 1,7$	A transição do escoamento ocorre de forma gradual e as perdas de carga são devido ao atrito nas paredes e fundo.
 <p>fraco</p>	$1,7 > Fr_1 > 2,5$	Ainda com aspecto ondular, mas com zonas de separação na superfície líquida, e as perdas de carga são baixas.
 <p>Rolo Jato oscilante</p> <p>oscilante</p>	$2,5 > Fr_1 > 4,5$	O ressalto já apresenta seu aspecto físico. Tem a tendência de se deslocar para jusante, não guardando posição junto à fonte geradora.
 <p>estacionário</p>	$4,5 > Fr_1 > 9,0$	Apresenta um comportamento regular e corresponde ao domínio de aplicação do ressalto como dissipador de energia em obras hidráulicas. A dissipação de energia varia entre 45 % e 70 %.

Figura 3.5 - Classificação do ressalto hidráulico em função do número de Froude.

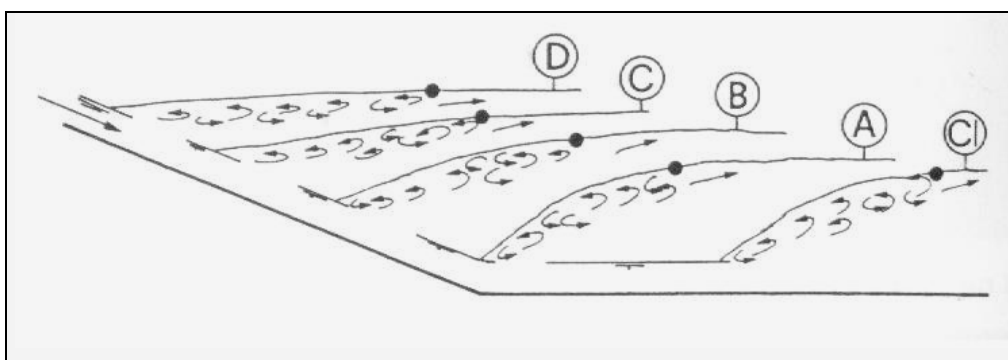


Figura 3.6 - Classificação do tipo de ressalto a jusante de vertedouro e/ou plano inclinado.
Fonte: Hager (1988).

Tabela 3.2 - Caracterização do ressalto hidráulico a jusante de vertedouro e/ou plano inclinado. Hager (1988).

Tipo	Caracterização do ressalto a jusante de vertedouro e/ou plano inclinado
A	Forma-se quando a altura conjugada lenta é igual à lâmina d'água sobre a bacia, sendo que o ressalto encontra-se inteiramente no canal horizontal à jusante do vertedouro.
CI	Formado totalmente na parte horizontal da estrutura e distante do paramento inclinado do vertedouro. Sua ocorrência é devido ao fato da lâmina d'água a jusante ser inferior à altura conjugada lenta correspondente ao ressalto do tipo A.
B	Ocorre quando o ressalto tem seu início no paramento do vertedouro, entretanto, boa parte encontra-se na estrutura de dissipação (horizontal).
C	Caracterizado pelo final do ressalto encontrar-se no início da estrutura de dissipação.
D	Formação do ressalto inteiramente sobre o paramento inclinado do vertedouro.

3.3 Ressalto hidráulico livre e submergido

Segundo Resch e Leutheusser (1974), a formação do ressalto hidráulico a jusante de vertedouros ou de comportas apresenta desenvolvimento distinto. O fato de uma comporta limitar o deslocamento do ressalto para montante é uma das principais diferenças que ocorrem no ressalto hidráulico entre a mesma e um vertedouro. As condições de jusante afetam diretamente a formação do ressalto. O fenômeno é chamado submergido à medida que a lâmina d'água a jusante (T_W) torna-se maior que a lâmina d'água referente ao ressalto livre (h_2). A Figura 3.7 e a Figura 3.8 apresentam, de forma esquemática, os parâmetros hidráulicos para o ressalto livre e submergido a jusante de uma comporta e de um vertedouro, respectivamente. A Figura 3.9 e a Figura 3.10 apresentam o ressalto hidráulico livre e submergido em estruturas montadas em laboratório, respectivamente.

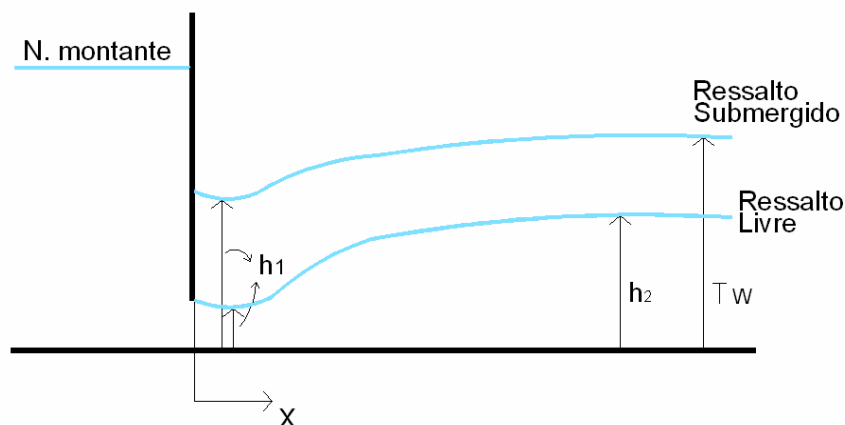


Figura 3.7 - Ressalto hidráulico livre e submergido formados a jusante de uma comporta.

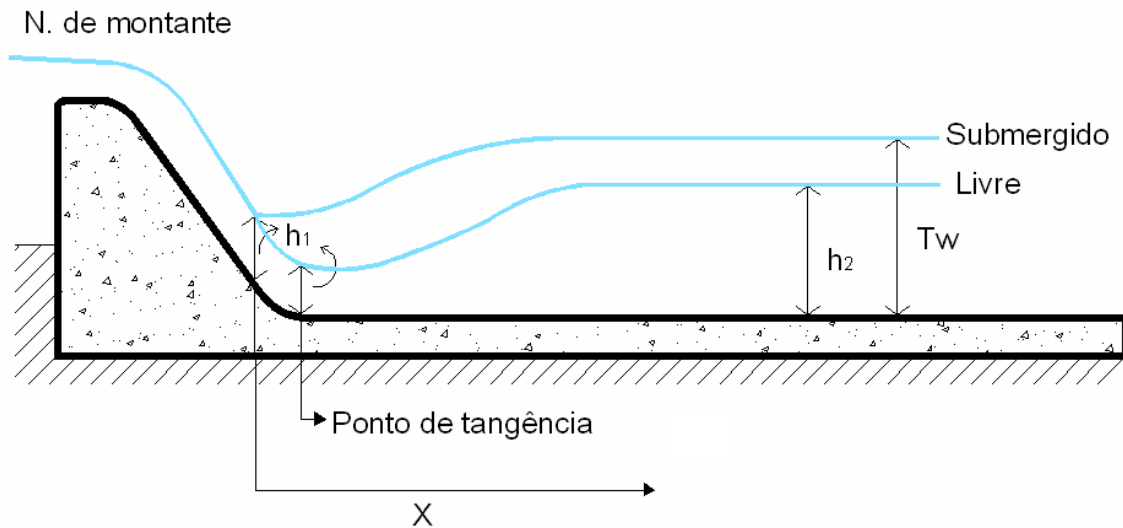


Figura 3.8 - Ressalto hidráulico livre e submergido formados a jusante de um vertedouro.

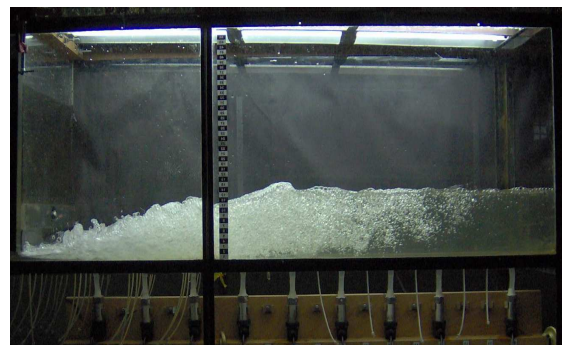
Onde:

X = posição do início do ressalto hidráulico (em relação à tangência do perfil do vertedouro com a bacia de dissipação) e;

T_w = altura de lâmina de água a jusante para ressalto hidráulico submergido.



(foto a)



(foto b)

Figura 3.9 - Ressalto livre a jusante de um vertedouro (foto a). Marques (1995). Ressalto livre a jusante de uma comporta (foto b). Trierweiler (2006).



(foto a)



(foto b)

Figura 3.10 - Ressalto submergido a jusante de um vertedouro (foto a). Modelo reduzido escala 1:100 da UHE Porto Colômbia. Ressalto submergido a jusante de uma comporta (foto b). Trierweiler (2006).

Existe uma ampla bibliografia que trata de ressalto hidráulico livre, principalmente para escoamentos a jusante de comportas. Entretanto, para a situação de ressalto submergido, independentemente se a jusante de comportas ou de vertedouros, a literatura se mostra bastante escassa, podendo citar os trabalhos de Rajaratnam (1967), Hager (1988), Teixeira (2003) e Trierweiler (2006).

Conforme os trabalhos de Marques *et al.* (1996) e Teixeira (2003), as características de um ressalto submergido irão depender, em parte, da relação direta entre a altura de lâmina de água a jusante (T_w) e a altura conjugada lenta (h_2). Essa relação foi definida pelos autores como grau de afogamento ou de submergência (S). Quando essa relação for igual à unidade temos o ressalto livre.

3.4 Características do ressalto hidráulico

A seguir serão apresentadas as principais formulações para determinação das características do ressalto hidráulico por diferentes pesquisadores, tais como, a relação das alturas conjugadas, o comprimento do ressalto, o comprimento do rolo e a dissipação de energia.

3.4.1 Alturas conjugadas

A primeira determinação exata das alturas conjugadas para o ressalto hidráulico em um canal retangular foi apresentada por Bélanger (1828), através da equação da conservação da quantidade de movimento dada pela equação 3.2:

$$\frac{1}{2} \rho g b h_1^2 + \rho Q V_1 = \frac{1}{2} \rho g b h_2^2 + \rho Q V_2 \quad (\text{Eq. 3.2})$$

Onde:

ρ = massa específica da água;

g = aceleração gravitacional;

b = largura do canal;

Q = vazão.

Considerando as hipóteses de distribuição de pressão hidrostática, distribuição de velocidades uniforme, seção transversal retangular, fundo do canal horizontal e escoamento permanente, e desprezando-se os efeitos viscosos, o autor pode representar a relação entre as alturas conjugadas (equação 3.3).

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1 \right) \quad (\text{Eq. 3.3})$$

Diversos outros pesquisadores apresentam formulações sobre as alturas conjugadas para o ressalto livre, principalmente a jusante de comportas. Na Tabela 3.3 e na Figura 3.11 é apresentada uma comparação entre os resultados de alguns dos autores mais consagrados em função do Fr_1 .

Tabela 3.3 - Determinação da altura conjugada lenta (h_2) por diferentes pesquisadores, em função de Fr_1 .

Q (m ³ /s)	q* (m ² /s)	V ₁ (m/s)	h ₁ (m)	Fr ₁	Bélanger (1828)	Leuthesser e Khartha (1972)	Merriman (1984)
					Altura conjugada lenta (h_2) em metros		
1000	7,41	21,29	0,35	11,52	5,50	5,03	4,01
2000	14,81	21,45	0,69	8,24	7,71	7,25	5,69
3000	22,22	21,50	1,03	6,75	9,37	8,92	6,98
4000	29,63	21,45	1,38	5,83	10,71	10,28	8,05

* q =vazão específica.

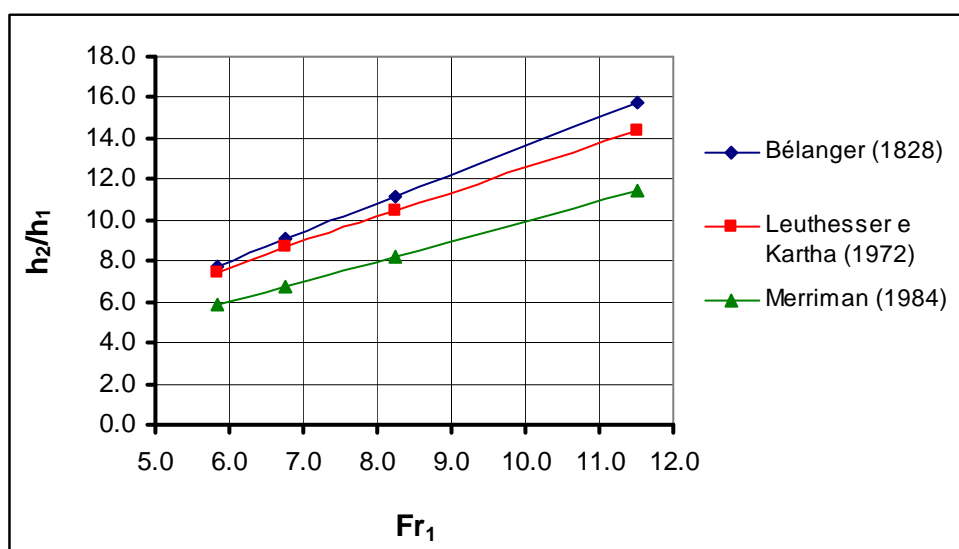


Figura 3.11 - Relação entre as alturas conjugadas (h_2/h_1) em função do Fr_1 para ressalto livre.

Observa-se pela análise da Figura 3.11 que todas as relações possuem o mesmo padrão de desenvolvimento. Dessa forma, ressalta-se a equação de Bélanger em função de ser a mais consagrada.

São raros os estudos que contemplam a determinação das alturas conjugadas para dados de ressalto submergido, tanto a jusante de comportas como de vertedouros. A jusante de comportas podem ser mencionados os trabalhos de Rajaratnam (1965a) e Trierweiler (2006). Os trabalhos de Hager (1988) e Kawagoshi e Hager (1990) correspondem aos trabalhos mais consagrados sobre a determinação das alturas conjugadas em ressalto submergido a jusante de planos inclinados e vertedouros.

3.4.2 Comprimento do ressalto

De acordo com Lopardo *et al.* (2004a), comprimento do ressalto hidráulico (L_j) é a variável macroscópica mais controversa em relação ao projeto de bacias de dissipação, haja vista que depende diretamente dos critérios que definem as seções de início e final do ressalto hidráulico. Ainda não existe um consenso na bibliografia sobre esta característica. As principais definições para determinação do comprimento do ressalto são apresentadas a seguir:

- local onde não há grande variação de níveis (Elevatorski, 1959);
- a altura do ressalto encontra a altura conjugada de saída (Rajaratnam, 1967);
- o escoamento é completamente desaerado e a superfície livre é essencialmente horizontal (Hager, 1992);
- onde terminam as perturbações causadas pelo ressalto (Lopardo *et al.* 2004a).

Na Tabela 3.4 e na Figura 3.12 é apresentada uma comparação entre os resultados obtidos por diferentes pesquisadores para o comprimento do ressalto.

Tabela 3.4 - Comprimento do ressalto (L_j) por diferentes pesquisadores (em metros).

q (m ² /s)	h_1 (m)	Fr_1	h_2^* (m)	Smetana (1934)	Wu (1949)	Elevatorski (1959)	Peterka (1974)	Marques <i>et al.</i> (1996)	Teixeira (2003)
7,41	0,35	11,52	5,50	30,90	34,84	35,54	**	41,21	43,78
14,81	0,69	8,24	7,71	42,12	50,09	48,44	53,20	56,16	59,67
22,22	1,03	6,75	9,37	50,00	61,39	57,50	64,63	66,66	70,83
29,63	1,38	5,83	10,71	55,98	70,38	64,38	73,91	74,64	79,31

* a altura conjugada lenta (h_2) foi determinada pela equação de Bélanger (1828).

** a equação proposta por Peterka (1974) é válida para $4,5 < Fr_1 < 9,0$.

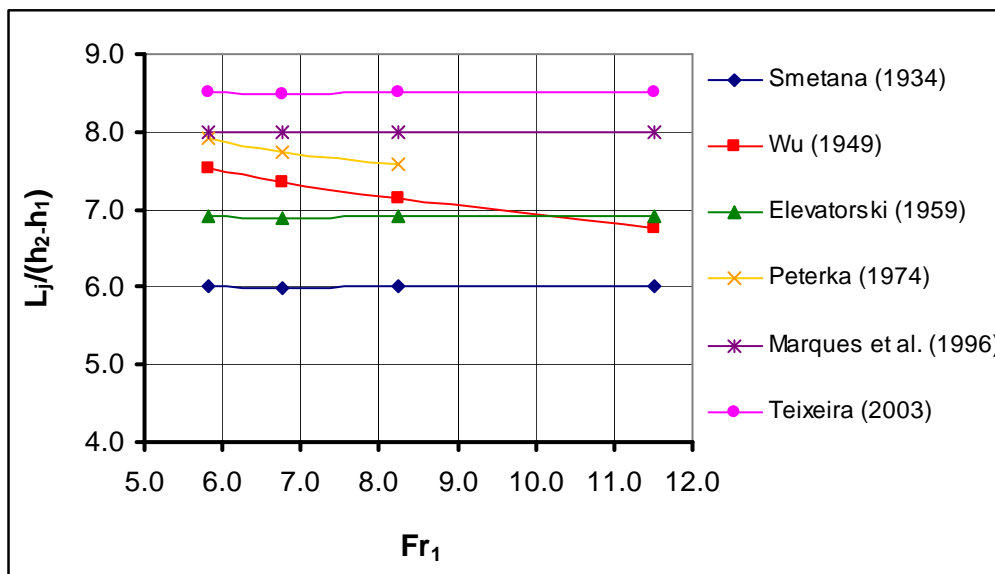


Figura 3.12 - Comprimento do ressalto (adimensionalizado a partir de h_1 e h_2) em função de Fr_1 .

De acordo com a Figura 3.12 nota-se que as proposições de Wu (1949) e Peterka (1974) são dependentes do número de Froude (Fr_1). No entanto, os seus desenvolvimentos são inversos. As demais formulações dependem essencialmente da relação das alturas conjugadas. Podemos destacar a expressão de Elevatorski (1959) como a mais usual dentre as apresentadas e também a de Teixeira (2003).

Segundo Gomes (2000), os resultados apresentados na Figura 3.12 podem ter uma oscilação de, aproximadamente, $0,35 \cdot (h_2 - h_1)$, devido às características macroturbulentas do fenômeno.

3.4.3 Comprimento do rolo

Sobre o comprimento do rolo (L_r), apesar de ser de mais fácil visualização, não há também um consenso sobre sua determinação. As principais definições para a determinação dessa característica do ressalto são apresentadas a seguir:

- onde o fim do rolo (L_r) coincide com o local onde a altura de água alcança 95 % da altura conjugada na saída do ressalto (Rajaratnam (1965b), confirmado, posteriormente, por Peterka (1974) e Lopardo (1986));
- local onde o coeficiente de assimetria (A_d) da amostra da pressão instantânea muda de sinal e encontra seu valor mínimo negativo (Marques *et al.*, 1996).

Na Tabela 3.5 e na Figura 3.13 é apresentada uma comparação entre os resultados obtidos por diferentes pesquisadores para o comprimento do rolo.

Tabela 3.5 – Comprimento do rolo (L_r) por diferentes pesquisadores (em metros).

q (m ² /s)	h_1 (m)	Fr_1	h_2^* (m)	Peterka (1957)	Newnham (1973)	Hager <i>et al.</i> (1989)	Teixeira (2003)
7,41	0,35	11,52	5,50	**	70,82	60,67	30,90
14,81	0,69	8,24	7,71	34,70	48,72	45,78	42,12
22,22	1,03	6,75	9,37	42,15	38,71	37,31	50,00
29,63	1,38	5,83	10,71	48,20	32,47	31,50	55,98

* a altura conjugada lenta (h_2) foi determinada pela equação de Bélanger (1828).

** a equação proposta por Peterka (1974) é válida para $4,5 < Fr_1 < 9,0$.

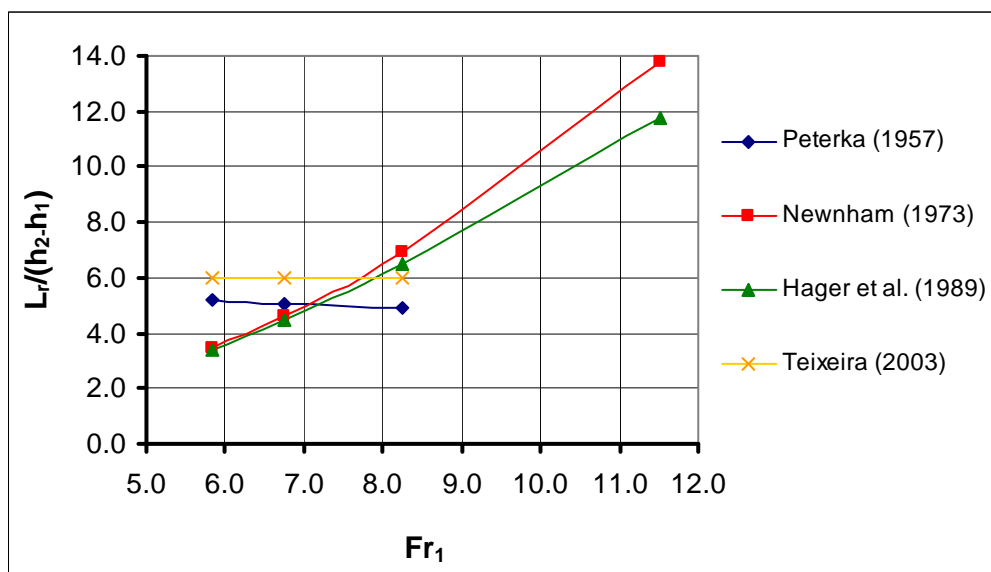


Figura 3.13 - Comprimento do rolo (adimensionalizado a partir de h_1 e h_2) em função de Fr_1 .

Pela Figura 3.13 observa-se que as equações de Newnham (1973) e Hager *et al.* (1989) são dependentes do número de Froude (Fr_1) e podemos dizer que apresentam o mesmo padrão de crescimento. As demais formulações dependem essencialmente da relação das alturas conjugadas. Ressalta-se, aqui, o trabalho de Marques *et al.* (1996), que identifica o final do rolo a partir da avaliação do coeficiente de assimetria através de amostras de pressões “instantâneas” obtidas a partir de estudos em bacia de dissipação a jusante de vertedouro.

Segundo Gomes (2000), os resultados apresentados na Figura 3.13 podem ter uma oscilação de, aproximadamente, $0,50 \cdot (h_2 - h_1)$.

3.4.4 Dissipação de energia

No caso de um canal com seção constante e fundo horizontal, a dissipação pode ser determinada pela diferença de energia nas seções imediatamente a montante da entrada (S_1) e saída (S_2) do ressalto hidráulico, conforme Elevatorski (1959). A equação 3.4 elucida a definição do autor:

$$H_t = E_1 - E_2 = \left(h_1 + \frac{V_1^2}{2g} \right) + \left(h_2 + \frac{V_2^2}{2g} \right) = \frac{1}{4} \frac{(h_2 - h_1)^3}{h_1 \cdot h_2} \quad (\text{Eq. 3.4})$$

Onde:

H_t = perda de energia no ressalto hidráulico;

E_1 = energia na seção S_1 e;

E_2 = energia na seção de saída do ressalto S_2 .

Na Tabela 3.6 e na Figura 3.14 é apresentada uma comparação entre os resultados obtidos por diferentes pesquisadores para o comprimento do rolo.

Tabela 3.6 - Dissipação de energia (H_t) por diferentes pesquisadores (em metros).

q (m ² /s)	h ₁ (m)	Fr ₁	h ₂ [*] (m)	Chow (1959)	Elevatorski (1959)	Silvester (1964)
7,41	0,35	11,52	5,50	17,86	11,85	24,52
14,81	0,69	8,24	7,71	16,24	12,32	21,90
22,22	1,03	6,75	9,37	14,94	12,68	19,80
29,63	1,38	5,83	10,71	13,72	12,92	17,85

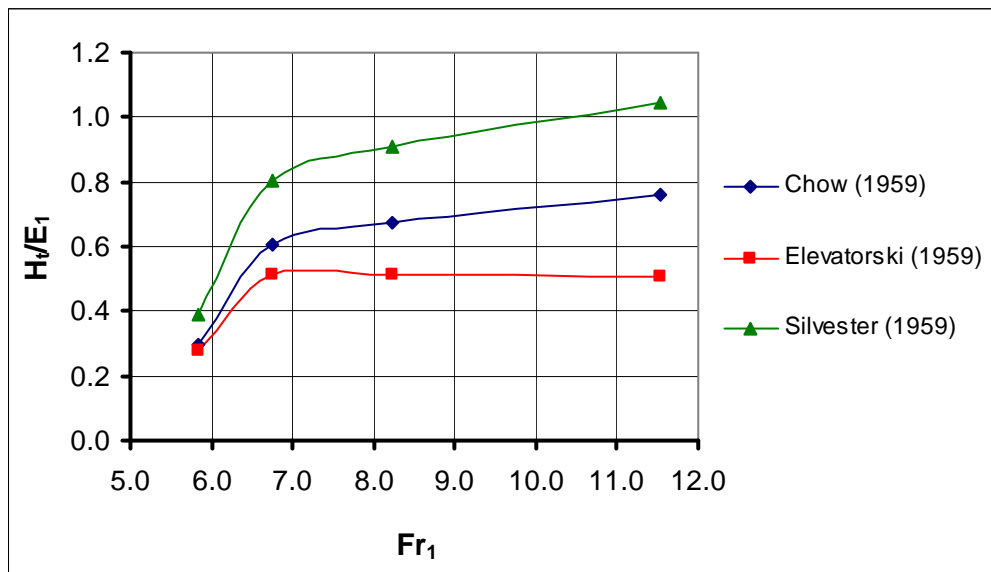


Figura 3.14 - Dissipação de energia (adimensionalizada a partir de E_1) em função de Fr_1 .

Dentre os resultados apresentados na Figura 3.14, o resultado obtido por Chow (1959) é o mais utilizado. Segundo Lopardo *et al.* (2005), o processo de dissipação no interior do ressalto é inevitavelmente acompanhado por severas flutuações de pressão que são transmitidas às estruturas hidráulicas, podendo submetê-las a fenômenos de arrancamento, fadiga, vibrações e cavitação.

3.5 Flutuação de pressão no ressalto hidráulico

O conhecimento das flutuações de pressão no ressalto pode fornecer informações importantes para a compreensão do processo de dissipação de energia. Segundo Toso e Bowers (1988), bacias de dissipação de vertedouros sofrem danos consideráveis em função das flutuações de pressão. Pode-se dizer que, devido a este fato, a flutuação de pressão é a grandeza mais estudada no ressalto hidráulico.

A flutuação de pressão junto ao fundo em um ressalto hidráulico pode ser representada pelos parâmetros hidráulicos do escoamento e geométricos da estrutura onde ele se desenvolve. A equação 3.5 apresenta a flutuação de pressão (ΔP) em função dos parâmetros acima mencionados.

$$\Delta P = \text{função} (t; X; H_t; Q; h_1; h_2; L_j; \nu; \rho; g; \sigma_s; f; T_W; \sigma_x; P_x/\gamma; P_{\%}/\gamma) \quad (\text{Eq. 3.5})$$

Sendo:

ΔP = amplitude média da flutuação de pressão em metros de coluna de água;

t = tempo;

X = coordenada do ponto da medição em relação a um ponto de referência;

H_t = perda de energia no ressalto hidráulico;

ν = viscosidade cinemática da água;

ρ = massa específica da água;

g = aceleração da gravidade;

σ_s = tensão superficial da água;

γ = peso específico da água;

f = frequência dominante do fenômeno;

σ_x = desvio padrão da amostra de pressão;

P_x/γ = pressão média da amostra de pressão; e

$P_{\%}/\gamma$ = pressão com certa probabilidade de ocorrência.

Através da análise dimensional, é possível apresentar a expressão 3.5 sob outras formas, por exemplo, equação 3.6 apresentada a seguir (os grupos adimensionais apresentados na equação a seguir estão dispostos na Tabela 3.7).

$$\frac{\Delta P}{\gamma \cdot h_2} = \text{função} \left(\frac{X}{L_j}; \frac{L_j}{H_t}; Fr_1; Re_1; \frac{h_2}{h_1}; We_1; St; Cp_{\sigma_x} \right) \quad (\text{Eq. 3.6})$$

Tabela 3.7 - Números adimensionais apresentados na equação 3.7.

Froude (Fr_1)	Reynolds (Re_1)	Weber (We_1)	Strouhal (St)	Coeficiente de flutuação de pressão (Cp_{σ_x})
$\frac{V_1}{\sqrt{g \cdot h_1}}$	$\frac{V_1 \cdot h_1}{\nu}$	$\frac{\rho \cdot V_1^2 \cdot h_1}{\sigma_s}$	$\frac{f \cdot V_1}{h_1}$	$\frac{\sigma_x}{V_1^2}$ $\frac{1}{2g}$

Obs.: os grupos adimensionais apresentados serão calculados neste trabalho com base na seção de entrada do ressalto.

A seguir é apresentado um breve histórico (Tabela 3.8) dos principais resultados obtidos por diferentes pesquisadores sobre o comportamento da flutuação de pressão no ressalto hidráulico utilizando como parâmetro de análise o Cp_{σ_x} .

Tabela 3.8 - Principais resultados sobre o comportamento da flutuação de pressão no ressalto hidráulico utilizando como parâmetro de análise o Cp_{α} .

Autores	Fr_1	Principais conclusões
Vasiliev (1967)	$5,75 < Fr_1 < 6,5$	Ponto no interior do ressalto no qual ocorre a máxima flutuação de pressão, função do número de Froude.
Abdul-Khader e Elango (1974)	$4,70 < Fr_1 < 6,60$	Resultados semelhantes ao de Vasiliev (1967). Verifica-se que o coeficiente de flutuação de pressão apresenta valores máximos próximos ao início do ressalto hidráulico.
Lopardo e Solari, (1980)	$2,50 < Fr_1 < 7,50$	Os resultados encontrados apresentam o mesmo comportamento do trabalho de Abdul-Khader e Elango (1974).
Lopardo (1986)	$4,50 < Fr_1 < 10,00$	Realizou medições de pressão a jusante de um vertedouro. Os resultados são semelhantes aos encontrados por Abdul-Khader e Elango (1974). Verificou-se a diminuição do número de Strouhal (St) em função do aumento do número de Froude (Fr_1) do ressalto hidráulico.
Toso e Bowers (1988)	$2,90 < Fr_1 < 10,00$	Estudaram a influência do ângulo da entrada do vertedouro sobre a distribuição da flutuação de pressão. Foi observado que a máxima flutuação de pressão ocorre próxima à posição que representa um terço do comprimento do ressalto e que a distribuição da flutuação de pressão difere substancialmente de uma distribuição normal.
Pinto <i>et al.</i> (1988)	$7,90 < Fr_1 < 10,01$	Os autores analisaram o comportamento da flutuação de pressão em ressaltos livres e afogados formados a jusante de vertedouros. Também concluíram que as frequências dominantes das flutuações de pressão apresentam a tendência de diminuição à medida que a submergência ¹ (S^*) do ressalto hidráulico é aumentada.
Endres (1990)	$4,50 < Fr_1 < 10,00$	Seus resultados possuem a mesma tendência que os de Lopardo (1986), mostrando que suas recomendações devem ser seguidas e que podem ser obtidos resultados semelhantes desde que as condições hidráulicas e de medição sejam respeitadas.
Marques <i>et al.</i> (1991)	$4,50 < Fr_1 < 10,00$	Utilizando dados apresentados por Endres (1990), sugerem que se use, ao longo do ressalto, a relação $X/(h_2-h_1)$ como parâmetro para representar a posição relativa da flutuação de pressão.

¹ O fator de submergência proposto pelo autor corresponde a $S^* = (T_w - h_2)/h_2$, diferente do utilizado no presente trabalho ($S = T_w/h_2$), proposto por Marques *et al.* (1999).

Em continuação aos trabalhos que abordaram a flutuação de pressão em função do comportamento do $C_{p_{\sigma x}}$, serão apresentados os resultados apresentados por Lopardo (1986), Lopardo *et al.* (2004b), Marques *et al.* (2004a) e Trierweiler (2006), de forma mais detalhada.

Lopardo (1986) recomenda que sejam seguidas algumas condições em estudos sobre flutuação de pressão em modelos reduzidos:

- $Re_1 \geq 100.000$;
- $h_1 \geq 3$ cm;
- tempo de aquisição de dados = 60 s;
- frequência de aquisição entre 50 e 100 Hz;
- comprimento máximo da mangueira entre a tomada de pressão e o sensor = 55 cm.

Lopardo *et al.* (2004b) estudaram a flutuação em ressalto hidráulico submerso formado a jusante de uma comporta para números de Froude entre 3 e 6 e fatores de submersão (S^*) entre 0,1 e 1,1.

Os autores concluíram que mantendo-se o fator de submersão constante, o coeficiente de flutuação de pressão ($C_{p_{\sigma x}}$) aumenta com a diminuição do valor do Froude incidente para a região de montante do ressalto ($X/h_1 < 10$), entretanto, a região de jusante do ressalto ($X/h_1 > 30$) verifica o comportamento inverso, um aumento do valor de $C_{p_{\sigma x}}$ em função do número de Froude, conforme pode ser visualizado na Figura 3.15.

Para avaliar a influência do fator de submersão (S^*), os autores apresentaram o comportamento do coeficiente de flutuação de pressão para o $Fr_1 = 3$. Verificou-se que o fator de submersão aumenta a intensidade da flutuação de pressão junto ao piso da bacia de dissipação para a $X/h_1 > 12$, conforme pode ser visto na Figura 3.16.

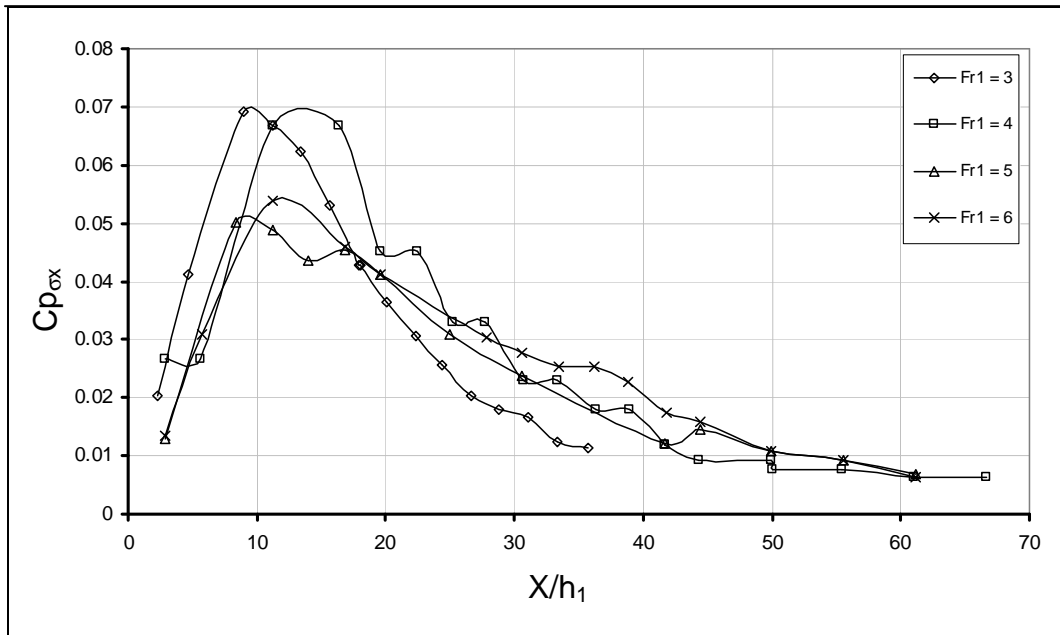


Figura 3.15 - Variação do coeficiente de flutuação de pressão (Cp_{ox}) em função do Fr_1 e da posição relativa para ressaltos formados a jusante de uma comporta ($S^* = 0,3$). Lopardo et al. (2004b).

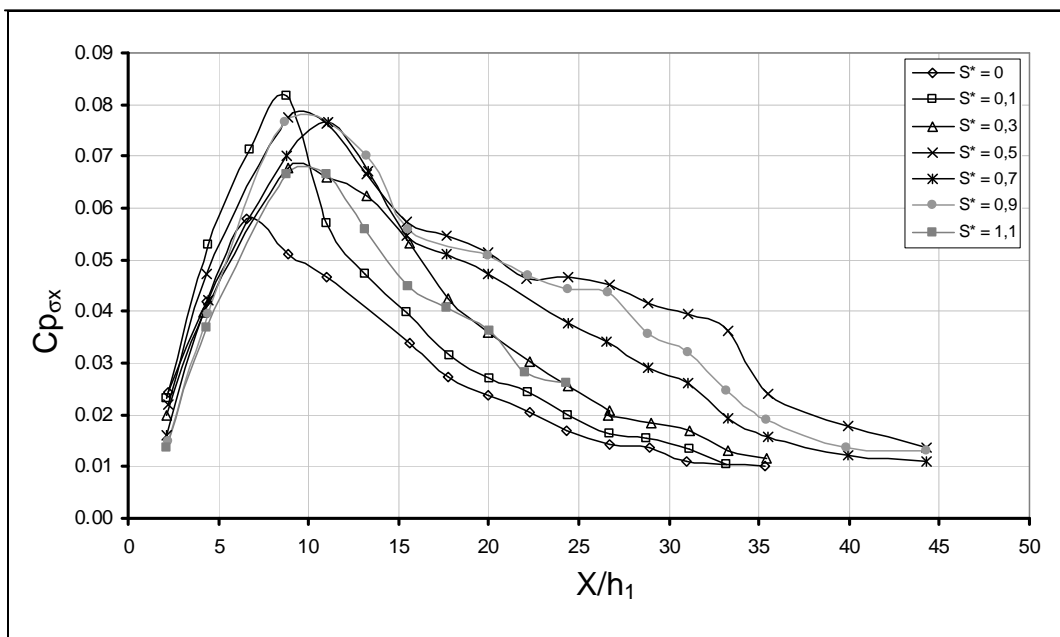


Figura 3.16 - Variação do coeficiente de flutuação de pressão (Cp_{ox}) em função do S^* e da posição relativa para ressaltos formados a jusante de uma comporta ($Fr_1 = 3$). Lopardo et al. (2004b).

Marques et al. (2004a), utilizando dados obtidos por diferentes pesquisadores, apresentam a tendência do comportamento do Cp_{ox} e da posição relativa de máxima flutuação de pressão para o ressalto hidráulico livre em função do número de Froude (Fr_1), ajustando expressões para o comportamento verificado (Figura 3.17 e Figura 3.18).

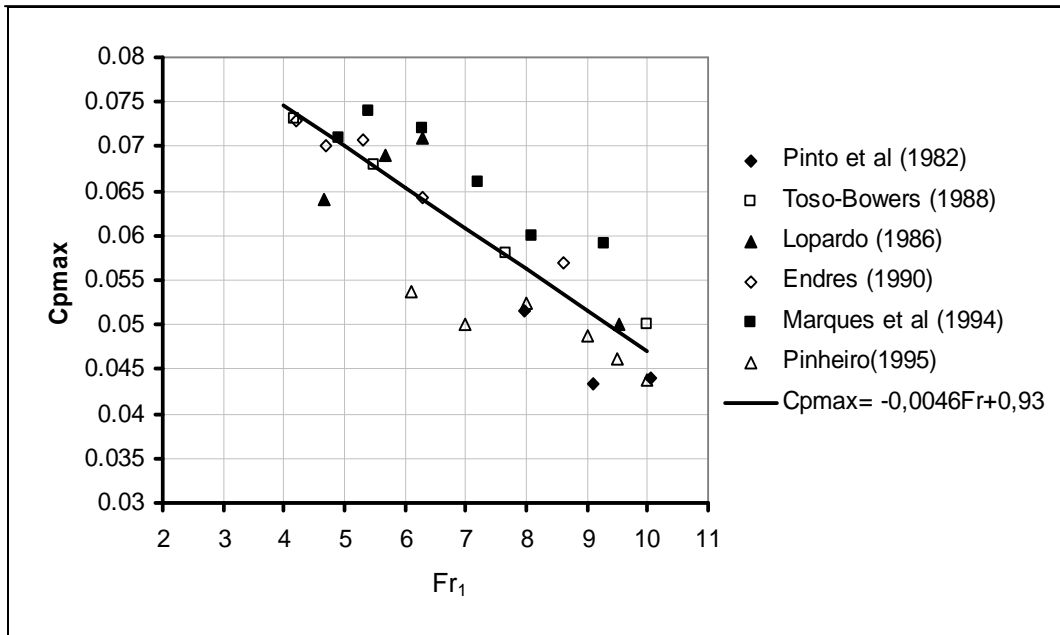


Figura 3.17 – $C_{p_{max}}$ máx em função do número de Froude (Fr_1), Marques et al. (2004a).

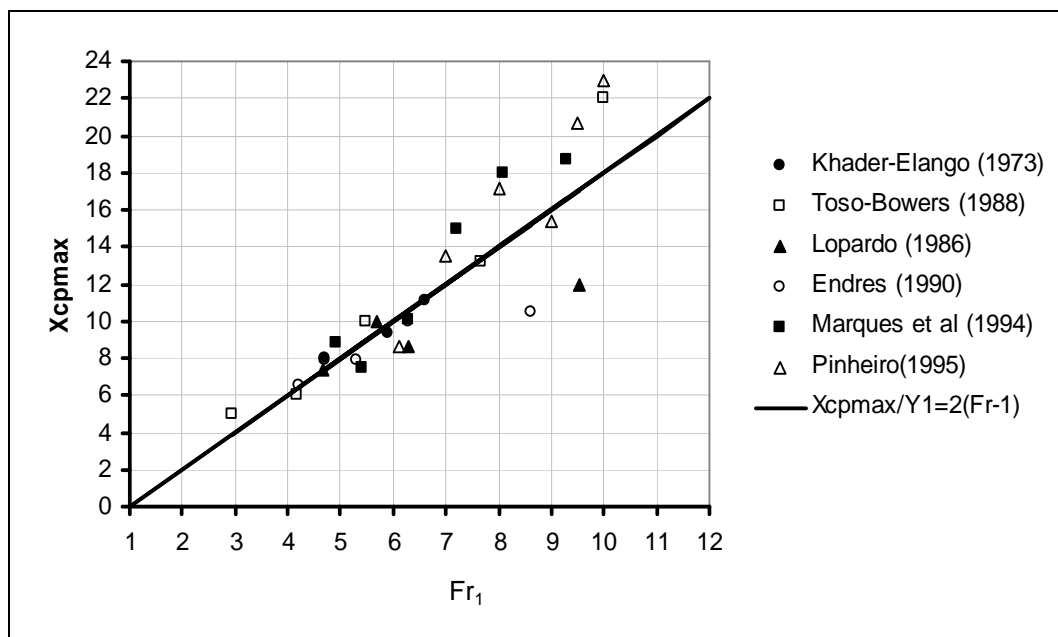


Figura 3.18 - Posição relativa (X/h_1) ao $C_{p_{ox}}$ máx em função do Fr_1 . Marques et al. (2004a).

Trierweiler (2006) estudou a flutuação em ressalto hidráulico livre e submergido formado a jusante de uma comporta para números de Froude (Fr_1) entre 3,97 e 5,88 e fatores de submersão (S) entre 1,0 e 1,40. A Figura 3.19 apresenta a comparação dos resultados do autor com os dados de Lopardo *et al.* (2004a) e Lopardo *et al.* (2004b). Observa-se que os resultados de Trierweiler (2006) apresentam o mesmo padrão de comportamento, porém com

valores um pouco superiores. Segundo o autor, o afogamento de uma bacia de dissipação acarretaria o aumento do $Cp_{\sigma x}$ junto ao fundo, em posições mais a jusante, entretanto, não afetaria da mesma forma a região de montante do ressalto. O aumento do Fr_1 produziria flutuações de pressão maiores junto ao final da bacia de dissipação.

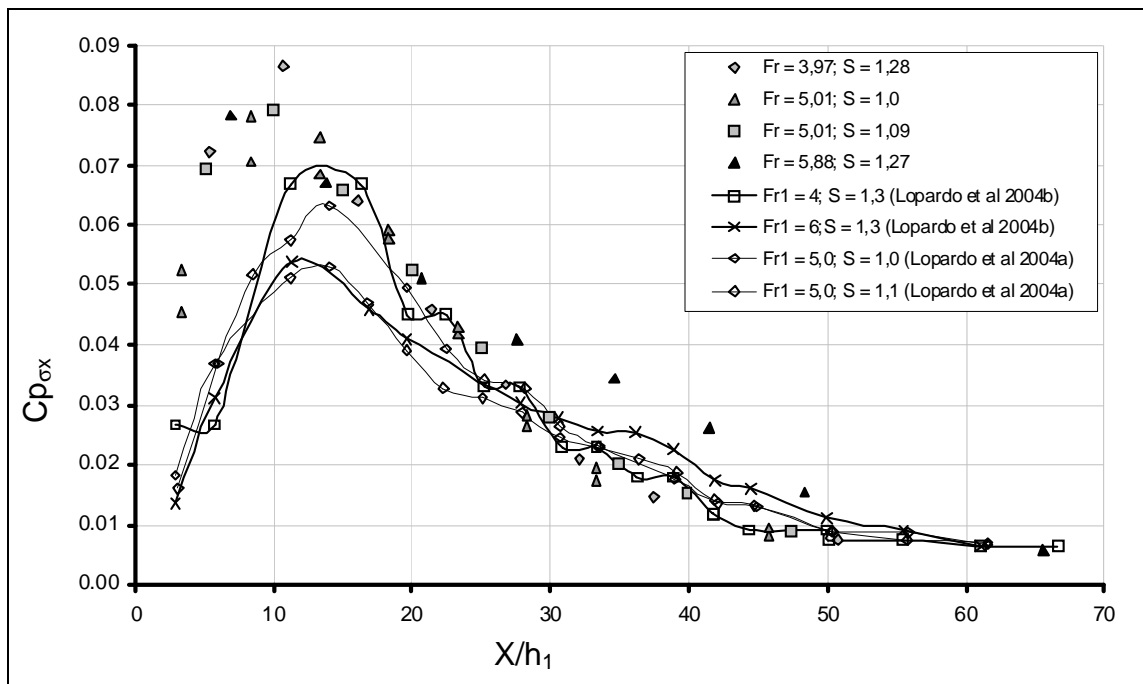


Figura 3.19 - Comparação entre os valores do $Cp_{\sigma x}$ obtidos por Trierweiler (2006) com os dados de Lopardo et al. (2004a) e Lopardo et al. (2004b), em função de Fr_1 e da posição relativa (X/h_1).

Serão descritos a seguir mais alguns trabalhos, que se julga importante sobre o comportamento das flutuações de pressão no ressalto hidráulico.

Lopardo *et al.* (1984) apresentaram resultados experimentais da correlação espaço-temporal das flutuações de pressão em ressalto livre, analisando a influência da posição longitudinal dentro do ressalto e do número de Froude na entrada. Os resultados mais importantes a respeito das correlações cruzadas instantâneas foram:

- entre dois pontos dentro do ressalto, distanciados longitudinalmente, o valor diminui segundo uma função de seno governada por essa distância;
- o valor cresce quando são comparados pontos mais a jusante do início do ressalto e com o aumento do número de Froude na entrada;

- é geralmente maior nas zonas em que as amplitudes de flutuação são menores.

Fiorotto e Rinaldo (1991) realizaram trabalho experimental mostrando a estrutura estatística das flutuações de pressão no ressalto hidráulico quanto à relevância na estabilidade de proteção de bacias de dissipação para números de Froude entre 7,0 e 9,5. São apresentados os valores máximos de pressão e sua correlação espacial e temporal. As conclusões mais relevantes em relação às correlações cruzadas são:

- a correlação longitudinal dos valores de pressão não é homogênea, dependendo da posição X;
- a correlação transversal dos valores de pressão é homogênea.

Os autores também apresentaram análises da flutuação de pressão para determinar a máxima subpressão atuando sob a laje de uma bacia de dissipação por ressalto hidráulico.

Pinheiro (1995) realizou medições de pressão no interior do ressalto hidráulico com número de Froude variando de 6,00 a 10,00. Uma de suas conclusões ressalta que é possível a existência de pressões negativas (em relação à atmosférica) em uma distância de até 70 % do comprimento do ressalto, sendo que a sua magnitude é mais elevada na zona em que ocorrem os maiores desvios padrões.

Marques *et al.* (1996) sugerem novas relações adimensionais para representar a pressão média e a flutuação de pressão (equações 3.7 e 3.8). Elas permitem reagrupar resultados de diferentes escoamentos e caracterizar os pontos de interesse no ressalto hidráulico, conforme apresentado na Tabela 3.9.

Tabela 3.9 - Descrição dos principais pontos de interesse no ressalto (Marques *et al.*, 1996).

Símbolo	Descrição dos pontos de interesse	$X/(Y_2-Y_1)$
$L_{\sigma_{max}}$	maior flutuação de pressão	1,75
L_d	descolamento	4,00
L_r	final do rolo	6,00
L_n	onde termina a influência do ressalto hidráulico	8,00

$$\frac{P_x - h_1}{h_2 - h_1} = \text{função} \left(\frac{X}{h_2 - h_1} \right) \quad (\text{Eq. 3.7})$$

$$\frac{\sigma_x \cdot h_2}{H_t \cdot h_1} = \text{função} \left(\frac{X}{h_2 - h_1} \right) \quad (\text{Eq. 3.8})$$

O parâmetro σ_x quantifica a flutuação de pressão, sendo que a variação dessa grandeza está associada ao mecanismo de perda de carga no interior do ressalto, e H_t representa a perda de carga total atribuída ao ressalto. A relação entre as alturas conjugadas representa o número de Froude na entrada do ressalto (Fr_1) através da equação de Bélanger.

Marques *et al.* (1999), com o intuito de possibilitar a uniformização dos dados de pressões no fundo de bacias de dissipação provenientes de protótipos ou de modelos, seja ressalto livre ou afogado, sugerem a inclusão de um fator de submersão (S) dado pela equação 3.9:

$$S = \frac{T_w}{Y_2} \quad (\text{Eq. 3.9})$$

Onde:

S = fator de submersão.

Teixeira (2003) apresenta ajustes para a pressão média e desvio padrão para o ressalto hidráulico livre a jusante de um vertedouro (equações 3.10 a 3.12) utilizando os resultados apresentados por Marques *et al.* (1996) e Marques *et al.* (1999).

Ajuste para a pressão média (P_x):

$$\Psi = -0,015 \cdot \Gamma^2 + 0,237 \cdot \Gamma + 0,07 \quad (\text{Eq. 3.10})$$

Onde:

$$\Psi = \left(\frac{P_x - h_1}{h_2 - h_1} \right) / \left(\frac{T_w}{h_2} \right); \quad \Gamma = \frac{X}{h_2 - h_1}$$

Ajuste para o desvio padrão (σ_x):

$$\Omega = -0,159 \cdot \Gamma^2 + 0,573 \cdot \Gamma + 0,19 \quad (\text{Ajuste A}) \quad (\text{Eq. 3.11})$$

válida para $0 \leq \Gamma < 2,4$, sendo:

$$\Omega = 0,017 \cdot \Gamma^2 - 0,281 \cdot \Gamma + 1,229 \quad (\text{Ajuste B}) \quad (\text{Eq. 3.12})$$

válida para $2,4 \leq \Gamma \leq 8,25$.

Onde:

$$\Omega = \frac{\sigma_x}{H_t} \cdot \frac{h_2}{h_1} \cdot \frac{h_2}{T_w}; \quad \Gamma = \frac{X}{h_2 - h_1}$$

A partir das relações adimensionais e dos ajustes propostos, Teixeira (2003) conseguiu uniformizar os valores de pressão média e de desvio padrão obtidos por diversos pesquisadores, conforme pode ser visualizado pela Figura 3.20 e pela Figura 3.21.

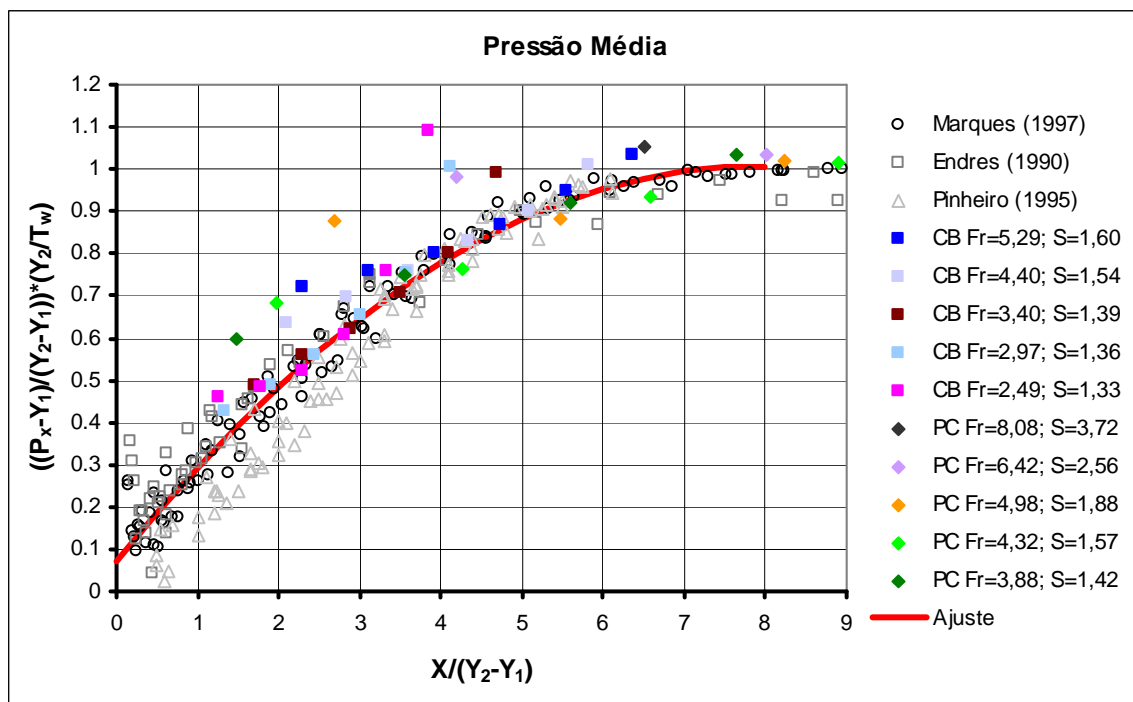


Figura 3.20 - Pressão média adimensionalizada em função da posição relativa ao início do ressalto hidráulico e das alturas conjugadas.

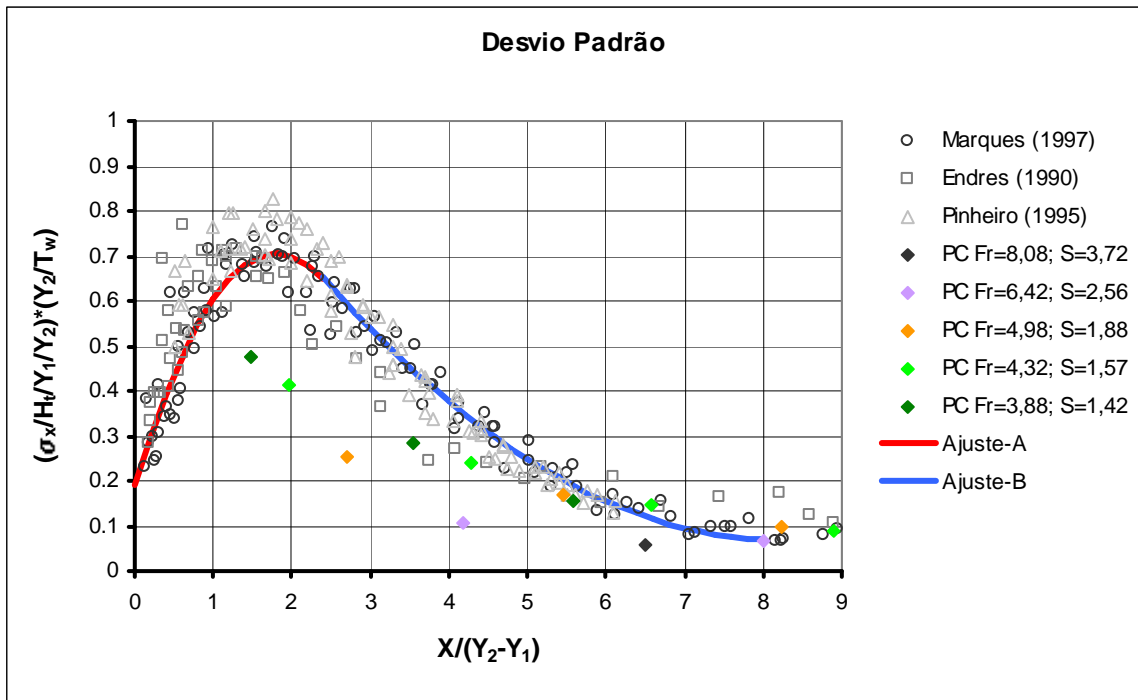


Figura 3.21 - Desvio padrão adimensionalizado em função da posição relativa ao início do ressalto hidráulico, das alturas conjugadas e da perda de energia.

O autor também apresenta uma metodologia para a determinação dos valores extremos de pressão em bacias de dissipação por ressalto hidráulico, através da determinação do coeficiente estatístico de distribuição de probabilidade (N) - equação 3.13.

$$N = a \cdot \left(\frac{X}{h_2 - h_1} \right)^2 + b \cdot \left(\frac{X}{h_2 - h_1} \right) + c \quad (\text{Eq. 3.13})$$

Onde:

N = coeficiente estatístico de distribuição de probabilidade;

a , b e c = coeficientes da equação correspondentes a cada probabilidade de ocorrência (ver Tabela 3.10).

Com a determinação do coeficiente estatístico para diferentes probabilidades de ocorrência, foi possível obter uma estimativa dos valores de pressão (a partir da expressão 3.14 que considera o desenvolvimento da pressão média e do desvio padrão) que podem ocorrer ao longo de uma bacia de dissipação por ressalto

hidráulico. Cabe salientar que o método proposto para determinação dos valores de pressão somente pode ser aplicado para o trecho plano da estrutura de dissipação.

$$P_{x\%} = P_x \pm N \cdot \sigma_x \quad (\text{Eq. 3.14})$$

Sendo:

$P_{x\%}$ = probabilidade de a pressão ser inferior ou igualada em um ponto X do ressalto.

Tabela 3.10 - Valores dos coeficientes a, b e c da equação 3.13.

Probab./Coef.	a	b	c
99%	0,0317	-0,3598	3,3008
95%	0,0171	-0,1393	1,8624
90%	0,0048	-0,0325	1,2695
10%	0,0032	-0,045	-1,0869
5%	0,013	-0,1323	-1,3061
1%	0,0512	-0,448	-1,6601

O método proposto para previsão dos valores de pressão mostrou resultados bastante satisfatórios. Para probabilidades inferiores a 5 % e também para posições próximas ao ponto de tangência, o método pode ser utilizado, mas com precaução.

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

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

Wiest *et al.* (2005) apresentam a variação do coeficiente estatístico de distribuição de probabilidade (N) para ressaltos hidráulicos submersos, utilizando dados do modelo reduzido (escala 1:50) da UHE Porto Colômbia existente no LAHE/Furnas. Os autores verificaram que, para o caso estudado, o coeficiente (N) apresenta a tendência de se manter constante ao longo de todo comprimento para ressaltos afogados, comportamento que não ocorre em ressaltos hidráulicos livres.

Trierweiler (2006) estudou o campo de pressões em ressalto hidráulico (livre e submerso) formado a jusante de uma comporta, propondo uma metodologia que

permitiu estimar os valores de pressões extremas associadas a diferentes probabilidades de ocorrência e graus de submergência. Os resultados apresentaram diferenças inferiores a 15 % (relativas) na maior parte dos ensaios, sendo as mais elevadas na zona de máxima flutuação de pressão. A Figura 3.22 apresenta uma comparação entre os ajustes propostos e os dados experimentais para as probabilidades de 1 % e 99 % ($Fr_1 = 4,55$ e $S = 1,30$).

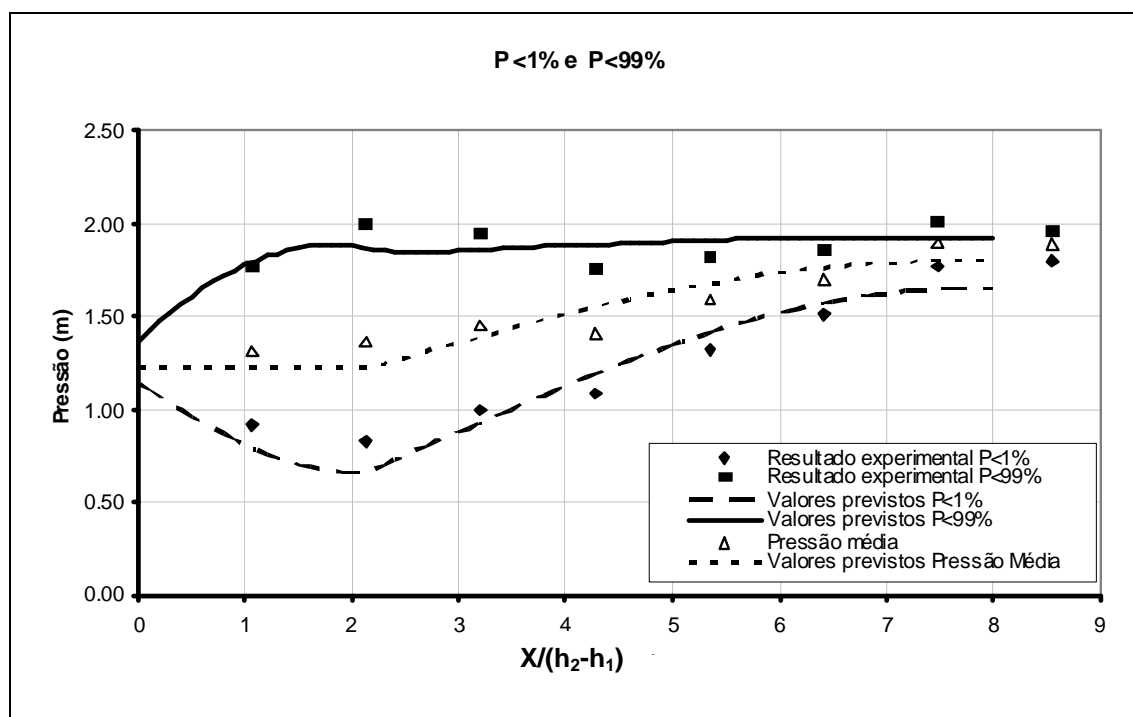


Figura 3.22 - Comparação entre os ajustes propostos para as pressões com probabilidades de 1 % e 99 % e os dados experimentais verificados para o ressalto hidráulico com $Fr_1 = 4,55$ e $S = 1,30$.

Wiest (2008), a partir de medições de pressão instantânea no modelo reduzido da UHE Porto Colômbia (escala geométrica de 1:50), analisou o comportamento da distribuição longitudinal da pressão média, do desvio padrão e do coeficiente de distribuição de probabilidade para escoamentos com diferentes graus de submergência (S) para vazões entre 1000 e 8000 m^3/s equivalentes ao protótipo. Utilizando a proposta de Teixeira (2003) para ressalto livre, o autor criou uma metodologia para estimar os valores de pressão para diferentes probabilidades de ocorrência para ressaltos a jusante de vertedouros, considerando os efeitos atribuídos pela submergência.

Cerezer (2008), a partir da Teoria dos Valores Extremos (TVE) apresentou uma metodologia para estimativa dos valores extremos de pressão com diferentes

probabilidades de ocorrência, utilizando os dados obtidos no protótipo da UHE Porto Colômbia (vazões de 1000, 2000, 3000 e 4000 m³/s). Os modelos de previsão obedecem a Distribuição Generalizada de Valores Extremos (GEV). As suas principais conclusões foram:

- a distribuição Generalizada de Valores Extremos (GEV) é adequada para estudar as pressões máximas e mínimas que ocorrem nas bacias de dissipação por ressalto hidráulico;
- as maiores variações para as probabilidades de ocorrência inferiores ou iguais a 1% e 5% são referentes à tomada de pressão situada próximo da concordância entre a bacia de dissipação e o trecho curvo do vertedouro. Com exceção dessa tomada de pressão, a grande maioria dos valores apresenta variações inferiores à $\pm 10\%$;
- Observa-se que as maiores diferenças para as probabilidades de ocorrência inferior ou igual a 95% e 99% estão situadas na região que corresponde a maior flutuação de pressão, sendo os valores estimados sempre maiores que os valores medidos.

3.6 Aeração no ressalto hidráulico

A incorporação de ar ao escoamento influencia fortemente o desempenho das estruturas hidráulicas, fazendo deste fenômeno um assunto de extrema importância para a engenharia hidráulica. Particularmente no ressalto hidráulico, são escassos os trabalhos que visaram descrever os efeitos da entrada de ar. A seguir serão apresentados alguns resultados dos principais estudos sobre a aeração nesse tipo de escoamento.

Rajaratnam (1962) realizou estudos experimentais com o objetivo de medir a concentração média de ar (C_a) no ressalto hidráulico. Os ensaios foram realizados para número de Froude na entrada do ressalto (Fr_1) entre 3,90 e 8,05. O autor concluiu que a concentração média de ar cresce rapidamente no início do ressalto até um valor máximo, próximo à posição adimensional $(X/h_2) = 1$, e, de forma brusca, passa a decrescer na direção do seu final. A expressão 3.15 apresenta a definição do autor para a C_a no ressalto hidráulico. Já a expressão 3.16 apresenta a

máxima concentração média de ar ($C_{a\max}$) ao longo do ressalto hidráulico. A Figura 3.23 mostra a concentração média de ar, adimensionalizada pela máxima concentração de ar, em relação à posição de aeração relativa ao início do ressalto hidráulico, adimensionalizada pelo comprimento de aeração (equação 3.17), para diferentes números de Froude.

$$C_a = \left(\frac{V_a}{V_a + V_w} \right) \quad (\text{Eq. 3.15})$$

Onde:

C_a = concentração média de ar ao longo do ressalto;

V_a = volume de ar;

V_w = volume de água.

$$C_{a\max} = 0,0255 \cdot (Fr_1 - 1,5) \quad (\text{Eq. 3.16})$$

Sendo:

$C_{a\max}$ = máxima concentração média de ar ao longo do ressalto.

$$\frac{L_a}{Y_2} = 3,5 \sqrt{(Fr_1 - 1,5)} \quad (\text{Eq. 3.17})$$

Sendo:

L_a = comprimento de aeração (valor medido desde o início do ressalto até o final da zona de bolhas).

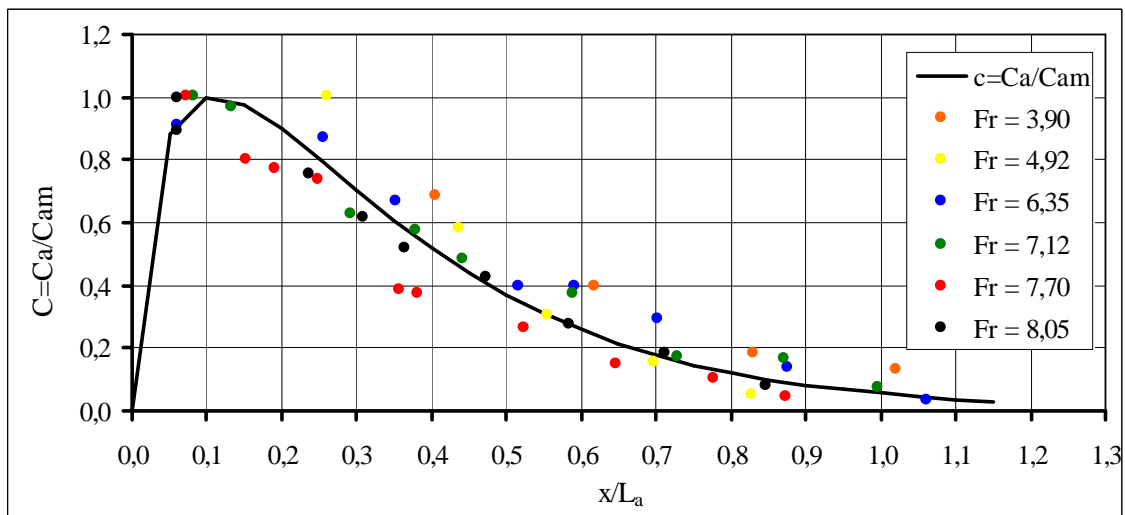


Figura 3.23 - Distribuição da concentração média de ar ao longo do ressalto.

Fonte: Rajaratnam (1962).

A partir dos resultados apresentados na Figura 3.23, foi proposta uma equação de ajuste aos dados, conforme pode ser visualizado pela equação 3.18.

$$\frac{C_a}{C_{a \max}} = \sqrt{9X_a e^{(1-9X_a)}} \quad (\text{Eq. 3.18})$$

Onde:

X_a = posição de aeração relativa ao início do ressalto.

Hoyt e Sellin (1989) sugerem que o ressalto hidráulico é um exemplo extremo de um escoamento de camada de mistura com o fluido mais pesado e rápido em baixo (água), e o mais leve e lento acima (ar). Através de formulações de camada de mistura, procuraram estimar a entrada de ar no ressalto hidráulico.

Mossa e Tolve (1998) apresentaram uma metodologia de análise da concentração média de ar no ressalto hidráulico a jusante de uma comporta através de técnicas de visualização, com ensaios na faixa de números de Froude (Fr_1) entre 6,0 e 8,0.

Marques *et al.* (2004c), através do conhecimento do comportamento médio da superfície livre e das pressões médias junto ao fundo de uma bacia de dissipação por ressalto hidráulico, propõem uma metodologia para estimar a região de separação entre o escoamento aerado e o escoamento não-aerado.

Chanson (2006) definiu que o aprisionamento de ar e os mecanismos de quebra de bolhas são dominados pela tensão superficial do escoamento implicando semelhança pelo número de Weber (We). Demonstrou também que os efeitos de escala contribuem para uma menor aeração na região do rolo, podendo afetar a dissipação de energia.

Boller (2006) apresenta as concentrações médias de ar (C_a) para número de Froude (Fr_1) igual a 4,2 em função da posição relativa ao comprimento da aeração (L_a). O autor divide o ressalto em 3 regiões distintas:

- região de aeração ($0,00 \leq X/L_a \leq 0,06$);
- região estável ($0,06 \leq X/L_a \leq 0,52$); e
- região de desaeração ($0,52 \leq X/L_a \leq 1,00$).

A Figura 3.24 apresenta os resultados dos coeficientes de aeração encontrados pelo pesquisador em função do comprimento de aeração.

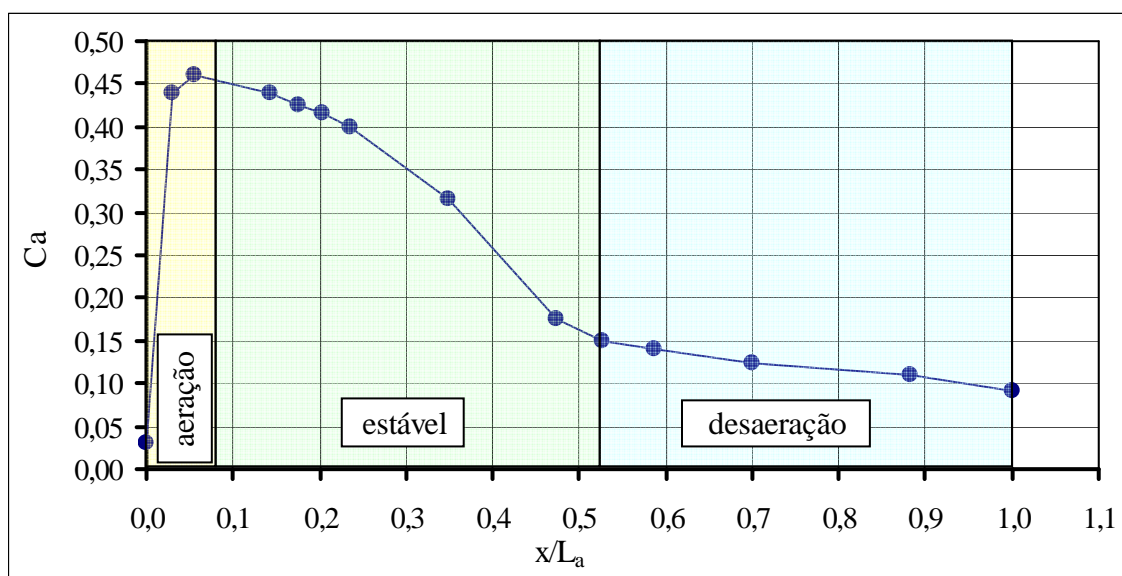


Figura 3.24 - Distribuição da concentração média de ar ao longo do ressalto hidráulico para $Fr_1 = 4,2$.

Fonte: Boller (2006).

Pela análise da Figura 3.24, observa-se que os resultados de Boller (2006) têm a mesma tendência dos resultados apresentados por Rajaratnam (1962).

Apresentam-se de forma mais corrente na bibliografia estudos relativos à modelação de sistemas de aeradores, onde é visto que a modelação em escala de Froude acarreta “efeitos de escala” ligados diretamente à reprodução do mecanismo de arraste de ar. Nesse sentido destacam-se os trabalhos de Pinto e Neidert (1982) e Pinto *et al.* (1984). Os referidos autores desenvolveram, para os aeradores do vertedouro de Foz do Areia (localizado no Rio Iguaçu, Brasil), estudos em modelos reduzidos nas escalas 1:50, 1:30, 1:15 e 1:8, sendo esses dois últimos seccionais. A conclusão dos estudos foi que os modelos nas escalas 1:15 e 1:8 representam, de forma bastante coerente, os valores observados no protótipo. Nesse caso, para que os efeitos de escala sejam, se não eliminados, pelo menos atenuados, são necessários modelos “grandes”, com escalas geométricas entre 1:10 e 1:15.

METODOLOGIA

4 Metodologia experimental

Nesta pesquisa foram analisados dados de pressão instantânea medidos em bacia de dissipação por ressalto hidráulico. As principais amostras estudadas consistem em dados obtidos diretamente na UHE Porto Colômbia (protótipo), no ano de 1996, e também nos modelos físicos bidimensionais (escalas geométricas 1:32, 1:50 e 1:100) montados, durante o desenvolvimento do presente estudo, no Laboratório de Hidráulica Experimental de Furnas (LAHE/FURNAS). Através da caracterização dessas amostras, a principal meta visa à análise dos efeitos de escala na previsão dos valores extremos de pressões junto ao fundo de bacias de dissipação por ressalto hidráulico em sistemas reais.

4.1 UHE Porto Colômbia

A Usina Hidrelétrica de Porto Colômbia, pertencente a Furnas Centrais Elétricas S.A., está situada no Rio Grande, na divisa dos estados de Minas Gerais e São Paulo. Em 1996, Furnas Centrais Elétricas S.A. realizou obras de recuperação na bacia de dissipação de energia por problemas ocasionados principalmente por cavitação nos blocos de dissipação. Cabe salientar que parte das informações apresentadas neste sub-item foram retiradas de Ortiz, *et. al.* (1998) e ICOLD/CBDB (2002).

Através de uma iniciativa do Laboratório de Hidráulica Experimental de Furnas (LAHE), com participação do COPPE (Centro de Pós-Graduação de Engenharia da UFRJ), da Comissão de Hidráulica da ABRH (Associação Brasileira de Recursos Hídricos), da FCTH (Fundação Centro-Tecnológico de Hidráulica) e do CEHPAR (Centro de Hidráulica Professor Parigot de Souza) foram instalados 07 transdutores de pressão ao longo da bacia de dissipação, conforme pode ser visualizado pela Figura 4.1 e pela Figura 4.2. A coleta de dados foi realizada para as vazões de 500, 1000, 2000, 3000 e 4000 m³/s. A intenção mais importante foi fornecer informações que pudessem contribuir para os estudos sobre os efeitos de escala nos valores de flutuações de pressão entre protótipos e modelos.

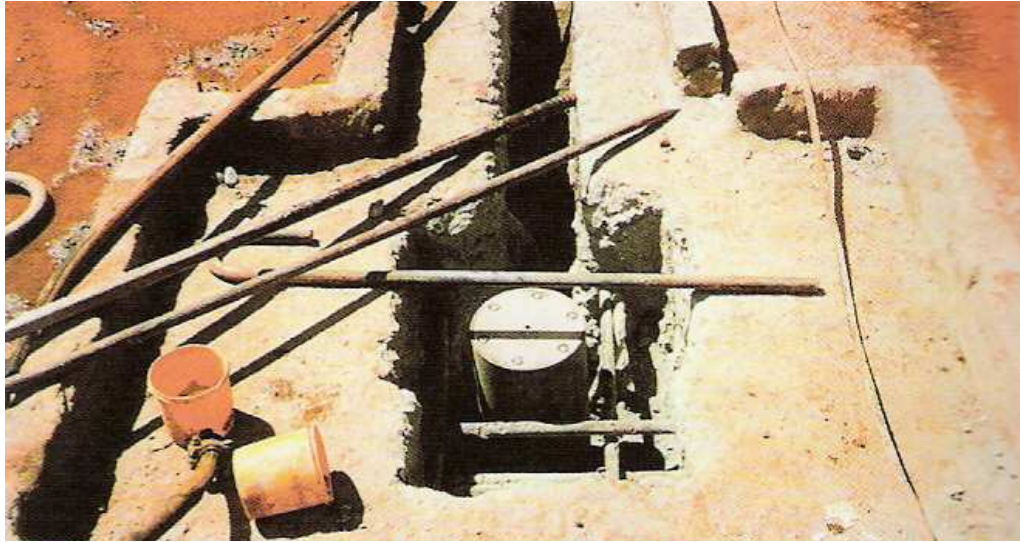


Figura 4.1 - Instalação dos transdutores de pressão na bacia de dissipação da UHE Porto Colômbia.
ICOLD/CBDB (2002).

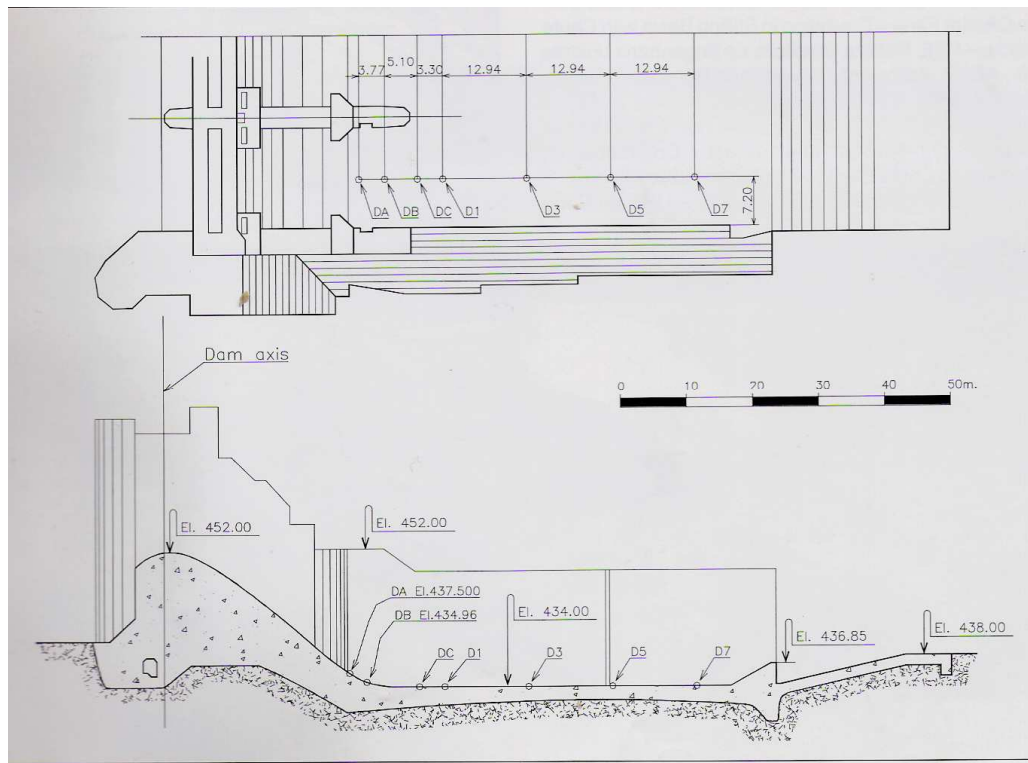


Figura 4.2 - Perfil longitudinal da UHE Porto Colômbia e posição das tomadas de pressão.
ICOLD/CBDB (2002).

A estrutura de extravasamento da UHE Porto Colômbia é composta por um vertedouro controlado e pela bacia de dissipação. O vertedouro possui nove vãos, cada um com 15 m de largura livre. Os vãos são separados por pilares com 3,5 m de espessura, resultando numa largura total da estrutura de controle de 163 m.

As amostras de pressão instantânea foram coletadas com uma frequência de 100 Hz durante um período variável entre 20 minutos e 45 minutos, em 07 tomadas de pressão, sendo 03 na concordância do trecho curvo do vertedouro, e 04 no trecho plano da bacia. Nessa pesquisa foram contempladas as vazões de 1000, 2000, 3000 e 4000 m³/s. O número de Froude na entrada do ressalto (Fr_1) varia entre 5,23 e 9,35. Cabe lembrar que o número de Froude para escoamentos a jusante de vertedouros é inversamente proporcional à vazão. A Figura 4.3 apresenta a formação do ressalto hidráulico para a vazão de 4000 m³/s ($Fr_1 = 5,23$).



Figura 4.3 - Ressalto hidráulico formado na UHE de Porto Colômbia para a vazão de 4000 m³/s.

Os transdutores de pressão foram instalados faceados junto ao fundo da bacia no centro do vão extremo direito do vertedouro. Não foi possível a instalação dos equipamentos no vão central por dificuldades de acesso. Os sensores possuíam uma faixa de operação de zero a 50 m.c.a. A incerteza na medição dos instrumentos era da ordem de 0,25 % do fundo de escala, que corresponde a $\pm 0,125$ m.c.a.

Foi verificada uma constância dos dados em todas as amostras, independentemente do tempo de aquisição. Sendo assim, optou-se para o desenvolvimento desta Tese a utilização dos valores presentes nos 15 minutos centrais de cada uma das amostras de pressão.

As condições hidráulicas da campanha de medições de pressão instantânea na UHE Porto Colômbia estão dispostas na Tabela 4.1, apresentada a seguir.

Tabela 4.1 - Condições hidráulicas da campanha de medições realizada na UHE Porto Colômbia.

Q (m ³ /s)	q (m ² /s)	Fr ₁	N _m (m)	N _j (m)	S
1000	7.41	9.35	465.79	443.81	2,58
2000	14.82	7.01	465.77	444.32	1,86
3000	22.22	5.95	465.88	444.68	1,58
4000	29.63	5.23	465.77	445.15	1,44

Onde:

N_m = nível de montante;

N_j = nível de jusante;

S = corresponde ao grau de submersão proposto por Marques *et al.*, (1999).

4.2 Modelo físico reduzido na escala 1:100

O modelo reduzido da UHE Porto Colômbia na escala 1:100 (inicialmente tridimensional) foi construído em 1992, no LAHE. Um dos principais objetivos que motivou a execução desse modelo foi estudar o efeito da nova configuração da bacia de dissipação sem os blocos amortecedores e soleira terminal da bacia.

Com o objetivo de tornar possível a análise comparativa dos resultados com os dados coletados no protótipo e nos modelos reduzidos foi realizada a adaptação do seu *layout* para uma estrutura bidimensional (sem a influência da tridimensionalidade do escoamento). São representados os 09 vãos do vertedouro com comportas, a bacia de dissipação e a soleira terminal (*end-sill*). As medições de pressão instantânea foram realizadas no meio do vão central com o intuito de minimizar os efeitos decorrentes dos muros laterais (medida esta que não foi possível ser adotada no protótipo).

Foram coletadas amostras de pressão com frequência de 100 Hz e 500 Hz, durante um período de 15 minutos, em 10 tomadas de pressão, sendo 3 na concordância do trecho curvo do vertedouro, e 7 na parte plana do fundo da bacia. Nesta pesquisa foram utilizadas apenas as 7 tomadas de pressão (dA, dB, dC, d1, d3, d5 e d7) que correspondem às dispostas no protótipo. As demais tomadas foram analisadas com o intuito de verificar a tendência dos resultados encontrados. Os

transdutores tinham faixa de trabalho de $-0,5$ a $1,0$ m.c.a, e a precisão era de $0,1\%$, ou seja, $\pm 0,0015$ m no modelo, equivalente a $\pm 0,15$ m.c.a. no protótipo.

A Figura 4.4 apresenta, de forma esquemática, a posição das tomadas de pressão no modelo reduzido na escala 1:100. A Figura 4.5 apresenta a formação do ressalto hidráulico para a vazão equivalente ao protótipo de 4000 m³/s.

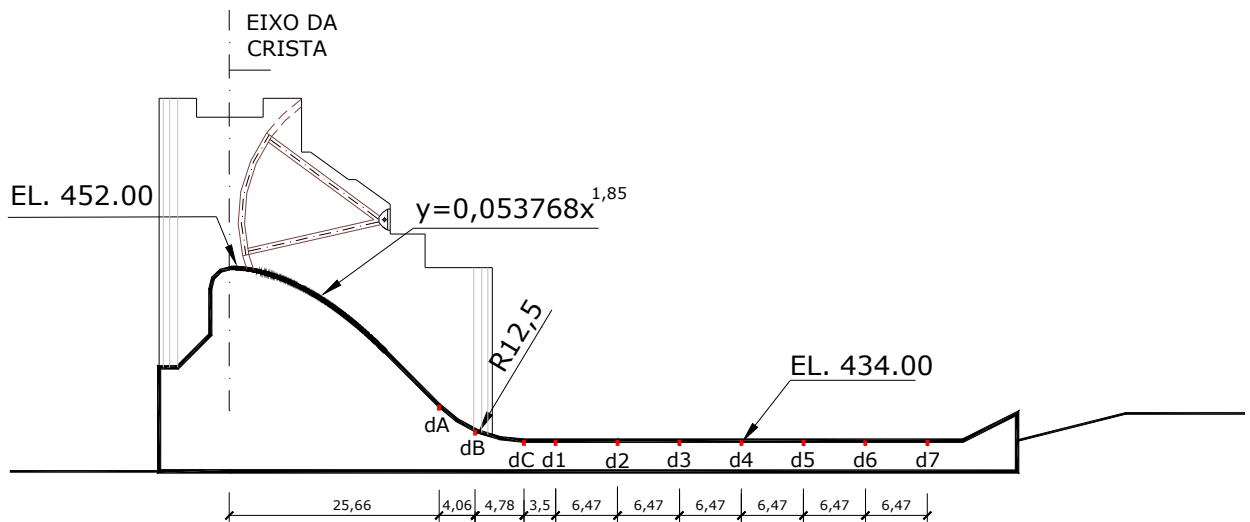


Figura 4.4 - Posição das tomadas de pressão no modelo reduzido na escala 1:100.



Figura 4.5 - Ressalto hidráulico formado no modelo 1:100 para a vazão equivalente ao protótipo de 4000 m³/s.

Os ensaios realizados contemplaram as vazões equivalentes a 1000 , 2000 , 3000 , 4000 , 6000 e 8000 m³/s, equivalentes ao protótipo, para diferentes graus de submersão (S). Para os estudos de verificação do efeito de escala, foram utilizados apenas os valores de pressão referentes às condições de protótipo para

as vazões de 1000, 2000, 3000 e 4000 m³/s, segundo a Tabela 4.1. Os dados obtidos para as demais submergências serão utilizados para a determinação da posição de início do ressalto e para validar o método de previsão de valores extremos proposto por Wiest (2008), realizado com base nos resultados do modelo reduzido na escala 1:50.

4.3 Modelo físico reduzido na escala 1:50

O modelo geométrico na escala 1:50 da UHE Porto Colômbia foi construído, em 1987, no LAHE. A execução desse modelo teve como finalidade inicial estudar o *layout* original da bacia de dissipação com os blocos amortecedores e soleira terminal da bacia, em virtude de problemas de cavitação e erosão evidenciados em investigações realizadas no protótipo.

No modelo são representados praticamente 3 vãos do vertedouro controlado, a bacia de dissipação e a soleira terminal (*end-sill*). As medições de pressão instantânea foram realizadas no meio do vão central do modelo.

Assim como no modelo na escala 1:100, foram coletadas amostras de pressão com frequência de 100 Hz e 500 Hz, durante um período de 15 minutos, em 10 tomadas de pressão. Nesta pesquisa foram utilizadas apenas as 7 tomadas de pressão (dA, dB, dC, d1, d3, d5 e d7) que correspondem às dispostas no protótipo. As demais tomadas foram analisadas com o intuito de verificar a tendência dos resultados encontrados. No modelo em escala 1:50, os transdutores tinham faixa de trabalho de -0,5 a 1,0 m.c.a, e a precisão era de 0,1 %, ou seja, $\pm 0,0015$ m no modelo, equivalente a $\pm 0,075$ m.c.a. no protótipo.

A Figura 4.6 apresenta a posição das tomadas de pressão no modelo reduzido na escala 1:50 (a localização das tomadas é a mesma do modelo 1:100). A Figura 4.7 apresenta a formação do ressalto hidráulico para a vazão equivalente ao protótipo de 4000 m³/s.

Os ensaios realizados contemplaram as vazões equivalentes a 1000, 2000, 3000, 4000, 6000 e 8000 m³/s no protótipo para diferentes graus de submergência (S). Como no modelo 1:100, para os estudos de verificação do efeito de escala, foram utilizados apenas os valores de pressão referentes às condições de protótipo para as vazões de 1000, 2000, 3000 e 4000 m³/s, segundo a Tabela 4.1.

Os dados obtidos para as demais submergências serão utilizados para a determinação da posição de início do ressalto.

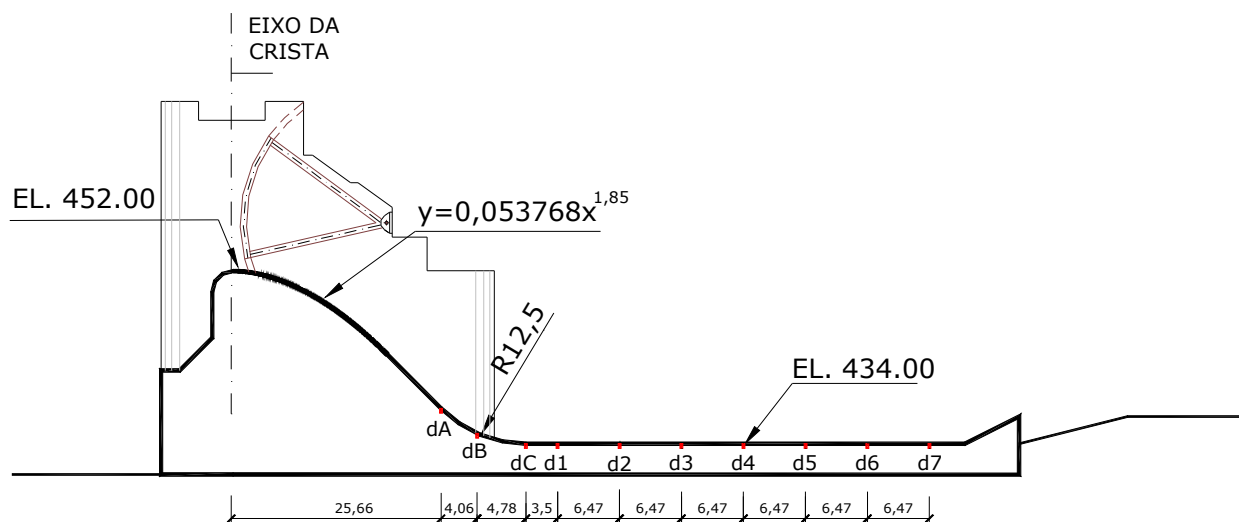


Figura 4.6 - Posição das tomadas de pressão no modelo reduzido na escala 1:50.



Figura 4.7 - Ressalto hidráulico formado no modelo 1:50 para a vazão equivalente ao protótipo de 4000 m³/s.

4.4 Modelo físico reduzido na escala 1:32

O modelo físico na escala 1:32 da UHE Porto Colômbia foi construído, em 2007, no LAHE. A construção desse modelo estava inserida no projeto de P&D *Análise da Macroturbulência em Dissipadores por Ressalto Hidráulico*. São representados, no modelo, 1 vão e outros dois meios vãos do vertedouro, a bacia de dissipação e a soleira terminal (*end-sill*). As medições de pressão instantânea foram realizadas no meio do vão central (inteiro) do modelo.

Foram coletadas amostras de pressão com frequência de 100 Hz e 500 Hz durante um período de 15 minutos, em 12 tomadas de pressão. O modelo 1:32 possui mais duas tomadas de pressão em relação aos modelos nas escalas 1:100 e 1:50, denominadas d1.5 e d2.5, e estão localizadas exatamente entre as tomadas d1 e d2 e d2 e d3, respectivamente. Assim como nos modelos nas escalas 1:100 e 1:50, foram utilizadas apenas as 7 tomadas de pressão (dA, dB, dC, d1, d3, d5 e d7) que correspondem às dispostas no protótipo. As demais tomadas foram analisadas com o intuito de verificar a tendência dos resultados encontrados. No modelo na escala 1:32, os transdutores tinham faixa de trabalho de -0,5 a 1,0 m.c.a, e a precisão era de 0,1 %, ou seja, $\pm 0,0015$ m no modelo, equivalente a $\pm 0,048$ m.c.a. no protótipo.

A Figura 4.8 apresenta, de forma esquemática, a posição das tomadas de pressão no modelo reduzido na escala 1:32. A Figura 4.9 apresenta a formação do ressalto hidráulico para a vazão equivalente ao protótipo de 4000 m³/s.

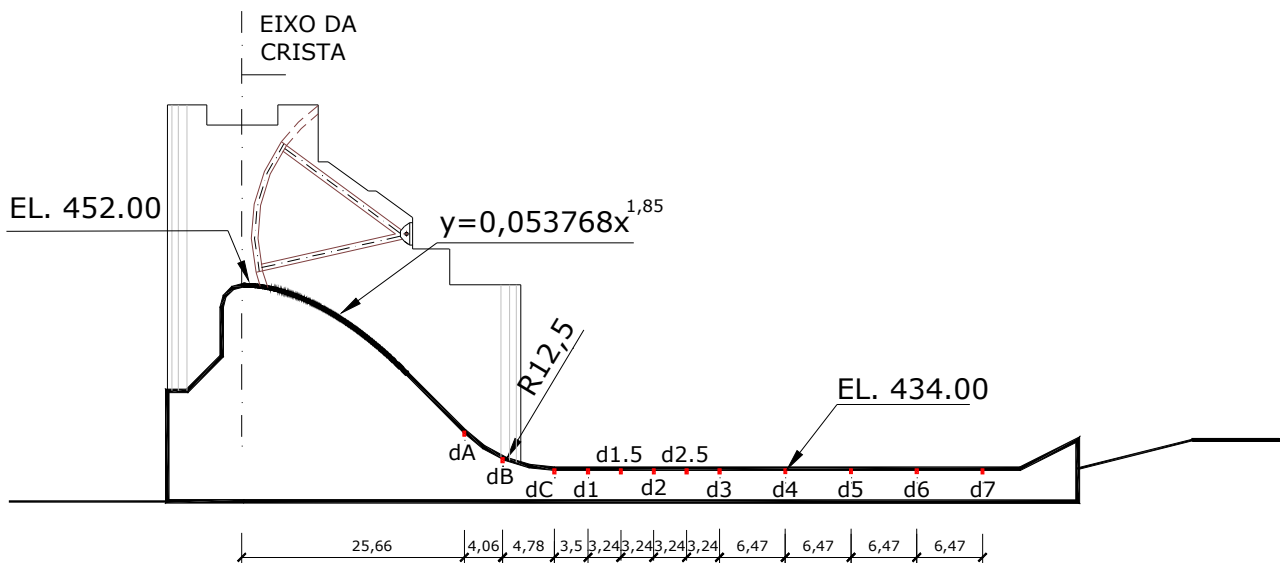


Figura 4.8 - Posição das tomadas de pressão no modelo reduzido na escala 1:32.

Os ensaios realizados contemplaram as vazões equivalentes a 1000, 2000, 3000, 4000, 6000 e 8000 m³/s no protótipo para diferentes graus de submersão (S). Para os estudos de verificação do efeito de escala, como no modelo na escala 1:100, foram utilizados apenas os valores de pressão referentes às condições de protótipo para as vazões de 1000, 2000, 3000 e 4000 m³/s, segundo a Tabela 4.1. Os dados obtidos para as demais submersões serão

utilizados para a determinação da posição de início do ressalto e para validar o método de previsão de valores extremos proposto por Wiest (2008), realizado com base nos resultados do modelo reduzido na escala 1:50.

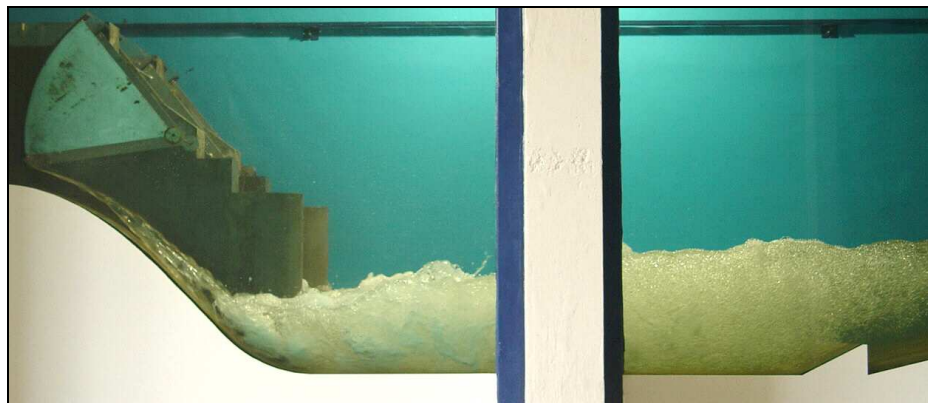


Figura 4.9 - Ressalto hidráulico formado no modelo 1:32 para a vazão equivalente ao protótipo de 4000 m³/s.

4.5 Resumo comparativo entre protótipo e modelos

Na Tabela 4.2 é apresentada, de forma resumida, as principais características geométricas do protótipo e dos modelos reduzidos nas diferentes escalas.

Tabela 4.2 - Resumo comparativo das características geométricas do protótipo e dos modelos em diferentes escalas.

Características geométricas	Protótipo	Modelos físicos reduzidos		
		Escala 1:100	Escala 1:50	Escala 1:32
Altura da crista do vertedouro (m)	18,00	0,180	0,360	0,563
Número de vãos	09	09	1+2*0,933	1+2*0,5
Largura dos vãos (m)	15,00	0,150	0,300+2*0,280	0,468+2*0,234
Raio de concordância entre o trecho curvo e a bacia (m)	12,50	0,125	0,250	0,391
Largura da bacia (m)	163,00	1,630	1,000	1,150
Comprimento da bacia (m)	45,80	0,458	0,916	1,431
Altura do <i>end-sill</i> (m)	2,85	0,028	0,057	0,089

4.6 Tempo de amostragem e frequência de aquisição

Com base nas amostras de pressões “instantâneas” obtidas no protótipo e nos modelos, foram avaliadas as dispersões dos valores de pressão média e dos valores extremos com a variação de tempos de amostragem e frequências de aquisição. Dessa forma, foram definidos os valores mínimos desses parâmetros que, em trabalhos futuros, poderão contribuir na redução do período de processamento de dados.

4.7 Análise de correlação cruzada

A análise de correlação cruzada entre duas amostras de dados de pressão descreve a dependência geral dos valores de um conjunto de dados em relação ao outro, no domínio do tempo. Essa técnica de análise apresenta a medição do lapso de tempo em que ocorre a influência dos valores que ocorreram em uma tomada de pressão a montante (denominado *lag*) sob as de jusante consideradas.

Foram avaliados os valores de correlação entre as amostras de pressão instantânea considerando duas tomadas (não necessariamente consecutivas) para um mesmo escoamento. Por fim, foi realizada a análise comparativa dos resultados encontrados no protótipo e nos modelos reduzidos.

4.8 Determinação do início do ressalto

Como os ressaltos formados na situação de protótipo são do tipo B, pela classificação de Hager (1988), é necessário determinar a posição de início do ressalto para que se efetuem as análises descritivas e comparativas do comportamento das amostras de pressão. Isso foi efetuado através das medições da linha de água nos modelos aplicando-se a metodologia sugerida por Wiest (2008).

4.9 Análises descritivas e comparativas das amostras de pressão

As análises desenvolvidas ao longo desta pesquisa visaram determinar os possíveis efeitos de escala envolvidos nas medições de pressão em modelos físicos reduzidos, conforme almejado no objetivo principal. Cabe salientar que os dados de pressão obtidos nos modelos reduzidos e no protótipo foram analisados da mesma maneira.

Foram realizadas análises comparativas e descritivas dos valores de pressão média (P_x), de flutuação de pressão (σ_x) e do coeficiente estatístico de probabilidade ($N_{x\%}$), obtidos no protótipo e nos modelos reduzidos nas diferentes escalas, considerando tempo de amostragem de 15 minutos e frequência de aquisição de 100 Hz. Cabe salientar que as análises foram realizadas a partir da comparação dos valores obtidos para cada tomada de pressão, ou seja, foram avaliados pontualmente de maneira a verificar a real diferença dos resultados.

Através da comparação dos resultados do protótipo e dos modelos foram analisados os possíveis efeitos de escala com base nas metodologias propostas por Wiest (2008).

4.10 Modelos teórico-experimentais de previsão de valores extremos

Foram utilizadas as metodologias propostas por Wiest (2008) e Cerezer (2008) para estimar as pressões extremas que ocorrem junto ao fundo de uma bacia de dissipação por ressalto hidráulico a partir dos dados coletados nas diferentes escalas de modelo.

Os dados provenientes dos ensaios realizados na UHE Porto Colômbia foram utilizados para validar os modelos teóricos de previsão dos valores extremos de pressão. As análises comparativas dos resultados dos modelos teórico-experimentais com os valores medidos no protótipo serviram para verificar os possíveis efeitos de escala provocados pela redução no tamanho da estrutura na previsão dos valores extremos de pressão.

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

5 Tempo de amostragem e frequência de aquisição

Parte desta pesquisa se deteve na análise da frequência de aquisição e do tempo de amostragem, visando determinar os mínimos valores que possam ser utilizados sem que as características das amostras sejam alteradas. Este estudo teve como base os dados coletados no protótipo da UHE Porto Colômbia e modelos reduzidos em diferentes escalas. A seguir serão apresentadas as premissas consideradas, sendo válidas tanto para os dados obtidos em protótipo, como também nos modelos em diferentes escalas:

- foram estudadas as vazões de 1000, 2000, 3000 e 4000 m³/s (equivalentes ao protótipo). Os parâmetros analisados foram P_x , $P_{0,1\%}$, $P_{1\%}$, $P_{5\%}$, $P_{10\%}$, $P_{90\%}$, $P_{95\%}$, $P_{99\%}$ e $P_{99,9\%}$;
- as tomadas analisadas foram a posição de máxima flutuação de pressão, posição equivalente ao final do rolo e posição equivalente ao final do ressalto. Estes valores equivalem às posições adimensionalizadas em torno da posição 2, 4 e 8, respectivamente, conforme sugerido por Marques, *et al.* (1996);
- para efeito de comparação, foram consideradas as amostras com duração de 15 minutos e frequência de aquisição de 100 Hz como as que apresentam os valores de referência;
- como forma de verificar se os valores de pressão possuem diferença significativa em relação ao valor correspondente ao tempo de amostragem de 15 minutos e frequência de 100 Hz, foi determinada uma faixa correspondente a uma dispersão natural dos dados, em função da escala da estrutura e da faixa de erro do equipamento de medição (transdutor de pressão) sobre a amostra citada (15 minutos e 100 Hz);
- os tempos mínimos de amostragem foram sempre iguais ou superiores a 1 minuto. Para cada situação foi selecionado sempre o maior dos tempos considerando as envoltórias superiores e inferiores definidas pela dispersão natural dos dados.

As freqüências de aquisição e tempos de amostragem analisadas nesta pesquisa estão descritas na Tabela 5.1, apresentada a seguir.

Tabela 5.1 - Subdivisões de freqüência de aquisição e tempos de amostragem.

Freqüência de aquisição (Hz)	Tempo da amostra (minutos)	Quantidade de amostras (por freqüência)
100, 50 e 10	15,0	01
	7,5	02
	5,0	03
	3,0	05
	1,0	15

Para demonstrar a metodologia de análise utilizada nesse estudo serão apresentados os resultados obtidos para os dados de protótipo na seguinte condição: vazão de 4000 m³/s e amostra de dados da tomada mais próxima do ponto de máxima flutuação de pressão (posição adimensional em torno de 2), conforme Marques *et al.* (1999). Essa condição de escoamento foi escolhida por representar a maior dispersão dos resultados (situação mais desfavorável).

5.1 Protótipo

Na Tabela 5.2 são apresentados os valores da pressão média e das pressões extremas (em metros de coluna de água) para a tomada “d₁” (vazão de 4000 m³/s) considerando a amostra com duração de 15 minutos e freqüência de aquisição igual a 100 Hz.

Tabela 5.2 – Valores de pressão obtidos para a tomada “d₁” considerando amostra de 15 minutos e freqüência de aquisição igual a 100 Hz (protótipo, Q = 4000 m³/s).

P _x	P _{0,1%}	P _{1%}	P _{5%}	P _{10%}	P _{90%}	P _{95%}	P _{99%}	P _{99,9%}
6,91	1,04	2,62	3,90	4,52	9,41	10,22	11,80	13,54

Na Figura 5.1 à Figura 5.3 são apresentados, respectivamente, os valores da pressão média, da pressão com 1 % e da pressão com 99 % de probabilidade de ocorrência para diferentes tempos de amostragem. Nessas Figuras são apresentadas as envoltórias superiores e inferiores que representam a variabilidade

dos dados frente à duração das amostras. Nesta pesquisa, é considerada uma dispersão aceitável (natural) como sendo a faixa de erro do equipamento de medição (considerando a faixa de operação do equipamento utilizado em cada uma das estruturas). No caso do protótipo, o erro do equipamento de medição é de $\pm 0,125$ m.

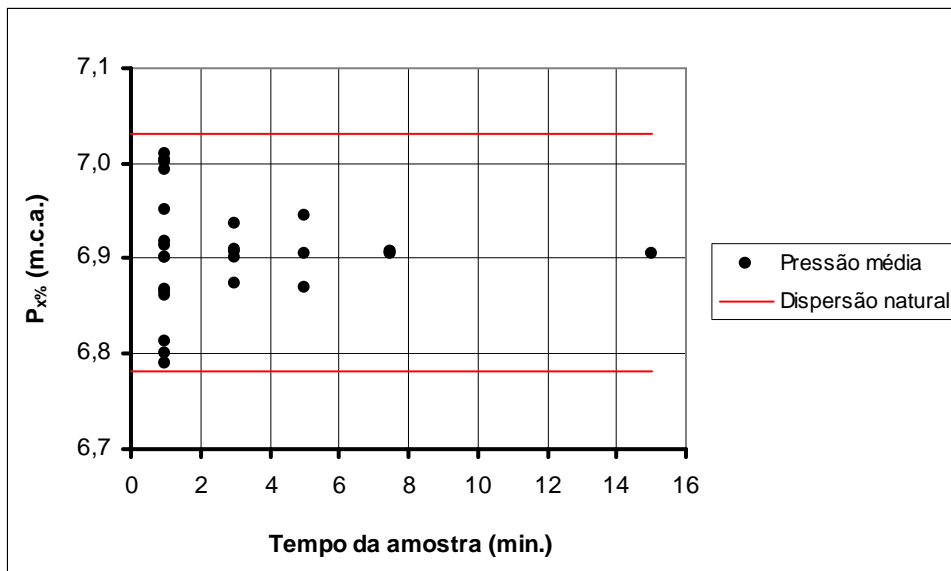


Figura 5.1 - Valores da pressão média em função do tempo de amostra (protótipo, tomada "d₁", Q = 4000 m³/s).

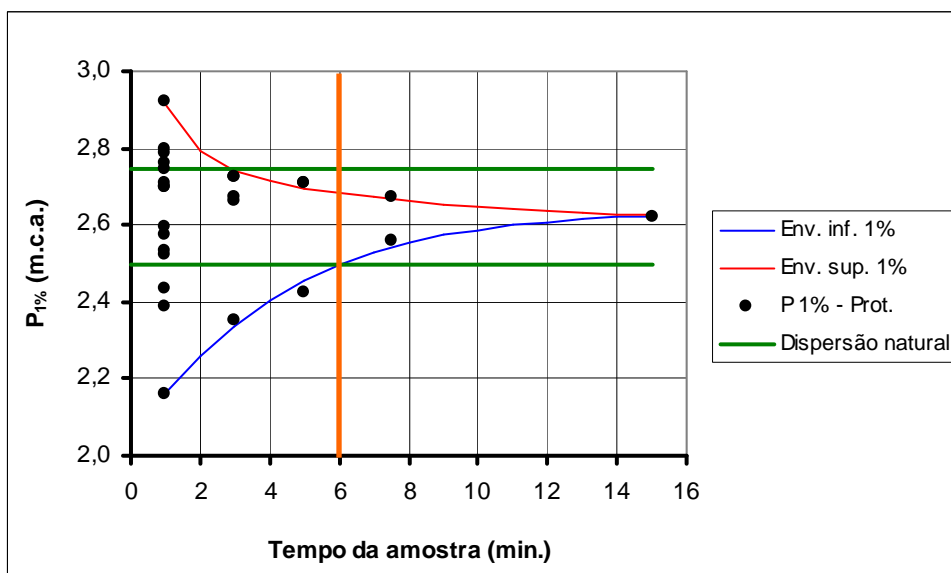


Figura 5.2 - Valores da pressão com 1% de probabilidade em função do tempo de amostra (protótipo, tomada "d₁", Q = 4000 m³/s).

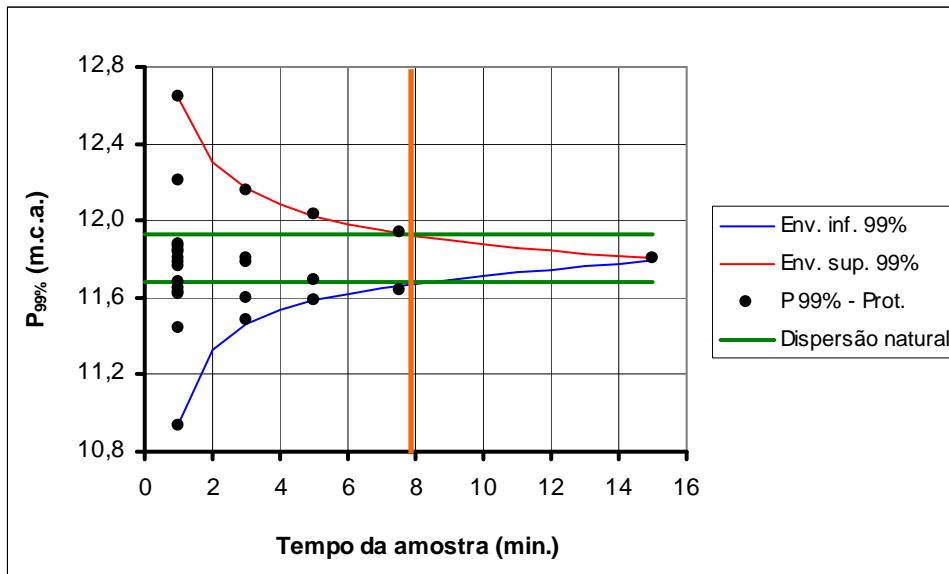


Figura 5.3 - Valores da pressão com 99 % de probabilidade em função do tempo de amostra (protótipo, tomada “d₁”, Q = 4000 m³/s).

Na Figura 5.1 nota-se que na P_x qualquer um dos tempos de aquisição representam os valores de referência, já para a P_{1%} e P_{99%} os tempos que mínimos que reproduzem os resultados dentro da dispersão aceitável correspondem a 6 minutos e 8 minutos, respectivamente, como é destacado pelas linhas na cor laranja nas Figuras 5.2 e 5.3.

Na Tabela 5.3 podem ser vistos os tempos mínimos de amostragem para os valores de pressão média e de pressão com diferentes probabilidades de ocorrência considerando a frequência de aquisição de 100 Hz. Observa-se que os tempos de amostragem são maiores para as probabilidades extremas.

Tabela 5.3 - Tempos mínimos de amostragem (em minutos) para frequência de aquisição igual a 100 Hz (protótipo, tomada “d₁”, Q = 4000 m³/s).

Parâmetros	P _x	P _{0,1%}	P _{1%}	P _{5%}	P _{10%}	P _{90%}	P _{95%}	P _{99%}	P _{99,9%}
Tempos (min.)	1,0	6,0	6,0	4,0	4,0	6,0	6,0	8,0	10,0

A Tabela 5.4 a seguir ilustra os tempos mínimos de amostra variando a frequência de aquisição. Consideraram-se os dados obtidos para a vazão de 4000 m³/s (situação de protótipo), tomada d₁, que correspondem aos valores mais desfavoráveis entre todas as vazões e tomadas de pressão. Observa-se que para as probabilidades menores, à medida que a frequência de aquisição diminui, o tempo

mínimo de aquisição aumenta; entretanto, para as probabilidades maiores, este fato já não ocorre, os tempos de aquisição são praticamente os mesmos. Para a pressão média não existe alteração no tempo de aquisição em função da frequência.

O procedimento descrito no item anterior foi realizado para cada uma das situações de escoamento e em cada uma das estruturas (protótipo e modelos reduzidos em diferentes escalas). Dessa forma, as figuras apresentadas anteriormente têm a intenção de ilustrar os procedimentos analíticos realizados.

Tabela 5.4 - Frequência mínima de aquisição e tempo mínimo de amostragem para diferentes probabilidades (protótipo, tomada "d₁", Q = 4000 m³/s).

Frequência (Hz)	Tempos mínimos (minutos)				
	P _x	P _{0,1%}	P _{1%}	P _{99%}	P _{99,9%}
100	1,0	6,0	6,0	8,0	10,0
50	1,0	8,0	6,0	8,0	10,0
10	1,0	11,0	8,0	9,0	10,0

5.2 Modelos físicos reduzidos

O procedimento utilizado na análise dos dados de protótipo (conforme item 5.1) foi também implementado com as amostras obtidas nos modelos reduzidos. Os resultados, para a vazão de 4000 m³/s (que representa a situação mais desfavorável), estão apresentados no Anexo A. Cabe salientar que para todas as escalas de modelo (1:100, 1:50 e 1:32), assim como já fora feito para o protótipo, foram analisadas todas as situações de escoamento (vazões de 1000, 2000, 3000 e 4000 m³/s). A partir de uma análise global das amostras obtidas nas estruturas montadas no laboratório pode-se concluir:

- foram analisadas as amostras de dados coletadas com frequência de 500 Hz. Observou-se que os resultados apresentam um comportamento idêntico aos obtidos a partir da frequência de 100 Hz.
- considerando a frequência de aquisição igual a 100 Hz, os tempos mínimos de amostragem dos valores de pressão, independentemente da frequência de aquisição, são maiores para os valores extremos. Esse comportamento é o mesmo constatado nas amostras coletadas no protótipo.

- na análise que contemplou a variação da frequência de aquisição (foram estudadas amostras com frequências de 100, 50 e 10 Hz), observa-se o mesmo tipo de comportamento encontrado no protótipo. Para se obter os valores das pressões extremas da mesma ordem da amostra de referência (obtidos com tempo de 15 minutos e frequência de 100 Hz), o tempo de aquisição deve ser maior à medida que a frequência de aquisição diminui. Outro fato constatado é que a variação nas pressões extremas (máximas e mínimas) obtidas nos modelos, de um modo geral, é menor que as encontradas nos dados de protótipo.

5.3 Comparação dos resultados

A Tabela 5.5 e a Figura 5.4 apresentam, para a vazão de 4000 m³/s, um resumo dos tempos mínimos de amostragem para coleta de dados de pressão em bacias de dissipação por ressalto hidráulico em função da frequência de aquisição e da escala da estrutura. Nota-se que para uma mesma frequência, não há uma diferença significativa dos tempos em função da dimensão dos modelos. No entanto, devido ao conjunto de dados obtidos com uma frequência de 10 Hz englobar um número reduzido de valores (por exemplo, em uma amostra de 10 minutos tem-se apenas 6000 valores), sugere-se limitar a frequência de aquisição de valores de pressão instantânea em estruturas tipo bacia de dissipação em 50 Hz.

De acordo com as análises efetuadas recomenda-se que em estudos de laboratório que visam à determinação do campo de pressões em bacias de dissipação por ressalto hidráulico, as amostras sejam coletadas com frequência de 50 Hz e duração de 10 minutos (valores mínimos).

Tabela 5.5 - Tempos mínimos de aquisição para coleta de dados de pressão em bacias de dissipação em função da escala da estrutura e das frequências de aquisição.

Frequência (Hz)	Protótipo	Modelo 1:32	Modelo 1:50	Modelo 1:100
	Tempos mínimos de aquisição (minutos)			
100	11,0	9,0	8,0	6,0
50	10,0	9,0	8,0	10,0
10	10,0	10,0	9,0	12,0

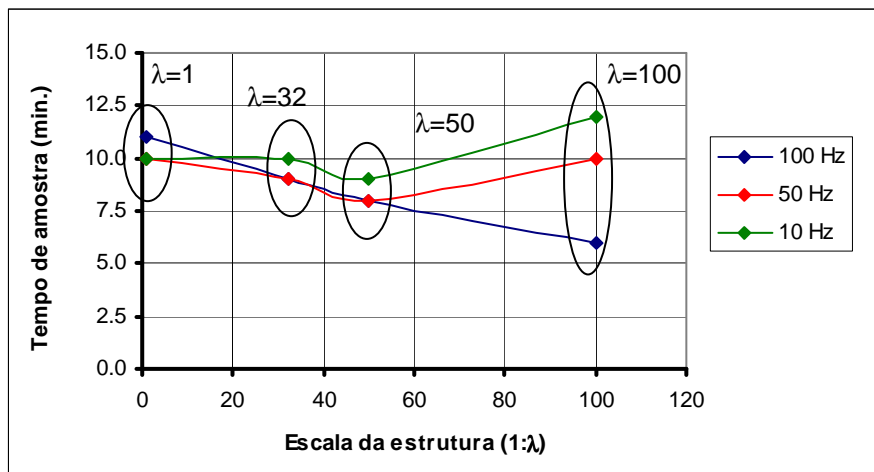


Figura 5.4 - Tempos mínimos de amostragem em função da escala da estrutura e das frequências de aquisição.

6 Correlação cruzada entre as tomadas de pressão

A análise de correlação cruzada entre duas amostras de dados de pressão descreve a dependência geral dos valores de um conjunto de dados em relação ao outro, no domínio do tempo. Esta técnica de análise apresenta a medição do lapso de tempo (denominado *lag*) em que ocorre a influência do escoamento sobre as tomadas de pressão. Neste capítulo será efetuada uma análise com base nos resultados da correlação cruzada visando à identificação de parâmetros mínimos recomendados na etapa da aquisição de dados.

A seguir serão apresentadas as premissas consideradas no presente estudo, que são válidas tanto para os dados obtidos em protótipo como também para os dados obtidos nos modelos em diferentes escalas:

- Foram estudadas as vazões de 1000, 2000, 3000 e 4000 m³/s (equivalentes ao protótipo);
- Os parâmetros analisados foram os lapsos de tempo em que ocorre a influência do escoamento sobre duas tomadas consecutivas e respectivos valores de correlação positiva;
- Os pares de tomadas analisadas referem-se à posição de máxima flutuação de pressão (posição relativa igual a 2), posição equivalente ao final do rolo (posição relativa igual a 4) e posição equivalente ao final do ressalto (posição relativa igual a 8). Nesta pesquisa serão apresentados os resultados referentes à posição 2, por serem os que apresentaram a maior dispersão. Na Tabela 6.1 são apresentadas as distâncias entre as tomadas de pressão analisadas (referentes à posição 2) para o protótipo e modelos reduzidos em diferentes escalas;
- Para efeito de comparação, foram consideradas como referência as amostras com duração de 15 minutos e frequência de aquisição de 100 Hz. Dessa forma foi analisada qual seria a diferença entre os resultados encontrados considerando diferentes frequências de aquisição e tamanhos de amostra.

Tabela 6.1 – Distância entre os pares de tomadas analisadas nos estudos de correlação cruzada para o protótipo e modelos reduzidos em diferentes escalas.

Estrutura	Pares de tomadas analisadas	Distância entre tomadas (m)
Protótipo	d_1-d_3	12,941
Modelo 1:32	d_1-d_3	0,404
Modelo 1:50	d_c-d_1	0,070
Modelo 1:100	d_c-d_1	0,035

As freqüências de aquisição e tempos de amostragem analisados no estudo de correlação cruzada estão descritos na Tabela 6.2 apresentada a seguir. De maneira a elucidar o procedimento adotado, convém salientar que a análise entre duas tomadas de pressão de uma mesma estrutura foi realizada com base em nove sub-amostras (com diferentes freqüências e durações, conforme apresentado na Tabela 6.2) constituídas a partir da amostra original (com freqüência de aquisição igual a 100 Hz e duração de 15 minutos). Esse procedimento será realizado tanto para as tomadas de pressão do protótipo quanto para as dos modelos reduzidos.

Tabela 6.2 - Freqüências de aquisição e tempos de amostragem analisados no estudo de correlação cruzada (válidos para o protótipo e modelos em diferentes escalas).

Freqüência de aquisição (Hz)	Tempo da amostra (minutos)
100, 50 e 10	15,0
	5,0
	1,0

Para demonstrar a metodologia de análise serão utilizados os dados provenientes da vazão de 4000 m³/s (que apresentou as maiores dispersões em relação a amostra de referência) coletados no protótipo. Foi considerada a tomada mais próxima do ponto de máxima flutuação de pressão em conjunto com a amostra de dados da tomada imediatamente à jusante (consecutiva).

6.1 Protótipo

Na Figura 6.1 e Tabela 6.3 são apresentados os valores de correlação cruzada em função do *lag* entre as tomadas “ d_1 ” e “ d_3 ” (situam-se no trecho plano da

bacia) do protótipo (vazão de 4000 m³/s), considerando a amostra com duração de 15 minutos e diferentes freqüências de aquisição.

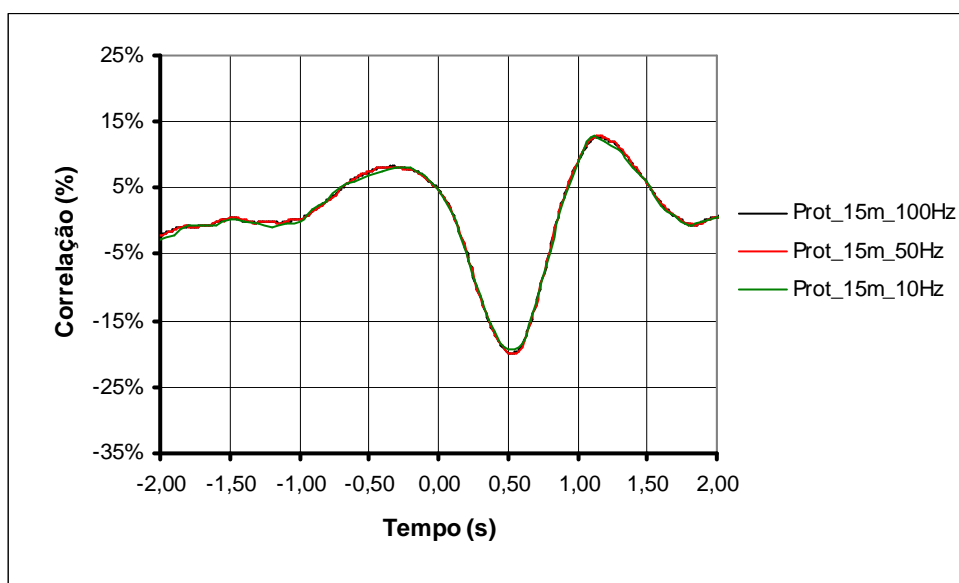


Figura 6.1 – Correlação cruzada para amostras com duração de 15 minutos e diferentes freqüências de aquisição (protótipo, tomadas “d₁ – d₃”, Q = 4000 m³/s).

Tabela 6.3 – Correlação cruzada máxima em função do tempo de pico para amostras com duração de 15 minutos e diferentes freqüências de aquisição (protótipo, tomadas “d₁ – d₃”, Q = 4000 m³/s).

Parâmetros (amostra de 15 min. ¹)	Freqüência de aquisição		
	100 Hz ¹	50 Hz	10 Hz
Correlação máxima positiva (%)	12,75	12,75	12,71
Lag (segundos)	1,16	1,16	1,10

¹ A amostra com duração de 15 minutos e freqüência de aquisição de 100 Hz representa, nesta pesquisa, os valores de referência.

Observa-se pela análise da Figura 6.1 e da Tabela 6.3 que as amostras com duração de 15 minutos e diferentes freqüências de aquisição praticamente apresentam o mesmo desenvolvimento do coeficiente de correlação cruzada. Desta forma, pode-se dizer que a amostra de dados de 15 minutos e freqüência igual a 50 Hz representa os valores obtidos da amostra considerada ideal (amostra de 15 minutos e freqüência 100 Hz).

Na Figura 6.2 e Tabela 6.4 são apresentados os resultados considerando a amostra com duração de 5 minutos e diferentes freqüências de aquisição.

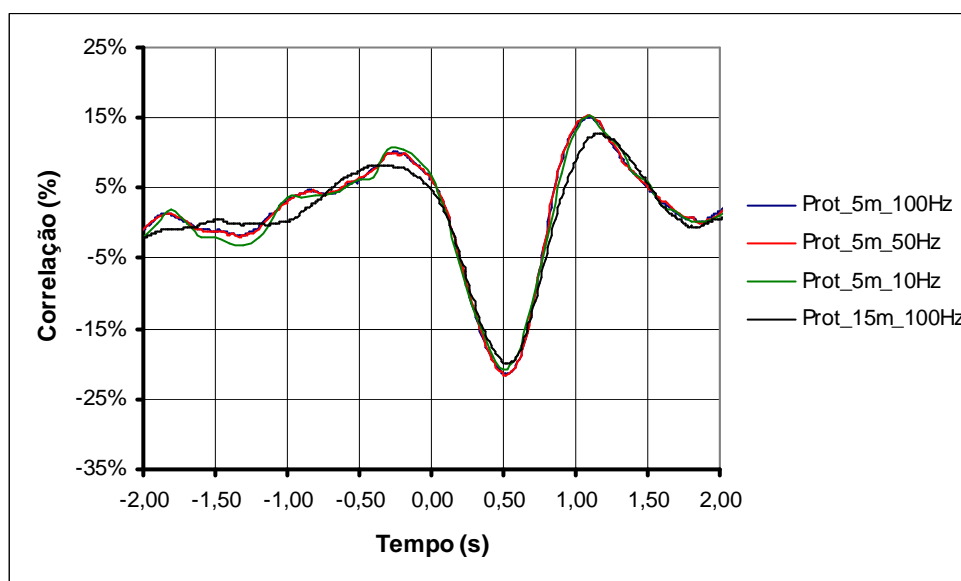


Figura 6.2 - Correlação cruzada para amostras com duração de 5 minutos e diferentes freqüências de aquisição (protótipo, tomadas “ $d_1 - d_3$ ”, $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$).

Tabela 6.4 – Correlação cruzada máxima em função do tempo de pico para amostras com duração de 5 minutos e diferentes freqüências de aquisição (protótipo, tomadas “ $d_1 - d_3$ ”, $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$).

Parâmetros	Amostra de 5 min.			Amostra de 15 min. 100 Hz ¹
	100 Hz	50 Hz	10 Hz	
Correlação máxima positiva (%)	15,12	15,33	15,38	12,75
Lag (segundos)	1,19	1,08	1,10	1,16

¹ A amostra com duração de 15 minutos e freqüência de aquisição de 100 Hz representa, nesta pesquisa, os valores de referência.

De acordo com a Figura 6.2 e com a Tabela 6.4, nenhuma amostra de dados com duração de 5 minutos representa de forma satisfatória os valores obtidos da amostra ideal (amostra de 15 minutos e freqüência 100 Hz).

Na Figura 6.3 e Tabela 6.5 são apresentados os resultados considerando a amostra com duração de 1 minuto e diferentes freqüências de aquisição.

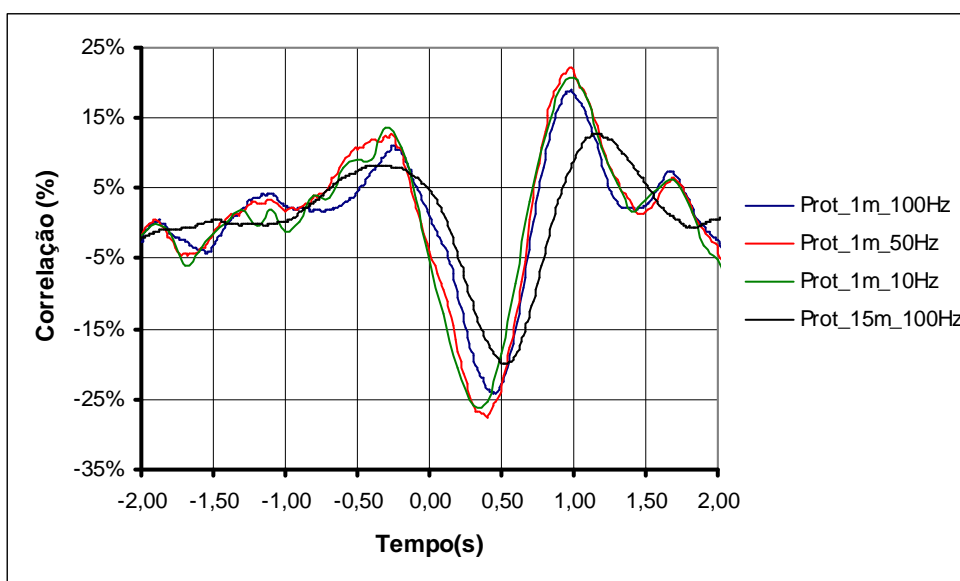


Figura 6.3 - Correlação cruzada para amostras com duração de 1 minuto e diferentes frequências de aquisição (Protótipo, tomadas “ $d_1 - d_3$ ”, $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$).

De acordo com a Figura 6.3 e Tabela 6.5, nenhuma amostra de dados com duração de 1 minuto representa de forma satisfatória os valores da amostra ideal.

Tabela 6.5 – Correlação cruzada máxima em função do tempo de pico para amostras com duração de 1 minuto e diferentes frequências de aquisição (Protótipo, tomadas “ $d_1 - d_3$ ”, $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$).

Parâmetros	Amostra de 1 min.			Amostra de 15 min.
	100 Hz	50 Hz	10 Hz	100 Hz ¹
Correlação máxima (%)	18,99	22,15	20,78	12,75
Lag (segundos)	0,98	0,98	1,00	1,16

¹ A amostra com duração de 15 minutos e frequência de aquisição de 100 Hz representa, nesta pesquisa, os valores de referência.

De acordo com os resultados apresentados anteriormente, a Tabela 6.6 apresenta as mínimas frequências de aquisição para o estudo de correlação cruzada no protótipo da UHE Porto Colômbia, considerando diferentes tempos de amostragem. Cabe salientar que essas condições representam de forma satisfatória os valores de referência

Tabela 6.6 – Frequência mínima de aquisição em função do tempo da amostra para estudos de correlação cruzada (protótipo, tomadas $d_1 - d_3$, $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$).

Tempo da amostra (min.)	Frequência de aquisição (Hz)
15	50
5	-
1	-

6.2 Modelos físicos reduzidos

As análises realizadas para os dados obtidos nos modelos reduzidos para a vazão de $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ estão apresentadas no Anexo B. Cabe salientar que, assim como para o protótipo, foram analisadas todas as situações de escoamento para cada uma das escalas de modelo reduzido (1:100, 1:50 e 1:32). Assim como na análise dos tempos mínimos de amostragem, foram analisadas as amostras de dados coletadas com frequência de 500 Hz. Observou-se também que os resultados apresentam o mesmo comportamento obtido a partir da frequência de 100 Hz.

Os conjuntos de dados que representam os valores obtidos na amostra considerada ideal (tempo de 15 minutos e frequência de aquisição igual a 100 Hz), a partir de cada uma das escalas de modelo analisadas isoladamente, são:

- modelo na escala 1:100: amostra com duração de 1 minuto e frequência de aquisição igual a 100 Hz;
- modelo na escala 1:50: amostra com duração de 1 minuto e frequência de aquisição igual a 50 Hz e;
- modelo na escala 1:32: amostra com duração de 1 minuto e frequência de aquisição igual a 100 Hz.

6.3 Comparação dos resultados

A Tabela 6.7 apresenta um resumo das frequências de aquisição mínimas encontradas em função da escala da estrutura e do tempo de amostragem para se

efetuar análises de correlações entre tomadas de pressão em bacias de dissipação por ressalto hidráulico.

Tabela 6.7 - Freqüências mínimas de aquisição em função da escala da estrutura e das durações das amostras.

Tempo de amostra (min.)	Protótipo	Modelo 1:32	Modelo 1:50	Modelo 1:100
	Freqüências mínimas de aquisição (Hz)			
15	50	50	50	100
5	-	50	50	100
1	-	100	50	100

Baseado nos resultados apresentados na Tabela 6.7 recomenda-se que em estudos de laboratório que visam à determinação das correlações entre os valores de pressão sejam coletadas amostras com freqüência de aquisição igual a 100 Hz. Sugere-se ainda que o tempo mínimo de amostragem seja de 10 minutos, de forma a ficar compatível com o estudo apresentados no capítulo anterior (página 59).

7 Posição do início do ressalto

O ressalto hidráulico que ocorre em canal retangular de fundo horizontal (denominado de ressalto clássico ou ressalto tipo B) é bastante estudado devido a sua simplicidade e aplicabilidade e, por esse motivo, tem suas características relativamente bem conhecidas. Entretanto, em casos práticos, em rressaltos formados a jusante de vertedouros, onde geralmente ele é afogado e parte dele se desenvolve sobre uma superfície inclinada, conforme pode ser visualizado na Figura 7.1, suas características ainda necessitam maior investigação.

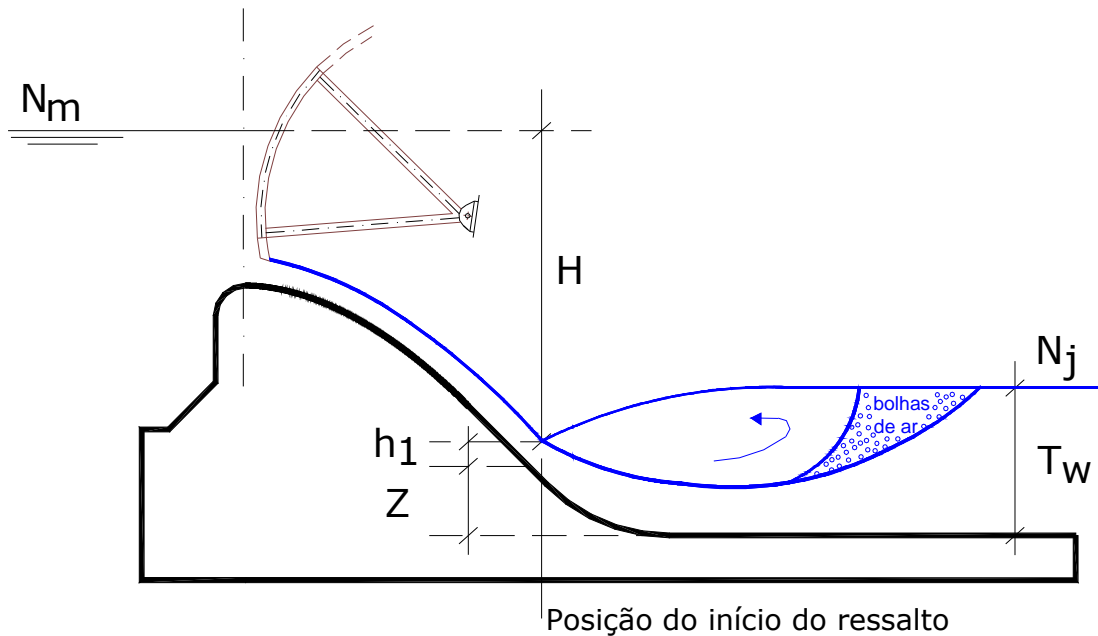


Figura 7.1 – Grandezas pertinentes na análise do ressalto submerso.

Onde:

H = energia na entrada do ressalto hidráulico;

N_j = nível de jusante;

N_m = nível de montante;

Z = altura sobre o plano inclinado em que ocorre o ressalto hidráulico;

h_1 = altura de água na seção de entrada do ressalto hidráulico;

h_2 = altura de água na seção de saída do ressalto hidráulico e;

T_w = altura de água sobre o fundo da bacia a jusante do ressalto hidráulico.

Quando da análise do escoamento no protótipo observou-se que para os quatro escoamentos estudados ocorria o ressalto hidráulico tipo B, segundo

denominação de Hager (1988) - conforme descrito no capítulo referente à *Revisão Bibliográfica*. Para se aplicar a adimensionalização sugerida por Favre *et al.* (1976) e Fiorotto e Rinaldo (1982), torna-se necessário determinar a posição de início do ressalto bem como as condições de entrada do escoamento (altura conjugada rápida, número de Froude, etc.) em função da submergência. Por isto, foram analisadas as condições em cada um dos ensaios conduzidos nos três modelos, a partir do qual foi desenvolvida uma metodologia para determinação da posição de início do ressalto submerso formado a jusante de um vertedouro.

Foram analisadas 06 vazões específicas, com um total de 20 submergências em cada modelo. As características dos ensaios realizados estão apresentadas no Anexo C. Cabe salientar que os valores apresentados são equivalentes ao protótipo da UHE Porto Colômbia.

Para as diversas condições de ensaio analisadas foram determinados, através de medições com ponta linimétrica e/ou através da análise de imagens, o perfil da linha d'água do ressalto, a altura de água sobre o plano inclinado do vertedouro (Z), a altura rápida na entrada do ressalto (h_1) e a lâmina de água sobre a bacia de dissipação no final do ressalto (T_w).

Com esses dados foi possível determinar ajustes para cada uma das escalas de modelo, assim como uma relação geral, mostrando a tendência do comportamento do início do ressalto em função da altura (Z), conforme mostrado na Figura 7.2. A Tabela 7.1 apresenta os ajustes propostos (equações 7.1 a 7.4).

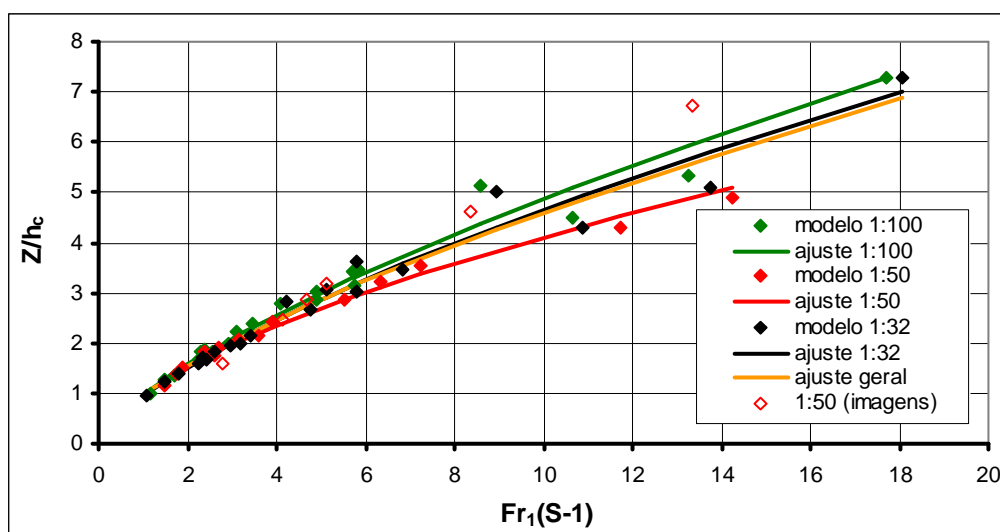


Figura 7.2 - Pontos experimentais e os ajustes propostos para cada uma das escalas de modelo.

Os pontos vazados apresentados na Figura 7.2 representam as situações de escoamento no modelo 1:50 em que não foi possível medir as posições do início do ressalto (Z). Nestes casos as mesmas foram estimadas com base nas imagens registradas durante os ensaios. Cabe salientar que os mesmos não fizeram parte da construção de nenhum dos ajustes.

Tabela 7.1 - Equações para determinação da posição de início do ressalto submerso.

Modelo	Equação
1:100	$\frac{Z}{h_c} = 0,9688 \cdot (Fr_1 \cdot (S - 1))^{0,701} \quad (R^2 = 0,98)$ (Eq. 7.1)
1:50	$\frac{Z}{h_c} = 1,0007 \cdot (Fr_1 \cdot (S - 1))^{0,611} \quad (R^2 = 0,99)$ (Eq. 7.2)
1:32	$\frac{Z}{h_c} = 0,9307 \cdot (Fr_1 \cdot (S - 1))^{0,698} \quad (R^2 = 0,98)$ (Eq. 7.3)
Ajuste geral	$\frac{Z}{h_c} = 0,9607 \cdot (Fr_1 \cdot (S - 1))^{0,680} \quad (R^2 = 0,98)$ (Eq. 7.4)

Onde:

h_c = altura crítica para a vazão específica escoada e;

Fr_1 = número de Froude na entrada do ressalto submerso determinado no sentido horizontal conforme equação 7.5.

$$Fr_1 = \frac{q \cdot \cos(\alpha)}{\sqrt{g \cdot h_1^3}} \quad (Eq. 7.5)$$

Pela análise da Figura 7.2 e das equações apresentadas na Tabela 7.1 observa-se uma pequena dispersão dos dados obtidos nos modelos sem poder-se definir uma tendência em relação à escala. Observa-se que à medida que o parâmetro $Fr_1 \cdot (S-1)$ aumenta, principalmente após o valor de $Fr_1 \cdot (S-1)$ igual a 6, que corresponde a valores de vazão inferiores a 3000 m³/s (valor de protótipo), ocorre também o aumento da dispersão dos resultados. O aumento do parâmetro $Fr_1 \cdot (S-1)$ pode ocorrer pelo aumento da submergência (S), pelo número de Froude na entrada do ressalto (Fr_1), ou por ambos simultaneamente. Para uma mesma condição de escoamento, um aumento do Fr_1 significa que a vazão diminui e, portanto, o valor do

tirante de água na entrada do ressalto (h_1) também diminui, implicando em diferenças relativas maiores na determinação da posição do início do ressalto (Z).

A partir de qualquer uma das curvas de ajuste e conhecendo os parâmetros de entrada do ressalto (níveis de montante e jusante, perdas de carga nas comportas, altura crítica e vazão unitária) pode-se definir, através de um processo iterativo, o número de Froude na entrada (Fr_1) e a submergência (S). Isto possibilitou o cálculo do valor de Z e a posição de início do ressalto em relação ao ponto de tangência entre a bacia de dissipação e o perfil do vertedouro para as diferentes situações de escoamento. O processo apresentou uma convergência rápida, com menos de quatro iterações em todos os casos analisados.

A Tabela 7.2 apresenta os valores dos parâmetros característicos do ressalto hidráulico obtidos para cada um dos modelos e para o protótipo (a partir das relações apresentadas na Tabela 7.1). Estão contempladas as condições de escoamento correspondentes às medições de pressão realizadas no protótipo da UHE Porto Colômbia.

Tabela 7.2 – Parâmetros característicos do ressalto hidráulico para as diferentes escalas de modelo reduzido e protótipo da UHE Porto Colômbia.

Q* (m ³ /s)	Modelo 1:100				Modelo 1:50				Modelo 1:32				Protótipo**			
	X	h_1	Fr_1	h_2	X	h_1	Fr_1	h_2	X	h_1	Fr_1	h_2	X	h_1	Fr_1	h_2
1000	14,64	0,30	10,18	4,18	13,99	0,31	10,00	4,15	13,95	0,30	10,29	4,19	14,42	0,32	9,35	4,04
2000	14,15	0,59	7,30	5,84	14,37	0,62	6,91	5,72	13,25	0,60	7,22	5,83	13,38	0,61	7,01	5,76
3000	14,22	0,90	5,87	7,03	13,25	0,90	5,89	7,05	14,11	0,89	5,98	7,08	12,51	0,89	5,95	7,08
4000	13,63	1,18	5,20	8,11	13,12	1,20	5,11	8,07	11,49	1,16	5,35	8,22	11,98	1,18	5,23	8,15

* Valores referentes às medições realizadas no protótipo da UHE Porto Colômbia.

** Os parâmetros do protótipo foram calculados com base na equação 7.2 (modelo 1:50).

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 7.2, julga-se que para determinação da posição de início do ressalto submerso poderia ser utilizada por qualquer uma das equações propostas na Tabela 7.1. Dessa forma, para calcular a posição de início do ressalto na estrutura de protótipo da UHE Porto Colômbia, optou-se pelo ajuste obtido com base nos dados do modelo 1:50. Essa decisão foi tomada em virtude dos seguintes aspectos:

- os ensaios realizados neste modelo terem sido os primeiros a serem finalizados;

- os dados obtidos foram tema da pesquisa efetuada por Wiest (2008). Sendo assim, esses dados foram analisados mais profundamente, permitindo atribuir uma maior confiabilidade na utilização do ajuste.

De forma a confirmar a possibilidade de poder-se utilizar qualquer um dos ajustes propostos anteriormente, a Tabela 7.3 apresenta o cálculo do parâmetro Z para as situações de escoamento e parâmetros determinados para o protótipo da UHE Porto Colômbia.

Tabela 7.3 – Cálculo da posição de início do ressalto (Z) com base nas equações obtidas para cada um dos modelos e pelo ajuste geral, contemplando as condições e parâmetros do escoamento no protótipo.

Q (m ³ /s)	h _c (m)	Z/h _c				Z (m)				ξ _{rel} (%)
		1:100	1:50	1:32	Geral	1:100	1:50	1:32	Geral	
1000	1,78	6,39	5,18	6,09	5.99	11,37	9,22	10,84	10.66	18,93
2000	2,81	3,42	3,00	3,27	3.27	9,62	8,45	9,19	9.18	12,15
3000	3,69	2,30	2,13	2,20	2.23	8,50	7,86	8,14	8.21	7,57
4000	4,47	1,75	1,67	1,67	1.70	7,81	7,48	7,49	7.61	4,22

Pela Tabela 7.3 se constata que os valores de Z podem apresentar uma diferença relativa máxima (ξ_{rel}) de, aproximadamente, 19 % (em valor absoluto este valor representa 2,15 m no protótipo). Nota-se também que os valores obtidos pela equação geral se apresentam de maneira intermediária aos determinados pelos ajustes dos modelos nas diferentes escalas.

Em virtude das pequenas diferenças observadas entre os valores dos parâmetros característicos do ressalto para as diferentes estruturas e, de maneira a facilitar o processo de compreensão dos resultados obtidos, as posições adimensionais das tomadas de pressão, desse ponto em diante, serão apresentadas conforme os resultados obtidos para a estrutura de protótipo.

8 Análise da pressão média

Conforme Teixeira (2003), a determinação das pressões médias que ocorrem junto ao fundo da bacia de dissipação por ressalto hidráulico é o primeiro passo para a previsão dos valores extremos. Cabe lembrar que a estimativa de pressões extremas corresponde a uma das principais metas da presente pesquisa. Dessa forma, as análises que visaram caracterizar os valores de pressão média ao longo do ressalto hidráulico serão apresentadas em duas etapas:

Etapa 01 - Item 8.1 Comparação dos valores médios de pressão obtidos através do uso de piezômetros com os níveis médios de água medidos com pontas limnimétricas, assim como com os valores médios obtidos com transdutores de pressão para diferentes condições de escoamento. Foram comparados os dados obtidos nas diferentes escalas de modelo, pois para o protótipo da UHE porto Colômbia não se dispunha de dados obtidos com piezômetros, assim como não foram realizadas leituras de níveis d'água. De uma forma geral, o principal objetivo foi verificar a consistência das amostras de pressão obtidas nas diferentes escalas de modelo.

Etapa 02 – Itens 8.2 e 8.3 Análises dos efeitos de laboratório nos valores médios de pressão através da comparação dos resultados obtidos em modelos reduzidos em diferentes escalas. Esse estudo teve como objetivo verificar a mínima escala que deve ter a estrutura para representar, de maneira similar, os valores de pressão média ocorridos no protótipo da UHE Porto Colômbia.

8.1 Comparação das amostras de pressão média (obtidas através de piezômetros e transdutores) e de níveis d'água

As análises foram desenvolvidas comparando os resultados obtidos para as diferentes escalas de modelo (1:100, 1:50 e 1:32). Serão apresentados aqui os resultados para a vazão de 4000 m³/s (condição de escoamento correspondente à medição realizada no protótipo). É mostrada também uma comparação dos valores médios de pressão determinados no presente estudo, obtidos com o uso de

transdutores, com os resultados obtidos por Rodrigues (2002), que realizou ensaios em um modelo tridimensional, na escala 1:100, do protótipo da UHE Porto Colômbia.

Os resultados das análises para a vazão de 1000 m³/s, equivalente ao protótipo, são apresentados no Anexo D.

8.1.1 Pressões médias obtidas através de piezômetros

Nos ensaios de pressão foram utilizados transdutores colocados junto ao fundo do canal, como foi demonstrado no capítulo 4, que trata, dentre outros assuntos, da descrição dos modelos reduzidos e da caracterização dos ensaios realizados. Concomitantemente com as medições de pressão através do uso de transdutores, foram realizadas medições com a utilização de piezômetros, a fim de tornar possível a comparação com os valores médios obtidos eletronicamente.

Na Figura 8.1 apresenta-se os valores de pressão média nos modelos em diferentes escalas, obtidos através de medições realizadas com piezômetros e também os valores obtidos no protótipo da UHE Porto Colômbia (com transdutores de pressão), considerando a vazão de 4000 m³/s.

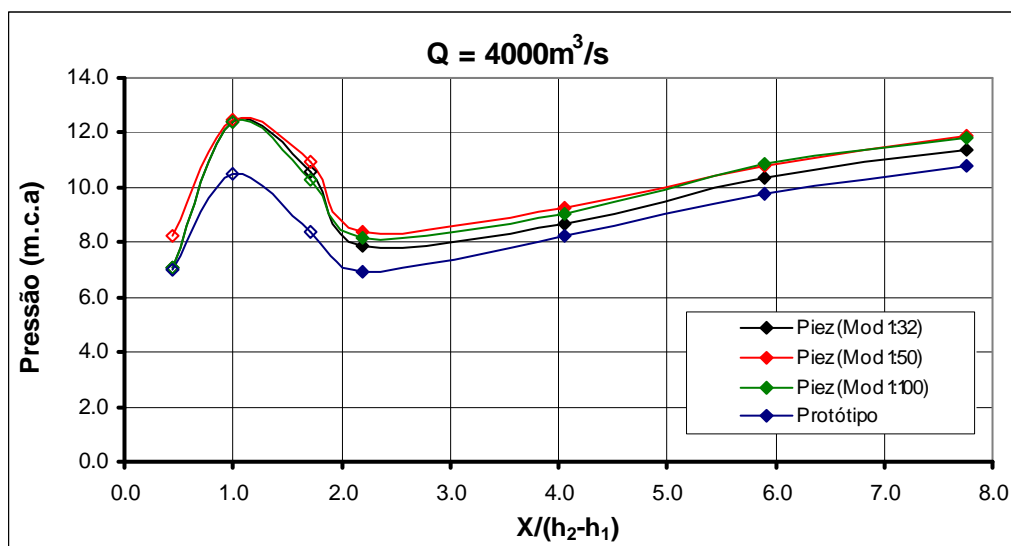


Figura 8.1 - Comparação entre os valores de pressão obtidos através de medições realizadas com piezômetros nos modelos em diferentes escalas ($Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$, valor equivalente no protótipo da UHE Porto Colômbia). As tomadas no trecho curvo estão representadas pelos símbolos vazados (\diamond).

Pela análise da Figura 8.1 observa-se que os resultados obtidos em cada uma das escalas de modelo são muito próximos e apresentam um mesmo padrão de desenvolvimento. Isso se deve ao fato da diferença geométrica entre as estruturas ser relativamente pequena (cerca de 3 vezes se comparados os modelos nas escalas 1:32 e 1:100). Os valores obtidos no protótipo possuem uma distribuição semelhante a dos modelos, no entanto, os valores são mais baixos, principalmente nas três primeiras tomadas, situadas na curva e próximas à zona de maior flutuação.

Verificou-se a mesma tendência na outra condição analisada (vazão de 1000 m³/s), porém, os valores obtidos no protótipo situam-se mais próximos dos valores dos modelos, mesmo nas primeiras tomadas, e os valores de modelo são mais próximos entre si (conforme apresentado no Anexo D). Isso pode ser explicado devido ao ressalto, para essa condição, ocorrer mais para montante dessa forma, as primeiras tomadas situam-se após a zona de maior flutuação de pressão.

8.1.2 Níveis d'água obtidos através de pontas limnimétricas

Os níveis médios de água que formam o perfil do ressalto foram medidos ao longo da bacia de dissipação através da utilização de pontas limnimétricas. A Figura 8.2 apresenta os valores obtidos para a vazão de 4000 m³/s.

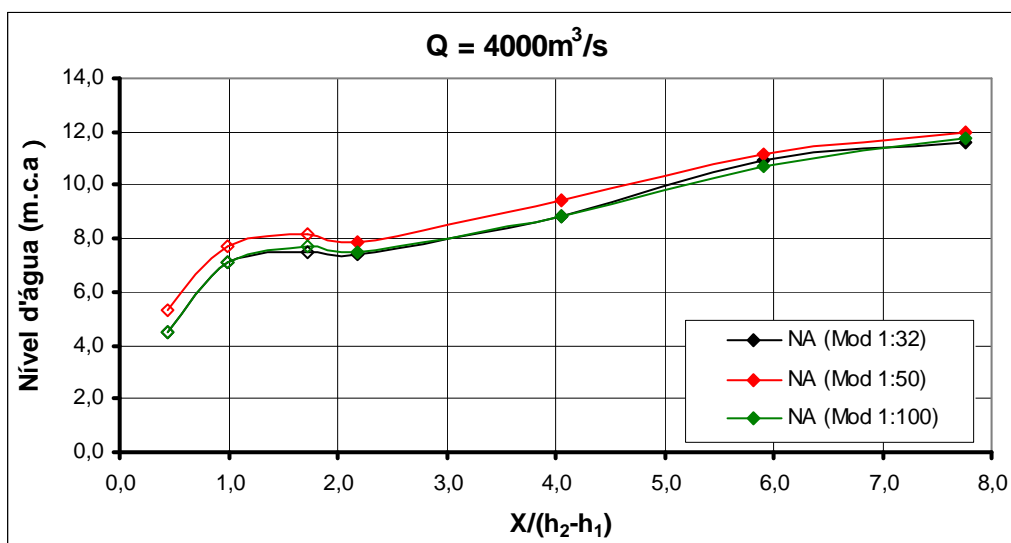


Figura 8.2 - Comparação entre os valores de níveis d'água obtidos através de pontas limnimétricas nos modelos em diferentes escalas (Q = 4000 m³/s, valor equivalente no protótipo da UHE Porto Colômbia). As tomadas no trecho curvo estão representadas pelos símbolos vazados (◇).

Da mesma forma que nos valores das pressões médias obtidos através de piezômetros, os níveis d'água determinados em cada um dos modelos apresentam desenvolvimentos equivalentes. Entretanto, não é possível comparar com o protótipo.

Verificou-se a mesma tendência na outra condição analisada (vazão de 1000 m³/s equivalente ao protótipo), conforme apresentado no Anexo D. Assim como nos dados de pressão média obtidos com piezômetros, os níveis de água entre as diferentes escalas de modelo, considerando a vazão de 1000 m³/s, são mais próximos em relação aos valores da vazão de 4000 m³/s.

8.1.3 Comparação dos valores de pressão média (através de piezômetros) com níveis d'água

Nas Figuras 8.3 a 8.5 são apresentadas comparações dos valores de pressão obtidos através do uso de piezômetros com os níveis d'água determinados através de pontas limnimétricas durante os ensaios realizados para a vazão de 4000 m³/s.

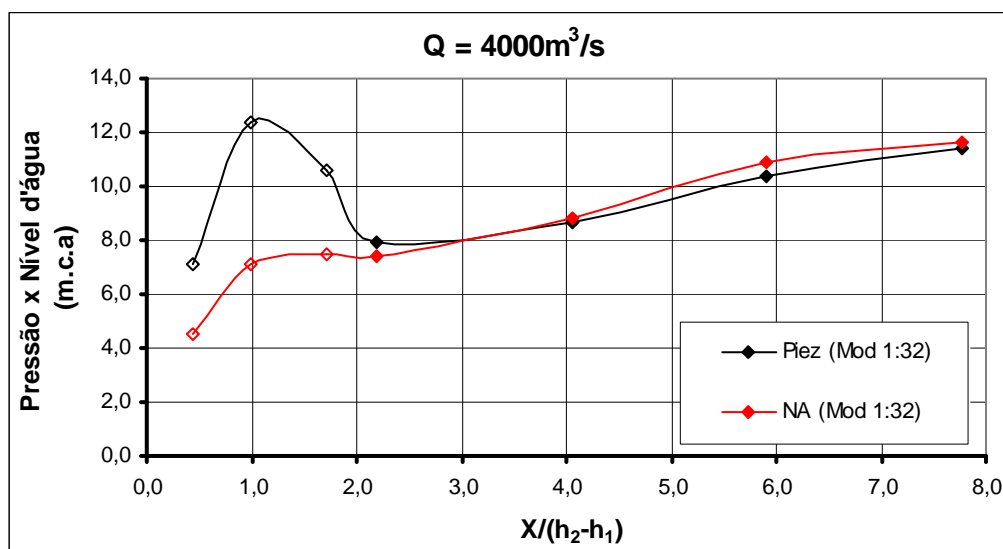


Figura 8.3 – Comparação entre os valores de pressão (obtidos através de piezômetros) com valores de níveis d'água para a vazão de 4000 m³/s (valor equivalente ao protótipo da UHE Porto Colômbia) no modelo 1:32. As tomadas no trecho curvo estão representadas pelos símbolos vazados (◊).

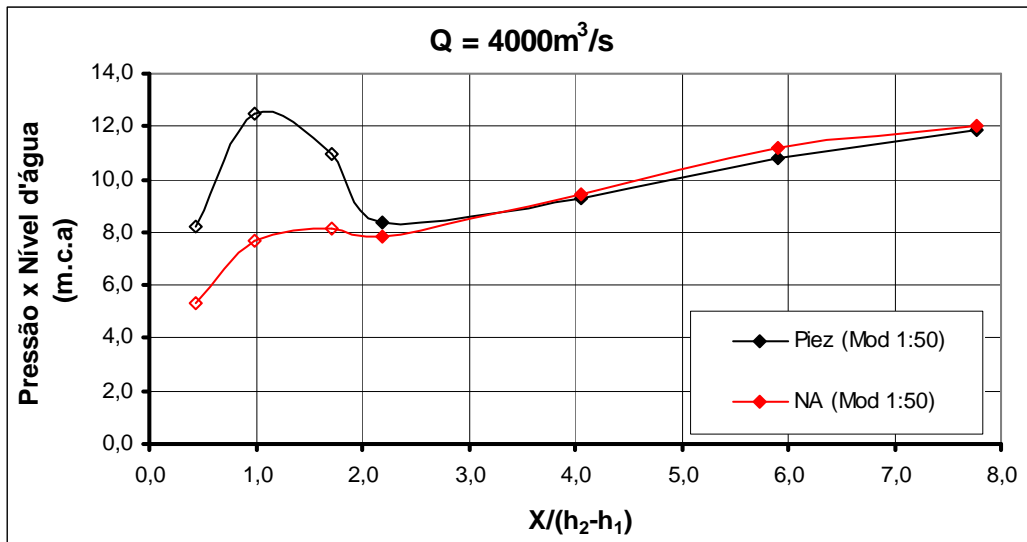


Figura 8.4 – Comparação entre os valores de pressão (obtidos através de piezômetros) com valores de níveis d'água para a vazão de 4000 m³/s (valor equivalente ao protótipo da UHE Porto Colômbia) no modelo 1:50. As tomadas no trecho curvo estão representadas pelos símbolos vazados (◊).

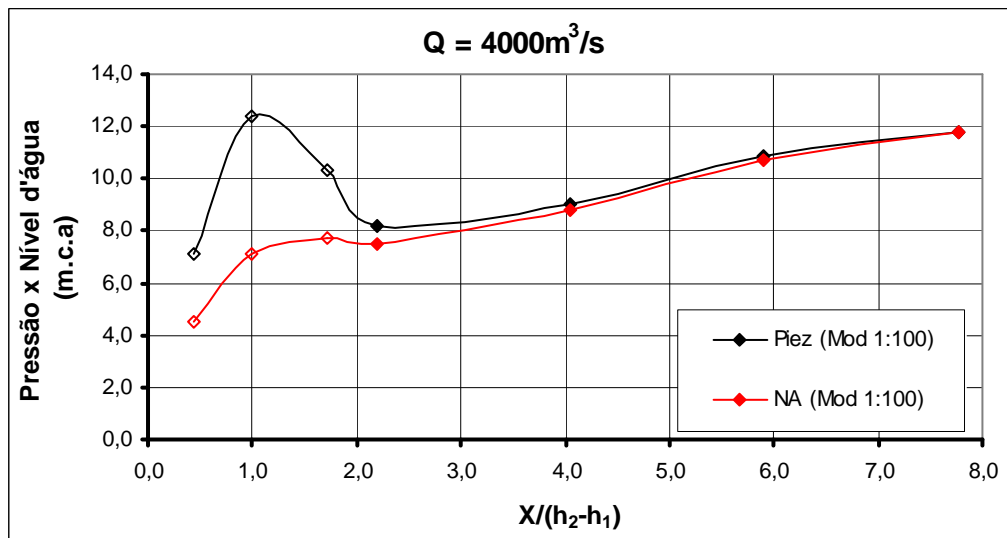


Figura 8.5 - Comparação entre os valores de pressão (obtidos através de piezômetros) com valores de níveis d'água para a vazão de 4000 m³/s (valor equivalente ao protótipo da UHE Porto Colômbia) no modelo 1:100. As tomadas no trecho curvo estão representadas pelos símbolos vazados (◊).

Pela análise das figuras citadas observa-se que os resultados nas três primeiras tomadas são discrepantes. Os valores obtidos nessas tomadas sofrem efeito de um acréscimo de pressão devido à curva do perfil do vertedouro. No trecho plano, onde o ressalto apresenta-se mais estável, os valores de pressão e níveis d'água praticamente coincidem. Cabe lembrar a dificuldade de realizar medições de

níveis d'água no início do ressalto, que se caracteriza por forte agitação do escoamento além do movimento horizontal do fenômeno no interior da bacia.

Na outra condição de escoamento analisada (as comparações para a vazão de 1000 m³/s considerando as diferentes escalas de modelo são apresentadas no Anexo D), se observa desenvolvimentos semelhantes, ou seja, valores de pressão superiores aos níveis d'água nas primeiras tomadas e valores muito próximos no trecho plano. No entanto, não se verifica uma diferença tão significativa entre as pressões e os níveis d'água nas três primeiras tomadas. Para esta vazão o ressalto inicia mais para montante, de forma que as primeiras tomadas situam-se em uma posição onde o escoamento é mais estável. Por isso, julga-se que o efeito do acréscimo no valor da pressão devido à curva é menor.

8.1.4 Pressão média obtida através dos transdutores

Na Figura 8.6 apresenta-se os valores de pressão média nos modelos, em diferentes escalas, obtidos através de medições realizadas com transdutores para a vazão de 4000 m³/s (valor equivalente ao protótipo da UHE Porto Colômbia).

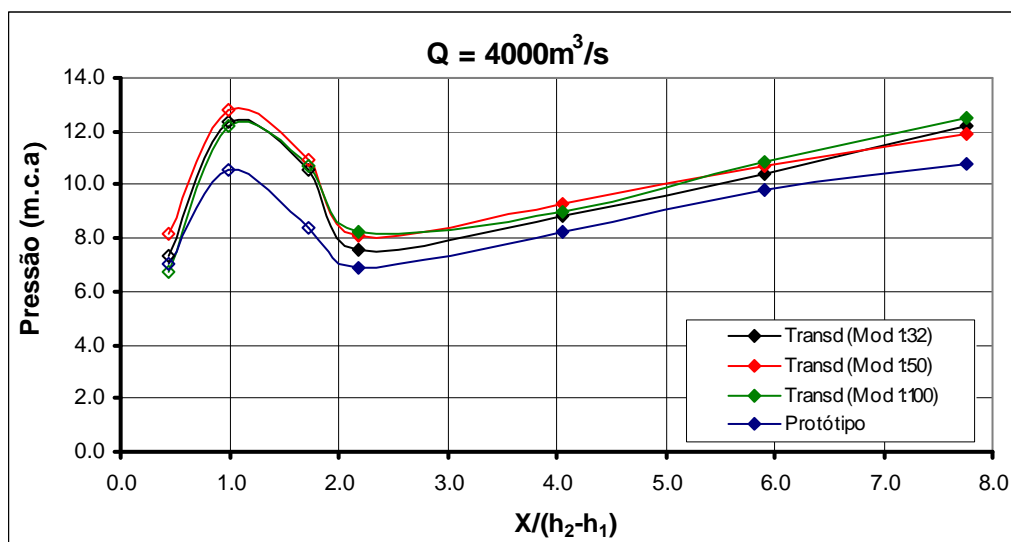


Figura 8.6 - Comparação entre os valores de pressão média (obtidos através de medições com transdutores) nas diferentes escalas de modelos ($Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$, valor equivalente no protótipo da UHE Porto Colômbia). As tomadas no trecho curvo estão representadas pelos símbolos vazados (\diamond).

Pela análise da Figura 8.6 observa-se que os resultados obtidos em cada um dos modelos apresentam uma mesma tendência com valores muito próximos. Os valores obtidos no protótipo possuem uma distribuição semelhante à dos modelos, no entanto, os valores são mais baixos, principalmente na segunda e terceira tomada (dB e dC).

Verificou-se a mesma tendência na outra condição analisada (vazão de 1000 m³/s), porém, os valores obtidos no protótipo situam-se mais próximos dos valores dos modelos, mesmo nas tomadas dB e dC, além dos valores obtidos nos modelos estarem mais próximos entre si (conforme pode ser visualizado no Anexo D).

8.1.5 Comparação dos valores das pressões médias obtidas com piezômetros e transdutores

Nas Figuras 8.7 a 8.9 apresentam-se a comparação dos valores de pressão obtidos através do uso de piezômetros com os determinados através de transdutores para a vazão de 4000 m³/s (valor equivalente ao protótipo). Pela análise das figuras citadas, observa-se que os resultados são praticamente coincidentes, mesmo considerando as tomadas situadas no trecho curvo do vertedouro.

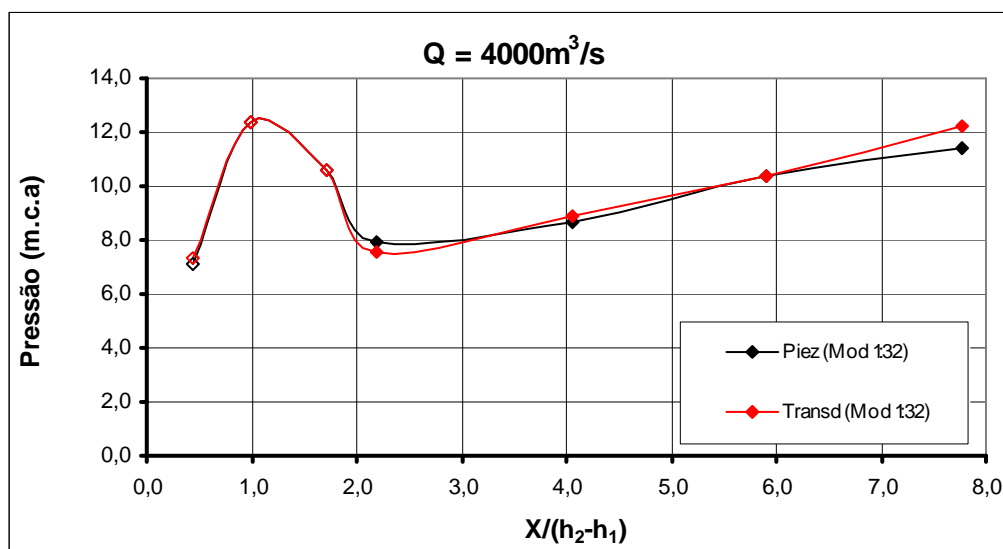


Figura 8.7 – Comparação entre os valores de pressão média (obtidos através de piezômetros e transdutores) para a vazão de 4000 m³/s (valor equivalente ao protótipo da UHE Porto Colômbia) no modelo 1:32. As tomadas no trecho curvo estão representadas pelos símbolos vazados (◊).

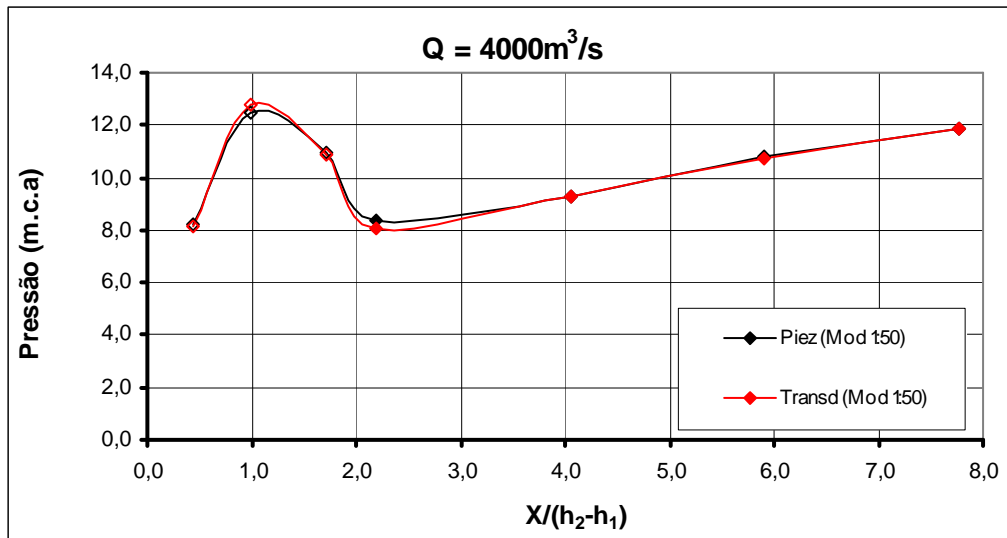


Figura 8.8 – Comparação entre os valores de pressão média (obtidos através de piezômetros e transdutores) para a vazão de 4000 m³/s (valor equivalente ao protótipo da UHE Porto Colômbia) no modelo 1:50. As tomadas no trecho curvo estão representadas pelos símbolos vazados (◊).

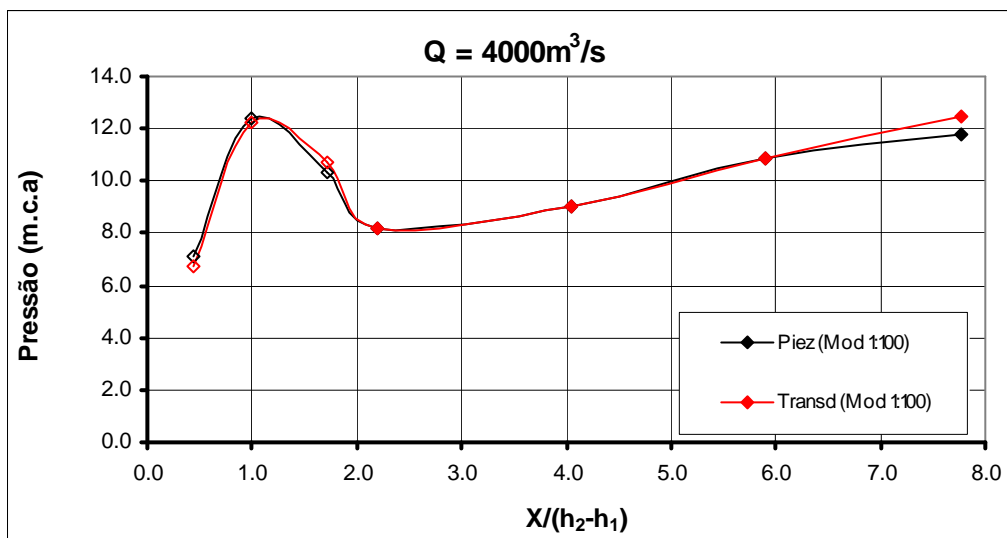


Figura 8.9 - Comparação entre os valores de pressão média (obtidos através de piezômetros e transdutores) para a vazão de 4000 m³/s (valor equivalente ao protótipo da UHE Porto Colômbia) no modelo 1:100. As tomadas no trecho curvo estão representadas pelos símbolos vazados (◊).

Na outra condição de escoamento analisada (as comparações para a vazão de 1000 m³/s considerando as diferentes escalas de modelo são apresentadas no Anexo D), observa-se as mesmas tendências, com os valores de pressão obtidos pelos piezômetros e transdutores ainda mais próximos entre si, considerando cada uma das escalas de estrutura. Estas comparações mostram que os transdutores,

tradicionalmente utilizados para medir flutuações de pressão, apresentam um comportamento dos valores médios amostrais muito satisfatório.

8.1.6 Comparação dos valores de pressão média nas diferentes escalas de modelo (obtidos com o uso dos transdutores) com os resultados de Rodrigues (2002)

Os valores de pressão média determinados para cada uma das escalas de modelos físicos bidimensionais (1:100, 1:50 e 1:32), que fazem parte da presente pesquisa, foram comparados com os resultados obtidos por Rodrigues (2002). O referido trabalho contemplou, dentre outros assuntos, a medição de valores de pressão em um modelo físico tridimensional da UHE Porto Colômbia na escala geométrica 1:100. O intuito da comparação dos resultados consiste em verificar uma possível existência de efeitos de tridimensionalidade do escoamento, assim como validar as amostras de dados obtidas no presente estudo.

Na Figura 8.10 é apresentada uma comparação dos valores de pressão média obtidos no presente estudo com os resultados obtidos por Rodrigues (2002) e também os valores obtidos no protótipo da UHE Porto Colômbia, para a vazão de 4000 m³/s.

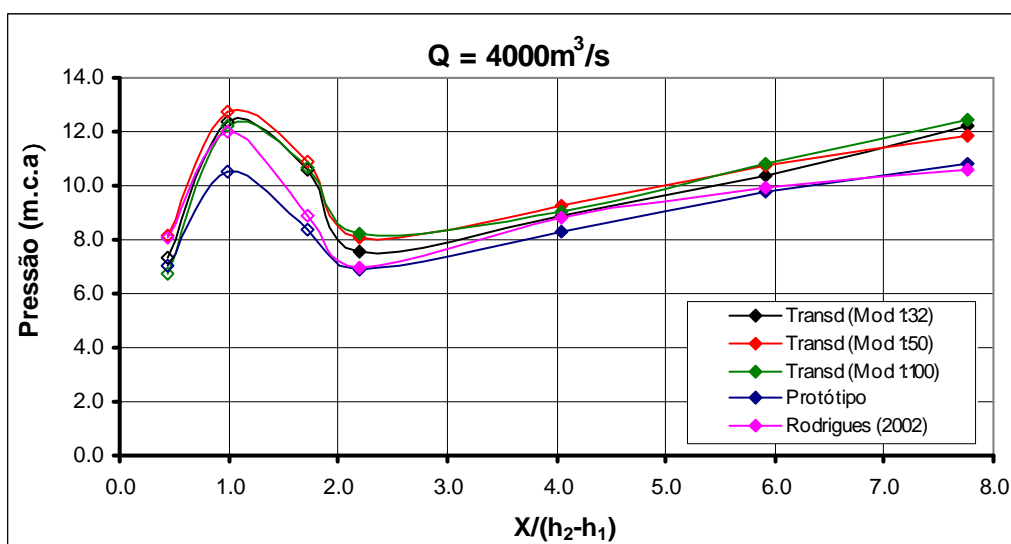


Figura 8.10 - Comparação entre os valores de pressão média (para $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$) obtidos nas diferentes escalas de modelos, no modelo físico tridimensional na escala 1:100 utilizado por Rodrigues (2002) e no protótipo da UHE Porto Colômbia. As tomadas no trecho curvo estão representadas pelos símbolos vazados (\diamond).

Pela análise da Figura 8.10 nota-se que os resultados obtidos para as diferentes escalas e no trabalho de Rodrigues (2002) apresentam um mesmo padrão de desenvolvimento, de onde se conclui que a tridimensionalidade não surte efeito significativo sobre os valores de pressão média. Os valores obtidos no protótipo possuem uma distribuição semelhante aos demais resultados, no entanto, os valores são mais baixos, principalmente na segunda e terceira tomadas (dB e dC). Para a vazão de 4000 m³/s, os resultados encontrados por Rodrigues (2002) encontram-se mais próximos aos valores medidos diretamente no protótipo.

No entanto, para outra condição analisada, vazão de 1000 m³/s (ver Anexo D), verificou-se uma situação inversa. Os valores de pressão encontrados por Rodrigues (2002) estão levemente superiores aos resultados obtidos nos ensaios referentes a esta pesquisa (modelos em diferentes escalas), assim como em relação aos valores medidos diretamente no protótipo.

Dessa forma, pode-se concluir que as amostras de dados obtidas no presente estudo, considerando as diferentes escalas de modelo, estão de acordo com a dispersão natural do fenômeno e não se verifica efeito significativo da tridimensionalidade do escoamento nos valores de pressão média.

8.2 Análise da pressão média obtida nas diferentes escalas de modelo e no protótipo (valores obtidos através dos transdutores)

Com o intuito de minimizar os efeitos de laboratório e verificar os efeitos de escala, foram utilizados parâmetros adimensionais no processo de análise das amostras de pressões obtidas pelos transdutores.

As pressões médias foram adimensionalizadas a partir das equações 8.1 e 8.2, conforme sugestões de Marques *et al.*(1999). A partir dessas relações, foram comparadas as distribuições longitudinais das pressões médias adimensionais (Ψ) ocorridas no protótipo da UHE Porto Colômbia e nos modelos reduzidos nas escalas 1:32, 1:50 e 1:100.

$$\Psi = \left(\frac{P_x - h_1}{h_2 - h_1} \right) \cdot \left(\frac{1}{S} \right) \quad (\text{Eq. 8.1})$$

$$\Gamma = \frac{X}{h_2 - h_1}$$

(Eq. 8.2)

Sendo:

Ψ = pressão média adimensionalizada;

Γ = posição adimensionalizada em relação ao início do ressalto;

P_X = pressão média na posição X ;

h_1 = altura de água na seção de entrada do ressalto hidráulico;

h_2 = altura de água na seção de saída do ressalto hidráulico; e

S = grau de submergência.

Na Figura 8.11 está apresentada a distribuição longitudinal do coeficiente de pressão média (Ψ) em função da posição adimensionalizada relativa ao início do ressalto hidráulico (Γ), para a vazão equivalente a $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ ($S = 1,44$) na UHE Porto Colômbia e nos modelos reduzidos nas diferentes escalas. Também podem ser visualizados na Figura 8.11 os valores obtidos por Rodrigues (2002), adimensionalizados a partir dos parâmetros (submergência e alturas de água h_1 e h_2) definidos para a estrutura de protótipo.

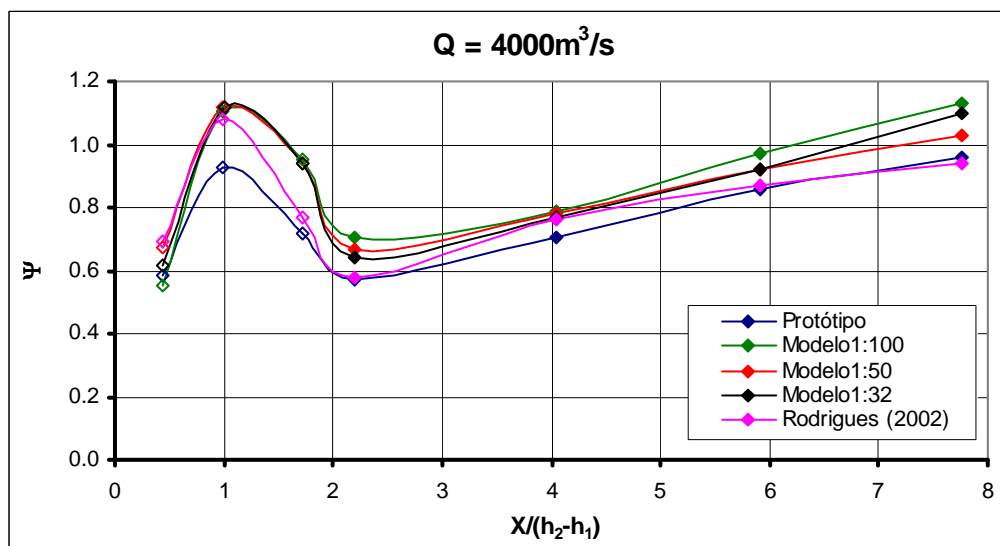


Figura 8.11 - Distribuições longitudinais do coeficiente de pressão média (Ψ) observadas na bacia de dissipação da UHE Porto Colômbia, nos modelos nas escalas 1:32; 1:50 e 1:100 e obtidos por Rodrigues (2002) para a vazão de $4000 \text{ m}^3/\text{s}$. As tomadas situadas no trecho curvo estão representadas pelos símbolos vazados (\diamond).

Constata-se que os valores da pressão média adimensionalizada (Ψ) obtidos nos modelos reduzidos, no trecho plano, tendem a resultar um pouco acima dos dados de protótipo, com a tendência das diferenças serem inversamente proporcionais à escala do modelo. Julga-se que esse efeito se deva à menor entrada de ar no escoamento nos modelos. Já no trecho curvo, a diferença entre o protótipo e os modelos é maior, entretanto, entre os modelos, os resultados possuem praticamente o mesmo desenvolvimento. Para a vazão de 4000 m³/s, os resultados encontrados por Rodrigues (2002) encontram-se mais próximos aos valores medidos diretamente no protótipo, principalmente no trecho reto, como já havia sido detectado na análise dos dados brutos (conforme Figura 8.10).

Estão apresentadas no Anexo D as comparações entre os resultados obtidos para as vazões de 1000 m³/s, 2000 m³/s e 3000 m³/s. Observa-se que os valores do Ψ no protótipo são sempre inferiores aos verificados nos modelos, entretanto, entre os modelos há uma tendência dos valores de Ψ serem menores se a dimensão da estrutura aumenta. Considerando os resultados obtidos por Rodrigues (2002), para vazões citadas, verifica-se que os mesmos apresentam um comportamento diferente do apresentado para a vazão de 4000 m³/s. Nas três primeiras tomadas os resultados se aproximam dos valores de protótipo, no entanto, nas tomadas localizadas no trecho reto os valores de Ψ apresentam-se mais elevados que nos demais modelos. Esse fato pode ser decorrente da utilização dos parâmetros de protótipo no processo de adimensionalização.

Comparando-se os dados obtidos nos modelos (nas escalas 1:100, 1:50 e 1:32 e resultados de Rodrigues, 2002) com os valores de protótipo, observa-se que, após a curva, há um ponto onde ocorrem os menores valores de Ψ no trecho plano. Os valores de Ψ tendem a ser maiores à medida que a vazão diminui (por exemplo, considerando valores de protótipo, $\Psi_{Q4000} = 0,57$ e $\Psi_{Q1000} = 0,90$). A diferença entre o pico de pressão na curva e o ponto de menor pressão após a curva diminui à medida que a vazão diminui. A dispersão dos valores de Ψ na primeira tomada da curva (dA) é bem pequena entre os modelos e também em relação ao protótipo, não sendo possível inferir se existe alguma tendência em função da escala.

Aparentemente, as pressões médias nos modelos tendem a ser maiores que no protótipo. Isto provavelmente ocorre devido à aeração ser menor nos modelos do

que no protótipo, podendo-se supor que quanto menor a escala menor será a aeração do escoamento. Sendo assim, torna-se necessária a avaliação dos efeitos do aumento da aeração do escoamento em função da escala da estrutura. Nessa análise foram consideradas as seguintes hipóteses:

a) Se considerarmos que a entrada de ar ocorre principalmente no início do ressalto em virtude do arraste provocado pelo escoamento, pode-se pensar, em uma primeira aproximação, que a mesma é proporcional à velocidade de entrada do escoamento, $q_{ar} \equiv V_1$, ou seja, que a escala da entrada de ar possa ser estimada por $\lambda_{ar} \equiv \lambda^{1/2}$. Entretanto, uma outra hipótese consiste que a entrada de ar no escoamento é proporcional à vazão, $q_{ar} \equiv q_w$, resultando em $\lambda_{ar} \equiv \lambda^{3/2}$. A partir dessas suposições apresentam-se na Tabela 8.1 possíveis relações entre as escalas de ar e as estruturas.

Tabela 8.1 – Possíveis relações entre as escalas de ar e as estruturas.

Escala entre estruturas	Relação entre escalas de ar e estruturas	
	$\lambda_{ar} \equiv \lambda^{1/2}$	$\lambda_{ar} \equiv \lambda^{3/2}$
1:100 (relação Prot. e 1:100)	10,00	1000,00
1:50 (relação Prot. e 1:50)	7,10	353,55
1:32 (relação Prot. e 1:32)	5,60	181,02
\cong 1:3,13 (relação 1:100 e 1:32)	1,75	5,52
1:2 (relação 1:100 e 1:50)	1,40	2,83
\cong 1:1,56 (relação 1:50 e 1:32)	1,25	1,95

Com base nos resultados apresentados na Tabela 8.1, observa-se uma variação bastante significativa entre as possíveis relações entre a entrada de ar no escoamento e a escala geométrica da estrutura. Por exemplo, para o modelo na escala geométrica 1:50, se considerarmos que a escala de ar no modelo é proporcional a velocidade de entrada ($\lambda_{ar} \equiv \lambda^{1/2}$), a entrada de ar no modelo seria em torno de 7 vezes menor que no protótipo; no entanto, se considerarmos que a escala de ar no modelo é proporcional a vazão ($\lambda_{ar} \equiv \lambda^{3/2}$), a entrada de ar no modelo seria da ordem de 350 vezes menor que no protótipo. Na comparação entre as escalas de

modelo, a variação entre as duas hipóteses é menor. Julga-se que isso se deve ao fato da relação geométrica entre as escalas estarem bastante próximas.

b) Uma maior entrada de ar deve levar a um aumento da linha de água, mas não altera a pressão, já que o volume de água é o mesmo. Nos modelos, não foi possível constatar a elevação do nível de água. Julga-se que isso se deve ao fato das escalas geométricas entre os próprios modelos estarem muito próximas (1:1,56 a 1:3,13) e também pela dispersão da leitura da linha de água ser de difícil medição. São necessárias medições no protótipo ou em modelos físicos em escalas bem maiores das abordadas na presente pesquisa. A Figura 8.12 procura mostrar, de forma visual, a diferença de entrada de ar no escoamento ($Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$) existente entre o protótipo e os modelos nas escalas 1:100, 1:32 e 1:50. Visualmente, parece não existir linearidade da aeração com a escala geométrica, por exemplo, a entrada de ar no modelo 1:50 é superior ao dobro existente no modelo 1:100. Estas constatações preliminares devem ser confirmadas em um estudo específico sobre aeração em bacias por ressalto hidráulico.



UHE Porto Colômbia (protótipo)



Modelo 1:32



Modelo 1:50



Modelo 1:100

Figura 8.12 – Comparação visual da entrada de ar no escoamento entre o protótipo da UHE Porto Colômbia e os modelos reduzidos em diferentes escalas ($Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$).

c) O coeficiente de perda de carga linear (f) diminui com o aumento do coeficiente de aeração (C_{ar}), de acordo com Matos (1999). Sendo o coeficiente de aeração no modelo menor que no protótipo, o coeficiente f também será menor, resultando em uma velocidade maior no interior do escoamento. Se a energia específica em uma dada seção é a mesma (considerando modelo e protótipo), ao aumentarmos a velocidade, a pressão média deve diminuir. Isto talvez possa explicar porque as pressões médias são menores no protótipo, ou seja, existiria um efeito de escala na pressão média associada à entrada de ar.

d) Outro aspecto a considerar é que as diferenças são maiores no trecho curvo, exceto no início da curva onde as diferenças são menores (da mesma ordem de grandeza do trecho reto), indicando que além da aeração, há uma influência significativa do efeito da curvatura entre o perfil do vertedouro e a bacia de dissipação. Cabe lembrar que, no início da curva, a aeração do escoamento ainda está aumentando (conforme estudos de Rajaratnam (1962) e Boller (2006) apresentados no capítulo referente à Revisão Bibliográfica) e atinge o seu ponto máximo na zona de maior flutuação de pressão (conforme trabalho de Marques *et al.*, 2007).

Em função das considerações citadas, julga-se que existe efeito de escala nos valores das pressões médias obtidas nos modelos devido à aeração, principalmente no trecho inicial do ressalto. Esse efeito é somado a influência do raio de curvatura. Desta forma, quando se faz a transposição dos valores de pressão média obtidos nos modelos, obtêm-se resultados superiores aos medidos diretamente no protótipo. De forma geral, a análise realizada, de uma maneira simplificada, mostra a necessidade de estudos mais aprofundados com relação à influência da aeração no ressalto hidráulico formado ao longo de bacias de dissipação.

8.2.1 Análise da dispersão natural das amostras de pressão e dos efeitos de escala

Qualquer análise que visa determinar os efeitos de escala nos valores de pressão obtidos através de ensaios realizados em modelos reduzidos deve considerar a existência de uma dispersão natural em função da dinâmica do

fenômeno e dos possíveis efeitos de laboratório (por exemplo, na leitura de níveis, nos equipamentos de medição, entre outros). Entretanto, a quantificação da soma desses efeitos é bastante difícil, além disso, deve-se ter em mente que os próprios valores do protótipo estão sujeitos a efeitos de “laboratório” e a uma dispersão natural dos resultados.

Nesta pesquisa foi realizada uma análise da dispersão natural dos valores de pressão média baseada nos resultados obtidos por Wiest (2008) para o ressalto submerso.

Wiest (2008) propôs uma metodologia para determinação da distribuição longitudinal da pressão média com base nos ensaios realizados no modelo físico reduzido na escala geométrica 1:50 da UHE Porto Colômbia, considerando diferentes vazões e graus de submersão (cabe salientar que os dados utilizados pelo pesquisador correspondem à mesma campanha de ensaios utilizada na presente pesquisa) e também com base em resultados de ressalto livre obtidos por Marques (1997) e Endres (1990).

A metodologia de análise consistiu na determinação de pontos característicos do ressalto hidráulico submerso, a fim de possibilitar o traçado de ajustes que descrevessem da melhor forma possível o fenômeno e sua dependência com relação à variação da submersão. De acordo com o autor, foi possível identificar cinco pontos principais ao longo do ressalto (Figura 8.13), conforme é descrito a seguir:

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

Para cada um dos pontos característicos da distribuição longitudinal da pressão média está associado um ajuste em função da submergência. No ponto 4, além do ajuste para a pressão, foi determinado também um ajuste para a determinação do ponto de intersecção entre as curvas do ressalto submergido e o ajuste médio para o ressalto livre. Para o ponto 5 apenas foi determinado um ajuste para a posição, pois deste ponto em diante, o valor da pressão média adimensionalizada corresponde à unidade (comportamento igual ao ajuste do ressalto livre). Os pontos no trecho curvo correspondem as posições relativas das próprias tomadas de pressão dA, dB e dC para cada condição de escoamento.

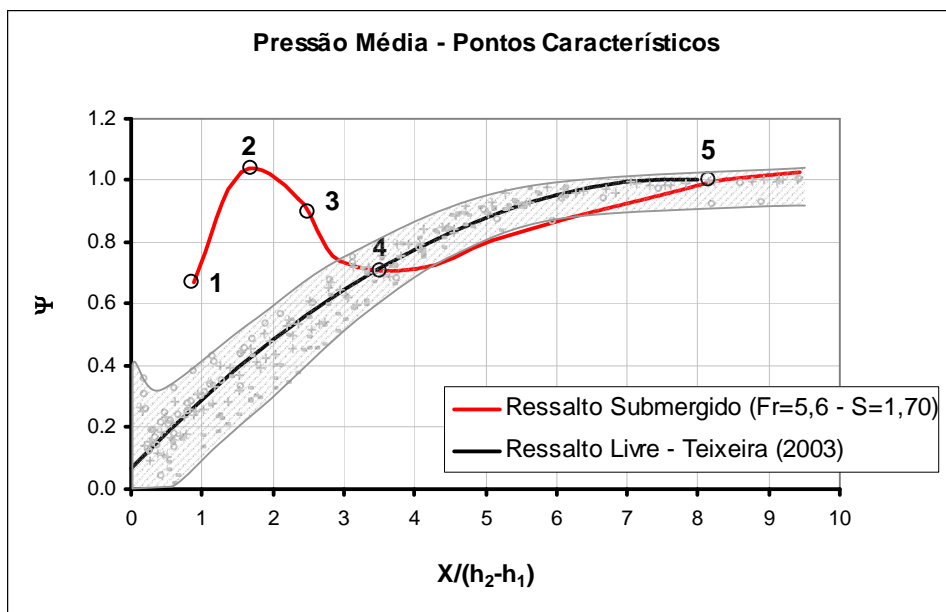


Figura 8.13 - Pontos característicos da distribuição longitudinal da pressão média para o ressalto submergido, conforme definido por Wiest (2008).

A equação 8.3 representa o ajuste da pressão média em função do número de Froude (Fr_1) e da submergência (S) do escoamento para as tomadas de pressão situadas no trecho curvo do vertedouro. A Tabela 8.2 apresenta os coeficientes da equação 8.3 para cada uma das tomadas de pressão.

$$\Psi \cdot S = \frac{(a + b \cdot (S - 1/Fr_1))}{(1 + c \cdot (S - 1/Fr_1) + d \cdot (S - 1/Fr_1)^2)} \quad (eq. 8.3)$$

A equação 8.4 representa o ajuste da pressão média em função da submersão (S) do escoamento para o ponto de intersecção entre as curvas do ressalto submerso e ajuste do ressalto livre (ponto 4).

$$\Psi \cdot S = \frac{-1,3370 + 1,4990 \cdot S}{1 - 0,0812 \cdot S + 0,0345 \cdot S^2} \quad (\text{eq. 8.4})$$

Tabela 8.2 – Coeficientes de ajuste para a distribuição da pressão média ao longo do trecho curvo referentes à metodologia proposta por Wiest (2008) para o modelo 1:50.

Posição/Coefficientes	a	b	c	d
Ponto 1 (Tomada dA)	0,0014	15,0450	11,3630	-1,4017
Ponto 2 (Tomada dB)	0,4629	27,5450	15,0440	-6,7244
Ponto 3 (Tomada dC)	0,2470	22,1590	13,7090	-1,6911

A Tabela 8.3 apresenta as equações para determinação das posições relativas adimensionais (X_{adm}) dos pontos 4 e 5 em função da submersão (S).

Tabela 8.3 - Ajustes para determinação das posições relativas dos pontos 4 e 5 referentes à metodologia de distribuição da pressão média proposta por Wiest (2008) para o modelo 1:50.

Ponto 4 (intersecção)	$X_{adm} = 1,0686 \cdot S^2 + 7,0784 \cdot S - 5,3693$	equação 8.5
Ponto 5 (idêntico ao ressalto livre)	$X_{adm} = 6,7473 \cdot S^{0,3453}$	equação 8.6

Da mesma forma proposta por Wiest (2008) para inferir a distribuição longitudinal da pressão média com base nos valores medidos no modelo 1:50, foram determinados os ajustes a partir das amostras de dados obtidas nos modelos nas escalas 1:32 e 1:100. Os coeficientes dos ajustes são bastante semelhantes aos determinados para o modelo 1:50. Os ajustes para a pressão média nos modelos 1:32 e 1:100 estão apresentados no Anexo D da presente pesquisa.

A partir dos ajustes médios estabelecidos para a pressão média, considerando cada escala de modelo, foram definidas envoltórias superiores e inferiores com base na distribuição estatística de *Student*, com um nível de significância de 95%.

As Figuras 8.14 a 8.16 apresentam os ajustes médios e as envoltórias estabelecidas para as escalas de modelo 1:32, 1:50 e 1:100, respectivamente, considerando a vazão de 4000 m³/s (valor equivalente ao protótipo). Os resultados para as vazões de 1000 m³/s, 2000 m³/s e 3000 m³/s são apresentados no Anexo D.

De acordo com os resultados apresentados nas Figuras 8.14 a 8.16, para a vazão de 4000 m³/s, observa-se que a dispersão em relação aos ajustes médios é inversamente proporcional à escala da estrutura, ou seja, a dispersão no modelo 1:100 é maior que no modelo 1:32. No entanto, a máxima dispersão é da mesma ordem de grandeza nas diferentes escalas de modelo ($\cong 30\%$) e ocorre nas tomadas localizadas no trecho curvo do perfil do vertedouro (onde existe influência do raio de curvatura). À medida que diminui a vazão, a dispersão nessas tomadas diminui. Verificou-se a mesma tendência para as outras condições de escoamento analisadas considerando os diferentes modelos.

Analisando as Figuras 8.14 a 8.16 e também os ajustes determinados para as demais condições de escoamento (apresentadas no Anexo D), foi possível observar que os valores medidos no protótipo enquadram-se dentro das faixas de dispersão definidas, excetuando as tomadas situadas na curva. Nota-se que as maiores diferenças ocorrem nas vazões de 3000 m³/s e 4000 m³/s.

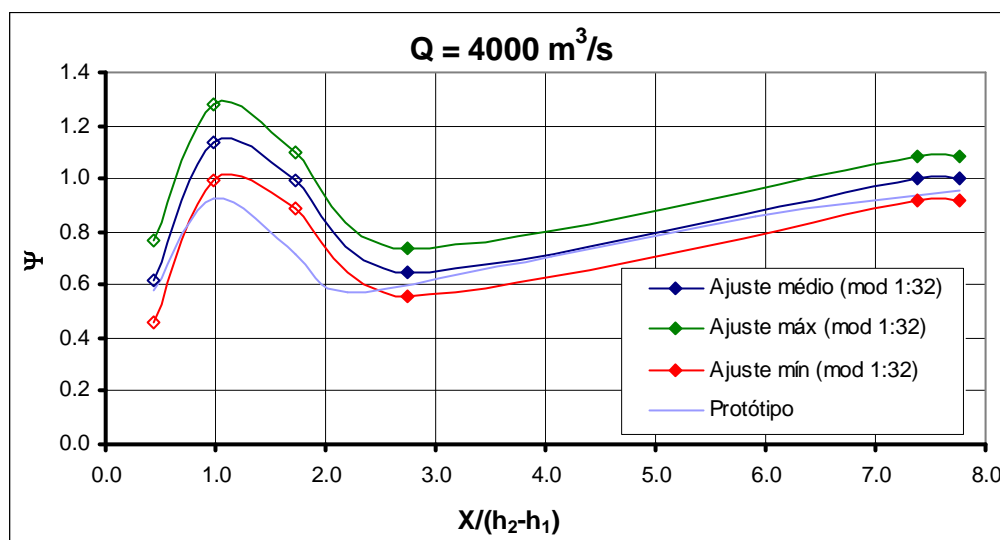


Figura 8.14 – Dispersão natural do coeficiente de pressão média (Ψ) considerando as amostras obtidas no modelo na escala 1:32 da UHE Porto Colômbia ($Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$). Os pontos situados no trecho curvo estão representados pelos símbolos vazados (\diamond).

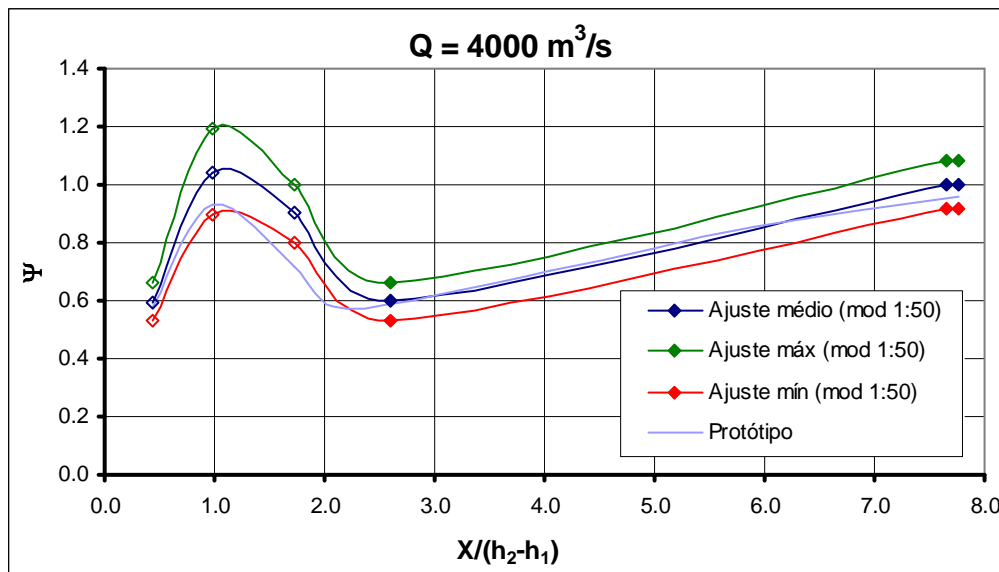


Figura 8.15 – Dispersão natural do coeficiente de pressão média (Ψ) considerando as amostras obtidas no modelo na escala 1:50 da UHE Porto Colômbia ($Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$). Os pontos situados no trecho curvo estão representados pelos símbolos vazados (\diamond).

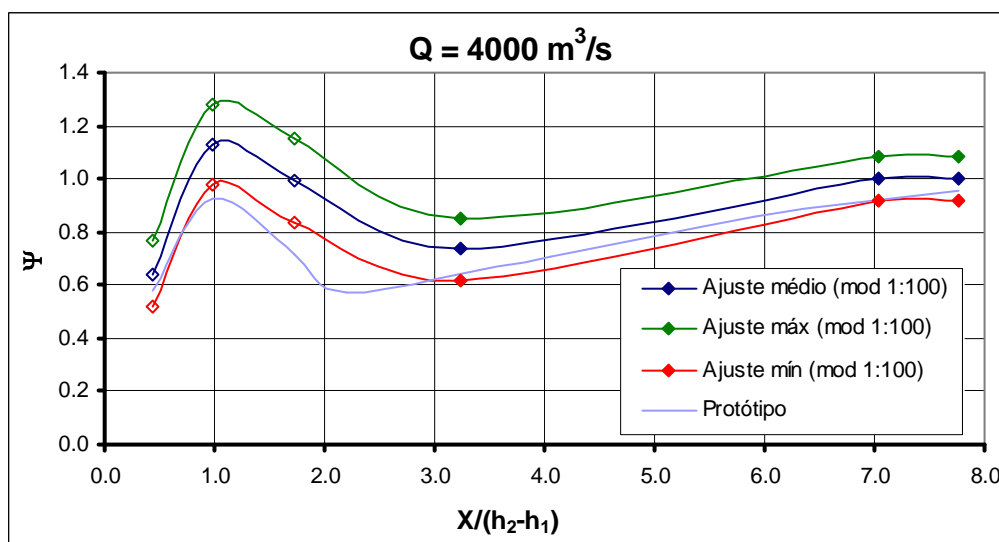


Figura 8.16 – Dispersão natural do coeficiente de pressão média (Ψ) considerando as amostras obtidas no modelo na escala 1:100 da UHE Porto Colômbia ($Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$). Os pontos situados no trecho curvo estão representados pelos símbolos vazados (\diamond).

A comparação das pressões médias obtidas através de medições em modelos reduzidos e no protótipo deve ser realizada de forma cuidadosa. É necessário ter em mente que as condições de contorno não são as mesmas. Por exemplo, existem diferenças com relação aos números de Froude na entrada do ressalto (Fr_1) e nas submergências (S) para uma mesma condição de escoamento.

De acordo com Wiest (2008), a submergência do escoamento afeta os resultados e quanto menor o Fr_1 , mais agitado é o escoamento. Isso explica as diferenças mais significativas vistas nas maiores vazões.

Além das considerações citadas, cabe lembrar que a entrada de ar nos modelos reduzidos não corresponde ao valor que ocorre no protótipo, para uma mesma situação de escoamento, conforme analisado anteriormente (Tabela 8.1). A Figura 8.17 apresenta o ajuste para a pressão média realizado a partir das amostras de pressão obtidas no modelo 1:32 e os valores obtidos no protótipo, para a vazão de $4000 \text{ m}^3/\text{s}$, comparados com a concentração de ar ao longo do ressalto (apresentada em relação a concentração máxima), definida por Rajaratnam (1962).

Pela análise da Figura 8.17 verifica-se, por exemplo, que a segunda e terceira tomada estão sob influência da zona de aeração do escoamento, considerando a classificação proposta por Rajaratnam (1962), o que pode justificar a diferença encontrada entre os valores de pressão medidos no protótipo e o ajuste médio feito com base no modelo 1:32. É possível observar que a partir da posição adimensional $4,0$, a quantidade de ar diminui sensivelmente e os coeficientes de pressões médias (Ψ) determinados para o modelo 1:32 e o protótipo praticamente coincidem. Sendo assim, verificou-se que os ajustes e suas respectivas envoltórias determinados para a pressão média estão em acordo com a dispersão natural do fenômeno.

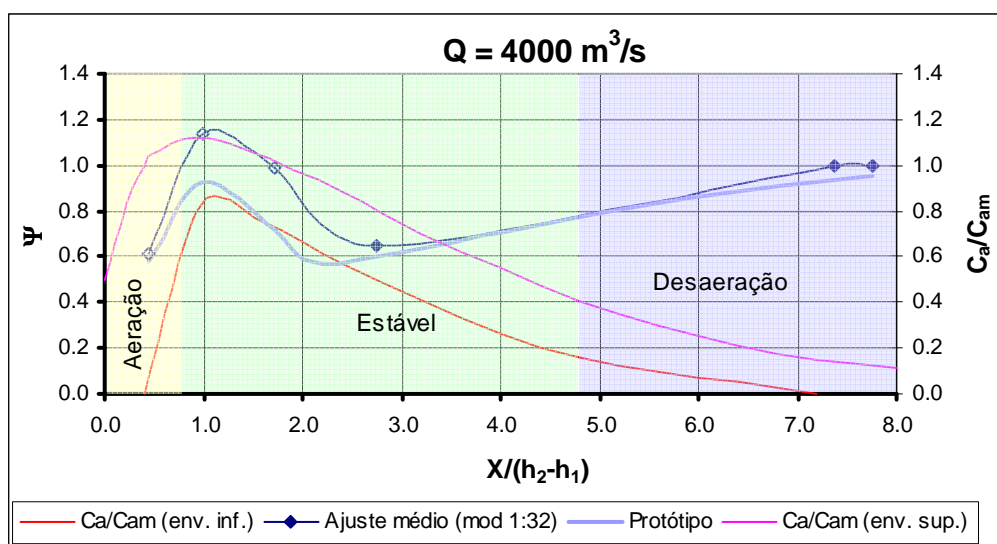


Figura 8.17 – Comparação entre a concentração de ar (definida por Rajaratnam, 1962) com os ajustes determinados para a pressão média com base no modelo 1:32 e os valores medidos diretamente no protótipo da UHE porto Colômbia ($Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$).

A partir da definição dos ajustes médios para cada uma das vazões, foram analisados os possíveis efeitos de escala na pressão média através da comparação dos valores obtidos nos ensaios em modelo reduzido ($P_{x\ mod}$), nas diferentes escalas, com os valores medidos no protótipo ($P_{x\ prot}$). Nessa avaliação foram consideradas as envoltórias superiores e inferiores, para cada condição de escoamento, determinadas para o modelo na escala 1:32. Essa decisão foi tomada devido ao modelo 1:32 ser a estrutura com as dimensões mais próximas do protótipo e também por apresentar a faixa de dispersão mais restritiva.

A Figura 8.18 apresenta as diferenças relativas admissíveis para cada tomada de pressão em função da dispersão natural dos dados, considerando a vazão de 4000 m³/s. Foram comparados os dados amostrais obtidos entre as diferentes escalas de modelo, ou seja, considerou-se nessas situações o modelo de maior dimensão como sendo um “protótipo”.

Os resultados para as demais condições de escoamento analisadas (vazões de 1000 m³/s, 2000 m³/s e 3000 m³/s) estão apresentados no Anexo D.

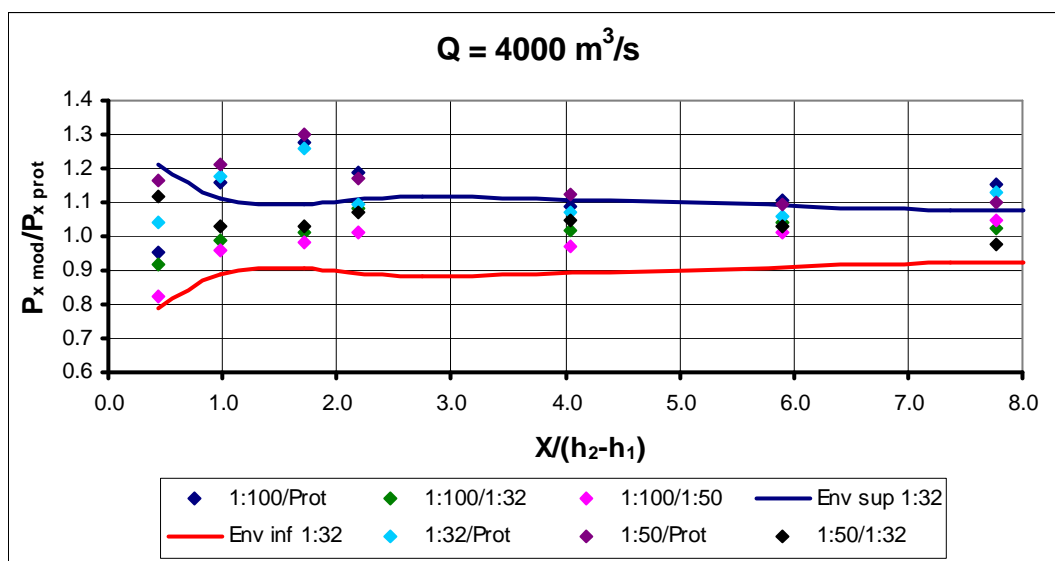


Figura 8.18 – Distribuição longitudinal das diferenças relativas da pressão média, $Q = 4000\ m^3/s$, considerando **as amostras** obtidas nas diferentes escalas de modelo e no protótipo. As envoltórias foram definidas com base nos dados obtidos no modelo 1:32.

Conforme os resultados apresentados na Figura 8.18 e no Anexo D, observa-se que, para algumas tomadas, os valores de pressão média nos modelos físicos situam-se acima do intervalo máximo definido no estudo, principalmente quando

comparados com as pressões médias determinadas com base nas amostras coletadas no protótipo da UHE Porto Colômbia. Além disso, é possível ainda fazer algumas constatações:

- as tomadas situadas no centro e no final da curva, além da primeira do trecho plano (ainda sobre o efeito da curvatura), são as que se situam fora da faixa de dispersão natural dos dados e;
- à medida que a vazão diminui (ou seja, o Fr_1 aumenta), a dispersão diminui e nesse caso, a submergência aumenta. Isso determina uma maior massa d'água nas primeiras tomadas de pressão. Esse fato deve “amenizar” o efeito da entrada de ar nas primeiras tomadas.

A partir da análise das diferenças relativas em função das escalas dos modelos apresentadas anteriormente, foi estudada separadamente a dispersão presente em cada uma das tomadas, para cada condição de escoamento. A Figura 8.19 e a Figura 8.20 apresentam a dispersão das tomadas dC e d1 para a vazão de 4000 m³/s (que corresponde a situação de escoamento mais desfavorável). A análise das demais tomadas de pressão, para a vazão de 4000 m³/s, está apresentada no Anexo D. Os ajustes médios apresentados foram determinados apenas com o intuito de verificar tendências do comportamento das diferenças relativas em cada uma das tomadas, ou seja, como uma forma de “quantificar” os possíveis efeitos de escala nos valores de pressão média.

Observa-se pela Figura 8.19 e Figura 8.20 que a escala mínima que representa os valores medidos diretamente no protótipo da UHE Porto Colômbia, considerando a dispersão definida anteriormente, é de 1:5 na tomada dC e 1:20 na tomada d1.

Os resultados obtidos nesta pesquisa implicaram na sugestão de escalas de mínimas de modelos para ter-se uma previsão dos valores de pressão média junto ao fundo de bacias de dissipação por ressalto hidráulico com um grau de confiabilidade de 95 %, de acordo com a distribuição de *Student*.

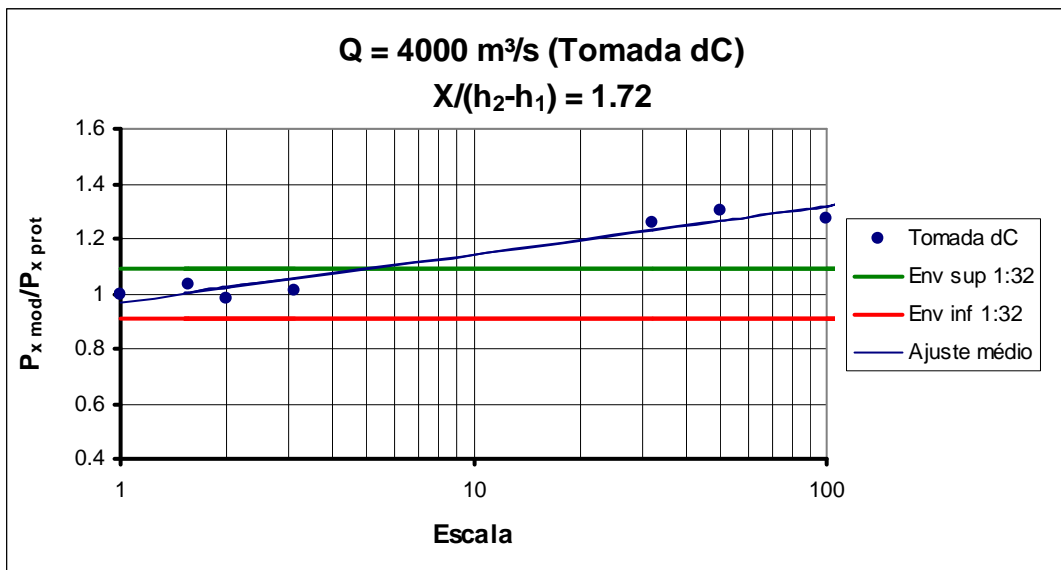


Figura 8.19 – Diferenças relativas da pressão média para a tomada de pressão dC, $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$, considerando **as amostras** obtidas nas diferentes escalas de modelo e no protótipo. As envoltórias foram definidas com base nos dados obtidos no modelo 1:32.

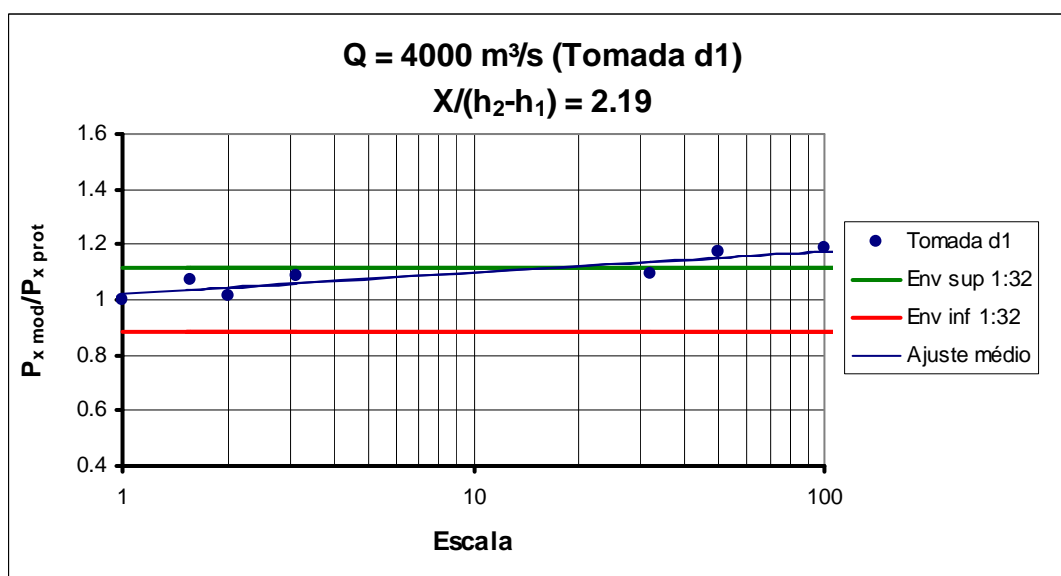


Figura 8.20 - Diferenças relativas da pressão média para a tomada de pressão d1, $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$, considerando **as amostras** obtidas nas diferentes escalas de modelo e no protótipo. As envoltórias foram definidas com base nos dados obtidos no modelo 1:32.

A Tabela 8.4 apresenta as sugestões de escalas mínimas a serem adotadas em estudos de modelos reduzidos de maneira a reduzir os efeitos de escala nos valores de pressão média. Os resultados apresentados na Tabela 8.4 indicam que, para o estudo da distribuição da pressão média ao longo do ressalto, quanto maiores são as vazões (ou seja, menores são os valores do Fr_1 e da submergência

do escoamento), maior deverá ser a escala do modelo físico. Pode-se ainda observar que os pontos críticos correspondem as posições relativas às tomadas dB, dC e d1, que situam-se no trecho curvo, ou ainda sob sua influência, e coincidem com as zonas de maior flutuação de pressão e entrada de ar no escoamento.

Tabela 8.4 – Escalas mínimas a serem executadas nos modelos reduzidos para obter valores de pressão média similares aos de protótipo (considerando **as amostras** de dados obtidas durante as campanhas de medição).

Fr ₁ *	S*	Q* (m ³ /s)	TOMADAS DE PRESSÃO						
			dA	dB	dC	d1	d3	d5	d7
9,35	2,58	1000	-	50	60	-	-	-	-
7,01	1,86	2000	-	50	20	-	-	-	-
5,95	1,58	3000	-	18	8	20	15	25	25
5,23	1,44	4000	-	15	5	20	28	28	15

* Os valores apresentados correspondem ao protótipo da UHE Porto Colômbia.

** Nas posições onde não constam valores, considerou-se que o modelo reduzido deve ser na escala mínima de 1:100, que corresponde ao menor tamanho de estrutura analisado nesta pesquisa.

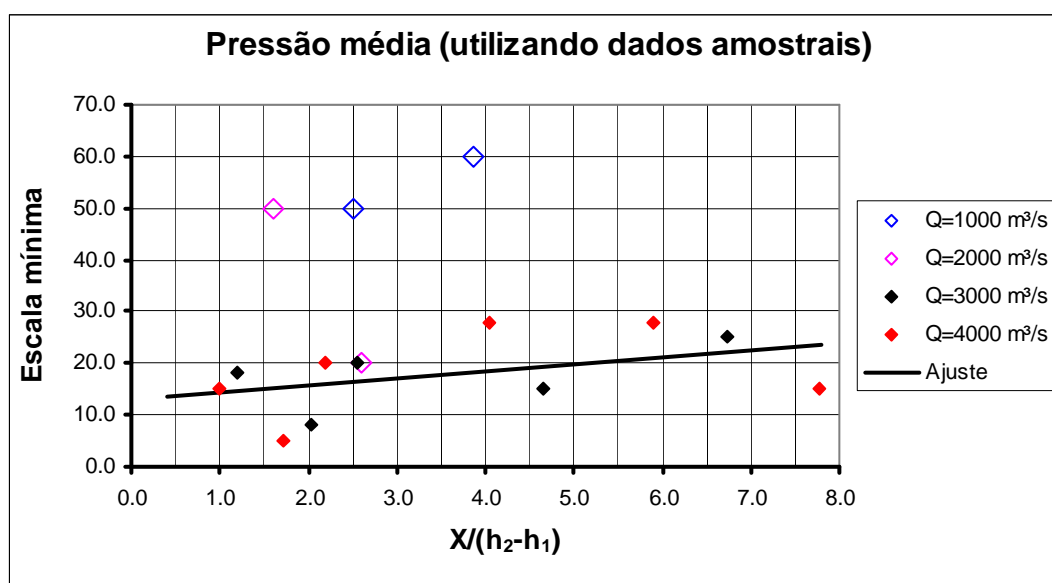


Figura 8.21 - Escalas mínimas sugeridas para a pressão média em função da posição adimensional relativa ao início do ressalto (com base **nas amostras** obtidas nas campanhas de medição).

Uma outra forma de analisar os efeitos de escala na distribuição da pressão média foi selecionar os valores mínimos e máximos (limite inferior e superior) para cada uma das condições de escoamento (apresentadas na Tabela 8.4). A Figura

8.22 apresenta os referidos valores plotados em função do número de Froude na entrada (Fr_1) e da submergência (S).

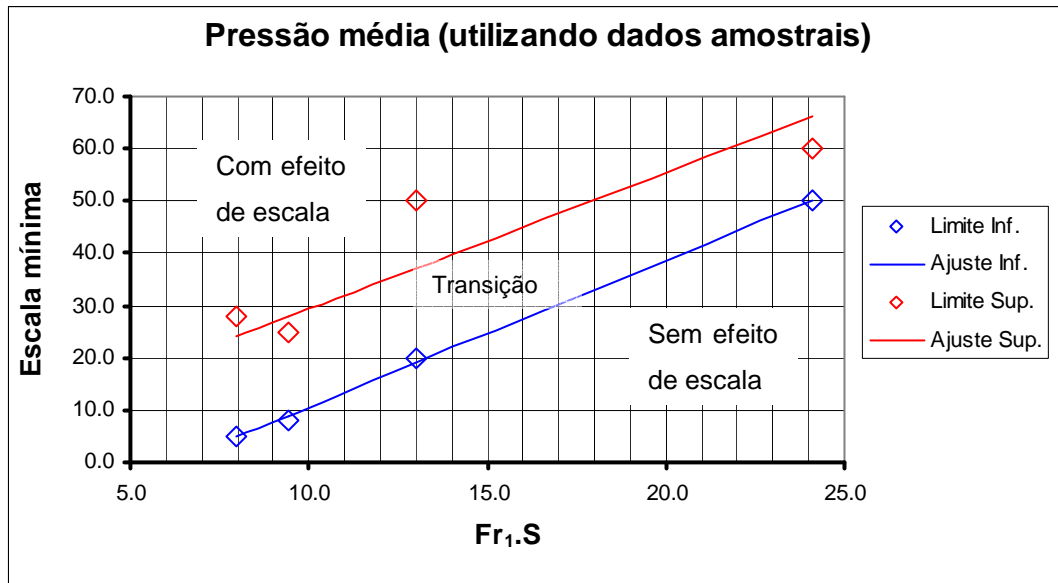


Figura 8.22 – Escalas mínimas sugeridas para a pressão média em função do número de Froude na entrada e da submergência (com base nas amostras de dados obtidos durante as campanhas de medição).

Nota-se pela Figura 8.22 que os menores Fr_1 e S (maiores vazões) necessitam modelos de maiores dimensões. A figura citada também apresenta uma sugestão de ajustes (inferior e superior) com base nas escalas mínimas e máximas. Dessa forma, foram determinadas três zonas distintas: 1) zona onde não existe efeito de escala; 2) zona de transição e 3) zona onde existe efeito de escala. A partir da classificação é possível dizer que para uma relação “ $Fr_1.S$ ” em torno de 10, o modelo físico para representar com exatidão os valores de pressão média no protótipo (sem efeitos de laboratório) deve ser na escala 1:10. No entanto, pode-se adotar modelos com escala até 1:30, dependendo das características do escoamento a serem avaliadas. Acima desse valor, possivelmente devam existir efeitos de escala nos valores médios de pressão.

De acordo com a análise apresentada anteriormente, foi possível constatar os seguintes aspectos sobre o efeito de escala na pressão média:

- a) é maior no trecho curvo (tomadas dA, dB e dC), podendo-se propagar para jusante até a posição da tomada d1;
- b) aumenta com o crescimento da vazão específica (menor número de Froude na entrada do ressalto);
- c) é maior nas posições relativas coincidentes com o trecho de maior flutuação de pressão; e
- d) é decorrente da soma do efeito do raio de curvatura, da posição do início do ressalto.

Pelos motivos citados, para reproduzir os valores medidos no protótipo da UHE Porto Colômbia, dentro da dispersão natural dos dados, tornam-se necessários modelos com grandes dimensões.

Sendo assim, resolveu-se fazer uma avaliação das escalas a serem adotadas nos modelos físicos se supusermos diferenças relativas maiores que a dispersão natural. Com isto estaremos aumentando a dispersão aceitável (definida a partir das diferenças relativas, como mostrado na Figura 8.19, por exemplo) em relação ao valor medido no protótipo, até que a mesma corresponda a modelos na escala 1:100. Este estudo teve como base os valores obtidos nas tomadas dC e d1 (que representam as condições mais desfavoráveis) para todas as vazões ensaiadas. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 8.23.

Os resultados obtidos são apresentados na Figura 8.23. Observa-se que se for aceita uma dispersão no valor da pressão média de 25 % (relativo ao valor medido no protótipo) poderia ser utilizado um modelo reduzido em torno da escala 1:40. Cabe lembrar que a dispersão natural da amostra da P_x é de 12 % para a tomada d1 (vazão de 4000 m³/s), conforme demonstrado anteriormente. Uma dispersão de 25 % na tomada d1 representa um erro de, aproximadamente, 1,7 m.c.a em relação ao valor medido no protótipo (que foi de 6,91 m).

A Tabela 8.5 apresenta uma sugestão de escalas de modelo em função da dispersão, além de apresentar as diferenças absolutas máximas ($\xi_{m\acute{a}x}$) para a tomada dC da vazão de 4000 m³/s (que representa a situação mais desfavorável).

Essa análise visou oferecer informações complementares para que possam ser avaliadas as diferenças que podem existir na transposição dos resultados obtidos em modelos físicos para o protótipo.

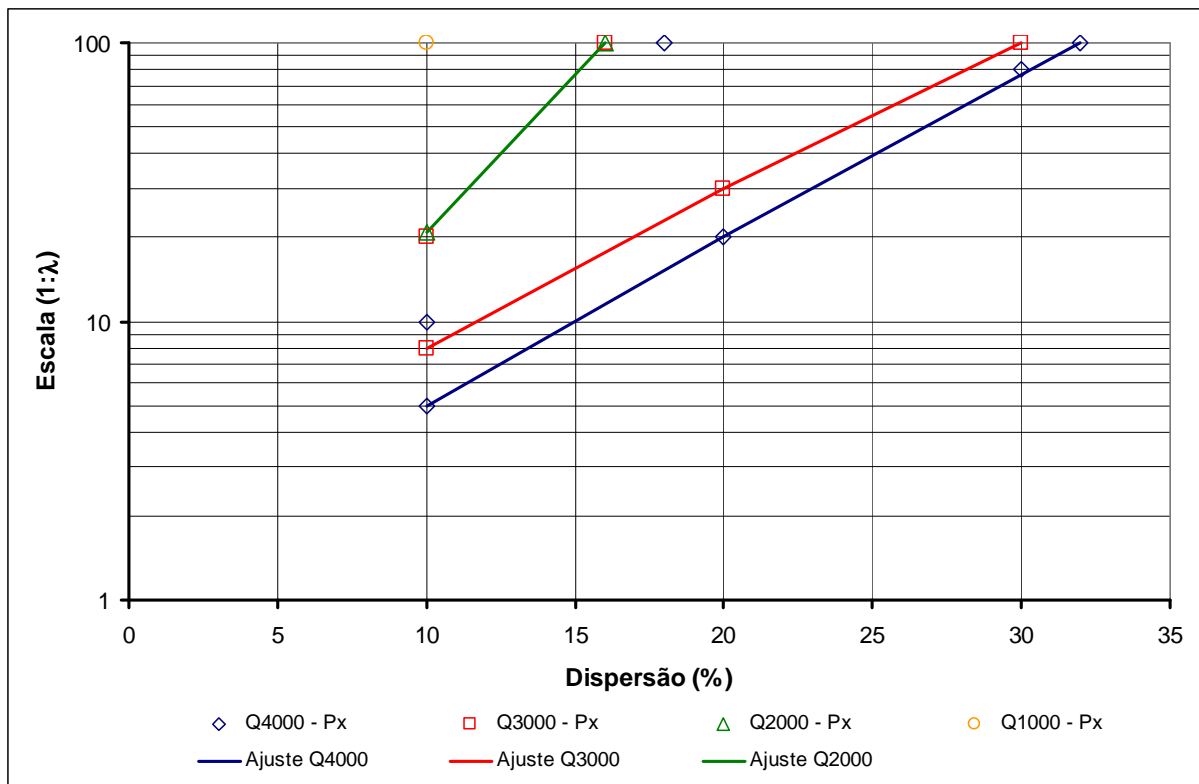


Figura 8.23 – Escalas sugeridas para o estudo da pressão média em função de uma variabilidade da dispersão (com base **nas amostras** obtidas durante as campanhas de medição).

Tabela 8.5 – Diferenças absolutas máximas nos valores de pressão média em função da variação da dispersão.

Dispersão	Escala sugerida (1:λ)	Dif. absoluta máxima (m)
9%*	5	0,62
10%	5	0,70
20%	20	1,38
30%	80	2,07
32%	100	2,21

* corresponde ao valor da dispersão natural dos dados obtidos nos modelos para $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$.

8.2.2 Análise dos efeitos de escala na pressão média com o uso do ajuste proposto por Wiest (2008)

Foram analisados os possíveis efeitos de escala na pressão média através da comparação dos ajustes definidos para cada uma das escalas de modelo ($P_{xaj \text{ mod}}$) com os valores ocorridos no protótipo ($P_{x \text{ prot}}$). A Figura 8.24 apresenta as diferenças relativas admissíveis, para cada tomada de pressão, considerando a vazão

de 4000 m³/s (valor equivalente ao protótipo). Nessa avaliação foram consideradas as envoltórias superiores e inferiores, para cada condição de escoamento, determinadas para o modelo na escala 1:32, como já havia sido feito na análise dos valores amostrais. As demais condições de escoamento analisadas (vazões de 1000 m³/s, 2000 m³/s e 3000 m³/s) estão apresentadas no Anexo D.

De acordo com os resultados apresentados na Figura 8.24 e no Anexo D, observa-se a mesma tendência dos resultados obtidos considerando os valores medidos (advindos das amostras de dados). Para algumas tomadas, principalmente situadas no trecho curvo, as pressões médias calculadas a partir do ajuste proposto por Wiest (2008), para cada uma das escalas de modelo, situam-se acima do intervalo máximo definido no estudo. Além disso, pode-se afirmar que a dispersão dos ajustes é levemente maior quando comparada com dispersão natural dos valores medidos.

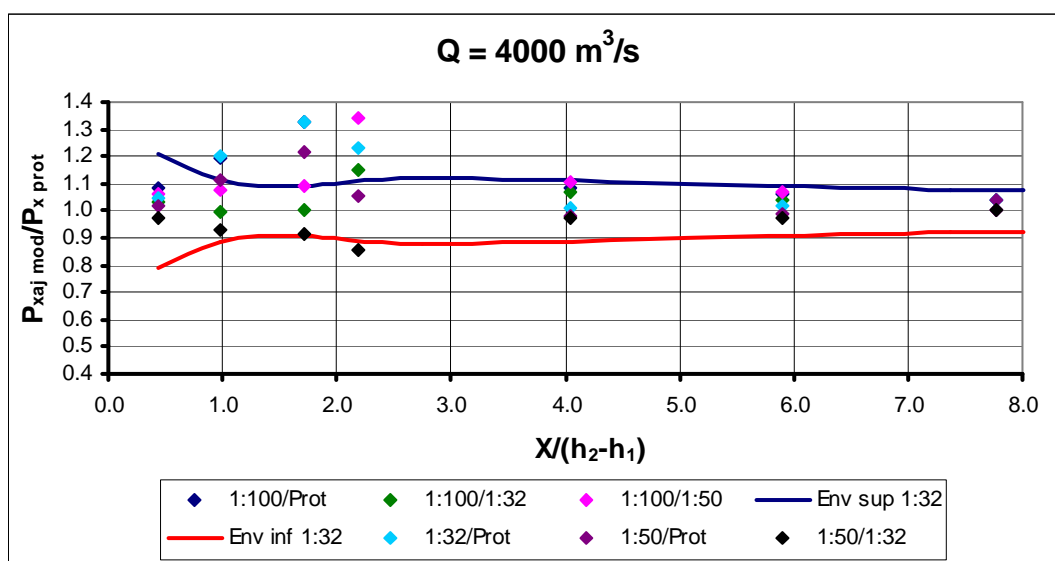


Figura 8.24 – Distribuição longitudinal das diferenças relativas da pressão média, $Q = 4000\ m^3/s$, considerando **os ajustes** determinados com base nas diferentes escalas de modelo e no protótipo. As envoltórias foram definidas com base nos dados obtidos no modelo 1:32.

Assim como na análise realizada para os valores amostrais, foram avaliadas as dispersões presentes em cada uma das tomadas considerando os ajustes propostos para a pressão média, para cada uma das escalas de modelo e situações de escoamento.

A Tabela 8.6 apresenta as sugestões de escalas mínimas a serem adotadas em estudos de modelos reduzidos considerando os ajustes para cálculo da distribuição da pressão média.

*Tabela 8.6 - Escalas mínimas a serem executadas nos modelos reduzidos para obter valores de pressão média similares aos de protótipo (considerando **os ajustes** determinados para as diferentes escalas).*

Fr ₁ *	S*	Q* (m ³ /s)	TOMADAS DE PRESSÃO						
			dA	dB	dC	d1	d3	d5	d7
9,35	2,58	1000	35	20	15	8	-	-	-
7,01	1,86	2000	-	15	9	13	80	-	-
5,95	1,58	3000	-	12	5	5	25	50	-
5,23	1,44	4000	-	20	5	4	-	-	-

* Os valores apresentados correspondem ao protótipo da UHE Porto Colômbia.

** Nas posições onde não constam valores, considerou-se que o modelo reduzido deve ser na escala mínima de 1:100, o que corresponde ao menor tamanho de estrutura analisado nesta pesquisa.

Os resultados apresentados na Tabela 8.6 indicam que quanto maiores são as vazões, maior deverá ser a escala do modelo físico. Pode-se ainda observar que os pontos críticos correspondem as posições relativas às tomadas dB, dC e d1, que situam-se no trecho curvo, ou ainda sob sua influência.

A Figura 8.25 apresenta as escalas mínimas (conforme Tabela 8.6) em função da posição adimensional relativa ao início do ressalto. Foram contempladas as escalas mínimas de todas as tomadas de pressão, para as quatro vazões. O ajuste apresentado na Figura 8.25 contemplou todos os pontos apresentados no gráfico. Observa-se a tendência de serem adotados modelos entre as escalas 1:10 e 1:20, independente da condição de escoamento e da posição relativa ao início do ressalto. Além disso, é possível notar que as vazões de 2000 e 3000 m³/s possuem uma tendência de ter escalas mínimas inferiores a partir da posição 4, podendo variar entre 1:25 e 1:80. Entretanto, em virtude do pequeno número de dados para essas condições, recomenda-se uma análise criteriosa antes de serem adotados modelos com escalas inferiores à 1:20.

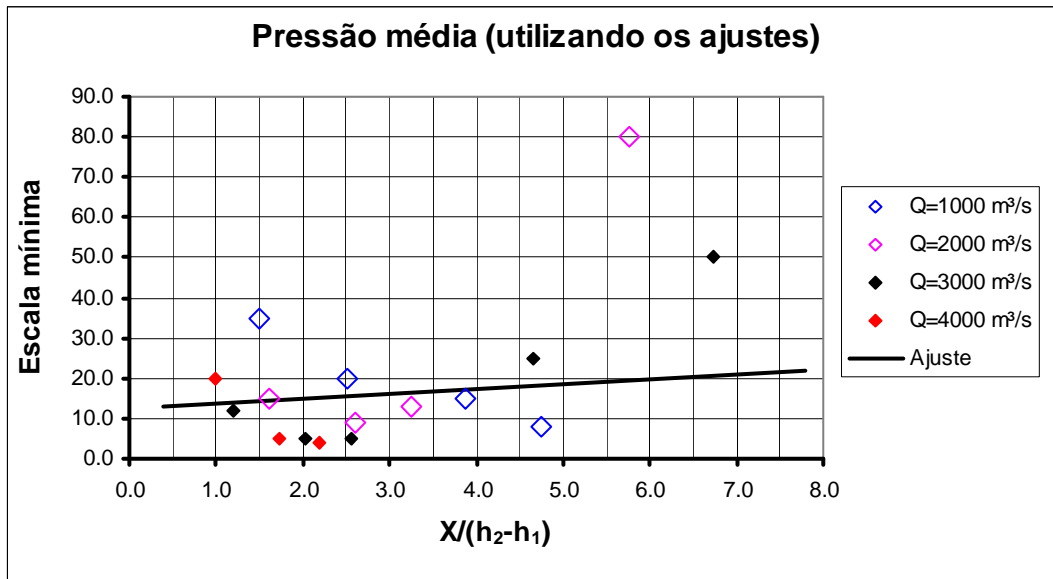


Figura 8.25 - Escalas mínimas sugeridas para a pressão média em função da posição adimensional relativa ao início do ressalto (com base **nos ajustes** determinados para as diferentes escalas).

A Figura 8.26 apresenta as escalas mínimas em função do número de Froude na entrada do ressalto (Fr_1) e da submergência do escoamento (S) com a utilização dos ajustes definidos para a pressão média. Nota-se que os menores Fr_1 e S necessitam modelos de maiores dimensões.

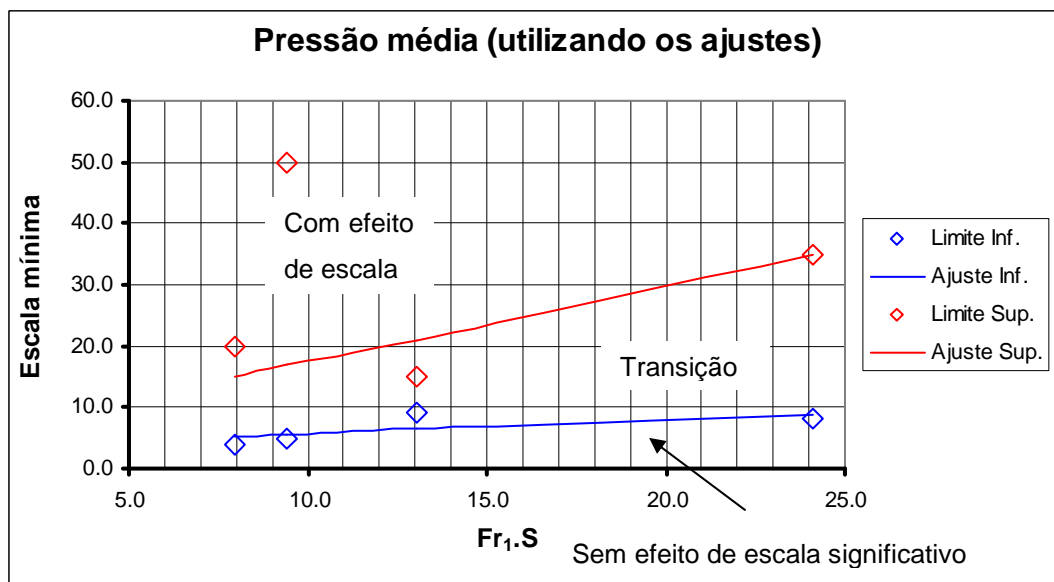


Figura 8.26 - Escalas mínimas sugeridas para a pressão média em função do número de Froude e da submergência (com base **nos ajustes** determinados para as diferentes escalas).

A partir da envoltória definida na Figura 8.26, pode-se concluir que para uma relação “ $Fr_1.S$ ” em torno de 10, o modelo físico para representar com exatidão os valores de pressão média no protótipo (sem efeitos de laboratório) deve ser na escala 1:5. No entanto, pode-se adotar modelos com escala até 1:18, dependendo das características do escoamento a serem avaliadas. Acima desse valor, possivelmente existam efeitos de escala nos valores médios de pressão.

No Anexo D são apresentados os valores de pressão média, não-adimensionalizados (para as diferentes escalas de modelo e protótipo), obtidos a partir das amostras de dados e através da metodologia proposta por Wiest (2008).

9 Análise da flutuação de pressão

O conhecimento da distribuição longitudinal das flutuações de pressão ao longo de um dissipador de energia por ressalto hidráulico é imprescindível para a descrição fiel do fenômeno, assim como para a previsão dos valores extremos de pressão que podem ocorrer na estrutura hidráulica.

Neste capítulo, de forma análoga aos estudos realizados para a pressão média, foram analisados os valores de flutuação de pressão ao longo do ressalto com o intuito de sugerir dimensões mínimas a serem adotadas nas estruturas de laboratório, de modo que os efeitos de escala sejam reduzidos.

9.1 Análise da flutuação de pressão nas diferentes escalas de modelo e protótipo

Assim como para os valores médios, as flutuações de pressão foram adimensionalizadas a partir dos parâmetros do escoamento (como mostra as equações 9.1 e 9.2), de acordo com a sugestão de Wiest (2008). Cabe salientar que o autor reavaliou a proposta de adimensionalização do coeficiente de flutuação de pressão (Ω) proposta por Marques *et al.* (1999) e concluiu, após avaliar as medições que realizou no modelo 1:50, por utilizar o quadrado do inverso da submergência (ao invés da relação elevada apenas à unidade).

$$\Omega = \frac{\sigma_x}{H_t} \frac{h_2}{h_1} \cdot \left(\frac{1}{S}\right)^2 \quad (\text{Eq. 9.1})$$

$$\Gamma = \frac{X}{h_2 - h_1} \quad (\text{Eq. 9.2})$$

Onde:

Ω = flutuação de pressão da amostra adimensionalizada;

σ_x = flutuação da pressão média (desvio padrão) e;

H_t = perda de energia no ressalto hidráulico.

Com a utilização das equações 9.1 e 9.2 foram comparadas as distribuições longitudinais das flutuações de pressão ocorridas no protótipo da UHE Porto Colômbia e nos modelos reduzidos nas escalas 1:100, 1:50 e 1:32.

Na Figura 9.1 é apresentada uma comparação dos valores brutos de flutuação de pressão (σ_x), para o protótipo e diferentes escalas de modelo, em função da posição adimensionalizada relativa ao início do ressalto hidráulico (Γ), considerando a vazão de $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ ($S = 1,44$). A Figura 9.2 apresenta os mesmos dados de flutuação de pressão, porém, de forma adimensionalizada (Ω). As comparações para as demais situações de escoamento (tanto para os dados brutos como adimensionalizados) estão apresentadas no Anexo E.

Pela análise da Figura 9.1 e da Figura 9.2 é possível constatar que os valores de flutuação de pressão no protótipo e nos modelos apresentam um mesmo padrão de desenvolvimento no trecho plano (após a tomada dC). Os valores obtidos nos modelos reduzidos, no trecho plano, tendem a resultar um pouco acima dos dados de protótipo, no entanto, não é possível definir um comportamento em função das escalas. Além disso, verifica-se que as maiores diferenças estão nas tomadas situadas no trecho curvo, que estão sob o efeito do raio de curvatura entre o perfil e a bacia. Para todas as vazões, o valor da flutuação na tomada dA no protótipo é inferior aos valores medidos nos modelos.

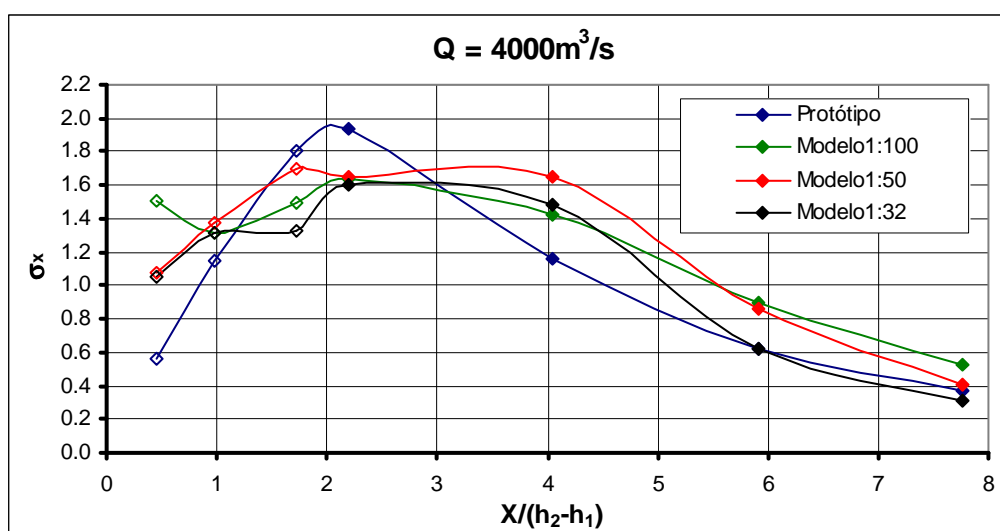


Figura 9.1 - Distribuições longitudinais dos valores brutos de flutuação de pressão (σ_x) observadas na bacia de dissipação da UHE Porto Colômbia e nos modelos 1:32; 1:50 e 1:100 ($Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$). As tomadas situadas no trecho curvo estão representadas pelos símbolos vazados (\diamond).

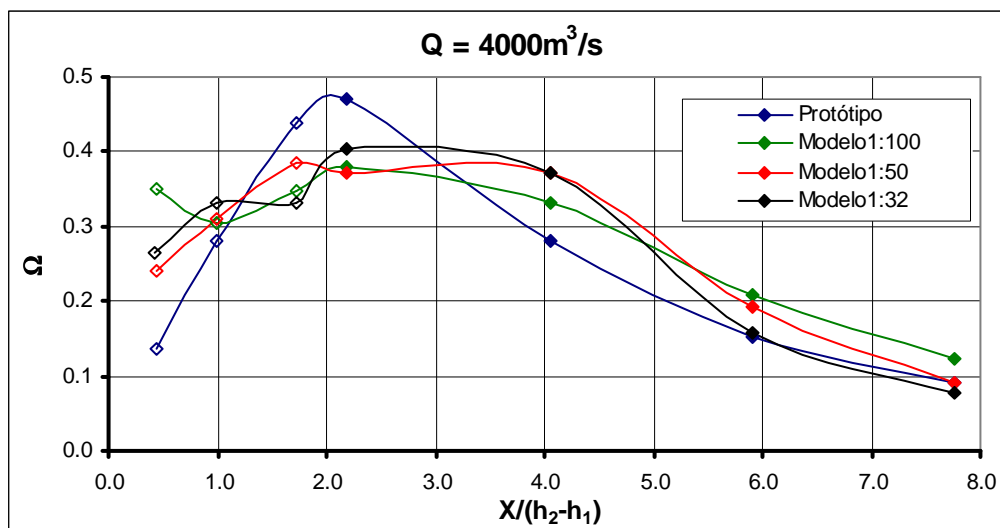


Figura 9.2 - Distribuições longitudinais do coeficiente de flutuação de pressão (Ω) observadas na bacia de dissipação da UHE Porto Colômbia e nos modelos 1:32; 1:50 e 1:100 ($Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$). As tomadas situadas no trecho curvo estão representadas pelos símbolos vazados (\diamond).

9.2 Análise da dispersão natural das amostras e do efeito escala na flutuação de pressão

Foi realizada uma análise da dispersão natural dos valores de flutuação de pressão baseada nos resultados obtidos por Wiest (2008) para o ressalto submerso.

Da mesma forma como ocorreu em relação à distribuição das pressões médias, a metodologia proposta por Wiest (2008) consistiu na avaliação de pontos característicos das flutuações de pressão ao longo do ressalto em função da submersão. O estudo teve como base os ensaios realizados no modelo físico reduzido na escala geométrica 1:50 da UHE Porto Colômbia (ressalto submerso) e também os resultados de Endres (1990) e Marques (1997) para o ressalto livre.

Inicialmente foi avaliado o comportamento da flutuação nas três tomadas de pressão situadas sobre o trecho curvo do perfil do vertedouro. Verificou-se nessas tomadas uma variabilidade significativa dos valores das flutuações, como também visto no presente estudo (item 9.1). A análise realizada por Wiest (2008) notou claramente a influência tanto do número de Froude (Fr_1) como da submersão (S). Os pontos no trecho curvo correspondem as posições relativas adimensionais (Γ) das tomadas de pressão dA, dB e dC para cada condição de escoamento.

De maneira a completar a caracterização das flutuações de pressão ao longo do ressalto submergido, o pesquisador identificou outros três pontos característicos, conforme é descrito a seguir (a Figura 9.3 auxilia no entendimento da metodologia proposta):

- Ponto “d” (inflexão): onde ocorre o encontro das curvas correspondentes aos ressaltos submergidos com a curva do ressalto livre;
- Ponto “e” (máximo): onde se caracteriza a máxima flutuação de pressão e;
- Ponto “f” (inflexão): onde é possível visualizar uma mudança na orientação da concavidade da curva.

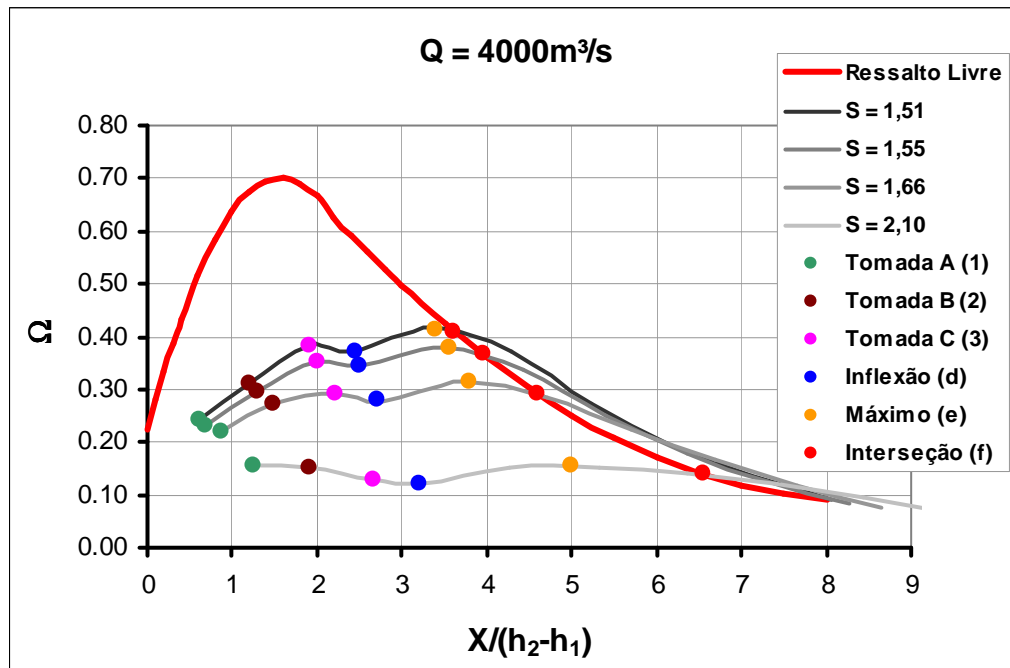


Figura 9.3 - Pontos característicos da distribuição longitudinal da flutuação de pressão para o ressalto submergido, de acordo com Wiest (2008).

Para cada um dos pontos característicos da flutuação de pressão citados anteriormente está associado um ajuste em função do número de Froude na entrada do ressalto (Fr_1) e da submergência (S). Além disso, foram determinados ajustes para determinação das posições relativas adimensionais (Γ) de cada um dos pontos.

A equação 9.3 representa o ajuste da flutuação de pressão em função do Fr_1 e da S do escoamento para as tomadas situadas no trecho curvo (dA, dB e dC).

A Tabela 9.1 apresenta os coeficientes da equação 9.3 para cada uma das referidas tomadas de pressão.

$$\frac{\Omega}{Fr_1^2} = a \cdot e^{b \cdot S} \quad (\text{eq. 9.3})$$

Tabela 9.1 – Coeficientes de ajuste para a distribuição longitudinal da flutuação de pressão ao longo do trecho curvo referente à metodologia proposta por Wiest (2008) para o modelo 1:50.

Posição/Coeficientes	a	b
Ponto 1 (Tomada dA)	0,0576	-1,1176
Ponto 2 (Tomada dB)	0,1889	-1,3073
Ponto 3 (Tomada dC)	0,5853	-1,4242

A Tabela 9.2 apresenta os ajustes para os pontos característicos “d”, “e” e “f”, assim como as equações para determinação de suas respectivas posições relativas em função da submergência.

Tabela 9.2 - Ajustes para os pontos característicos “d”, “e” e “f” e as equações para cálculo de suas posições relativas de acordo com a metodologia proposta por Wiest (2008) para o modelo 1:50.

Ponto característico	Ajuste para a flutuação	Posição relativa
Ponto 4 (intersecção)	$\Omega = 1,5046 \cdot S^{-3,338}$ (eq. 9.4)	$\Gamma = 9,3004 \cdot \ln(S) - 0,0156$ (eq. 9.5)
Ponto 5 (máximo)	$\Omega = 2,7450 \cdot e^{-1,3152 \cdot S}$ (eq. 9.6)	$\Gamma = 4,1312 \cdot \ln(S) + 1,6824$ (eq. 9.7)
Ponto 6 (inflexão)	$\Omega = 0,9090 \cdot S^{-2,4041}$ (eq. 9.8)	$\Gamma = 2,1527 \cdot \ln(S) + 1,4716$ (eq. 9.9)

Conforme metodologia proposta por Wiest (2008) para inferir a distribuição longitudinal da flutuação de pressão com base nos valores medidos no modelo 1:50, foram determinados ajustes para as amostras de dados coletadas nas escalas 1:32 e 1:100. Os coeficientes dos ajustes são bastante semelhantes aos determinados para o modelo 1:50. Todos esses resultados estão apresentados no Anexo E da presente pesquisa.

Assim como na pressão média, a partir dos ajustes médios estabelecidos para a flutuação, considerando cada escala de modelo, foram definidas envoltórias superiores e inferiores com base na distribuição estatística de *Student*, com um nível de significância de 95 %. Cabe lembrar que foram considerados os dados de todas as vazões e diferentes submergências.

As Figuras 9.4 a 9.6 apresentam os ajustes médios e as envoltórias estabelecidas para as escalas de modelo 1:32, 1:50 e 1:100, respectivamente, considerando a vazão de 4000 m³/s (valor equivalente ao protótipo). Os resultados para as demais vazões são apresentados no Anexo E. Nas Figuras 9.4 a 9.6 aparecem pontos destacados que correspondem a pontos característicos definidos na metodologia proposta por Wiest (2008). No entanto, de maneira a obter-se um melhor ajuste, foi necessário modificar as suas posições relativas deslocando-os um pouco para jusante.

De acordo com os resultados apresentados nas Figuras 9.4 a 9.6, para a vazão de 4000 m³/s, observa-se que as maiores dispersões estão nas tomadas localizadas no trecho curvo. Esse comportamento foi visualizado também nas demais situações de escoamento, conforme apresentado no Anexo E. Observa-se que a dispersão em relação aos ajustes médios é bastante semelhante. As maiores diferenças ocorrem nas tomadas localizadas no trecho curvo do perfil do vertedouro (onde existe influência do raio de curvatura).

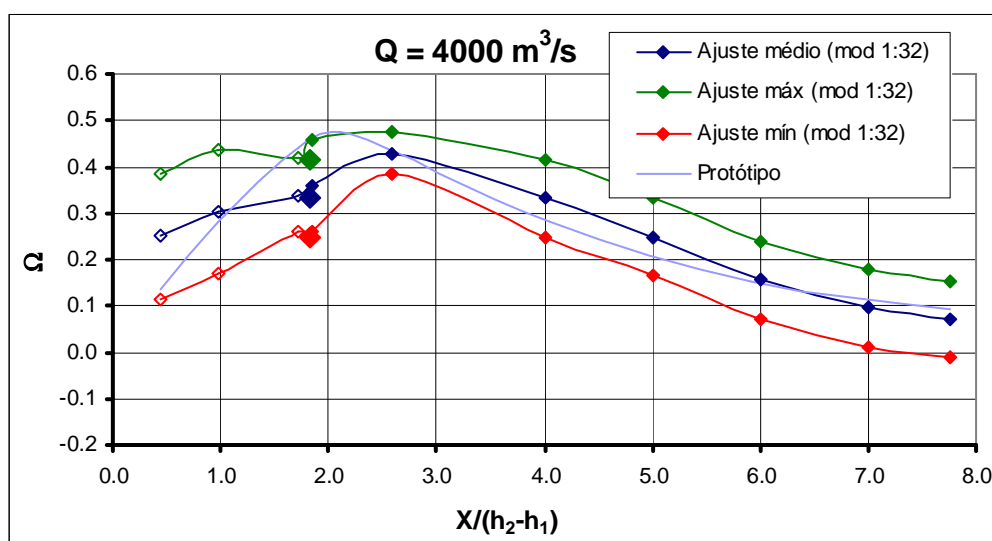


Figura 9.4 - Dispersão natural do coeficiente de flutuação de pressão (Ω) considerando as amostras obtidas no modelo na escala 1:32 da UHE Porto Colômbia ($Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$). Os pontos situados no trecho curvo estão representados pelos símbolos vazados (\diamond).

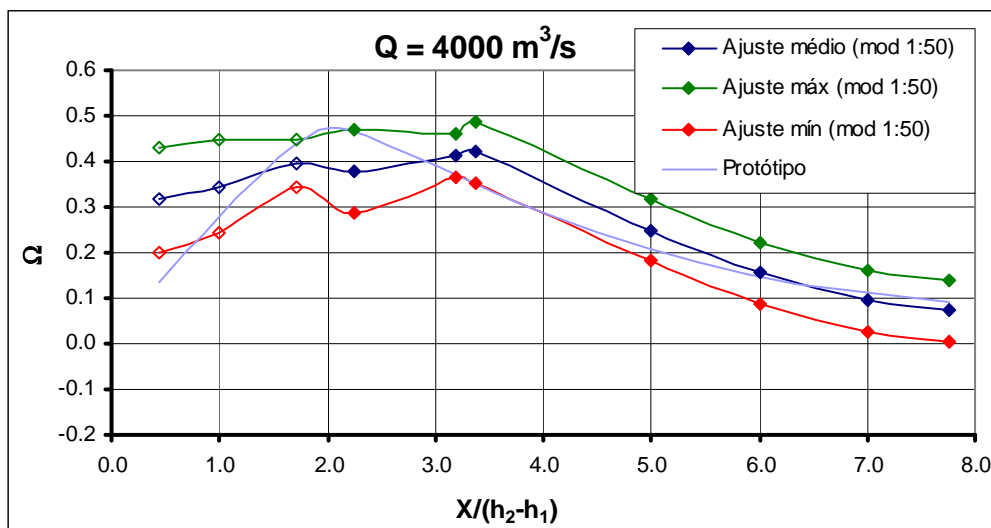


Figura 9.5 - Dispersão natural do coeficiente de flutuação de pressão (Ω) considerando as amostras obtidas no modelo na escala 1:50 da UHE Porto Colômbia ($Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$). Os pontos situados no trecho curvo estão representados pelos símbolos vazados (\diamond).

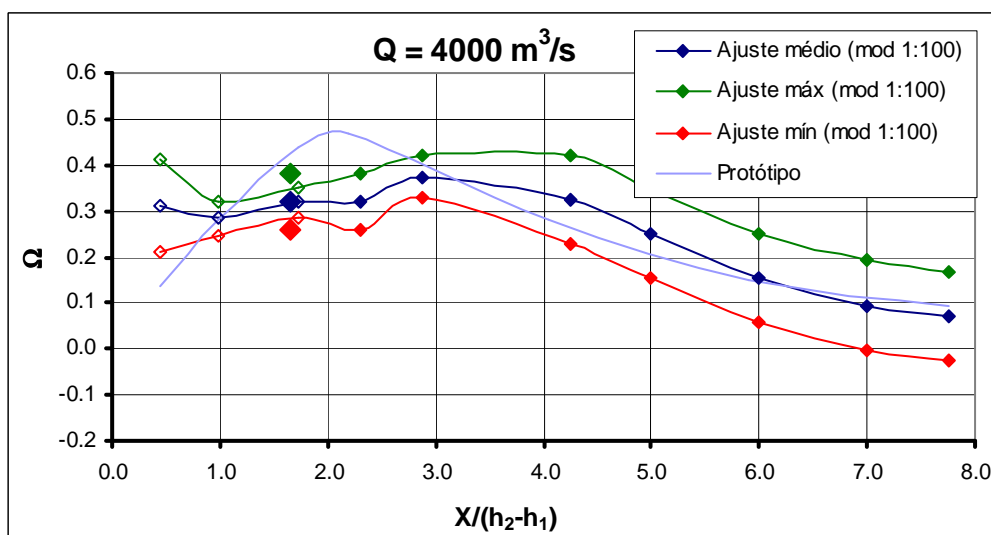


Figura 9.6 - Dispersão natural do coeficiente de flutuação de pressão (Ω) considerando as amostras obtidas no modelo na escala 1:100 da UHE Porto Colômbia ($Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$). Os pontos situados no trecho curvo estão representados pelos símbolos vazados (\diamond).

Em continuação à análise das Figuras 9.4 a 9.6, e também os ajustes determinados para as demais vazões (apresentados Anexo E), foi possível notar que os valores medidos no protótipo enquadram-se dentro das faixas de dispersão definidas, excetuando as tomadas situadas na curva no caso das envoltórias obtidas a partir dos dados do modelo 1:100, apenas para a vazão de $4000 \text{ m}^3/\text{s}$, tratando-se de um caso isolado.

A partir da definição dos ajustes médios para cada uma das vazões foram analisados os possíveis efeitos de escala através da comparação dos valores obtidos nos ensaios em modelo reduzido ($\sigma_{x \text{ mod}}$), nas diferentes escalas, com os valores ocorridos no protótipo ($\sigma_{x \text{ prot}}$). Nessa avaliação foram consideradas as envoltórias superiores e inferiores, para cada uma das condições de escoamento, determinadas para o modelo na escala 1:32.

A Figura 9.7 apresenta as diferenças relativas admissíveis para cada tomada de pressão em função da dispersão natural dos dados de flutuação de pressão, considerando a vazão de 4000 m³/s equivalente ao protótipo. As demais condições de escoamento analisadas (vazões de 1000 m³/s, 2000 m³/s e 3000 m³/s) estão apresentadas no Anexo E.

De acordo com os resultados obtidos para as diferentes vazões (exceto para a vazão de 1000 m³/s onde todos os pontos estão dentro do intervalo) verifica-se que apenas os valores de flutuação de pressão presentes na tomada dA situa-se acima do intervalo máximo definido no estudo. Cabe lembrar que a tomada dA está sob efeito do raio de curvatura entre o perfil do vertedouro e a bacia, fato que pode explicar a presença de maiores diferenças. Além disso, pode-se constatar que à medida que a vazão diminui (ou seja, o Fr₁ aumenta), a faixa de dispersão aumenta sensivelmente, ao contrário do que ocorre com a pressão média.

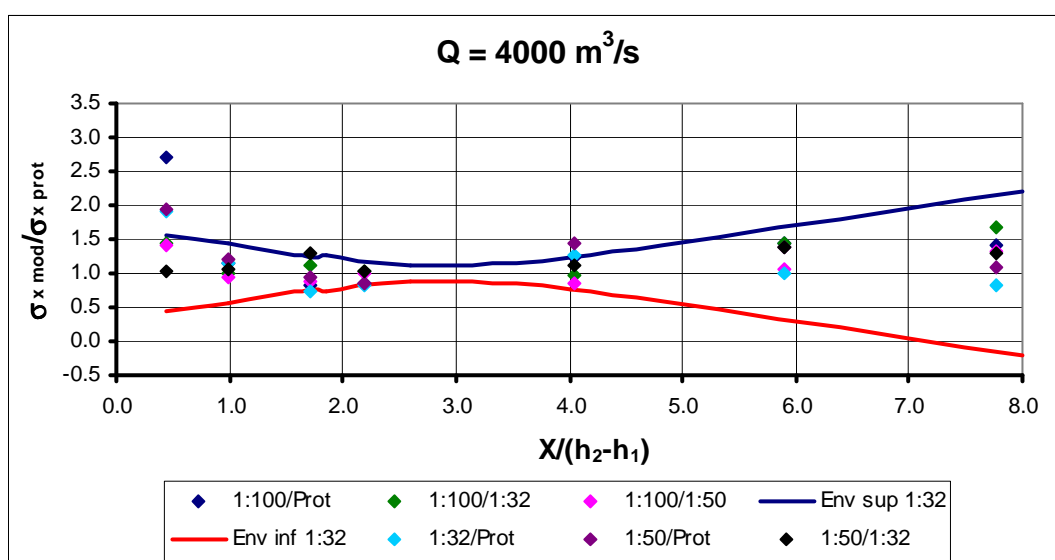


Figura 9.7 - Distribuição longitudinal das diferenças relativas da flutuação de pressão, $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$, considerando **as amostras** obtidas nas diferentes escalas de modelo e no protótipo. As envoltórias foram definidas com base nos dados obtidos no modelo 1:32.

A partir da análise das diferenças relativas em função das escalas dos modelos apresentadas anteriormente, foi estudado separadamente a dispersão presente em cada uma das tomadas, para cada uma das vazões. Como exemplos, a Figura 9.8 e a Figura 9.9 apresentam a dispersão das tomadas d1 e d3, vazão de 4000 m³/s.

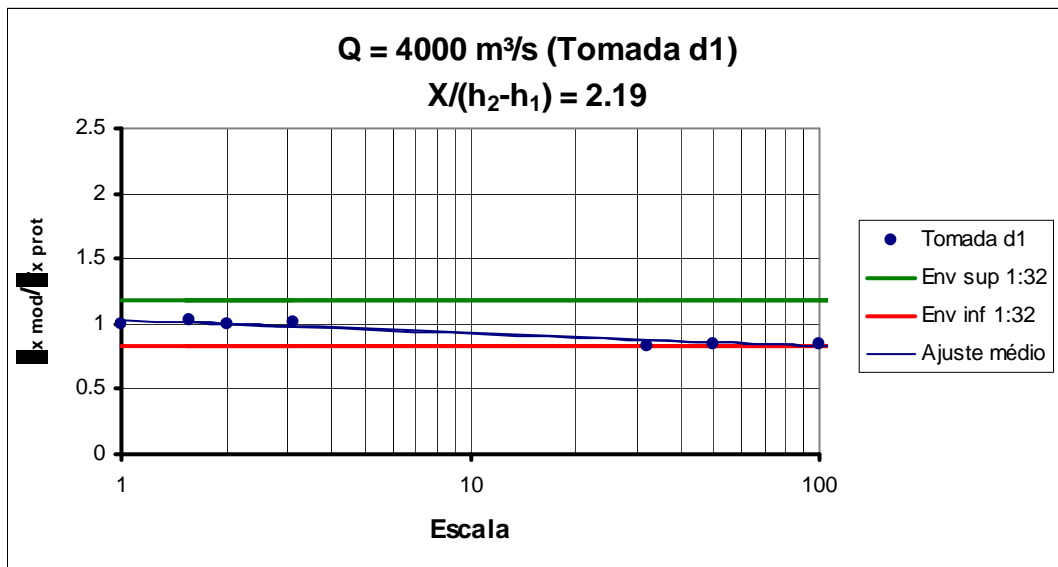


Figura 9.8 - Diferenças relativas da flutuação de pressão para a tomada de pressão d1, $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$, considerando **as amostras** obtidas nas diferentes escalas de modelo e no protótipo. As envoltórias foram definidas com base nos dados obtidos no modelo 1:32.

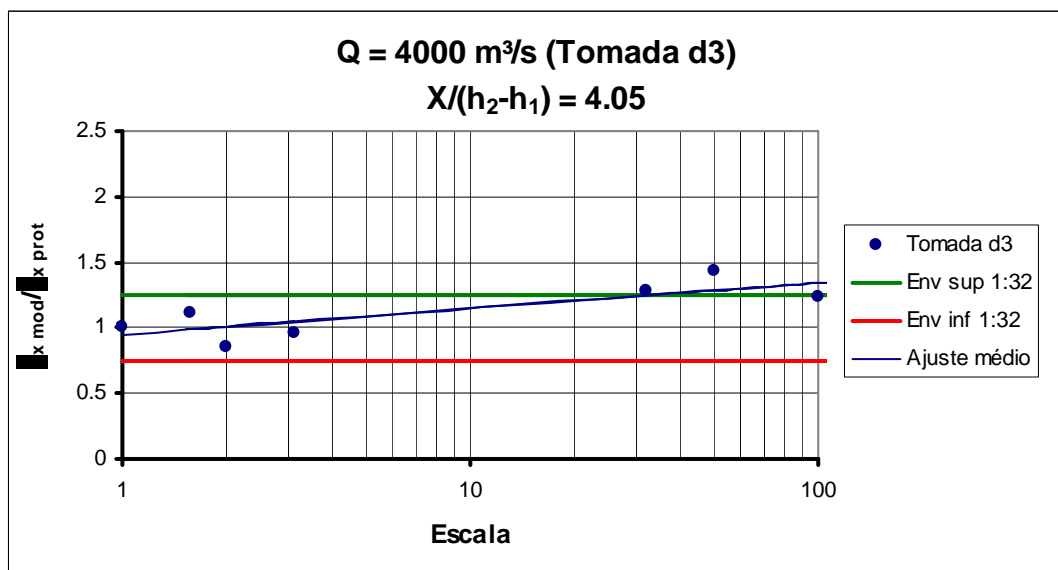


Figura 9.9 - Diferenças relativas da flutuação de pressão para a tomada de pressão d3, $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$, considerando **as amostras** obtidas nas diferentes escalas de modelo e no protótipo. As envoltórias foram definidas com base nos dados obtidos no modelo 1:32.

Cabe ressaltar que os ajustes médios apresentados na Figura 9.8 e Figura 9.9 foram determinados apenas com o intuito de verificar tendências do comportamento das diferenças relativas. A análise das demais tomadas de pressão, considerando a vazão de 4000 m³/s, está apresentada no Anexo E.

Assim como na análise da pressão média, os resultados obtidos implicaram na sugestão de escalas mínimas de modelos físicos a serem utilizados para se ter uma previsão dos valores de flutuação com um grau de confiabilidade de 95 %, de acordo com a distribuição de *Student*.

Verifica-se pela Figura 9.8 e Figura 9.9 que as escalas mínimas que representam os valores medidos diretamente no protótipo da UHE Porto Colômbia, considerando a dispersão definida com base nos valores medidos no modelo 1:32, é de 1:90 para a tomada d1 e de 1:35 para a tomada d3. A Tabela 9.3 apresenta as sugestões de escalas mínimas a serem adotadas em estudos de modelos reduzidos de maneira a reduzir os efeitos de escala nos valores de flutuação de pressão.

*Tabela 9.3 – Escalas mínimas a serem executadas nos modelos reduzidos para obter valores de flutuação de pressão similares aos de protótipo (considerando **as amostras** de dados obtidas durante as campanhas de medição).*

Fr ₁ *	S*	Q* (m ³ /s)	TOMADAS DE PRESSÃO						
			dA	dB	dC	d1	d3	d5	d7
9,35	2,58	1000	-	-	-	-	-	-	-
7,01	1,86	2000	12	-	-	-	-	-	-
5,95	1,58	3000	4	25	-	-	-	-	-
5,23	1,44	4000	6	-	-	90	35	-	-

* Os valores apresentados correspondem ao protótipo da UHE Porto Colômbia.

** Nas posições onde não constam valores, considerou-se que o modelo reduzido deve ser na escala mínima de 1:100, o que corresponde ao menor tamanho de estrutura analisado nesta pesquisa.

Os resultados apresentados na Tabela 9.3 indicam que para ter os valores da flutuação de pressão ao longo do ressalto inteiramente dentro da dispersão natural do fenômeno, a escala do modelo reduzido deverá ser em torno de 1:10. Entretanto, essa análise leva em conta os resultados obtidos para a tomada dA, que possui forte efeito do raio de curvatura do perfil conforme mencionado anteriormente. As diferenças relativas para a tomada dA ultrapassam o limite definido no estudo,

porém, as diferenças absolutas são pequenas, conforme pode ser visto na Tabela 9.4.

Tabela 9.4 – Valores brutos da flutuação de pressão na tomada dA (dados amostrais) considerando as diferentes condições de escoamento.

Vazão (m ³ /s)	Dados amostrais			
	Protótipo	Modelo 1:32	Modelo 1:50	Modelo 1:100
1000	0,77	0,91	1,15	0,77
2000	0,68	1,70	1,99	1,55
3000	0,53	1,64	1,66	2,14
4000	0,56	1,06	1,07	1,51

De acordo com os valores apresentados na Tabela 9.4, observa-se que as maiores diferenças são da ordem de $\approx 1,0$ m.c.a (a pressão média na tomada dA para a vazão de 4000 m³/s no protótipo corresponde a 7,02 m.c.a). Dessa forma, pode-se concluir que não existe efeito de escala significativo na flutuação de pressão ao longo do ressalto, mesmo considerando as tomadas situadas no trecho curvo. Sendo assim, a escala mínima de modelo físico sugerida para análise da flutuação de pressão é de 1:100, em função da mesma coincidir com a menor estrutura avaliada no presente estudo.

9.3 Análise dos efeitos de escala na flutuação de pressão com o uso do ajuste proposto por Wiest (2008)

Foram analisados também os possíveis efeitos de escala na flutuação de pressão através da comparação dos ajustes definidos para cada uma das escalas de modelo ($\sigma_{x_{aj\ mod}}$) com os valores ocorridos no protótipo ($\sigma_{x\ prot}$). A Figura 9.10 apresenta as diferenças relativas admissíveis para cada tomada de pressão considerando a vazão de 4000 m³/s. Nessa avaliação foram consideradas também as envoltórias superiores e inferiores, para cada condição de escoamento, determinadas para o modelo na escala 1:32. As demais condições de escoamento analisadas (vazões de 1000 m³/s, 2000 m³/s e 3000 m³/s) estão apresentadas no Anexo E.

De acordo com os resultados obtidos para as quatro vazões analisadas, observa-se a mesma tendência dos resultados obtidos considerando as medições realizadas (dados amostrais). No entanto, a dispersão dos ajustes é levemente maior quando comparada com a dispersão natural dos valores medidos.

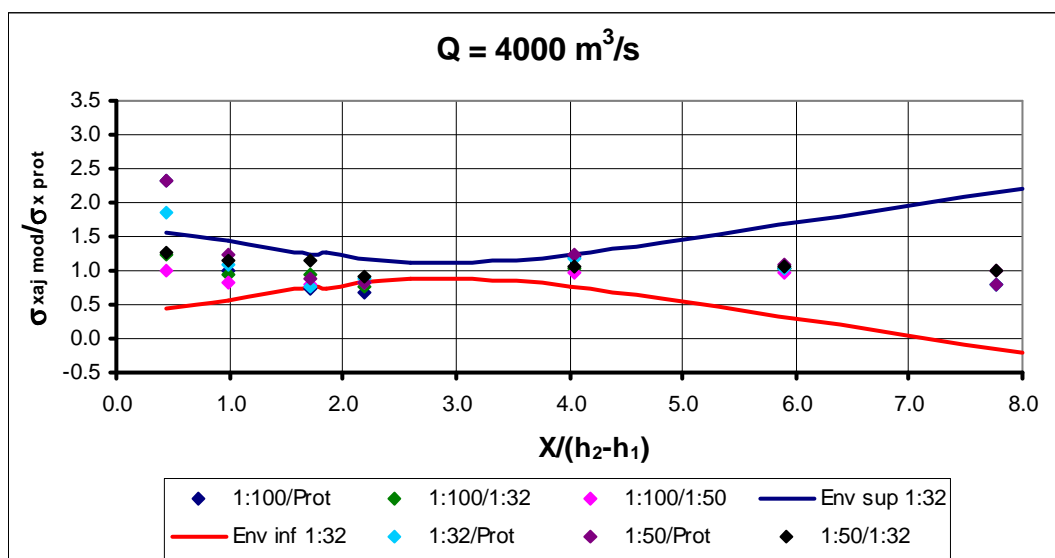


Figura 9.10 - Distribuição longitudinal das diferenças relativas da flutuação de pressão, $Q = 4000\ m^3/s$, considerando **os ajustes** determinados para as diferentes escalas. As envoltórias foram definidas com base nas medições realizadas no modelo 1:32.

A Tabela 9.5 apresenta as sugestões de escalas mínimas a serem adotadas em estudos de modelos reduzidos considerando os ajustes para cálculo da distribuição da flutuação de pressão.

Tabela 9.5 - Escalas mínimas a serem executadas nos modelos reduzidos para obter valores de flutuação de pressão similares aos de protótipo (considerando **os ajustes** determinados para as diferentes escalas).

Fr_1^*	S^*	Q^* (m ³ /s)	TOMADAS DE PRESSÃO						
			dA	dB	dC	d1	d3	d5	d7
9,35	2,58	1000	-	-	-	-	-	-	-
7,01	1,86	2000	13	-	-	-	-	-	-
5,95	1,58	3000	6	-	-	90	-	-	-
5,23	1,44	4000	7	-	100	10	100	-	-

* Os valores apresentados correspondem ao protótipo da UHE Porto Colômbia.

** Nas posições onde não constam valores, considerou-se que o modelo reduzido deve ser na escala mínima de 1:100, o que corresponde ao menor tamanho de estrutura analisado nesta pesquisa.

Observa-se pela Tabela 9.5 que são vistos efeitos de escala nas tomadas dA e d1 (nesta isoladamente para as vazões de 3000 e 4000 m³/s). Nestas tomadas as diferenças absolutas são pequenas, conforme pode ser visualizado na Tabela 9.6 para a tomada dA (situação mais desfavorável).

Sendo assim, conclui-se que as equações propostas no presente estudo podem ser utilizadas para a determinação da flutuação de pressão ao longo do ressalto.

Tabela 9.6 – Valores brutos da flutuação de pressão na tomada dA (dados provenientes dos ajustes) considerando as diferentes condições de escoamento.

Vazão (m ³ /s)	Dados provenientes dos ajustes (em cada um dos modelos)			
	Protótipo	Modelo 1:32	Modelo 1:50	Modelo 1:100
1000	0,77	1,74	2,01	1,29
2000	0,68	1,48	1,80	1,52
3000	0,53	1,22	1,53	1,43
4000	0,56	1,03	1,30	1,29

No Anexo E são apresentados os valores de flutuação de pressão, não-adimensionalizados (para as diferentes escalas de modelo e protótipo), obtidos a partir das amostras de dados e através da metodologia proposta por Wiest (2008).

10 Coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades

De maneira similar aos estudos realizados para a pressão média e flutuação de pressão, será apresentada a seguir a análise dos possíveis efeitos de laboratório na distribuição dos valores do coeficiente estatístico de distribuição de probabilidade ($N_{x\%}$) ao longo do ressalto hidráulico submerso.

10.1 Análise do coeficiente estatístico nas diferentes escalas de modelo e protótipo

Marques *et al.* (1997) e Teixeira (2003) descreveram, para o ressalto livre, que os valores do coeficiente estatístico de distribuição de probabilidade ($N_{x\%}$) podem ser estimados com base no conhecimento da distribuição longitudinal da pressão média (P_x), da flutuação de pressão (σ_x) e da distribuição de frequência das amostras ($P_{x\%}$), conforme pode ser visualizado pela equação 10.1:

$$N_{x\%} = \pm \left(\frac{P_{x\%} - P_x}{\sigma_x} \right) \quad (\text{Eq. 10.1})$$

Onde:

$N_{x\%}$ = coeficiente estatístico de distribuição de probabilidade para certa posição X do ressalto;

$P_{x\%}$ = pressão com probabilidade de ser inferior ou igual para certa posição X do ressalto;

P_x = pressão média para certa posição X do ressalto e;

σ_x = flutuação da pressão média (desvio padrão).

De acordo com os pesquisadores, o coeficiente $N_{x\%}$ não segue o comportamento de uma distribuição Gaussiana (Normal). Tal comportamento é confirmado nos estudos de Trierweiler (2006), que apresenta dados experimentais para ressaltos (livre e submerso) a jusante de uma comporta plana.

Wiest (2008) avaliou a metodologia proposta por Teixeira (2003) na situação de ressalto submerso, considerando as amostras de dados coletadas no modelo físico reduzido na escala 1:50 da UHE Porto Colômbia. A partir das distribuições

longitudinais da P_x , da σ_x e das distribuições de freqüência das amostras, foram determinados os valores do $N_{x\%}$ para as probabilidades de 0,1 % a 99,9 %.

A Figura 10.1 contempla os valores do $N_{x\%}$ para as probabilidades extremas de ocorrência, considerando diferentes graus de submergência em função da posição relativa ao início do ressalto.

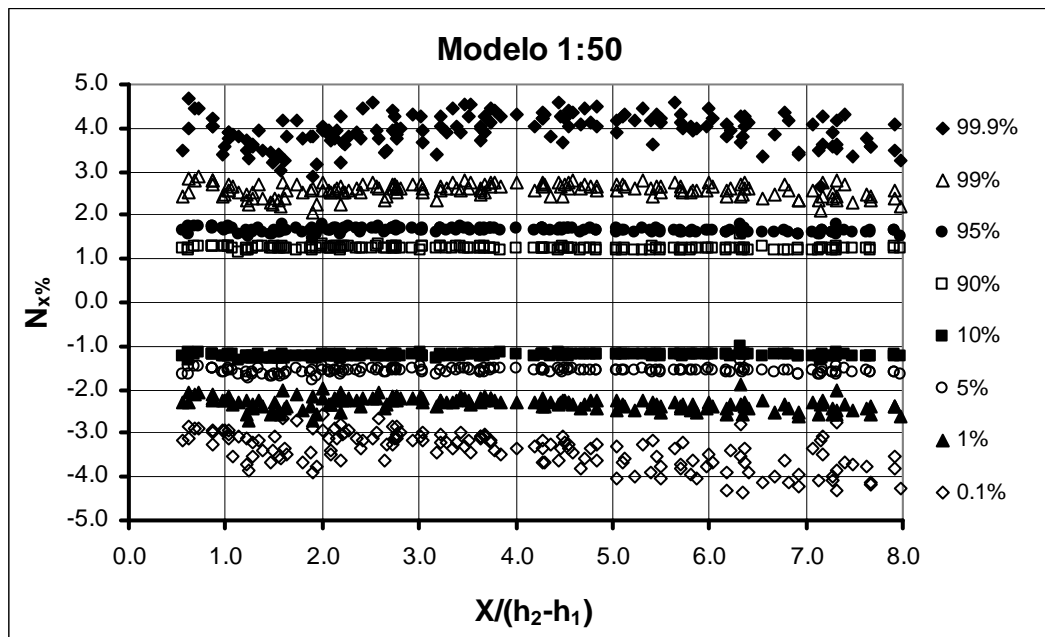


Figura 10.1 - Distribuição longitudinal do $N_{x\%}$ para os dados do modelo 1:50 (considerando diferentes submergências) em função da posição relativa ao início do ressalto.

De maneira análoga as amostras obtidas para o modelo 1:50, foram determinadas as distribuições longitudinais do $N_{x\%}$ para os modelos nas escalas 1:32 e 1:100, conforme pode ser visto no Anexo F. Analisando os resultados obtidos nas diferentes escalas de modelo, verificou-se que os valores do $N_{x\%}$ seguem uma tendência linear, aproximando-se de um valor constante. Verifica-se alguma dispersão para as probabilidades de 0,1 % e 99,9 %, que correspondem as menores amostras (com apenas 90 dados).

Wiest (2008) optou por utilizar os valores médios de $N_{x\%}$ para cada uma das probabilidades de ocorrência, uma vez que não foi observada influência da submergência do escoamento. Na Tabela 10.1 apresenta-se os valores médios do $N_{x\%}$ para diferentes probabilidades considerando as amostras obtidas nos ensaios realizados no modelo reduzido na escala 1:50.

Tabela 10.1 – Valores dos coeficientes estatísticos de distribuição de probabilidades ($N_{x\%}$) determinados para o modelo na escala 1:50.

Prob. (%)	$N_{x\%}$	Prob. (%)	$N_{x\%}$	Prob. (%)	$N_{x\%}$
0,1%	-3,415	30%	-0,522	80%	0,808
1%	-2,327	40%	-0,264	90%	1,243
5%	-1,575	50%	-0,017	95%	1,650
10%	-1,217	60%	0,233	99%	2,550
20%	-0,818	70%	0,499	99,9%	3,891

De acordo com os valores apresentados na Tabela 10.1, foi determinado um ajuste médio (equação 10.2) que representa a distribuição longitudinal do $N_{x\%}$ em função da probabilidade de ocorrência. A Figura 10.2 apresenta o conjunto de pontos avaliados e o ajuste proposto.

$$N_{x\%} = \frac{a + b \cdot k}{(1 + c \cdot k + d \cdot k^2)} \quad (\text{eq. 10.2})$$

Onde $a = -3,161$
 $b = 6,150$
 $c = 14,351$
 $d = -14,526$ e
 $k =$ o valor da probabilidade desejada (p.ex., em valores decimais: 90 % = 0,90)

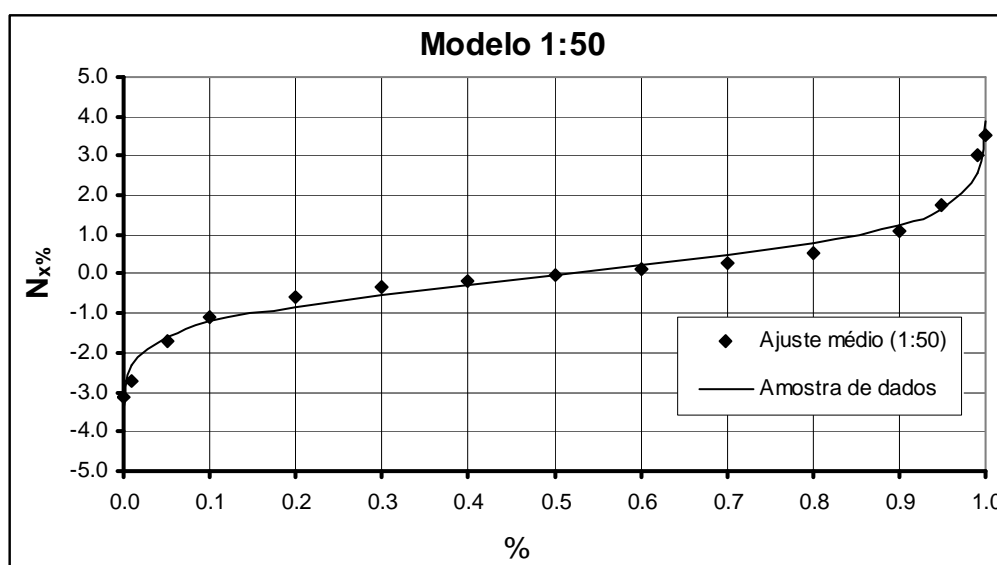


Figura 10.2 - Ajuste médio proposto para determinação do coeficiente estatístico ($N_{x\%}$) ao longo do resalto considerando os dados obtidos no modelo 1:50 da UHE Porto Colômbia.

Também foram determinados ajustes médios para a distribuição do $N_{x\%}$ nos modelos nas escalas 1:32 e 1:100. Os coeficientes são muito semelhantes aos determinados para o modelo 1:50. Os resultados, para as diferentes escalas, estão apresentados no Anexo F.

A partir dos valores médios estabelecidos para o $N_{x\%}$, para as diferentes escalas de estrutura, foram definidas envoltórias superiores e inferiores com base na distribuição estatística de *Student*, com um nível de significância de 95%, como já havia sido realizado para a pressão média e para a flutuação de pressão. As Figuras 10.3 a 10.5 apresentam os ajustes médios e as envoltórias estabelecidas para as escalas de modelo 1:32, 1:50 e 1:100, respectivamente.

De acordo com os resultados apresentados nas Figuras 10.3 a 10.5, observa-se que as dispersões em relação aos ajustes médios são pequenas, independente da escala do modelo. Entre os modelos, as curvas também são bastante semelhantes.

As maiores dispersões do coeficiente $N_{x\%}$ ocorrem nos extremos inferiores e superiores (probabilidades de 0,1% e 99,9%). Nas probabilidades restantes é visível a concentração dos valores ao redor da média, com uma redução da dispersão dos dados.

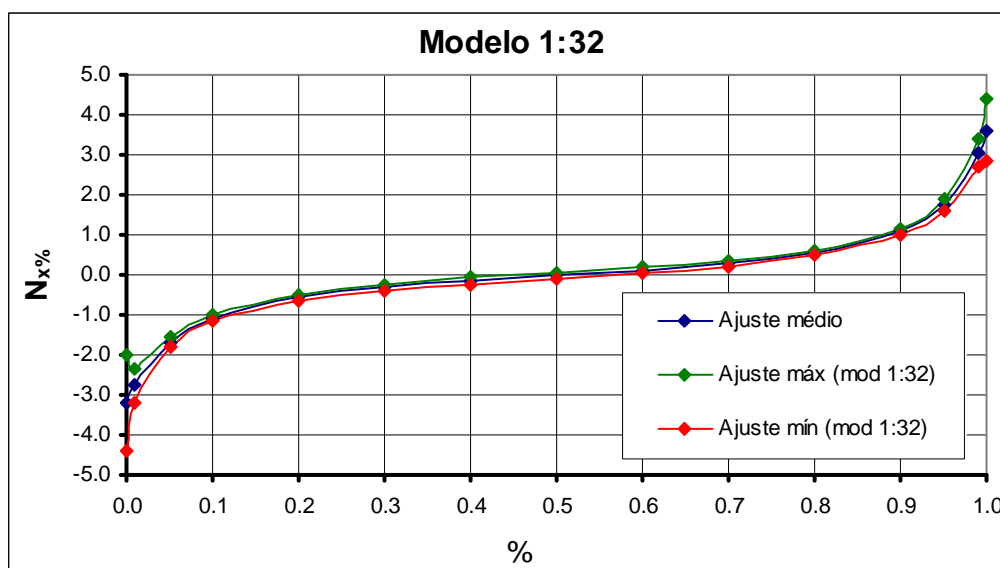


Figura 10.3 - Dispersão natural do coeficiente estatístico ($N_{x\%}$) considerando as amostras obtidas no modelo na escala 1:32 da UHE Porto Colômbia.

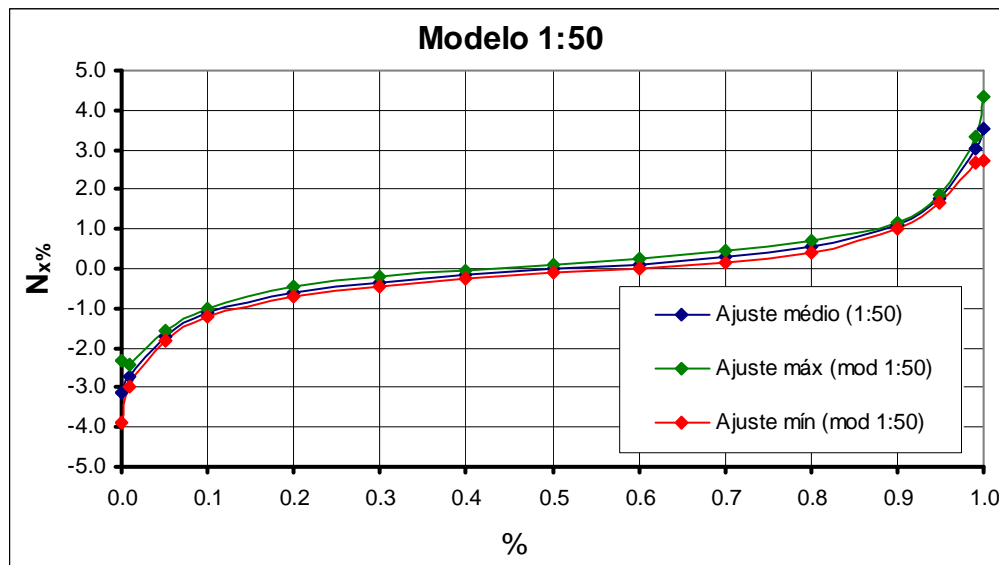


Figura 10.4 - Dispersão natural do coeficiente estatístico ($N_{x\%}$) considerando as amostras obtidas no modelo na escala 1:50 da UHE Porto Colômbia.

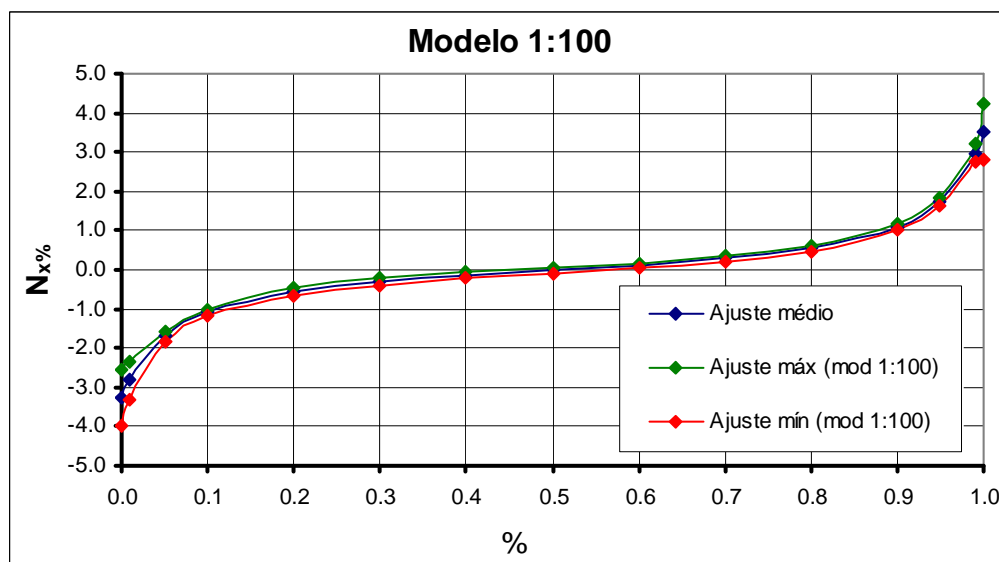


Figura 10.5 - Dispersão natural do coeficiente estatístico ($N_{x\%}$) considerando as amostras obtidas no modelo na escala 1:100 da UHE Porto Colômbia.

A partir da definição dos ajustes médios foram analisados os possíveis efeitos de escala no $N_{x\%}$. Esse estudo foi realizado através da comparação dos valores obtidos nos ensaios em modelo reduzido ($N_{x\% \text{ mod}}$), nas diferentes escalas, com os valores obtidos com base nas amostras coletadas no protótipo ($N_{x\% \text{ prot}}$). Nessa avaliação foram consideradas as envoltórias superiores e inferiores, para cada uma das condições de escoamento, determinado para o modelo na escala 1:32, por ser a escala mais próxima, em dimensões, do protótipo.

A Figura 10.6 e a Figura 10.7 apresentam as diferenças relativas admissíveis para as probabilidades de 1 % e 99 %, respectivamente, considerando a vazão de 4000 m³/s (equivalente ao protótipo). As demais probabilidades analisadas (0,1 %, 5 %, 10 %, 90 %, 95 % e 99,9 %), considerando as diferentes situações de escoamento, estão apresentadas no Anexo F.

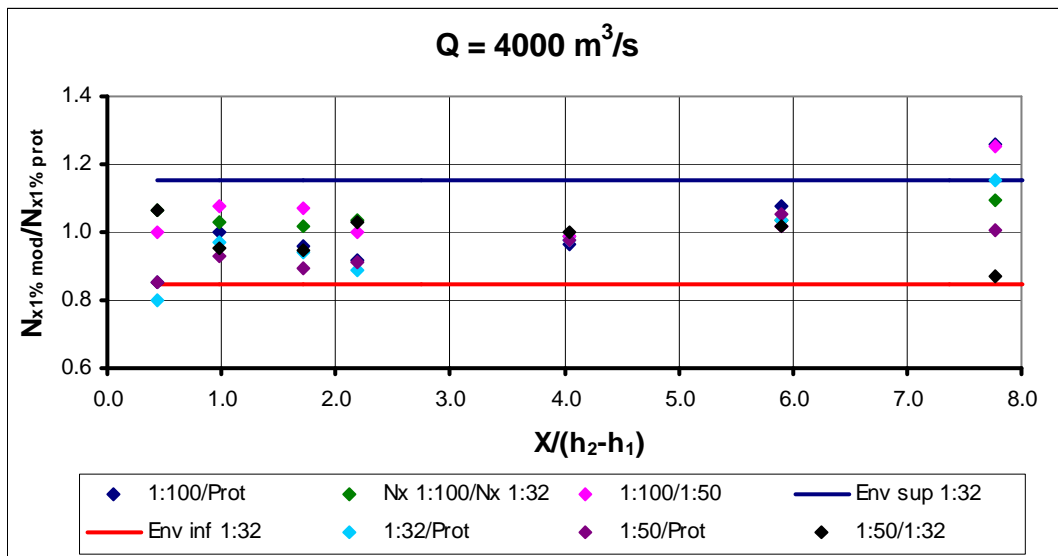


Figura 10.6 - Distribuição longitudinal das diferenças relativas do coeficiente estatístico ($N_{x1\%}$) para a probabilidade de 1 %, $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$, considerando **as amostras** obtidas nas diferentes escalas de modelo e no protótipo. As envoltórias foram definidas com base nos dados obtidos no modelo 1:32.

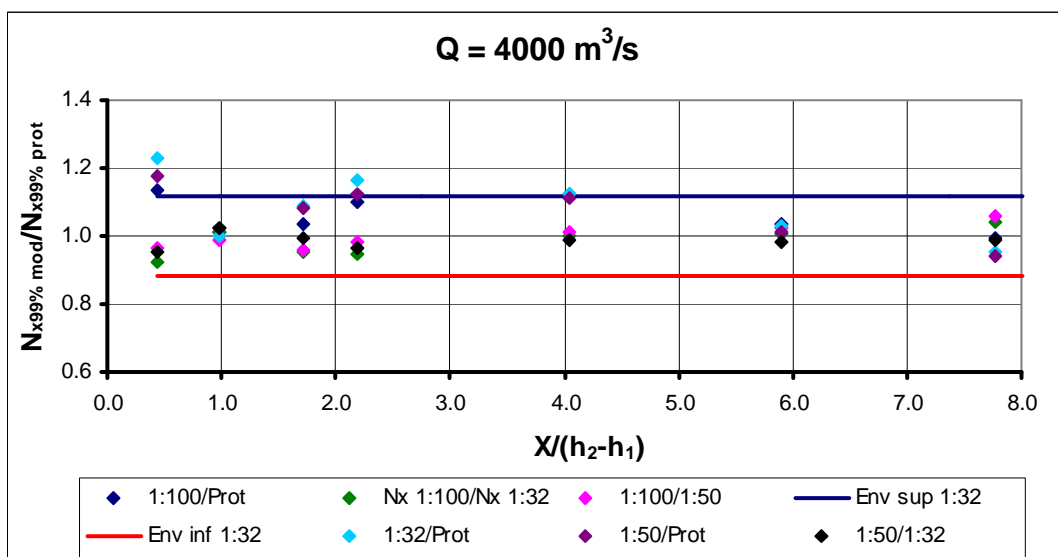


Figura 10.7 - Distribuição longitudinal das diferenças relativas do coeficiente estatístico ($N_{x99\%}$) para a probabilidade de 99 %, $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$, considerando **as amostras** obtidas nas diferentes escalas de modelo e no protótipo. As envoltórias foram definidas com base nos dados obtidos no modelo 1:32.

De acordo com os resultados obtidos para as diferentes condições de escoamento e probabilidades de ocorrência, observa-se que as maiores diferenças ocorrem na primeira tomada, o que indica uma influência do trecho curvo do perfil do vertedouro. As diferenças relativas, em sua grande maioria, ficam dentro da faixa de dispersão natural dos resultados. Dessa forma, a escala mínima que deve ser executado o modelo reduzido para que não haja efeitos significativos de laboratório nos valores do coeficiente estatístico é de 1:100, que corresponde a menor escala de modelo analisada na presente pesquisa.

10.2 Análise dos efeitos de escala no coeficiente estatístico com o uso do ajuste proposto por Wiest (2008)

Foram analisados também os possíveis efeitos de escala nos ajustes médios determinados para o coeficiente estatístico ($N_{x\%aj\ mod}$) através de sua comparação com os dados de protótipo. A Figura 10.8 e a Figura 10.9 apresentam as diferenças relativas admissíveis para as probabilidades de 1 % e 99 %, respectivamente, considerando a vazão de 4000 m³/s. Nessa avaliação foram consideradas também as envoltórias superiores e inferiores determinadas com base no modelo na escala 1:32.

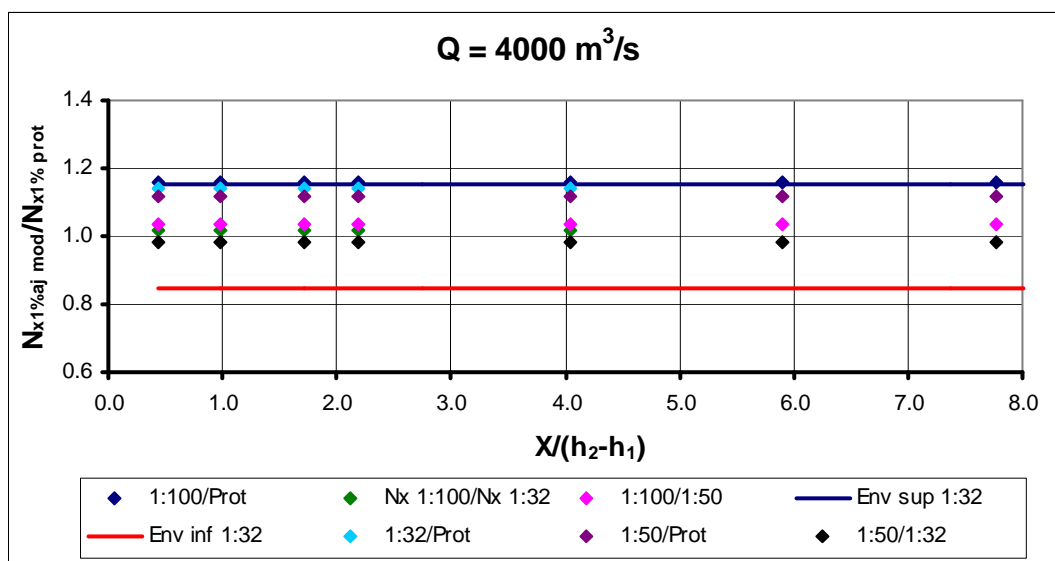


Figura 10.8 - Distribuição longitudinal das diferenças relativas do coeficiente estatístico ($N_{x1\%}$) para a probabilidade de 1 %, $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$, considerando **os ajustes** determinados para as diferentes escalas. As envoltórias foram definidas com base nas medições realizadas no modelo 1:32.

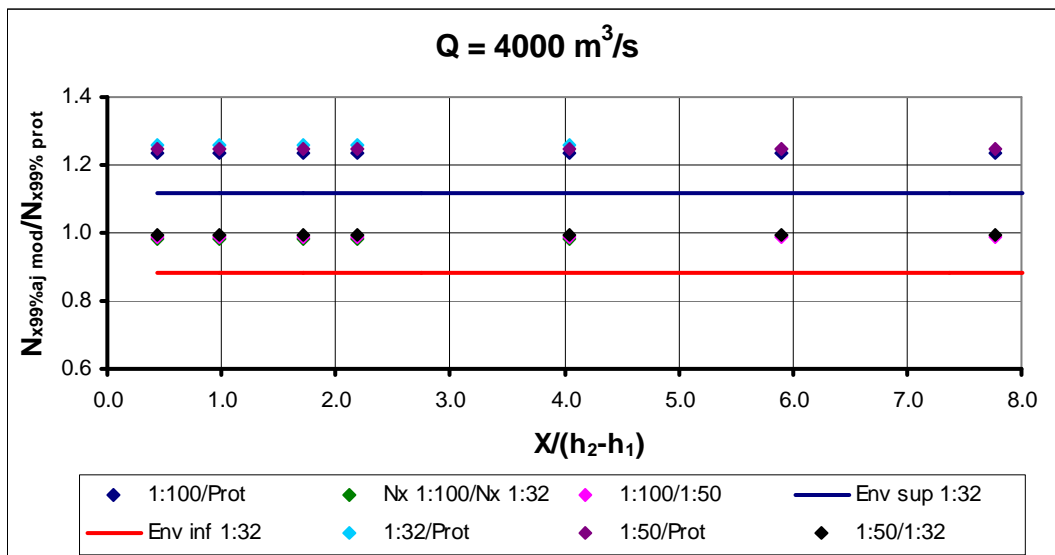


Figura 10.9 – Distribuição longitudinal das diferenças relativas do coeficiente estatístico ($N_{x99\%}$) para a probabilidade de 99 %, $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$, considerando os ajustes determinados para as diferentes escalas. As envoltórias foram definidas com base nas medições realizadas no modelo 1:32.

As demais probabilidades, considerando as diferentes situações de escoamento, estão apresentadas no Anexo F.

Observa-se que para as probabilidades máximas (por exemplo, 99 % de ocorrência) os valores do $N_{x\%}$ advindos dos ajustes situam-se acima do intervalo máximo definido no estudo. Isso se deve ao fato de haver pequenas diferenças entre os valores ajustados (ver Figuras 10.3 a 10.5), com base no método proposto por Wiest (2008), e os valores médios das amostras coletadas para as probabilidades de 90 %, 95 % e 99 %, porém, de uma forma geral, os ajustes são adequados.

No entanto, no cálculo das pressões extremas, que corresponde ao foco principal da pesquisa, o coeficiente estatístico irá influenciar diretamente na flutuação de pressão (σ_x), que são valores baixos, por isso, o impacto nos valores extremos de pressão também será pequeno.

Dessa forma, mesmo os valores de $N_{x\%}$, para algumas probabilidades, estejam fora do intervalo definido, considera-se que não existe efeito de escala nos valores dos $N_{x\%}$ determinados com base nos ajustes propostos por Wiest (2008).

No Anexo F são apresentados os valores do coeficiente estatístico, para as diferentes escalas de modelo e protótipo, obtidos a partir das amostras de dados e através da metodologia proposta por Wiest (2008).

11 Previsão dos valores extremos de pressão com base na metodologia proposta por Wiest (2008)

Para o desenvolvimento do projeto de uma bacia de dissipação por ressalto hidráulico é necessário o conhecimento da distribuição da pressão média e da sua flutuação, assim como das pressões extremas atuantes. Para essa última, são importantes tanto os valores com probabilidades mínimas de ocorrência, onde podem ser avaliadas possíveis situações de incipiência de cavitação, como as probabilidades máximas, que representam os máximos esforços de compressão sobre a estrutura.

Cabe salientar que ainda não existe um consenso sobre quais são as probabilidades que definem os valores extremos a serem utilizados no dimensionamento das bacias de dissipação. Desse modo, esta pesquisa apresenta uma gama de probabilidades de ocorrência (mínimas: 0,1 %, 1 %, 5 % e 10 % e máximas: 90 %, 95 %, 99 % e 99,9 %) dependendo do caso em estudo.

Serão apresentadas as estimativas das pressões extremas com base nas metodologias propostas para cálculo das pressões médias, das flutuações de pressão e dos coeficientes estatísticos de distribuição de probabilidade, mencionados anteriormente, considerando os dados obtidos nas diferentes escalas de modelo reduzido. Os resultados serão comparados com os valores extremos determinados a partir das amostras de dados coletadas no protótipo da UHE Porto Colômbia.

11.1 Análise das pressões extremas (dados amostrais) nas diferentes escalas de modelo e protótipo

As pressões extremas foram adimensionalizadas a partir dos mesmos parâmetros definidos para a pressão média, conforme pode ser visto pela equação 11.1. As Figuras 11.1 e 11.2 apresentam a comparação das distribuições longitudinais das pressões adimensionalizadas, com probabilidades de ocorrência de 1 % e 99 %, respectivamente, no protótipo da UHE Porto Colômbia e nos modelos reduzidos nas escalas 1:32, 1:50 e 1:100.

$$\Psi_{\%} = \left(\frac{P_{x\%} - h_1}{h_2 - h_1} \right) \left(\frac{1}{S} \right) \quad (\text{Eq. 11.1})$$

Sendo:

$\Psi_{\%}$ = pressão adimensionalizada com ocorrência igual ou inferior a determinada probabilidade e;

$P_{x\%}$ = pressão com ocorrência igual ou inferior a determinada probabilidade na posição X.

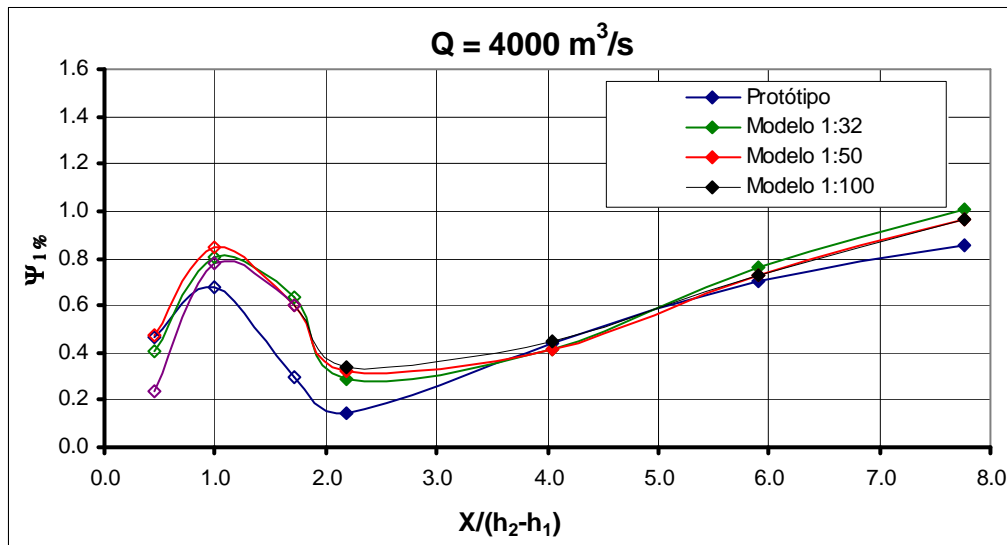


Figura 11.1 - Distribuições longitudinais do coeficiente da pressão com 1 % de probabilidade ($\Psi_{1\%}$) observadas na UHE Porto Colômbia e nos modelos nas escalas 1:32; 1:50 e 1:100, para a vazão de $4000 \text{ m}^3/\text{s}$. As tomadas situadas no trecho curvo estão representadas pelos símbolos vazados (\diamond).

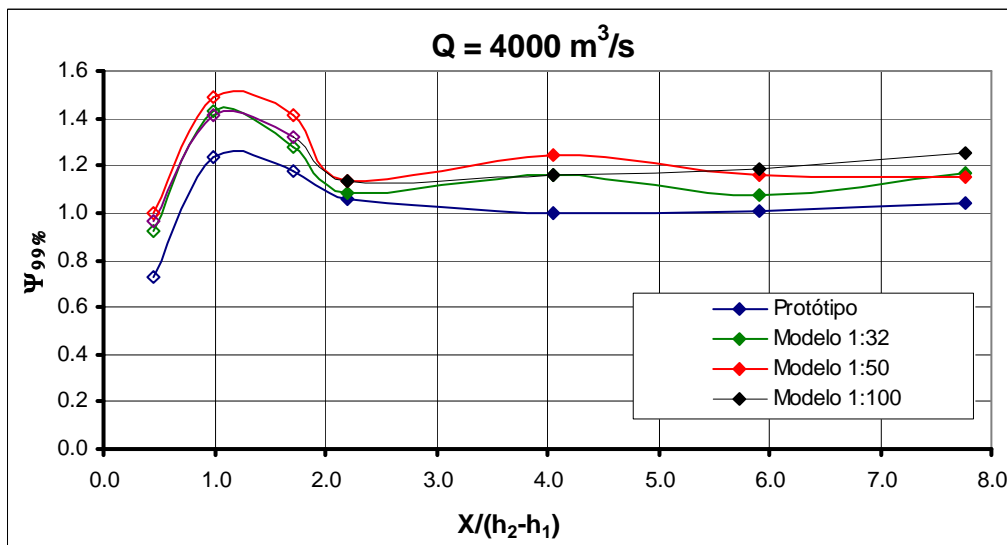


Figura 11.2 - Distribuições longitudinais do coeficiente da pressão com 99 % de probabilidade ($\Psi_{99\%}$) observadas na UHE Porto Colômbia e nos modelos nas escalas 1:32; 1:50 e 1:100, para a vazão de $4000 \text{ m}^3/\text{s}$. As tomadas situadas no trecho curvo estão representadas pelos símbolos vazados (\diamond).

Observa-se pelas Figuras 11.1 e 11.2 que os valores obtidos nos modelos reduzidos, no trecho plano, tendem a resultar um pouco acima dos dados de protótipo, com a tendência das diferenças serem inversamente proporcionais à escala do modelo. Nota-se que as dispersões são mais relevantes para as maiores probabilidades de ocorrência. Já no trecho curvo, a diferença entre o protótipo e os modelos é maior, entretanto, entre os modelos, os resultados possuem praticamente o mesmo desenvolvimento.

Estão apresentadas no Anexo G, as comparações entre os resultados obtidos para as vazões de 1000 m³/s, 2000 m³/s e 3000 m³/s, considerando as probabilidades de 1 % e 99 %.

11.2 Análise da dispersão natural das pressões extremas e dos efeitos de escala

De acordo com Teixeira (2003), as pressões com certa probabilidade de serem inferiores ou iguais a um determinado valor em ponto X no interior do ressalto livre podem ser determinadas através da relação $P_{x\%} = P_x \pm N_{x\%} \cdot \sigma_x$ (conforme já explicitado na equação 10.1).

Wiest (2008), com base nos ensaios realizados no modelo 1:50 da UHE Porto Colômbia, propôs uma metodologia para estimar os valores extremos de pressão no ressalto hidráulico submerso considerando a dispersão dos ajustes determinados para a pressão média (P_x), flutuação de pressão (σ_x) e para o coeficiente estatístico (N_x), conforme apresentados nos capítulos anteriores. O objetivo principal foi o de validar o ajuste médio proposto por Teixeira (2003).

A partir disso, o autor estabeleceu uma relação (equação 11.1) que representa o intervalo de confiança para as pressões extremas para diferentes probabilidades de ocorrência e condições de escoamento.

Como foi visto nos capítulos anteriores, existe uma dispersão natural das amostras de dados obtidas nas diferentes escalas de modelo. Sendo assim, observou-se que no cálculo das pressões extremas deveriam ser levadas em consideração as dispersões naturais da P_x , da σ_x e do $N_{x\%}$. No entanto como na equação 11.2 tem-se um produto do $N_{x\%}$ e da σ_x , o autor definiu que em apenas um

dos dois parâmetros poderia ser considerada a dispersão. Foi adotada a do $N_{x\%}$ por apresentar, em termos de valores absolutos, uma dispersão mais significativa.

$$P_{x\%} = (P_x \pm \Delta P_x) \pm (N_{x\%} \pm \Delta N_{x\%}) \cdot \sigma_x \quad (\text{Eq. 11.2})$$

Onde:

ΔP_x = variação absoluta da pressão média no ressalto submergido.

$\Delta N_{x\%}$ = variação absoluta do coeficiente estatístico no ressalto submergido.

As Figuras 11.3 a 11.8 apresentam as envoltórias estabelecidas para as escalas de modelo 1:32, 1:50 e 1:100, considerando a vazão de 4000 m³/s e as probabilidades de ocorrência de 1 % e 99 %. As Figuras citadas apresentam também valores advindos das amostras obtidas na UHE Porto Colômbia. Os resultados para as demais vazões e probabilidades de 0,1 % e 99,9 % são apresentadas no Anexo G.

Analisando as Figuras 11.3 a 11.5 e também os ajustes determinados para as demais condições de escoamento (apresentadas no Anexo G), foi possível observar que os valores medidos no protótipo, para a pressão com 1 % de probabilidade, enquadram-se dentro das faixas de dispersão definidas, excetuando algumas poucas tomadas situadas na curva.

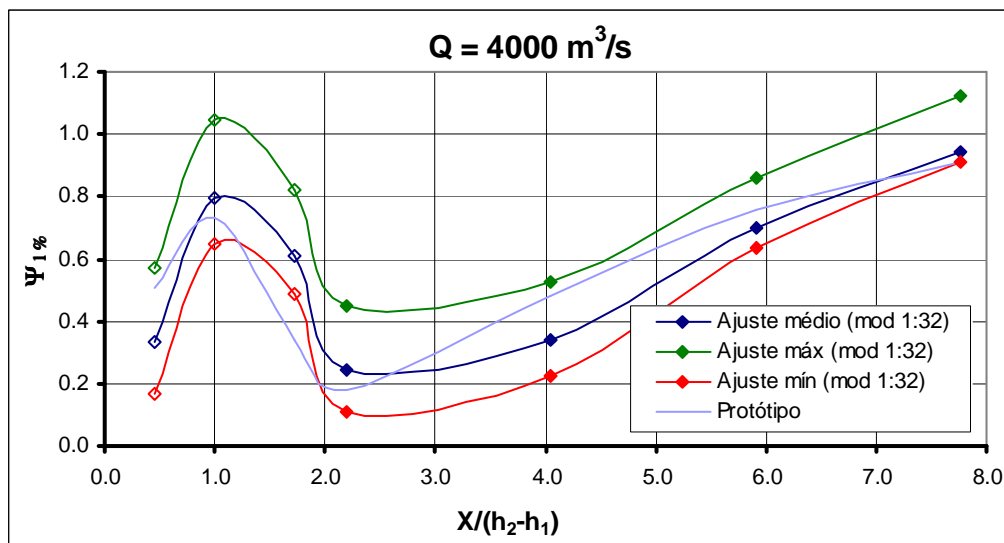


Figura 11.3 - Dispersão natural da pressão com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 1 % ($\Psi_{1\%}$) considerando **as amostras** obtidas no modelo 1:32 da UHE Porto Colômbia ($Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$).

Os pontos situados no trecho curvo estão representados pelos símbolos vazados (\diamond).

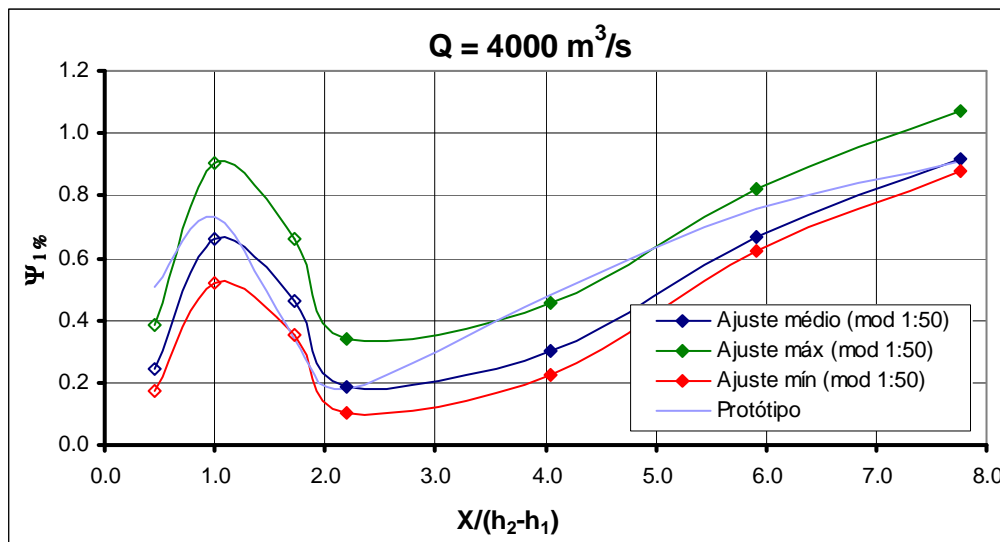


Figura 11.4 - Dispersão natural da pressão com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 1 % ($\Psi_{1\%}$) considerando **as amostras** obtidas no modelo 1:50 da UHE Porto Colômbia ($Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$). Os pontos situados no trecho curvo estão representados pelos símbolos vazados (\diamond).

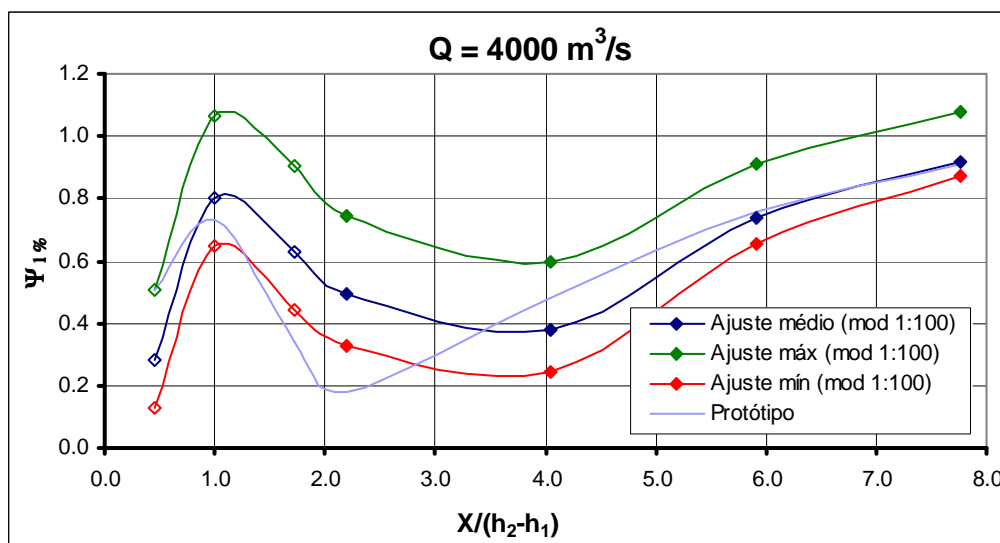


Figura 11.5 - Dispersão natural da pressão com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 1 % ($\Psi_{1\%}$) considerando **as amostras** obtidas no modelo 1:100 da UHE Porto Colômbia ($Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$). Os pontos situados no trecho curvo estão representados pelos símbolos vazados (\diamond).

Pelas Figuras 11.6 a 11.8 (observando também as demais vazões, conforme apresentadas no Anexo G), nota-se que os valores medidos no protótipo, para a vazão de $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ e 99 % de probabilidade, enquadram-se dentro das faixas de dispersão definidas nas diferentes escalas de modelo.

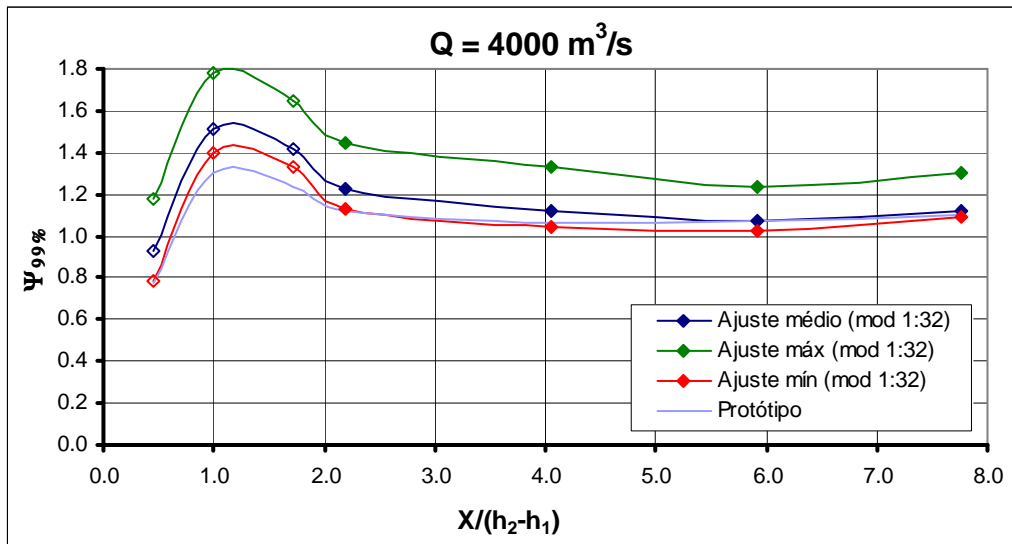


Figura 11.6 - Dispersão natural da pressão com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 99 % ($\Psi_{99\%}$) considerando **as amostras** obtidas no modelo 1:32 da UHE Porto Colômbia ($Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$). Os pontos situados no trecho curvo estão representados pelos símbolos vazados (\diamond).

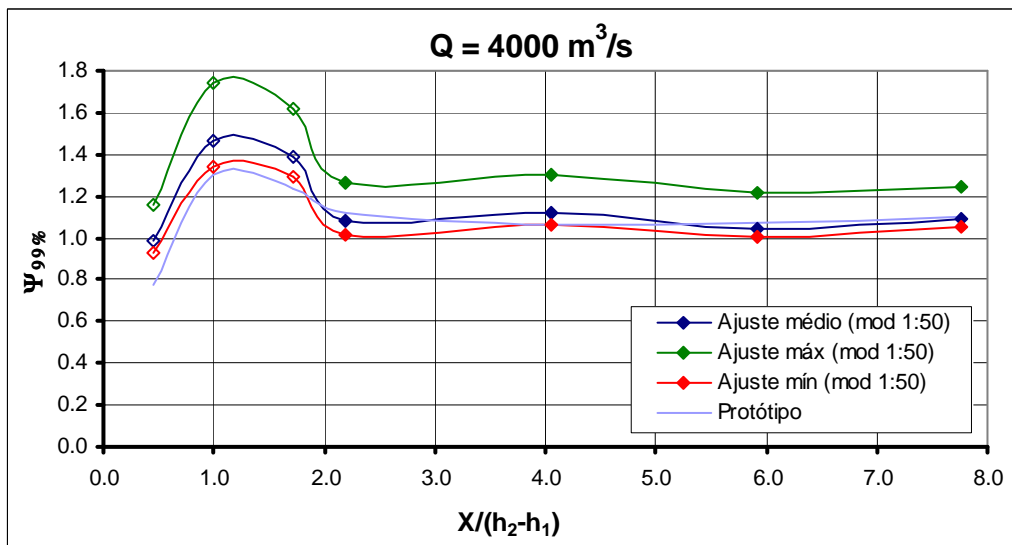


Figura 11.7 - Dispersão natural da pressão com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 99 % ($\Psi_{99\%}$) considerando as amostras obtidas no modelo 1:50 da UHE Porto Colômbia ($Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$). Os pontos situados no trecho curvo estão representados pelos símbolos vazados (\diamond).

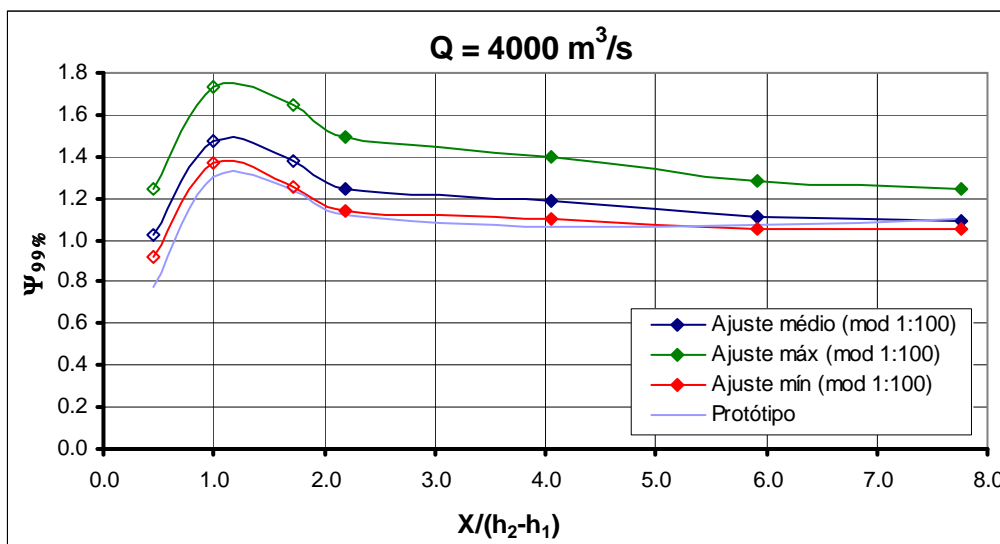


Figura 11.8 - Dispersão natural da pressão com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 99 % ($\Psi_{99\%}$) considerando **as amostras** obtidas no modelo 1:100 da UHE Porto Colômbia ($Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$). Os pontos situados no trecho curvo estão representados pelos símbolos vazados (\diamond).

A partir da definição dos ajustes médios para cada uma das estruturas foram analisados os possíveis efeitos de escala através da comparação dos valores obtidos nos ensaios em modelo reduzido ($P_{x\% \text{ mod}}$), nas diferentes escalas, com os valores obtidos com base nos resultados de protótipo ($P_{x\% \text{ prot}}$). Nessa avaliação foram consideradas as envoltórias superiores e inferiores, para cada uma das condições de escoamento, determinadas para o modelo na escala 1:32.

A Figura 11.9 e a Figura 11.10 apresentam as diferenças relativas admissíveis para as probabilidades de 1 % e 99 %, respectivamente, considerando a vazão de $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ equivalente ao protótipo. As demais situações de escoamento estão apresentadas no Anexo G.

De acordo com os resultados obtidos nota-se que, para algumas tomadas, os valores extremos de pressão obtidos nos modelos situam-se fora da faixa limite delimitada no presente estudo, principalmente quando comparados com os valores determinados com base nas amostras coletadas no protótipo da UHE Porto Colômbia. Além disso, é possível constatar que as tomadas situadas no centro e no final da curva além da primeira do trecho plano (ainda sobre o efeito da curvatura) são as que geralmente se situam fora da faixa de dispersão natural dos dados, principalmente quando aumenta a vazão (ou seja, o Fr_1 aumenta). Nesse caso a submersão aumenta determinando uma maior massa d'água nas primeiras tomadas de pressão. Essa tendência foi vista no desenvolvimento da pressão média,

e como a sua dispersão é preponderante no cálculo das pressões extremas, esse efeito já era esperado.

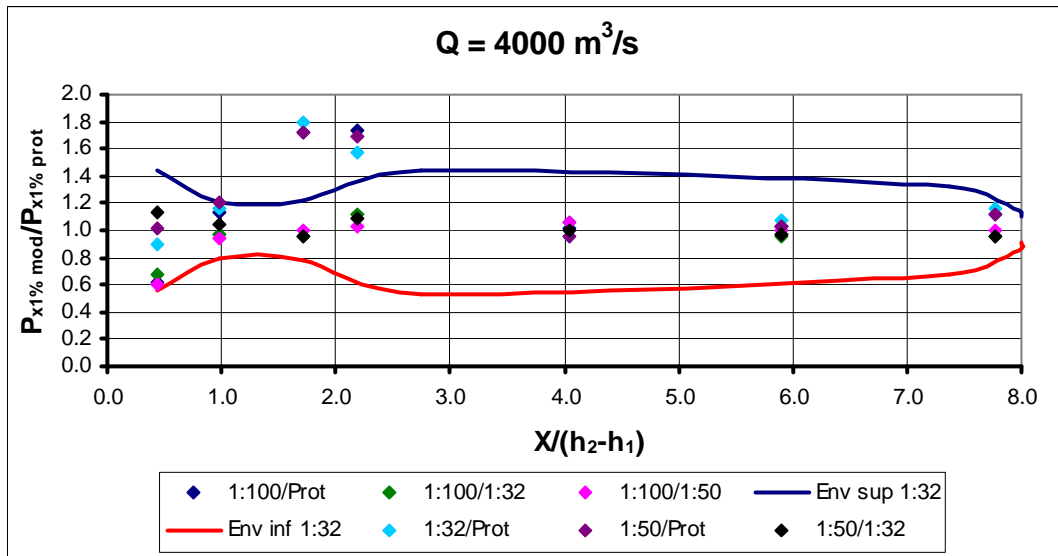


Figura 11.9 - Distribuição longitudinal das diferenças relativas da pressão com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 1 % ($\Psi_{1\%}$), $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$, considerando **as amostras** obtidas nas diferentes escalas de modelo e no protótipo. As envoltórias foram definidas com base nos dados obtidos no modelo 1:32.

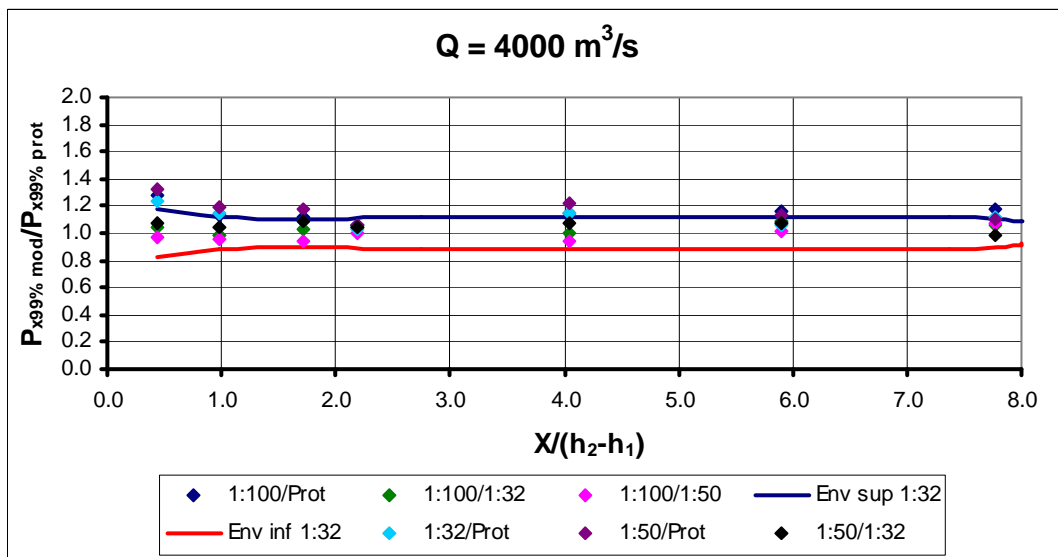


Figura 11.10 - Distribuição longitudinal das diferenças relativas da pressão com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 99 % ($\Psi_{99\%}$), $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$, considerando **as amostras** obtidas nas diferentes escalas de modelo e no protótipo. As envoltórias foram definidas com base nos dados obtidos no modelo 1:32.

A partir da análise das diferenças relativas em função das escalas dos modelos, foram estudadas separadamente as dispersões presentes em cada uma das tomadas, para cada uma das vazões e probabilidades de ocorrência. A Figura 11.9 e a Figura 11.10 apresentam a dispersão das tomadas dC e d1 para a vazão de 4000 m³/s e probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 1 % (que corresponde a situação de escoamento mais desfavorável). A análise das demais tomadas de pressão, para a vazão de 4000 m³/s, está apresentada no Anexo G.

Os resultados obtidos nesse estudo implicaram na sugestão de escalas mínimas de modelos físicos a serem utilizadas para se ter uma previsão dos valores de pressões extremas junto ao fundo de bacias de dissipação por ressalto hidráulico, com um grau de confiabilidade de 95 % de acordo com a distribuição de *Student*.

Observa-se pela Figura 11.11 e Figura 11.12 que as escalas mínimas que representam os valores medidos diretamente no protótipo da UHE Porto Colômbia, considerando a dispersão definida com base nos valores medidos no modelo 1:32, é de, aproximadamente, 1:5 e 1:15 para as tomadas dC e d1, respectivamente.

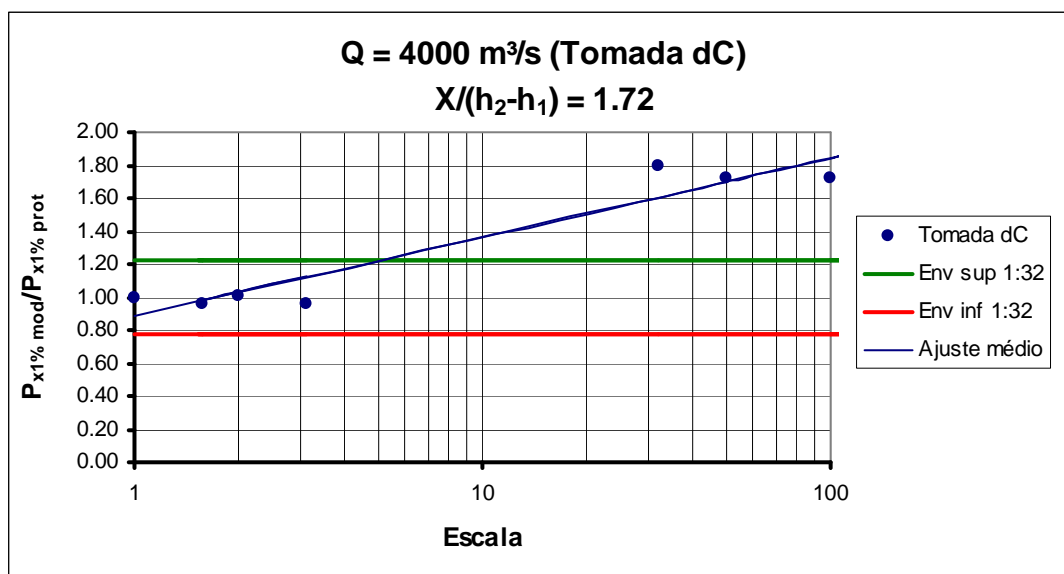


Figura 11.11 - Diferenças relativas da pressão com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 1 % ($\Psi_{1\%}$), para a tomada de pressão dC, $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$, considerando **as amostras** obtidas nas diferentes escalas de modelo e no protótipo. As envoltórias foram definidas com base nos dados obtidos no modelo 1:32.

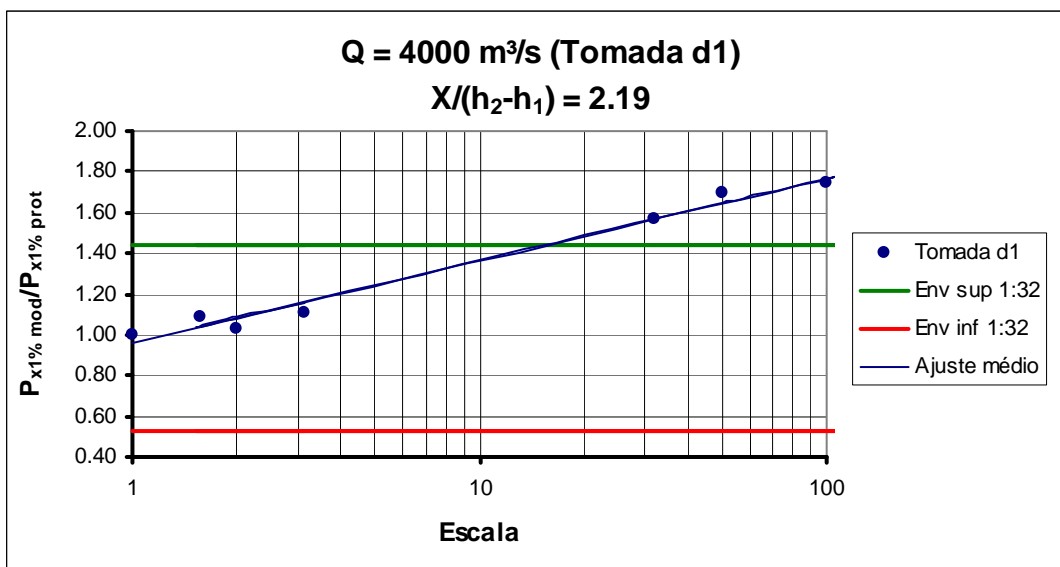


Figura 11.12 - Diferenças relativas da pressão com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 1 % ($\Psi_{1\%}$), para a tomada de pressão d1, Q = 4000 m³/s, considerando **as amostras** obtidas nas diferentes escalas de modelo e no protótipo. As envoltórias foram definidas com base nos dados obtidos no modelo 1:32.

As Tabelas 11.1 a 11.4 apresentam as sugestões de escalas mínimas a serem adotadas em estudos de modelos de maneira a reduzir os efeitos de escala nos valores de pressão, com diferentes probabilidades de ocorrência.

Tabela 11.1 - Escalas mínimas a serem executadas nos modelos reduzidos para obter valores do $\Psi_{\%}$ similares aos de protótipo, considerando a vazão de 4000 m³/s (considerando **as amostras** de dados obtidas nas diferentes escalas).

Prob. (%)	TOMADAS DE PRESSÃO						
	dA	dB	dC	d1	d3	d5	d7
0,1	-	-	5	12	-	-	35
1,0	-	-	5	18	-	-	50
5,0	-	-	5	8	-	-	28
10,0	-	25	5	7	-	-	25
90,0	-	18	9	-	35	20	18
95,0	50	20	12	-	30	15	17
99,0	20	25	30	-	20	12	15
99,9	-	45	-	-	18	15	15

* Os valores apresentados correspondem ao protótipo da UHE Porto Colômbia.

** Nas posições onde não constam valores, considerou-se que o modelo reduzido deve ser na escala mínima de 1:100, o que corresponde ao menor tamanho de estrutura analisado nesta pesquisa.

Tabela 11.2 - Escalas mínimas a serem executadas nos modelos reduzidos para obter valores de $\Psi_{\%}$ similares aos de protótipo, considerando a vazão de 3000 m³/s (considerando **as amostras** de dados obtidas nas diferentes escalas).

Prob. (%)	TOMADAS DE PRESSÃO						
	dA	dB	dC	d1	d3	d5	d7
0,1	-	-	20	18	-	-	-
1,0	-	-	10	20	-	-	-
5,0	-	-	8	10	-	60	-
10,0	-	-	7	10	100	40	-
90,0	15	10	10	70	15	30	-
95,0	9	9	10	80	15	20	-
99,0	6	9	12	100	15	20	-
99,9	-	12	20	40	15	15	-

* Os valores apresentados correspondem ao protótipo da UHE Porto Colômbia.

** Nas posições onde não constam valores, considerou-se que o modelo reduzido deve ser na escala mínima de 1:100, o que corresponde ao menor tamanho de estrutura analisado nesta pesquisa.

Tabela 11.3 - Escalas mínimas a serem executadas nos modelos reduzidos para obter valores de $\Psi_{\%}$ similares aos de protótipo, considerando a vazão de 2000 m³/s (considerando **as amostras** de dados obtidas nas diferentes escalas).

Prob. (%)	TOMADAS DE PRESSÃO						
	dA	dB	dC	d1	d3	d5	d7
0,1	-	-	-	-	-	-	-
1,0	90	-	90	-	-	-	-
5,0	30	-	40	-	-	-	-
10,0	30	-	30	-	-	-	-
90,0	100	20	15	-	20	-	-
95,0	35	15	18	-	20	-	-
99,0	15	15	20	-	18	60	-
99,9	-	18	25	-	18	-	-

* Os valores apresentados correspondem ao protótipo da UHE Porto Colômbia.

** Nas posições onde não constam valores, considerou-se que o modelo reduzido deve ser na escala mínima de 1:100, o que corresponde ao menor tamanho de estrutura analisado nesta pesquisa.

Tabela 11.4 - Escalas mínimas a serem executadas nos modelos reduzidos para obter valores de $\Psi_{\%}$ similares aos de protótipo, considerando a vazão de 1000 m³/s (considerando **as amostras** de dados obtidas nas diferentes escalas).

Prob. (%)	TOMADAS DE PRESSÃO						
	dA	dB	dC	d1	d3	d5	d7
0,1	-	-	-	-	-	-	-
1,0	-	-	-	-	-	-	-
5,0	-	-	90	-	-	-	-
10,0	-	80	75	-	-	-	-
90,0	-	45	55	-	-	-	-
95,0	-	45	45	-	-	-	-
99,0	-	45	45	-	-	-	-
99,9	-	70	40	40	-	-	-

* Os valores apresentados correspondem ao protótipo da UHE Porto Colômbia.

** Nas posições onde não constam valores, considerou-se que o modelo reduzido deve ser na escala mínima de 1:100,0 que corresponde ao menor tamanho de estrutura analisado nesta pesquisa.

Os resultados apresentados nas Tabelas 11.1 a 11.4 indicam que, para o estudo das pressões extremas ao longo do ressalto, quanto maiores são as vazões (ou seja, menores são os valores do Fr_1 e da submergência do escoamento), maior deverá ser a escala do modelo físico (uma maior parte do ressalto, ou seja, um maior número de tomadas está sob influência da escala). Pode-se ainda observar que os pontos críticos correspondem as posições relativas às tomadas dB, dC e d1, que situam-se no trecho curvo, ou ainda sob sua influência, e coincidem com as zonas de maior flutuação de pressão e entrada de ar no escoamento.

Uma outra maneira de analisar os efeitos de escala na distribuição das pressões extremas foi selecionar os valores médios determinados para as probabilidades de 0,1 %, 1 %, 5 % e 10 % (denominados de Prob. mínimas) e os valores médios das probabilidades de 90 %, 95 %, 99 % e 99,9 % (denominados de Prob. máximas), para cada uma das condições de escoamento (conforme Tabelas 11.1 a 11.4). A Figura 11.13 apresenta os referidos valores plotados em função do número de Froude na entrada (Fr_1) e da submergência (S).

Nota-se pela Figura 11.13 que os menores Fr_1 e S (maiores vazões) necessitam de modelos de maiores dimensões. Foram determinadas duas curvas distintas: 1) para as mínimas probabilidades de ocorrência (0,1 %, 1 %, 5 % e 10 %) e; 2) para as máximas probabilidades de ocorrência (90 %, 95 %, 99 % e 99,9 %).

A partir dessa classificação é possível dizer que para uma relação “ $Fr_1.S$ ” em torno de 15, o modelo físico para representar com exatidão os valores de pressão com 1 % de ocorrência (Prob. mínima) no protótipo deve ser em torno da escala 1:40 (sem efeitos significativos de laboratório). No entanto, para valores de pressão com 99 % (Prob. máxima) de ocorrência no protótipo, a escala deve ser em torno de 1:20.

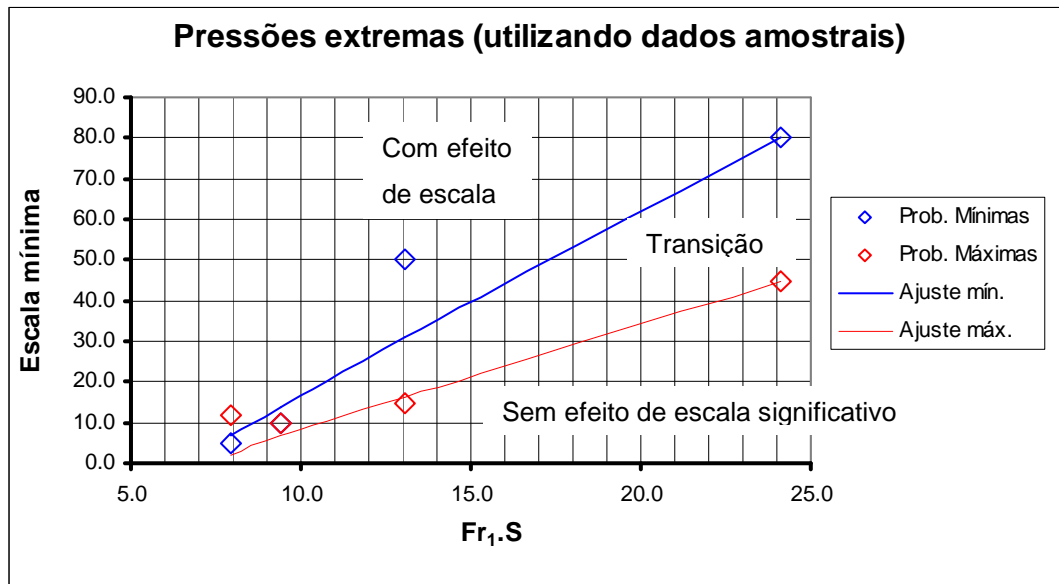


Figura 11.13 - Escalas mínimas sugeridas estudo das pressões extremas ao longo do ressalto em função do número de Froude na entrada e da submergência (com base **nas amostras** de dados obtidos durante as campanhas de medição).

A seguir é apresentada uma avaliação das escalas a serem adotadas nos modelos físicos para estudo das pressões extremas supondo diferenças relativas superiores a dispersão natural dos dados (mesmo procedimento adotado na análise da pressão média). O processo de análise consiste em aumentar a dispersão aceitável em relação a medida efetuada no protótipo até que a mesma corresponda a modelos na escala 1:100. Foram utilizados os valores obtidos nas tomadas dC e d1 (que representam as condições mais desfavoráveis) para todas as vazões ensaiadas. Os resultados obtidos são apresentados através de dois gráficos: para as mínimas probabilidades de ocorrência (Figura 11.14) e para as máximas (Figura 11.15).

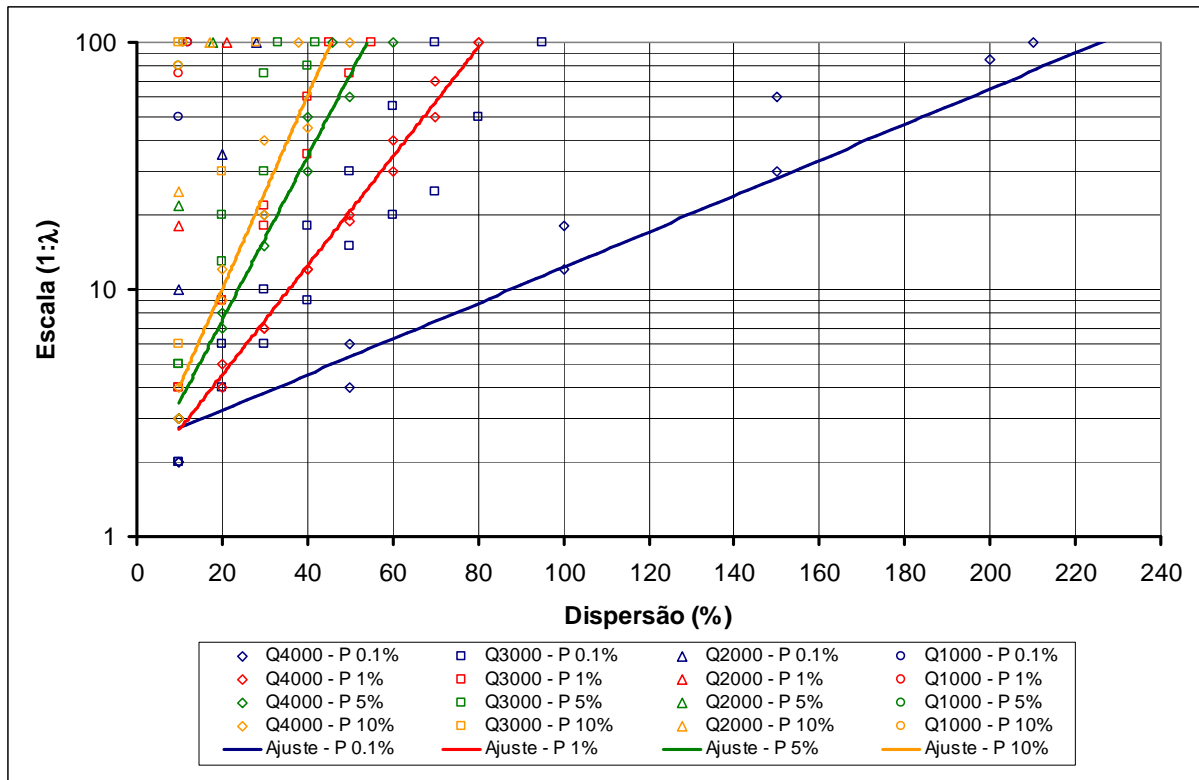


Figura 11.14 - Escalas sugeridas para as pressões extremas mínimas em função de uma variabilidade aceitável da dispersão (com base **nas amostras** obtidas durante as campanhas de medição).

Observa-se pela Figura 11.14 que se for aceita uma dispersão no valor da $P_{1\%}$ de 80 % (relativo ao valor medido no protótipo) poderia ser utilizado um modelo reduzido na escala 1:100. Cabe lembrar que a dispersão natural da amostra da $P_{1\%}$ é de 22 % para a tomada dC (vazão de 4000 m³/s), conforme demonstrado anteriormente. Uma dispersão de 80 % na tomada dC representa um erro de, aproximadamente, 3,35 m.c.a em relação ao valor medido no protótipo (que foi de 4,19 m). A Tabela 11.5 apresenta, para as pressões mínimas, as escalas de modelo em função da dispersão, além de apresentar as diferenças absolutas máximas ($\xi_{\text{máx}}$) para a tomada dC da vazão de 4000 m³/s (que representa a situação mais desfavorável).

Tabela 11.5 – Diferenças absolutas máximas nos valores de pressão com probabilidade de ocorrência de 0,1 % e 1 % em função da variação da dispersão.

Dispersão	P _{0,1%} (2,38 m medido no protótipo)		P _{1%} (4,19 m medido no protótipo)	
	Escala (1:λ)	ξ _{máx} (m)	Escala (1:λ)	ξ _{máx} (m)
10 %	2	0,24	3	0,42
20 %	-	-	5	0,84
30 %	-	-	7	1,26
40 %	-	-	12	1,68
50 %	4	1,19	19	2,10
60 %	5	1,43	30	2,51
70 %	6	1,67	50	2,93
80 %	8	1,90	100	3,35
100 %	18	2,38	-	-
150 %	60	3,57	-	-
280 %	100	6,66	-	-

De acordo com a Figura 11.15, uma dispersão no valor da P_{99%} de 23 % poderia ser utilizado um modelo reduzido na escala 1:100. Cabe lembrar que a dispersão natural da amostra da P_{99%} é de 10 % para a tomada dC (Q = 3000 m³/s). Uma dispersão de 23 % na tomada dC representa um erro de 2,73 m.c.a em relação ao valor medido no protótipo (que foi de 11,85 m).

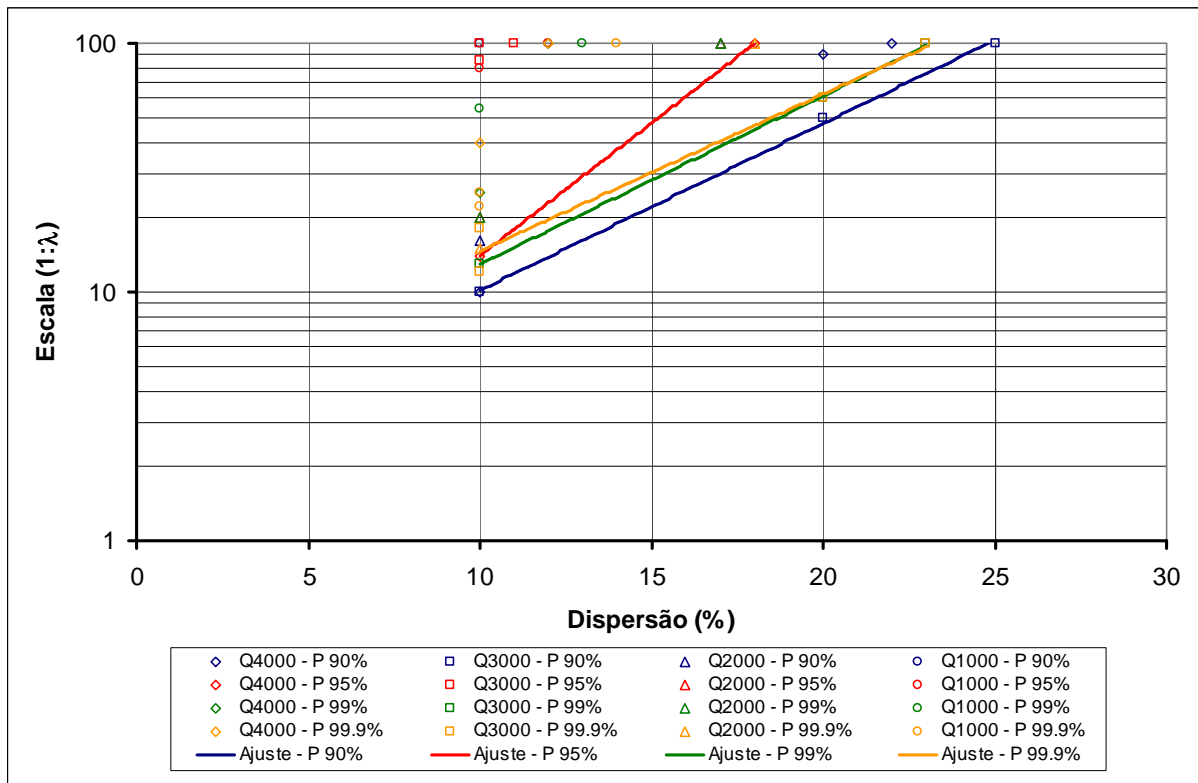


Figura 11.15 - Escalas sugeridas para as pressões extremas máximas em função de uma variabilidade aceitável da dispersão (com base nas amostras obtidas durante as medições).

A Tabela 11.6 apresenta, para as pressões máximas, as escalas de modelo em função da dispersão, além de apresentar os $\xi_{\text{máx}}$ para a tomada dC da vazão de 3000 m³/s (que representa a situação mais desfavorável).

Tabela 11.6 – Diferenças absolutas máximas nos valores de pressão com probabilidade de ocorrência de 99 % e 99,9 % em função da variação da dispersão.

Dispersão	P _{99 %} (11,85 m medido no protótipo)		P _{99,9 %} (13,55 m medido no protótipo)	
	Escala (1:λ)	ξ _{máx} (m)	Escala (1:λ)	ξ _{máx} (m)
10 %	13	1,19	12	1,36
20 %	60	2,37	60	2,72
23 %	100	2,73	100	3,12

11.3 Análise dos efeitos de escala nas pressões com o uso dos ajustes para a P_x, a σ_x e o N_{x%} propostos por Wiest (2008)

Foram analisados também os possíveis efeitos de escala na $\Psi_{\%}$ através do cálculo das pressões extremas a partir dos ajustes definidos para a pressão média (P_x), para a flutuação de pressão (σ_x) e para o coeficiente estatístico de probabilidade (N_{x%}), considerando as diferentes escalas de modelo ($\Psi_{\%aj\ mod}$). Esses resultados foram comparados com os valores ocorridos no protótipo ($\Psi_{\% prot}$).

A Figura 11.16 e a Figura 11.17 apresentam as diferenças relativas admissíveis para as probabilidades de 1 % e 99 %, respectivamente, considerando a vazão de 4000 m³/s equivalente ao protótipo. Nessa avaliação foram consideradas as envoltórias superiores e inferiores determinadas com base no modelo na escala 1:32. As demais probabilidades analisadas (para cada uma das vazões) estão apresentadas no Anexo G.

De acordo com os resultados obtidos para as quatro vazões analisadas, observa-se a mesma tendência dos resultados obtidos com os dados obtidos nos ensaios. Além disso, pode-se afirmar que a dispersão dos ajustes é levemente maior quando comparada com a dispersão das amostras.

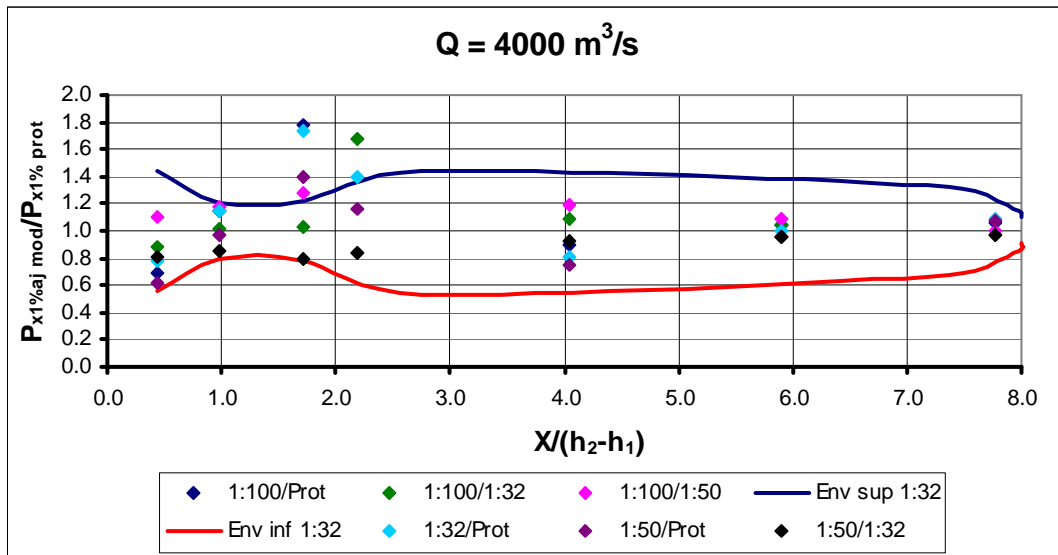


Figura 11.16 - Distribuição longitudinal das diferenças relativas da pressão com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 1 % ($\Psi_{1\%}$), $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$, considerando **os ajustes** determinados para as diferentes escalas. As envoltórias foram definidas com base no modelo 1:32.

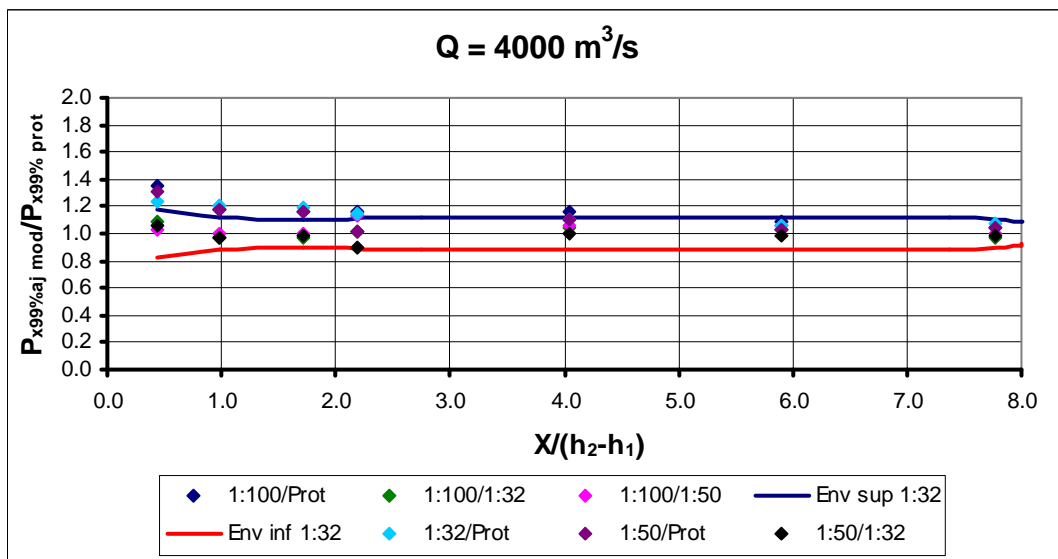


Figura 11.17 - Distribuição longitudinal das diferenças relativas da pressão com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 99 % ($\Psi_{99\%}$), $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$, considerando **os ajustes** determinados para as diferentes escalas. As envoltórias foram definidas com base no modelo 1:32.

Para os dados advindos dos ajustes, também foram avaliadas as dispersões presentes em cada uma das tomadas. As Tabelas 11.7 a 11.10 apresentam as sugestões de escalas mínimas de modelos de forma a reduzir os efeitos de laboratório, para diferentes probabilidades de ocorrência.

Tabela 11.7 - Escalas mínimas a serem executadas nos modelos reduzidos para obter valores do $\Psi_{\%}$ similares aos de protótipo, considerando a vazão de 4000 m³/s (considerando **os ajustes** determinados para as diferentes escalas).

Prob. (%)	TOMADAS DE PRESSÃO						
	dA	dB	dC	d1	d3	d5	d7
0,1	-	-	4	5	-	-	40
1,0	-	-	5	5	-	-	-
5,0	-	-	4	2	-	-	-
10,0	-	20	4	2	-	-	-
90,0	-	50	35	-	-	-	-
95,0	50	20	15	65	-	-	-
99,0	15	18	18	60	35	-	-
99,9	-	-	-	-	-	-	-

* Os valores apresentados correspondem ao protótipo da UHE Porto Colômbia.

** Nas posições onde não constam valores, considerou-se que o modelo reduzido deve ser na escala mínima de 1:100, o que corresponde ao menor tamanho de estrutura analisado nesta pesquisa.

Tabela 11.8 - Escalas mínimas a serem executadas nos modelos reduzidos para obter valores de $\Psi_{\%}$ similares aos de protótipo, considerando a vazão de 3000 m³/s (considerando **os ajustes** determinados para as diferentes escalas).

Prob. (%)	TOMADAS DE PRESSÃO						
	dA	dB	dC	d1	d3	d5	d7
0,1	-	-	8	4	-	12	-
1,0	-	-	8	5	-	35	-
5,0	-	-	4	3	-	35	-
10,0	-	18	4	3	100	28	-
90,0	20	10	9	25	40	-	-
95,0	10	8	8	20	18	-	-
99,0	7	7	8	28	12	-	-
99,9	-	20	45	-	-	-	-

* Os valores apresentados correspondem ao protótipo da UHE Porto Colômbia.

** Nas posições onde não constam valores, considerou-se que o modelo reduzido deve ser na escala mínima de 1:100, o que corresponde o menor tamanho de estrutura analisado nesta pesquisa.

Tabela 11.9 - Escalas mínimas a serem executadas nos modelos reduzidos para obter valores de $\Psi_{\%}$ similares aos de protótipo, considerando a vazão de 2000 m³/s (considerando **os ajustes** determinados para as diferentes escalas).

Prob. (%)	TOMADAS DE PRESSÃO						
	dA	dB	dC	d1	d3	d5	d7
0,1	-	-		95	-	15	-
1,0	-	-		-	-	-	-
5,0	-	-	22	20	-	-	-
10,0	-	50	10	10	-	-	-
90,0	18	12	10	70	30	-	-
95,0	8	8	8	40	15	-	-
99,0	5	6	7	35	9	-	-
99,9	-	15	18	-	65	-	-

* Os valores apresentados correspondem ao protótipo da UHE Porto Colômbia.

** Nas posições onde não constam valores, considerou-se que o modelo reduzido deve ser na escala mínima de 1:100, o que corresponde ao menor tamanho de estrutura analisado nesta pesquisa.

Tabela 11.10 - Escalas mínimas a serem executadas nos modelos reduzidos para obter valores de $\Psi_{\%}$ similares aos de protótipo, considerando a vazão de 1000 m³/s (considerando **os ajustes** determinados para as diferentes escalas).

Prob. (%)	TOMADAS DE PRESSÃO						
	dA	dB	dC	d1	d3	d5	d7
0,1	-	-	-	-	-	-	-
1,0	-	-	-	-	-	-	-
5,0	-	-	60	45	-	-	-
10,0	-	85	25	25	-	90	-
90,0	12	12	12	20	-	-	-
95,0	8	8	9	15	55	-	-
99,0	6	5	7	10	20	-	-
99,9	-	8	12	22	30	--	

* Os valores apresentados correspondem ao protótipo da UHE Porto Colômbia.

** Nas posições onde não constam valores, considerou-se que o modelo reduzido deve ser na escala mínima de 1:100, o que corresponde ao menor tamanho de estrutura analisado nesta pesquisa.

Os resultados apresentados nas Tabelas 11.7 a 11.10 indicam que com o aumento da vazão e, principalmente, da probabilidade de ocorrência, maior deverá ser a escala do modelo reduzido.

Os efeitos de escala na distribuição das pressões extremas obtidas através dos ajustes propostos foram avaliados da mesma forma que os dados adquiridos nas diferentes escalas de estrutura, ou seja, foram selecionados os valores médios determinados para as probabilidades mínimas e máximas (denominados de Prob. mínimas e Prob. máximas, respectivamente), para cada uma das vazões (de acordo com os valores apresentados nas Tabelas 11.7 a 11.10). A Figura 11.18 apresenta os referidos valores plotados em função do Fr_1 e da S .

Pela Figura 11.18, pode-se dizer que para uma relação “ $Fr_1.S$ ” em torno de 15, o modelo físico para representar com exatidão os valores de pressão com, por exemplo, 1 % de ocorrência no protótipo (sem efeitos significativos de laboratório), deve ser em torno da escala 1:15. No entanto, para valores de pressão com 99 % de ocorrência no protótipo, a escala deve ser em torno de 1:8.

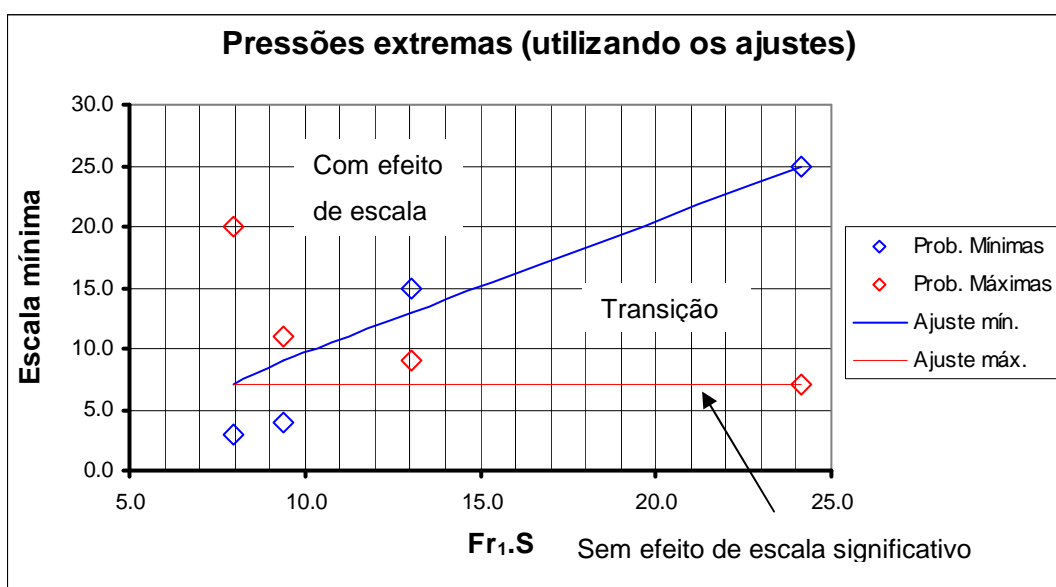


Figura 11.18 - Escalas mínimas sugeridas estudo das pressões extremas ao longo do ressalto em função do número de Froude na entrada e da submergência (considerando **os ajustes** determinados para as diferentes escalas).

No Anexo G são apresentados os valores extremos de pressão, não-adimensionalizados (para as diferentes escalas de modelo e protótipo), obtidos a partir das amostras de dados e através da metodologia proposta por Wiest (2008).

12 Previsão dos valores extremos de pressão com base na metodologia proposta por Cerezer (2008)

Baseado nos dados registrados na UHE Porto Colômbia, o trabalho de Cerezer (2008) define que as probabilidades de ocorrência das pressões extremas (máximas e mínimas) podem ser modeladas pela Distribuição Generalizada de Valores Extremos (GEV). Esta distribuição tem a função de distribuição acumulada de probabilidade dada pela equação 12.1:

$$F_x = \exp \left\{ - \left[1 + \xi \cdot \left(\frac{\Psi_{\%Mmat} - \mu_{adm}}{\sigma_{adm}} \right) \right]^{-\frac{1}{\xi}} \right\} \quad (Eq. 12.1)$$

Sendo que:

- a) Fréchet quando $\xi > 0$ definida em $\mu_{adm} - \frac{\sigma_{adm}}{\xi} < \Psi_{\%Mmat} < +\infty$
- b) Weibull quando $\xi < 0$ definida em $-\infty < \Psi_{\%Mmat} < \mu_{adm} - \frac{\sigma_{adm}}{\xi}$
- c) Gumbel quando $\xi \rightarrow 0$ definida em $-\infty < \Psi_{\%Mmat} < +\infty$

Onde:

$\Psi_{\%Mmat}$ = pressão extrema adimensionalizada para cada instante de tempo do subconjunto de dados;

μ_{adm} = pressão média da amostra de dados adimensionalizada;

σ_{adm} = desvio padrão da amostra de dados adimensionalizada;

ξ = parâmetro de forma da amostra, com $\sigma_x > 0$ dada uma posição x no ressalto.

Obs.: Cabe salientar que a adimensionalização dos parâmetros segue as equações sugeridas por Marques *et al.* (1999).

No trabalho de Cerezer (2008) foram determinados subconjuntos de dados contendo os valores máximos e mínimos obtidos a cada segundo (provenientes de amostras de dados com 5 minutos de duração para diferentes condições de escoamento, adquiridas diretamente na UHE Porto Colômbia). Dessa forma, para

cada uma das condições de escoamento, foram definidas duas novas amostras, apenas com os valores máximos e mínimos, contendo 300 dados cada uma. A partir dessas novas amostras foram determinadas as estimativas dos parâmetros da distribuição GEV ($\Psi_{\%Mmat}$, μ_{adm} , σ_{adm} e ξ) para os valores máximos e mínimos de pressão, para cada uma das tomadas. Para o cálculo dos parâmetros, foi utilizado o software *R: Copyright 2004, The R Foundation for Statistical Computing, Version 1.9.1, ISBN 3-900051-00-3* desenvolvido pela Vienna University of Technology. A autora contempla as estimativas dos parâmetros e das pressões extremas para o protótipo da UHE Porto Colômbia.

A expressão utilizada para o cálculo das pressões extremas adimensionalizadas é determinada pelo parâmetro de forma. Este parâmetro é definido como sendo diferente de zero pela aplicação de um teste da razão de verossimilhança. Sendo assim, puderam ser definidas duas situações:

a) Quando $\xi = 0$, o valor de $\Psi_{\%Mmat}$ é dado por:

$$\Psi_{\%Mmat} = \frac{\sigma_{adm}}{\xi} \cdot \left[\left(-\ln(x_{\%})^{-\xi} - 1 \right) \right] + \mu_{adm} \quad (Eq. 12.2)$$

b) Quando $\xi \neq 0$, o valor de $\Psi_{\%Mmat}$ é dado por:

$$\Psi_{\%Mmat} = \sigma_{adm} \cdot \left[-\ln(-\ln(x_{\%})) \right] + \mu_{adm} \quad (Eq. 12.3)$$

Nesta pesquisa foram determinadas as estimativas dos parâmetros e das pressões extremas para o protótipo e também para os modelos reduzidos, em diferentes escalas, como forma de avaliar os possíveis efeitos de escala na utilização do modelo matemático (daqui por diante será utilizada a sigla “Mmat.” para designar os resultados obtidos através do modelo matemático) de previsão de valores extremos de pressões.

As estimativas por máxima verossimilhança dos parâmetros da distribuição GEV para os valores máximos e mínimos de pressão, considerando a vazão de 4000 m³/s (equivalente ao protótipo) são apresentadas nas Tabelas 12.1 a 12.6.

Tabela 12.1 - Estimativa dos parâmetros da distribuição GEV para os valores extremos máximos de pressão (Mmat. (esc. 1:32), Q = 4000 m³/s).

Q = 4000 m³/s			
Tomadas	μ_{adm}	σ_{adm}	ξ
dA	1,014	0,031	-0,637
dB	1,538	0,078	0,095
dC	1,339	0,092	0,145
d1	1,115	0,135	0,000
d3	1,217	0,113	0,000
d5	1,132	0,049	0,000
d7	1,255	0,024	-0,101

Tabela 12.2 - Estimativa dos parâmetros da distribuição GEV para os valores extremos máximos de pressão (Mmat. (esc. 1:50), Q = 4000 m³/s).

Q = 4000 m³/s			
Tomadas	μ_{adm}	σ_{adm}	ξ
dA	0,933	0,083	0,000
dB	1,427	0,076	0,000
dC	1,340	0,091	0,000
d1	1,046	0,121	0,119
d3	1,165	0,114	0,000
d5	1,102	0,053	0,000
d7	1,106	0,020	0,000

Tabela 12.3 - Estimativa dos parâmetros da distribuição GEV para os valores extremos máximos de pressão (Mmat. (esc. 1:100), Q = 4000 m³/s).

Q = 4000 m³/s			
Tomadas	μ_{adm}	σ_{adm}	ξ
dA	0,942	0,105	-0,124
dB	1,412	0,069	0,000
dC	1,314	0,084	0,000
d1	1,113	0,115	0,000
d3	1,156	0,104	0,000
d5	1,179	0,053	0,070
d7	1,260	0,027	0,000

Tabela 12.4 - Estimativa dos parâmetros da distribuição GEV para os valores extremos mínimos de pressão (Mmat. (esc. 1:32), Q = 4000 m³/s).

Q = 4000 m³/s			
Tomadas	μ_{adm}	σ_{adm}	ξ
dA	0,456	0,057	-0,451
dB	0,856	0,093	-0,427
dC	0,703	0,090	-0,447
d1	0,302	0,090	-0,397
d3	0,438	0,123	-0,501
d5	0,835	0,086	-0,403
d7	1,136	0,044	-0,482

Tabela 12.5 - Estimativa dos parâmetros da distribuição GEV para os valores extremos mínimos de pressão (Mmat. (esc. 1:50), Q = 4000 m³/s).

Q = 4000 m³/s			
Tomadas	μ_{adm}	σ_{adm}	ξ
dA	0,439	0,052	-0,367
dB	0,789	0,072	-0,460
dC	0,547	0,077	-0,382
d1	0,267	0,098	-0,489
d3	0,343	0,126	-0,503
d5	0,669	0,085	-0,447
d7	0,936	0,031	-0,516

Tabela 12.6 - Estimativa dos parâmetros da distribuição GEV para os valores extremos mínimos de pressão (Mmat. (esc. 1:100), Q = 4000 m³/s).

Q = 4000 m³/s			
Tomadas	μ_{adm}	σ_{adm}	ξ
dA	0,197	0,076	-0,375
dB	0,743	0,106	-0,532
dC	0,573	0,085	-0,412
d1	0,287	0,102	-0,461
d3	0,381	0,125	-0,610
d5	0,698	0,074	-0,433
d7	0,945	0,047	-0,349

Os parâmetros da distribuição GEV para as demais condições de escoamento são apresentados no Anexo H.

A partir da definição dos parâmetros da distribuição GEV, foi possível calcular as pressões máximas e mínimas, de acordo com a metodologia proposta por Cerezer (2008), para cada um dos modelos reduzidos e para o protótipo.

12.1 Análise dos efeitos de escala nas pressões extremas através da metodologia proposta por Cerezer (2008)

Foram analisados os possíveis efeitos de escala nos valores extremos ($P_{x\% Mmat mod}$) de pressão determinados a partir da metodologia de Cerezer (2008) através da comparação com os valores de protótipo ($P_{x\% prot}$), para as diferentes escalas de modelo. Nessa avaliação foram consideradas as envoltórias superiores e inferiores, para cada uma das condições de escoamento, determinadas para o modelo na escala 1:32 (apresentada no Capítulo 11). Cabe salientar que os resultados obtidos por Cerezer (2008) foram analisados da mesma forma que os valores determinados pela metodologia proposta por Wiest (2008).

A Figura 12.1 e a Figura 12.2 apresentam as diferenças relativas admissíveis, de acordo com a metodologia proposta por Cerezer (2008), para as probabilidades de 1 % e 99 %, considerando a vazão de 4000 m³/s (valor equivalente ao protótipo).

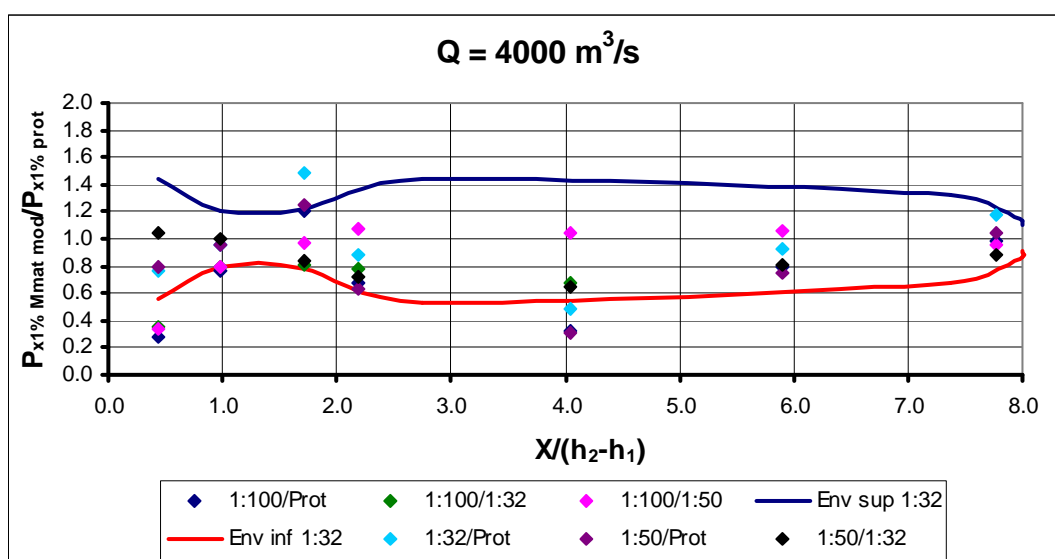


Figura 12.1 - Distribuição longitudinal das diferenças relativas da pressão com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 1 % ($P_{x1\% Mmat}$), $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$, considerando os valores obtidos pela metodologia de Cerezer (2008), para as diferentes escalas de modelo. As envoltórias foram definidas com base nos dados obtidos no modelo 1:32.

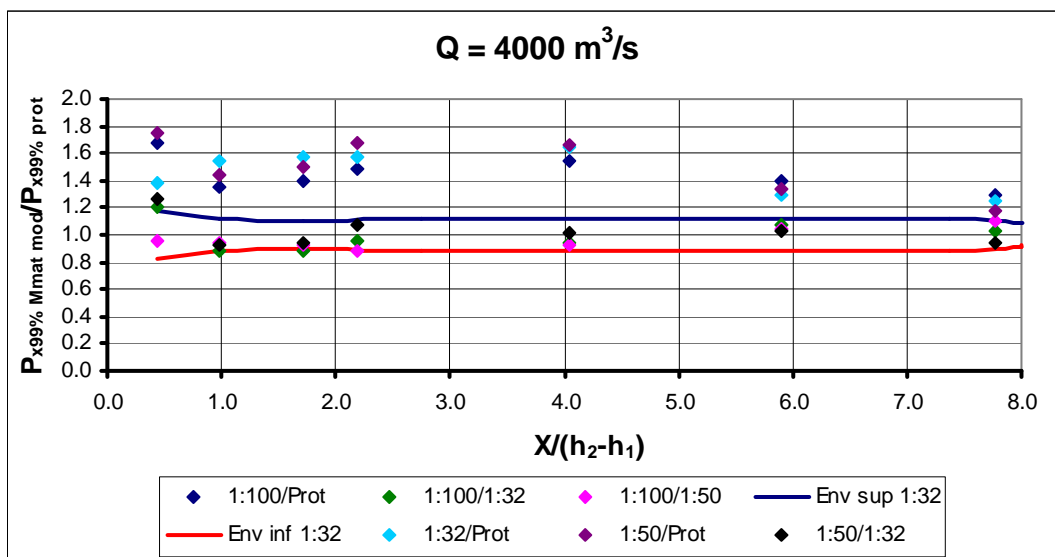


Figura 12.2 - Distribuição longitudinal das diferenças relativas da pressão com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 99 % ($P_{x99\%} Mmat$), $Q = 4000\ m^3/s$, considerando os valores obtidos pela metodologia de Cerezer (2008), para as diferentes escalas de modelo. As envoltórias foram definidas com base nos dados obtidos no modelo 1:32.

As demais probabilidades analisadas (0,1 %, 5 %, 10 %, 90 %, 95 % e 99,9 %) e situações de escoamento (vazões de 1000 m³/s, 2000 m³/s e 3000 m³/s e 4000 m³/s) estão apresentadas no Anexo H.

De acordo com os resultados obtidos nas Figuras 12.1 e 12.2, observa-se que com o aumento da probabilidade de ocorrência, os valores das pressões tendem localizar-se fora da faixa de dispersão delimitada no presente estudo. Além disso, é possível constatar que as tomadas situadas no trecho curvo, além da primeira do trecho plano (ainda sobre o efeito da curvatura), são as que apresentam as maiores diferenças relativas.

A partir dessa análise foram estudadas as dispersões em cada uma das tomadas, para cada uma das vazões e probabilidades de ocorrência. A Figura 12.3 e a Figura 12.4 apresentam a dispersão das tomadas dC e d1 para a vazão de 4000 m³/s e probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 99 % (que corresponde a situação mais desfavorável). A análise das demais tomadas de pressão está apresentada no Anexo H.

Observa-se pela Figura 12.3 e Figura 12.4 que as escalas mínimas que representam os valores medidos diretamente no protótipo da UHE Porto Colômbia, considerando a dispersão definida com base nos valores medidos no modelo 1:32, é de, aproximadamente, 1:5 e 1:4 para as tomadas dC e d1, respectivamente.

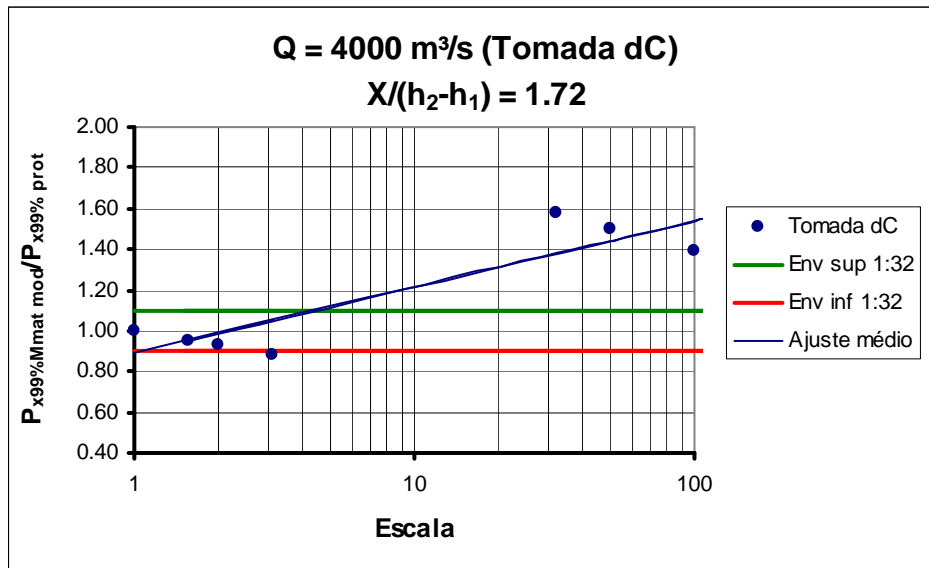


Figura 12.3 - Diferenças relativas da pressão com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 99 %, tomada de pressão dC, Q = 4000 m³/s, considerando os valores obtidos pela metodologia de Cerezer (2008) para as diferentes escalas de modelo. As envoltórias foram definidas com base nos dados obtidos no modelo 1:32.

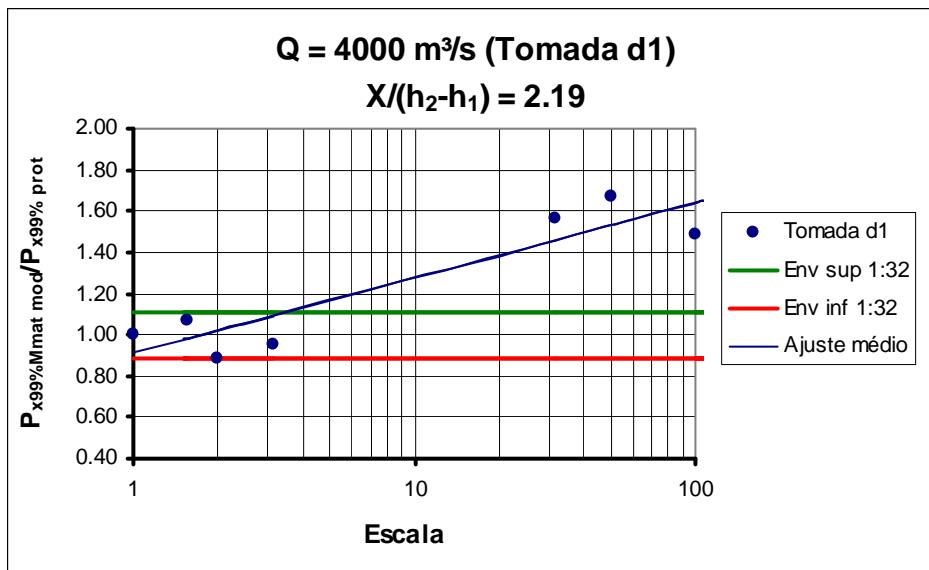


Figura 12.4 - Diferenças relativas da pressão com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 99 %, tomada de pressão dC, Q = 4000 m³/s, considerando os valores obtidos pela metodologia de Cerezer (2008) para as diferentes escalas de modelo. As envoltórias foram definidas com base nos dados obtidos no modelo 1:32.

As Tabelas 12.7 a 12.10 apresentam as sugestões de escalas mínimas a serem adotadas em estudos de modelos, para as diferentes vazões, de maneira a reduzir os efeitos de escala nos valores de pressão com diferentes probabilidades de

ocorrência, considerando os resultados obtidos através do modelo matemático proposto por Cerezer (2008).

Tabela 12.7 - Escalas mínimas a serem executadas nos modelos reduzidos para obter valores de $\Psi_{\%Mmat}$ similares aos de protótipo, considerando a vazão de 4000 m³/s, considerando os valores obtidos pela metodologia de Cerezer (2008), para as diferentes escalas de modelo.

Prob. (%)	TOMADAS DE PRESSÃO						
	dA	dB	dC	d1	d3	d5	d7
0,1	-	-	9	-	10	-	100
1,0	40	-	30	-	5	12	-
5,0	6	-	-	15	3	7	-
10,0	3		-	8	3	7	-
90,0	4	5	3	3	3	4	6
95,0	4	5	4	4	4	3	6
99,0	2	6	5	4	3	3	6
99,9	-	8	7	4	4	3	5

* Os valores apresentados correspondem ao protótipo da UHE Porto Colômbia.

** Nas posições onde não constam valores, considerou-se que o modelo reduzido deve ser na escala mínima de 1:100, o que corresponde ao menor tamanho de estrutura analisado nesta pesquisa.

Tabela 12.8 - Escalas mínimas a serem executadas nos modelos reduzidos para obter valores de $\Psi_{\%Mmat}$ similares aos de protótipo, considerando a vazão de 3000 m³/s, considerando os valores obtidos pela metodologia de Cerezer (2008), para as diferentes escalas de modelo.

Prob. (%)	TOMADAS DE PRESSÃO						
	dA	dB	dC	d1	d3	d5	d7
0,1	5	35	-	-	45	20	-
1,0	2	15	-	35	15	3	-
5,0	-	10	80	10	9	3	-
10,0	-	9	15	6	7	3	-
90,0	3	4	4	3	3	4	-
95,0	3	4	3	3	3	4	-
99,0	3	4	4	3	3	4	-
99,9	18	4	5	3	3	4	-

* Os valores apresentados correspondem ao protótipo da UHE Porto Colômbia.

** Nas posições onde não constam valores, considerou-se que o modelo reduzido deve ser na escala mínima de 1:100, o que corresponde ao menor tamanho de estrutura analisado nesta pesquisa.

Tabela 12.9 - Escalas mínimas a serem executadas nos modelos reduzidos para obter valores de $\Psi_{\%Mmat}$ similares aos de protótipo, considerando a vazão de 2000 m³/s, considerando os valores obtidos pela metodologia de Cerezer (2008), para as diferentes escalas de modelo.

Prob. (%)	TOMADAS DE PRESSÃO						
	dA	dB	dC	d1	d3	d5	d7
0,1	20	80	-	70	50	-	-
1,0	2	20	-	6	15	80	-
5,0	-	9	60	3	7	30	-
10,0	-	8	6	3	5	30	-
90,0	4	4	3	2	3	5	-
95,0	4	3	3	2	2	6	-
99,0	4	3	3	2	3	6	-
99,9	-	4	4	2	4	9	-

* Os valores apresentados correspondem ao protótipo da UHE Porto Colômbia.

** Nas posições onde não constam valores, considerou-se que o modelo reduzido deve ser na escala mínima de 1:100,0 que corresponde ao menor tamanho de estrutura analisado nesta pesquisa.

Tabela 12.10 - Escalas mínimas a serem executadas nos modelos reduzidos para obter valores de $\Psi_{\%Mmat}$ similares aos de protótipo, considerando a vazão de 1000 m³/s, considerando os valores obtidos pela metodologia de Cerezer (2008), para as diferentes escalas de modelo.

Prob. (%)	TOMADAS DE PRESSÃO						
	dA	dB	dC	d1	d3	d5	d7
0,1	-	-	-	35	4	-	-
1,0	-	-	-	8	2	-	-
5,0	15	-	-	4	2	-	-
10,0	6	-	-	4	2	-	-
90,0	15	4	5	6	25	-	-
95,0	18	4	5	6	15	-	-
99,0	25	5	5	5	8	-	-
99,9	-	7	6	5	6	-	-

* Os valores apresentados correspondem ao protótipo da UHE Porto Colômbia.

** Nas posições onde não constam valores, considerou-se que o modelo reduzido deve ser na escala mínima de 1:100,0 que corresponde ao menor tamanho de estrutura analisado nesta pesquisa.

Os resultados apresentados nas Tabelas 12.7 a 12.10 indicam a possibilidade de serem utilizados os ajustes matemáticos propostos por Cerezer (2008), no entanto, os modelos devem possuir escalas da ordem de 1:5.

Os efeitos de escala nas pressões extremas calculadas a partir do modelo matemático foram analisados da mesma maneira que no Capítulo 11 (onde foi estudada a metodologia proposta por Wiest, 2008). A Figura 12.5 apresenta as escalas mínimas sugeridas em função do Fr_1 e da S (valores equivalentes ao protótipo).

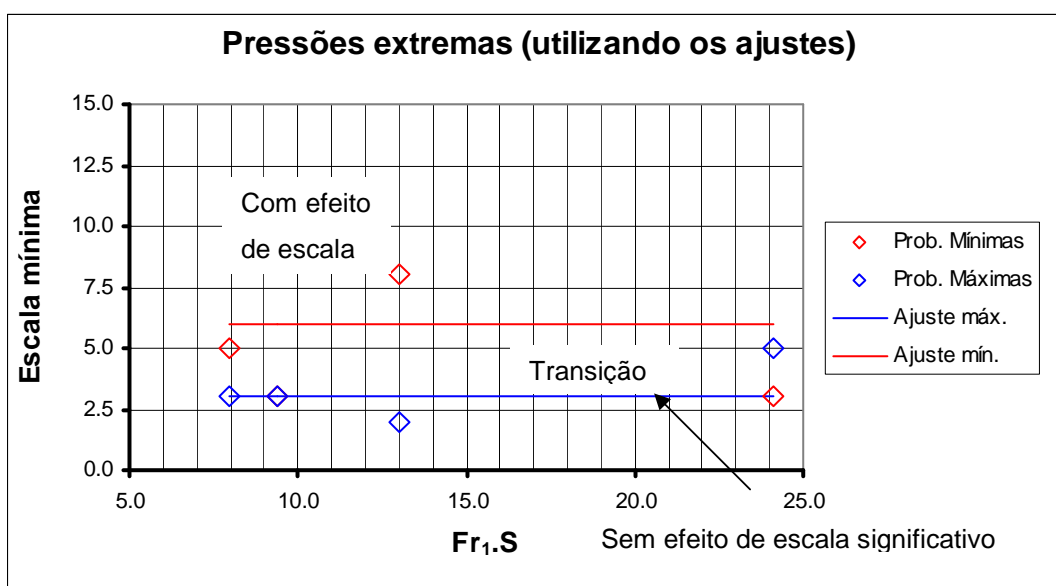


Figura 12.5 - Escalas mínimas sugeridas estudo das pressões extremas ao longo do ressalto em função do número de Froude na entrada e da submergência (considerando os valores obtidos pela metodologia proposta por Cerezer, 2008).

Pela análise da Figura 12.5 nota-se uma pequena dispersão das escalas mínimas sugeridas, independente da probabilidade de ocorrência e da relação “ $Fr_1 \cdot S$ ”. A Figura mostra um ajuste que procura representar a média dos resultados encontrados. Utilizando os ajustes propostos, observa-se que para uma relação “ $Fr_1 \cdot S$ ” em torno de 15, a escala do modelo físico para representar os valores extremos de pressão no protótipo (sem efeitos significativos de laboratório), deve ser maior que 1:5.

No Anexo H são apresentados os valores extremos de pressão, não-adimensionalizados (para as diferentes escalas de modelo e protótipo), obtidos a partir da metodologia proposta por Cerezer (2008).

CONCLUSÕES DA PESQUISA

13 Conclusões, recomendações e considerações finais

O objetivo desta pesquisa foi estudar os possíveis efeitos de escala na previsão dos valores de pressão, com diferentes probabilidades de ocorrência, em bacias de dissipação por ressalto hidráulico. Assim, este trabalho procurou caracterizar as mínimas escalas que devem ter os modelos reduzidos para se efetuar o estudo dos esforços máximos e mínimos que agem sobre este tipo de estrutura hidráulica. As conclusões serão subdivididas conforme a itemização abordada no texto:

13.1 Revisão bibliográfica

Através da análise dos diversos trabalhos citados na revisão bibliográfica, foi possível apresentar as principais características do ressalto hidráulico. Com relação aos estudos das características do fenômeno destacam-se os trabalhos de Bélanger (1828), Marques *et. al.* (1996) e Hager *et. al.* (1989).

Mais especificamente com relação aos estudos do campo de pressões no ressalto hidráulico, podem ser relacionados os trabalhos de Lopardo (1986), Toso e Bowers (1988), Endres (1990) e Pinheiro (1995). Pode-se dizer que a flutuação de pressão foi a grandeza mais estudada no ressalto hidráulico.

A previsão dos valores extremos de pressão que podem ocorrer em uma bacia de dissipação por ressalto hidráulico foi estudada, dentre outros trabalhos pelos seguintes pesquisadores: Teixeira (2003), Cerezer (2008) e Wiest (2008). Não se verificou estudos sistemáticos sobre os possíveis efeitos de escala na determinação dos valores extremos de pressões em bacias de dissipação por ressalto hidráulico.

A incorporação de ar ao escoamento influencia fortemente o desempenho das estruturas hidráulicas. Entretanto, particularmente no ressalto hidráulico, são escassos os trabalhos que visaram descrever os efeitos da entrada de ar. Os principais estudos sobre a aeração nesse tipo de escoamento foram realizados por: Rajaratnan (1962), Boller (2006) e Chanson (2006).

13.2 Tempo mínimo de amostragem e correlação cruzada

Recomenda-se que em estudos de laboratório que visam à determinação do campo de pressões atuantes em bacias de dissipação, as amostras sejam coletadas com frequência de 50 Hz e duração de 10 minutos (valores mínimos).

Já nos estudos que visam determinar as correlações entre os valores de pressão (considerando tomadas consecutivas), sugere-se que sejam coletadas amostras com frequência de aquisição igual a 100 Hz.

13.3 Posição do início do ressalto

A determinação da posição de início do ressalto tornou-se necessária para poder indicar a submergência do escoamento, além de sua importância no processo de adimensionalização adotado na pesquisa. A metodologia de análise seguiu as recomendações propostas por Wiest (2008). Foram analisadas 06 vazões específicas, com um total de 20 submergências em cada um dos modelos. Com isto foi possível determinar ajustes para cada uma das escalas de modelo, assim como uma relação geral, mostrando a tendência do comportamento da posição do início do ressalto em função das características do escoamento.

Observa-se uma pequena dispersão dos dados obtidos nos diferentes modelos. Não foram observados efeitos de escala. Dessa forma, julga-se que para determinação da posição de início do ressalto submergido poderia ser utilizado o ajuste com base nos dados obtidos em qualquer um dos modelos.

13.4 Análise da pressão média

A análise das amostras de dados coletadas no protótipo e nos modelos em diferentes escalas foi realizada em duas etapas:

Etapa 01 - Comparação dos valores médios de pressão obtidos através do uso de piezômetros com os níveis médios de água medidos com pontas limnimétricas, bem como, com os valores médios obtidos com transdutores de pressão para diferentes condições de escoamento.

Etapa 02 - Análises dos efeitos de laboratório nos valores médios de pressão através da comparação dos resultados obtidos em modelos reduzidos em diferentes escalas com os valores de protótipo.

Pressões médias obtidas através de piezômetros

Os resultados obtidos em cada uma das escalas de modelo são muito próximos e apresentam um mesmo padrão de desenvolvimento. Isso se deve ao fato da diferença geométrica entre as estruturas ser relativamente pequena. Os valores obtidos no protótipo (medidos com transdutores de pressão) possuem uma distribuição semelhante à dos modelos, no entanto, os valores são mais baixos, principalmente nas três primeiras tomadas, situadas na curva.

Níveis d'água obtidos através de pontas limnimétricas

Da mesma forma que nos valores das pressões médias obtidos através de piezômetros, os níveis d'água determinados em cada um dos modelos apresentam desenvolvimentos equivalentes. Entretanto, não foi possível comparar com o protótipo.

Comparação dos valores de pressão média (através de piezômetros) com níveis d'água

Como já esperado, os resultados nas três primeiras tomadas são discrepantes. Os valores obtidos nessas tomadas sofrem efeito de um acréscimo de pressão devido ao efeito da curva de concordância entre o perfil do vertedouro e a bacia de dissipação. No trecho plano, onde o ressalto apresenta-se mais estável, os valores de pressão e níveis d'água praticamente coincidem.

Pressão média obtida através dos transdutores

Os resultados de modelo apresentam uma mesma tendência, com valores muito próximos entre si. As medições efetuadas no protótipo possuem distribuição

semelhante à dos modelos físicos, no entanto, apresentam valores mais baixos, sistematicamente na tomadas situadas no trecho curvo.

Comparação dos valores das pressões médias obtidas com piezômetros e transdutores

Os valores são praticamente coincidentes, mesmo considerando as tomadas situadas no trecho curvo do vertedouro.

Comparação dos valores de pressão média nas diferentes escalas de modelo (obtidos com o uso dos transdutores) com os resultados experimentais obtidos por Rodrigues (2002)

Comparando os valores de pressão média obtidos na presente pesquisa com os apresentados no trabalho de Rodrigues (2002), que contemplou um modelo de arranjo, observa-se que ambos possuem um mesmo padrão de desenvolvimento e são bastante próximos entre si. Desta maneira, conclui-se que não existe efeito significativo da tridimensionalidade sobre os valores de pressão média e flutuação.

Análise da pressão média obtida nas diferentes escalas de modelo e no protótipo (valores obtidos através dos transdutores)

Constatou-se que os valores da pressão média obtidos nos modelos reduzidos, no trecho plano, tendem a resultar um pouco acima dos dados de protótipo, com a tendência das diferenças serem inversamente proporcionais à escala do modelo.

Aparentemente, as pressões médias nos modelos tendem a ser maiores que no protótipo. Isto provavelmente ocorre devido à aeração ser menor nos modelos do que no protótipo, podendo-se supor que quanto menor a escala menor será a aeração do escoamento.

Julga-se que existe efeito de escala nos valores das pressões médias obtidas nos modelos devido à aeração, 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.

Análise da dispersão natural das amostras de pressão e dos efeitos de escala

Nesta pesquisa foi realizada uma análise da dispersão natural dos valores de pressão média baseada na metodologia proposta por Wiest (2008).

A partir dos resultados obtidos sugere-se, para relações de $Fr_1.S$ inferiores a 20, que sejam utilizados modelos em torno da escala 1:20. Acima desse valor, possivelmente existam efeitos de escala nos valores médios de pressão.

No entanto, se for aceitável uma dispersão no valor da pressão média de 25 % (relativo ao valor medido no protótipo) pode ser utilizado um modelo reduzido em torno da escala 1:40.

Análise dos efeitos de escala na pressão média com o uso do ajuste proposto por Wiest (2008)

Foram analisados os possíveis efeitos de escala na pressão média através da comparação dos ajustes definidos para cada uma das escalas de modelo com os valores ocorridos no protótipo.

Caso se queira extrapolar os resultados do ajuste proposto por Wiest (2008) para o protótipo, para relações de $Fr_1.S$ inferiores a 20, sugere-se utilizar modelos em torno da escala 1:15. Acima desse valor, possivelmente existam efeitos de escala nos valores médios de pressão.

13.5 Análise da flutuação de pressão

Análise da flutuação de pressão nas diferentes escalas de modelo e protótipo

Foi possível constatar que os valores de flutuação de pressão no protótipo e nos modelos apresentam um mesmo padrão de desenvolvimento no trecho plano. Verificam-se maiores diferenças nas tomadas situadas no trecho curvo, que estão sob o efeito do raio de curvatura entre o perfil e a bacia.

Análise da dispersão natural das amostras e do efeito escala na flutuação de pressão

Foi realizada uma análise da dispersão natural dos valores de flutuação de pressão baseada no método proposto por Wiest (2008) para o ressalto submerso.

Para ter os valores da flutuação de pressão ao longo do ressalto inteiramente dentro da dispersão natural do fenômeno, a escala do modelo reduzido deverá ser em torno de 1:10. Entretanto, quando comparados os valores amostrais, as diferenças absolutas encontradas são muito pequenas (no máximo $\approx 1,0$ m.c.a., considerando a posição mais desfavorável (tomada dA, que se localiza no trecho curvo do perfil do vertedouro). Dessa forma, se pode considerar que não existe efeito de escala significativo na flutuação de pressão ao longo do ressalto. Isto indica que o processo de dissipação de energia ocorre da mesma maneira no protótipo e nos modelos reduzidos.

Análise dos efeitos de escala na flutuação de pressão com o uso do ajuste proposto por Wiest (2008)

Foram observadas diferenças significativas somente na tomada dA. Esta tomada, conforme explicado anteriormente, está sob efeito da curva do perfil e do vertedouro. Sendo assim, conclui-se que as equações propostas podem ser utilizadas para a determinação da flutuação de pressão ao longo do ressalto sem incorrer em efeito de escala significativo.

13.6 Coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades

Foi realizada uma análise da dispersão natural dos coeficientes estatísticos baseada no método proposto por Wiest (2008).

Análise do coeficiente estatístico nas diferentes escalas de modelo e protótipo

De acordo com os resultados obtidos observa-se que as maiores diferenças ocorrem nas três primeiras tomadas, o que indica uma influência do trecho curvo. As

diferenças relativas, em sua grande maioria, ficam dentro da faixa de dispersão natural dos resultados. Este fato confirma a possibilidade de desprezar os efeitos de escala no coeficiente estatístico de probabilidade.

Análise dos efeitos de escala no coeficiente estatístico com o uso do ajuste proposto por Wiest (2008)

Os valores dos coeficientes estatísticos determinados a partir dos ajustes propostos, para algumas probabilidades, ficam fora do intervalo definido nesta pesquisa (principalmente para as probabilidades acima de 90 %). Este fato é devido à existência de uma pequena discrepância do trecho final ajustado em relação aos valores amostrais. No entanto, considera-se esta diferença pouco relevante, indicando que o efeito de escala pode ser desprezado nos ajustes propostos para as diferentes escalas de modelo reduzido.

13.7 Previsão dos valores extremos de pressão com base na metodologia proposta por Wiest (2008)

Análise das pressões extremas (dados amostrais) nas diferentes escalas de modelo e protótipo

No trecho plano, os valores de modelo são superiores dos dados de protótipo, com a tendência das diferenças serem inversamente proporcionais à escala da estrutura. Nota-se que as dispersões são mais relevantes para as maiores probabilidades de ocorrência. Já nas tomadas situadas na curva, a diferença entre o protótipo e os modelos é maior, entretanto, entre os modelos, os resultados possuem praticamente o mesmo desenvolvimento.

Análise da dispersão natural das pressões extremas e dos efeitos de escala

Foram determinadas duas curvas distintas: 1) para as mínimas probabilidades de ocorrência (0,1 %, 1 %, 5 % e 10 %) e; 2) para as máximas probabilidades de ocorrência (90 %, 95 %, 99 % e 99,9 %). A partir dessa classificação é possível dizer

que o modelo físico para representar, dentro da dispersão natural dos dados, os valores de pressão com 1 % de ocorrência no protótipo deve ser em torno da escala 1:60. No entanto, para valores de pressão com 99 % de probabilidade, a escala deve ser em torno de 1:20 (para ambos os casos foi considerada uma relação de Fr_1 e S igual a 20).

Entretanto, se for considerado como aceitável uma dispersão de 80 % para a estimativa da pressão com 1% de probabilidade de ocorrência ($P_{1\%}$) pode ser utilizado um modelo reduzido na escala 1:100. Caso se queira uma dispersão de no máximo 50 %, o modelo deverá estar na escala 1:20.

Análise dos efeitos de escala nas pressões com o uso dos ajustes para a P_x , a σ_x e o $N_{x\%}$ propostos por Wiest (2008)

Com a utilização dos ajustes propostos por Wiest (2008), o modelo físico para representar os valores de pressão no protótipo, por exemplo, com 1 % de probabilidade de ocorrência, dentro da dispersão natural, deve ser em torno da escala 1:15. Já para as pressões extremas máximas, por exemplo, com 99 % de ocorrência no protótipo, a escala deve ser em torno de 1:8.

13.8 Previsão dos valores extremos de pressão com base na metodologia proposta por Cerezer (2008)

Baseado nos dados registrados na UHE Porto Colômbia, e no trabalho de Cerezer (2008) verificou-se que as probabilidades de ocorrência das pressões extremas (máximas e mínimas) podem ser modeladas pela Distribuição Generalizada de Valores Extremos (GEV).

Análise dos efeitos de escala nas pressões extremas através da metodologia proposta por Cerezer (2008)

Observa-se que com o aumento da probabilidade de ocorrência os valores das pressões tendem a ficarem localizados fora da faixa de dispersão delimitada no

presente estudo. Além disso, as tomadas situadas na curva, além da primeira do trecho plano, são as que apresentam as maiores diferenças relativas.

Os resultados indicam a possibilidade de serem utilizados os ajustes matemáticos propostos por Cerezer (2008), no entanto, o modelo físico para representar corretamente os valores extremos de pressão no protótipo deve ser maior que 1:5.

13.9 Recomendações para trabalhos futuros

a) Verificar o efeito do raio de curvatura entre o perfil do vertedouro e a bacia de dissipação nas amostras de pressão; através de um estudo que compare os valores de pressão para diferentes números de Froude e submergências;

b) Realizar medições em protótipo para diferentes condições de escoamento. Cabe ressaltar que medições em escala real não são incontestáveis, uma vez que possuem peculiaridades das aquisições realizadas em laboratório, tais como: faixa de erro dos equipamentos, dificuldades na leitura de níveis, determinação das posições de início do ressalto, medição das vazões vertidas, entre outras;

c) Avaliar os coeficientes de assimetria e curtose ao longo do ressalto hidráulico. Este estudo pode trazer informações importantes quanto a características do fenômeno e;

d) Estudar a influência da aeração no escoamento, que se apresenta como uma das possíveis causas de efeitos de escala no ressalto hidráulico.

REFERÊNCIAS

14 Referências bibliográficas

- [1] ABDUL-KHADER, M.H.; ELANGO, K. 1974. Turbulent pressure field beneath a hydraulic jump. **Journal of Hydraulic Research**, Delft, v. 12, n. 4, p. 469-489.
- [2] AKBARI, M. E.; MITTAL, M. K.; PANDE, P. K. 1982. Pressure fluctuations on the floor of free and forced hydraulic jumps. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE HYDRAULIC MODELLING OF CIVIL ENGINEERING STRUCTURES, 1982, Coventry. **Papers**. Cranfield: BHRA Fluid Engineering. C1, p. 87-96.
- [3] ARMENIO, V.; TOSCANO, P; FIOROTTO, V. 2000. On the effects of a negative step in pressure fluctuations at the bottom of a hydraulic jump. **Journal of Hydraulic Research**, Delft, v. 38, n. 5, p. 359-368.
- [4] BÉLANGER, J. B. 1828. Essai sur la solution numerique de quelques problèmes relatifs au mouvement permanent des eaux courantes. **Carilian-Goeury**. Paris.
- [5] BENDAT, J.S.; PIERSOL, A.G. 1971. **Random data: analysis and measurement procedures**. New York: Wiley-Interscience. 497 p.
- [6] BENJAMIN, J. R.; CORNELL, C. A. 1970. **Probability, statistics and decision for civil engineers**. New York: McGraw-Hill.
- [7] BHUTTO, H.B.G; MIRANI, S.N.; CHANDIO, S. N. 1989. Characteristics of free hydraulic jump in rectangular channel. **Mehran University Research Journal of Engineering and Technology**, Jamshoro, v. 8, n. 2, p. 34-44.
- [8] BOLLERS F. 2006. Experimental Investigation of Air Circulation Patterns in Classical Hydraulic Jumps. In: **International Junior Researcher and Engineer Workshop on Hydraulic Structures**. J. Matos and H. Chanson (Eds). Report CH61/06, Div. of Civil Eng., The University of Queensland, Brisbane, Australia – ISBN 1864998687.

[9] BRADLEY, J. N.;PETERKA, A. J. 1957. The hydraulic design of stilling basins. **Journal of hydraulics division**, ASCE, Vol. 83, nº. HY5, papers 1401, 1402 and 1403.

[10] 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 - Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 179 p.

[11] CHANSON, 2006. **Air Bubble entrainment in hydraulic jumps - Similitude and scale effects**. Report nº. CH57/05, Dept. of Civil Eng., The University of Queensland, Brisbane, Australia. 119 p.

[12] CHOW, V.T. 1959. **Open-channel hydraulics**. New York: McGraw-Hill. p. 393 - 438.

[13] COUSTEIX, J.O. 1989. **Turbulence et couche limite**. Toulouse: Cepadues. 627 p.

[14] ELDER, R.A. 1961. Model-prototypet turbulence scaling. In: INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR HYDRAULIC RESEARCH CONVENTION, 9, 1961, Dubrovnik. **[Proceedings]**. Dubrovnik: Proleter. p. 24-31.

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

[16] 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 – Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 104 p.

- [17] ESTADOS UNIDOS. Bureau of Reclamation. 1987. **Design of small dams**. 3rd ed. Denver: Government Printing Office. 860 p.
- [18] FAVRE, A.; KOVAZNAY, L.; DUMAS, R.; CAVIGLIO, J.; COANTIC, M. 1976. **La turbulence en mécanique des fluides**. Paris: Gauthier-Villars. 411 p.
- [19] FIOROTTO, V.; RINALDO, A. 1982. Fluctuating uplift and lining in spillway stilling basins. **Journal of Hydraulic Engineering**, New York, v. 118, n. 4, p. 578-595.
- [20] FIOROTTO, V.; RINALDO, A. 1992. Turbulent pressure fluctuations under hydraulic jumps. **Journal of Hydraulic Research**, Delft, v. 30, n. 4, p. 499-520.
- [21] FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS. Usina Hidrelétrica de Porto Colômbia. 1996. **Estudos hidráulicos em modelo reduzido – modelo de conjunto – escala 1:100 – memória conceitual do modelo**. Rio de Janeiro. 16 p.
- [22] FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS. Usina Hidrelétrica de Canabrava. 1999. **Relatório final de estudos – dec.t.012.2000**. Rio de Janeiro. 16 p.
- [23] GOMES, J.F. 2000. **Visualização de escoamento macroturbulento: ressalto hidráulico a jusante de uma comporta**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 110 p.
- [24] HAGER, W.H. 1988. Ressaut hydraulique du type b dans um canal à forte pente. **Journal of Hydraulic Research**, Delft, v. 26, n. 5, p. 539-558.
- [25] HAGER, W. H.; BREMEN, R.; KAWAGOSHI, N.T. 1989. Classical hydraulic jump: length of roller. **Journal of Hydraulic Research**, Delft, v. 28, n. 5, p. 591-608.
- [26] HAGER, W.H. 1992. **Energy dissipators and hydraulic jump**. Dordrecht: Kluwer Academic. 289 p.

- [27] HARTUNG, F.; HAUSLER, H. 1973. Scours stilling basins and downstream protection under free overfall jets at dams. In: CONGRESS ON LARGE DAMS, 11, 1973, Madrid. **Proceedings**. Madrid: ICOLD. Q. 41, v.R3, p. 39-56.
- [28] HOYT, J. W.; SELLIN, R. H. J. 1989. Hydraulic jump as "mixing layer". **Journal of hydraulic Engineering**, vol. 115, n. 12, p. 1607-1614.
- [29] INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. Brazilian Committee on Dams (Org.). 2002. **Large Brazilian spillways**: overview of Brazilian practice and experience in designing and building spillways for large dams. Rio de Janeiro.
- [30] KAWAGOSHI, N.; HAGER, W.H. 1990. B-jump in sloping channel: part II. **Journal of Hydraulic Research**, Delft, v. 28, n, 4, p. 461-480.
- [31] LONG, D.; RAJARATNAM, N.; STEFFLER, P.M.; SMY, P.R. 1991. Structure of flow in hydraulic jumps. **Journal of Hydraulic Research**, Delft, v. 29, n. 2, p. 207-218.
- [32] LOPARDO, R.A.; SOLARI, H.G. 1980. Flutuaciones de presión en la base de resalto libre. In: CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, 9, Mérida, 1980. **Memorias**. Mérida: Asociación Internacional de Investigaciones Hidráulicas. p. 69-78.
- [33] LOPARDO, R.A.; LIO, J.C.D.; VERNET, G.F. 1982. Physical modelling on cavitation tendency for macroturbulence of hydraulic jump. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE HYDRAULIC MODELLING OF CIVIL ENGINEERING STRUCTURES, 1982, Coventry. **Papers**. Bedford: BHRA Fluid Engineering. p.109-121.
- [34] LOPARDO, R.A., HENNING, R.E. 1984. Temas prácticos de la medición y análisis de presiones instantáneas en laboratorio. In: CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, Buenos Aires. **Anales**. Asociación Internacional de Investigaciones Hidráulicas, v. 1, p. 375-386.

[35] LOPARDO, R.A. 1986. **Apunte sobre fluctuaciones macroturbulentas de presión, medición, análisis y aplicación al resalto hidráulico**. São Paulo: Escola Politécnica. 44 p.

[36] LOPARDO, R.A. 1987. Notas sobre fluctuaciones macroturbulentas de presión, medición, análisis y aplicación al resalto hidráulico. **Revista Latino Americana de Hidráulica**, São Paulo, n. 2, set., p. 109-154.

[37] LOPARDO, R. A.; CHIVIDINI, M. F.; BERRILIO, D. A. 1987. Effect of Hydraulic Jump Inflow Condition on the Decay of Turbulence in Stilling Basins. In: **International Symposium on New Technology in Model Testing in Hydraulic Research**, India, p. 24-26.

[38] LOPARDO, R.A.; CHIVIDINI, M.F.; BERRILIO, D.A. 1987. Effects of hydraulic jump inflow condition on the decay of turbulence in stilling basins. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NEW TECHNOLOGY IN MODEL TESTING IN HYDRAULIC RESEARCH, 1987, Pune. **Proceedings**. New Delhi: Central Board of Irrigation and Power. p. 111-114.

[39] LOPARDO, R.A. 1996. Modelación física de flujo macroturbulento en estructuras hidráulicas. **Apuntes de Ingeniería**, Santiago de Chile, v.19, n. 2, p. 5-20.

[40] LOPARDO, R.A.; DE LIO, J.C.; LOPARDO, M.C. 1999. Physical modelling and design estimation of instantaneous pressures in stilling basins. In: INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR HYDRAULIC RESEARCH, 28., 1999, Graz. **Hydraulic engineering for sustainable water resources management at the turn of the millennium**. Graz: Institute for Hydraulics and Hydrology. 1 CD-ROM.

[41] LOPARDO, R.A.; FATTOR, C.A.; CASADO, J.M.; LOPARDO, M.C. 2004a. Una aproximación por turbulencia remanente de la longitud del resalto sumergido. In: CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, 21., 2004, São Pedro. **Anales**. São Paulo: Asociación Internacional de Investigaciones Hidráulicas. 1 CD-ROM.

[42] LOPARDO, R.A.; FATTOR, C.A.; LOPARDO, M.C.; CASADO, J.M. 2004b. Instantaneous pressure field on a submerged jump stilling basins. In: YAZDANDOOST, F.; ATTARI, J. (Ed.). **Hydraulics of dams and river structures**. London: A. A. Balkema. p. 133-138.

[43] LOPARDO, R.A. 2005. Una aproximación al estudios de flujos macroturbulentos en resalto hidráulico. In: **Escoamentos Macroturbulentos**: Departamento de Obras Hidráulicas, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 40 p.

[44] 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, **Anais**, Florianópolis, 25 p.

[45] MARQUES, M.G.; ENDRES, L.A.M.; ALMEIDA, L.E.S.B.; REZENDE, B.S. 1991. Caracterização do campo de pressões instantâneas em bacia de dissipação planas a jusante de descarregadores. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 9., 1991, Rio de Janeiro [e] SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 5., 1991, Rio de Janeiro. **Anais**. Rio de Janeiro: ABRH. v. 3, p. 344-353.

[46] MARQUES, M.G. 1995. **Nouvelle approche pour le dimensionnement des dissipateurs a auge**. Tese de Doutorado - Université Laval. Faculté des Sciences et de Génie, Québec, 229 p.

[47] MARQUES, M.G.; DRAPEAU, J.; VERRETTE, J. L. 1996. Análise da flutuação de pressão provocada pela formação de um ressalto hidráulico a jusante de vertedouro. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, 17., 1996, Guayaquil. **Memorias**. Guayaquil: Asociación Internacional de Investigaciones Hidráulicas. p. 1-11.

[48] MARQUES, M.G.; OLLERMANN G.; WEILLER C.; ENDRES L.A.M. 1998. Perda de carga no interior de um ressalto hidráulico a jusante de vertedouro. In:

CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, 18., 1998, Oaxaca. **Memorias**. Oaxaca: Asociación Internacional de Investigaciones Hidráulicas. p. 1-6.

[49] MARQUES, M.G.; ALMEIDA, F.M.; ENDRES, L.A.M. 1999. Adimensionalização de pressões médias em bacias de dissipação por ressalto hidráulico. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 13, 1999, Belo Horizonte. **Anais**. Belo Horizonte: ABRH. 1 CD-ROM.

[50] MARQUES, M.G.; TEIXEIRA, E.D.; MARTINEZ, D.B.; GOMES, J.F.; ENDRES, L. A. M. 2004a. Análise da macroturbulência em estruturas de dissipação de energia através do estudo de variação de pressões e níveis. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 9, n. 1, p. 127-153.

[51] MARQUES, M.G.; TRIERWEILER NETO, E.F.; ENDRES, L.A.M. ; TEIXEIRA, E.D. 2004b. Determinação analítica da linha de separação de escoamentos para o ressalto hidráulico. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, 21, 2004, São Pedro. **Anales**. São Paulo: IAHR. 1 CD-ROM, G214.

[52] MARQUES, M.G.; ENDRES, L.A.M.; TEIXEIRA, E.D. e TRIERWEILER NETO, E.F. 2004c. Previsão de pressões extremas junto ao fundo de uma bacia de dissipação por ressalto hidráulico. In: IV SIMPÓSIO SOBRE PEQUENAS E MÉDIAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS, 2004, Recife. **Anais**. Recife: CBDB. 1 CD-ROM.

[53] MARQUES, M.G.; TRIERWEILER, E.F.; TEIXEIRA, E.D.; WIEST, R.A. 2006. Contribuição ao dimensionamento de estruturas de dissipação através do estudo da flutuação de pressão em ressalto hidráulico formado a jusante de comporta. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE PEQUENAS E MÉDIAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS, 5., 2006, Florianópolis. **Temas**. Florianópolis: Tractebel Energia. 1 CD-ROM.

[54] MARQUES, M.G.; ENDRES, L.A.M.; MEES, A. A. 2007. Paralelo entre o coeficiente de aeração e a flutuação de pressão no ressalto hidráulico: um estudo teórico-experimental. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2007, São Paulo. **Anais**. São Paulo: ABRH, 11 p.

- [55] MARQUES, M.G.; ENDRES, L.A.M.; TEIXEIRA, E. D. MEES, A. A. 2007. Evaluating hydrodynamic pressures in the stilling basin of Porto Colômbia Hydroelectric Power Plant. In: INTERNATIONAL ASSOCIATION OF HYDRAULIC ENGINEERING AND RESEARCH. Congress. **Proceedings**. Venice: Organizing Committee, 2007. C1.b-593.pdf, 10 p.
- [56] MATOS, J. S. G. 1999. **Emulsão de ar e dissipação de energia do escoamento em descarregadores em degraus**. Dissertação de Doutorado, Instituto Superior Técnico, Portugal.
- [57] MATLAB: **the language of technical computing**. 1998. Natick: MathWorks, c1984-1988. (5.3.0.29215A (R11)).
- [58] MOSSA, M. 1999. On the oscillating characteristics of hydraulic jumps. **Journal of Hydraulic Research**, Delft, v. 37, n. 4, p. 541-558.
- [59] MOSSA, M.; TOLVE, U. 1998. Flow visualization in bubbly two-phase hydraulic jump. **Journal of Hydraulic Research**, IAHR, nº. 37, p. 541-557.
- [60] MÜLLER, D. 2008. **Análise de pressões junto ao fundo no ressalto hidráulico formado a jusante de um vertedouro através da distribuição bivariada de valores extremos**. Tese de Doutorado – Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 84 p.
- [61] OHTSU, I.; YASUDA, Y. 1991. Hydraulic jump in sloping channels. **Journal of Hydraulic Engineering**, New York, v. 117, n. 7, p. 905-921.
- [62] ORTIZ, J.P.; ALMEIDA, F.M.; CARVALHO, E.; BORSARI, R.D. 1998. Medições em protótipo de flutuações de pressão na bacia de dissipação da Usina de Porto Colômbia. In: ESCOLA DE PRIMAVERA EM TRANSIÇÃO E TURBULÊNCIA, 1, 1998, Rio de Janeiro. **Anais**. Rio de Janeiro: ABCM. v. 1, p. 293-320.

- [63] PETERKA, A. J. 1974. **Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators**. Washington: U.S. Govt. Print. Off. 222 p.
- [64] PINHEIRO, A.A.N. 1995. **Acções hidrodinâmicas em soleiras de bacia de dissipação de energia por ressalto hidráulico**. Tese Doutorado - Universidade Técnica de Lisboa, 353 p.
- [65] PINTO, N. L. de S. and NEIDERT, S. H. 1982. Model prototype conformity in aerated spillway flow. In: **International on the Hydraulic Modeling of Civil Engineering Structures**, BHRA Fluid Engineering, Coventry, England,. 7 p.
- [66] PINTO, N. L. de S. 1984. Model evaluation of aerators in shooting flow. In **Symposium on Scale Effects in Modelling Hydraulic Structures**, Esslinger am Neckar, Germany, 6 p.
- [67] PINTO, L. C. D. S.; VASCONCELLOS, J. E. D.; SEYSSEL, R. L. 1988. Análise experimental da flutuação de pressão na base de um ressalto livre e afogado. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, 13., 1988, Habana. **Memorias**. Habana: Asociación Internacional de Investigaciones Hidráulicas. v. 2, p. 182-194.
- [68] RAJARATNAM, N. 1962. Experimental Study of Air Entrainment Characteristics of the Hydraulic Jump. **Jl of Instn. Eng**, India, Vol. 42, nº. 7, p. 279-293 9.
- [69] RAJARATNAM, N. 1965a. Submerged hydraulic jump. **Journal of the Hydraulics Division**, New York, v. 91, n. 4, p. 71-96.
- [70] RAJARATNAM, N. 1965b. The hydraulic jump as wall jet. **Journal of the Hydraulics Division**, New York, v. 91, n. 5, p. 107-132.
- [71] RAJARATNAM, N. 1967. Hydraulic jumps. **Advances in Hydroscience**, New York, v. 4, p. 197-280.

[72] REINSEL, G. C. 1993. **Elements of multivariate time series analysis**. New York: Springer. 263 p.

[73] RENIUS, E. 1986. Rock erosion. **International Water Power and Dam Construction**, Sutton, v. 38, n. 6, p. 43-48.

[74] RENIUS, E. 1970. Head losses in unlined rock tunnels. **Water Power and Dam Construction**, London, v. 22, n. 7/8, July/Aug., p. 256-262.

[75] RETI, L. 1974. **Léonard de Vinci: L'Humaniste, L'Artiste, L'inventeur**. Paris: Robert Laffont. 319 p.

[76] RESCH, F.J.; LEUTHEUSSER, H.J. 1971. Mesures de turbulence dans le ressaut hydraulique. **La Houille Blanche**, Grenoble, v. 26, n. 1, p. 17-32.

[77] RODRIGUES, R.C. 2002. **Estudo numérico experimental de bacia de dissipação**. Dissertação de Mestrado - Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 124 p.

[78] ROMAGNOLI, M. 2005. **Avaliação experimental da vibração induzida sobre uma comporta plana com descarga de fundo**. Dissertação de Mestrado – Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 111 p.

[79] ROUSE, H.; SIAO, T.T.; NAGARATNAM, S. 1959. Turbulence characteristics of the hydraulic jump. **Transactions of the American Society of Civil Engineers**, New York, v. 124, p. 926-950.

[80] SAUMA HADDAD, J.C.; DE LIO, J.C.; LOPARDO, R.A. 1992. Una aproximación analítica para la superficie libre del resalto hidráulico. In: CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, 15., 1992, Cartagena. **Memorias**. Cartagena: Asociación Internacional de Investigaciones Hidráulicas. 11 p.

[81] TEIXEIRA, E.D. 2003. **Previsão dos valores de pressão junto ao fundo em bacias de dissipação por ressalto hidráulico**. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

[82] TEIXEIRA, E.D.; TRIERWEILER NETO, E.F.; ENDRES, L.A.M.; MARQUES, M. G. 2003a. Determinação do coeficiente estatístico de distribuição de probabilidade para valores extremos de pressões no ressalto hidráulico. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 15., 2003, Curitiba. **Anais**. Curitiba: ABRH. 1 CD-ROM, T 310.

[83] TEIXEIRA, E.D.; TRIERWEILER NETO, E.F.; ENDRES, L.A.M.; MARQUES, M. G. 2003b. Análise das flutuações de pressão junto ao fundo em bacias de dissipação por ressalto hidráulico. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 25., 2003, Salvador. **Anais**. Rio de Janeiro: Comitê Brasileiro de Barragens. v. 1, T91-A14, p. 188-198.

[84] TENNEKES, H.; LUMLEY, J.L. 1972. **A first course in turbulence**. Cambridge: MIT. 300 p.

[85] TOSO, J.W. 1986. **The magnitude and extent of extreme pressure fluctuations in the hydraulic jump**. 163 p. Tese (Doutorado) - Minnesota University.

[86] TOSO, J. W.; BOWERS, C. E. 1988. Extreme pressures in hydraulic-jump stilling basins. **Journal of Hydraulic Engineering**, New York, v. 114, n. 8, p. 829-843, Aug.

[87] TRIERWEILER NETO, E.F.; AMANTE, R.C.R.; TEIXEIRA, E.D.; MARQUES, M. G. 2005a. Comparação das medições de pressão em bacia de dissipação por ressalto hidráulico no protótipo e nos modelos reduzidos da UHE Porto Colômbia. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 26,

2005, Goiânia. **Anais**. Rio de Janeiro: Comitê Brasileiro de Barragens. 1 CD-ROM, T97, A04.

[88] TRIERWEILER NETO, E.F.; ENDRES, L.A.M.; MEES, A.A.A.; PRÁ, M.D.; TEIXEIRA, E.D.; WIEST, R.A.; CANELLAS, A.V.B.; FERAUDY FILHO, R.P.; MARQUES, M.G. 2005b. Influência da utilização de condutos flexíveis em medições de flutuação de pressão em ressalto hidráulico. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 16, 2005, João Pessoa. **Anais**. [João Pessoa]: ABRH. 1 CD-ROM, Trabalhos Técnicos.

[89] TRIERWEILER NETO, E.F. 2006. **Avaliação do campo de pressões em ressalto hidráulico formado à jusante de uma comporta com diferentes graus de submergência**. 174 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

[90] VASILIEV, D.F.; BUKREYEV, V.I. 1967. Statistical characteristics of pressure fluctuations in the region of hydraulic jump. In: INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR HYDRAULIC RESEARCH, 12., 1967. **Proceedings**. Fort Collins: Colorado State University. v. 2, p. 1-8.

[91] WIEST, R.A.; MARQUES, M.G.; TEIXEIRA, E. D.; TRIERWEILER NETO, E.F.; MEES, A.A.A.; PRÁ, M.D.; ENDRES, L.A.M.; CANELLAS, A.V.B.; FERAUDY FILHO, R.P. 2005. Influência da submergência na determinação do coeficiente estatístico de distribuição de probabilidade para pressões extremas em bacias de dissipação por ressalto hidráulico. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 16, 2005, João Pessoa. **Anais**. [João Pessoa]: ABRH. 1 CD-ROM, Trabalhos Técnicos.

[92] WIEST, R.A. 2008. **Avaliação do campo de pressões em ressalto hidráulico formado a jusante de um vertedouro com diferentes graus de submergência**. Dissertação de Mestrado - Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 139 p.

ANEXOS

Anexo A - Tempo de amostragem e freqüência de aquisição

A.1 - Modelo 1:100

Na Tabela A.1 são apresentados os valores da pressão média e das pressões extremas para a tomada “d_c” (vazão de 4000 m³/s equivalente ao protótipo) considerando a amostra com duração de 15 minutos e freqüência de aquisição igual a 100 Hz.

Tabela A.1 – Valores de pressão obtidos para a tomada “dc” considerando amostra de 15 minutos e freqüência de aquisição igual a 100 Hz (modelo 1:100, Q = 4000 m³/s).

P _x	P _{0,1%}	P _{1%}	P _{5%}	P _{10%}	P _{90%}	P _{95%}	P _{99%}	P _{99,9%}
10,69	5,84	7,21	8,30	8,82	12,56	13,22	14,45	16,15

Estão apresentados na Figura A.1 e na Figura A.2, respectivamente, os valores de pressão com 1 % e 99 % de probabilidade de ocorrência para diferentes tempos de amostragem. Nessas figuras são apresentadas as envoltórias superiores e inferiores que representam a variabilidade dos dados frente à duração das amostras. No caso do modelo 1:100, a dispersão natural em função do erro do equipamento de medição é de $\pm 0,15$ m (valor equivalente no protótipo).

Na Tabela A.2 são apresentados os tempos mínimos de amostragem para os valores de pressão média e de pressão com diferentes probabilidades de ocorrência para a freqüência de aquisição de 100 Hz. Nota-se que os tempos mínimos de amostragem dos valores de pressão com diferentes probabilidades de ocorrência são maiores para as probabilidades extremas. Esse comportamento é o mesmo constatado nas amostras coletadas no protótipo.

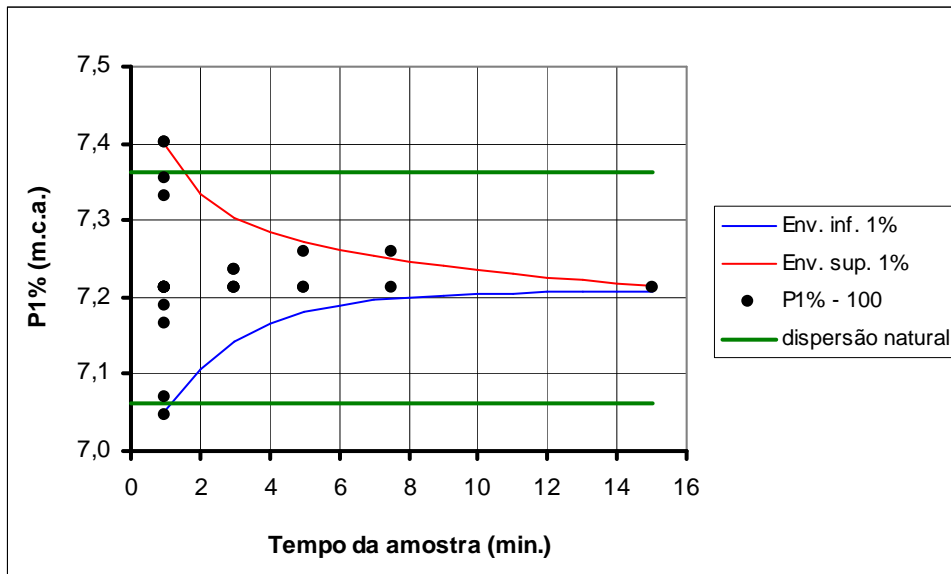


Figura A.1 - Valores da pressão com 1 % de probabilidade em função do tempo de amostra (modelo 1:100, tomada “dc”, $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$).

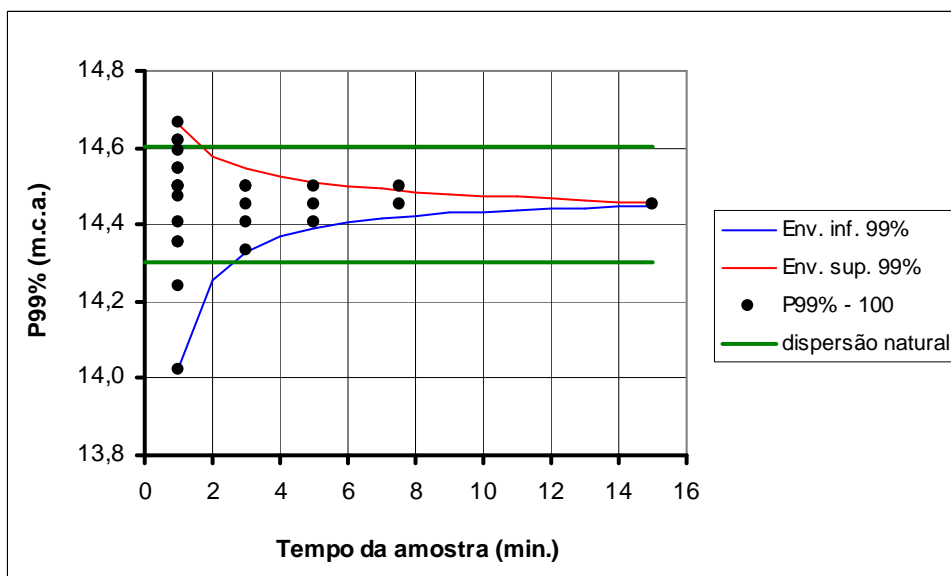


Figura A.2 - Valores da pressão com 99 % de probabilidade em função do tempo de amostra (modelo 1:100, tomada “dc”, $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$).

Tabela A.2 - Tempos mínimos de amostragem (em minutos) para freqüência de aquisição igual a 100 Hz (modelo 1:100, tomada “dc”, $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$).

Parâmetros	P_x	$P_{0,1\%}$	$P_{1\%}$	$P_{5\%}$	$P_{10\%}$	$P_{90\%}$	$P_{95\%}$	$P_{99\%}$	$P_{99,9\%}$
Tempos (min.)	1,0	6,0	2,0	1,0	1,0	1,0	1,0	2,0	6,0

A Tabela A.3 a seguir ilustra os resultados obtidos de frequência mínima de aquisição e tempo mínimo de amostragem para os valores de pressão considerando os dados obtidos para a vazão de 4000 m³/s no modelo 1:100. Ressalta-se que esses valores foram os mais críticos entre todas as vazões e tomadas. Observa-se o mesmo tipo de comportamento encontrado no protótipo, ou seja, à medida que a frequência de aquisição diminui, o tempo de aquisição aumenta. Entretanto, essa variação nas pressões extremas, de um modo geral, é menor que a encontrada no protótipo.

Tabela A.3 - Frequência mínima de aquisição e tempo mínimo de amostragem para diferentes probabilidades (modelo 1:100, tomada "dc", Q = 4000 m³/s).

Frequência (Hz)	Tempos mínimos (minutos)				
	P _x	P _{0,1%}	P _{1%}	P _{99%}	P _{99,9%}
100	1,0	6,0	2,0	2,0	6,0
50	1,0	6,0	2,0	4,0	10,0
10	1,0	9,0	4,0	7,0	12,0

A.2 - Modelo 1:50

Na Tabela A.4 são apresentados os valores da pressão média e das pressões extremas para a tomada "d_c" (vazão de 4000 m³/s equivalente ao protótipo), considerando a amostra com duração de 15 minutos e frequência de aquisição igual a 100 Hz.

Tabela A.4 – Valores de pressão obtidos para a tomada "dc" considerando amostra de 15 minutos e frequência de aquisição igual a 100 Hz (modelo 1:50, Q = 4000 m³/s).

P _x	P _{0,1%}	P _{1%}	P _{5%}	P _{10%}	P _{90%}	P _{95%}	P _{99%}	P _{99,9%}
10,90	5,97	7,21	8,25	8,80	13,08	13,81	15,36	17,41

Estão apresentados na Figura A.3 e na Figura A.4, respectivamente, os valores de pressão com 1 % e 99 % de probabilidade de ocorrência para diferentes tempos de amostragem. No caso do modelo 1:50, a dispersão natural em função do erro do equipamento de medição é de ± 0,075 m (valor equivalente no protótipo).

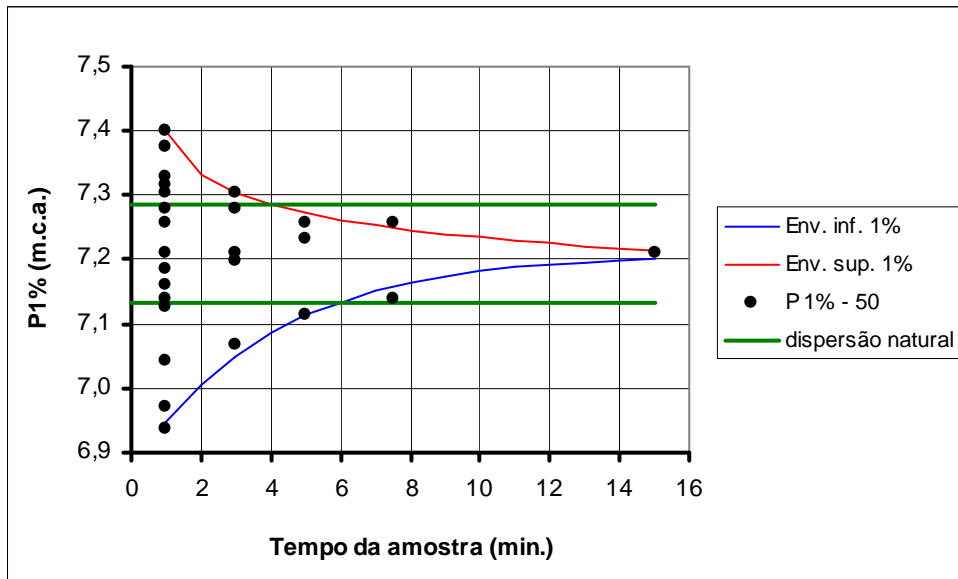


Figura A.3 - Valores da pressão com 1 % de probabilidade em função do tempo de amostra (modelo 1:50, tomada "dc", $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$).

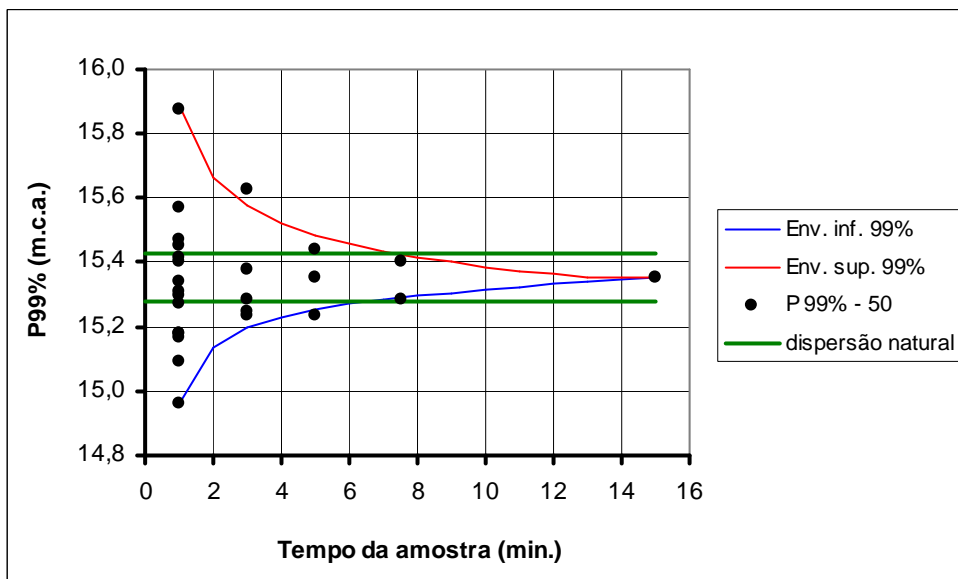


Figura A.4 - Valores da pressão com 99 % de probabilidade em função do tempo de amostra (modelo 1:50, tomada "dc", $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$).

Na Tabela A.5 estão apresentados os tempos mínimos de amostragem para os valores de pressão média e de pressão com diferentes probabilidades de ocorrência para a frequência de aquisição de 100 Hz. Observa-se o mesmo tipo de comportamento que o constatado no protótipo, ou seja, que os tempos de amostragem são maiores para as probabilidades extremas.

Tabela A.5 - Tempos mínimos de amostragem (em minutos) para frequência de aquisição igual a 100 Hz (modelo 1:50, tomada “dc”, Q = 4000 m³/s).

Parâmetros	P _x	P _{0,1%}	P _{1%}	P _{5%}	P _{10%}	P _{90%}	P _{95%}	P _{99%}	P _{99,9%}
Tempos (min.)	1,0	6,0	2,0	3,0	2,0	2,0	4,0	6,0	8,0

A Tabela A.6 a seguir ilustra os resultados obtidos de frequência mínima de aquisição e tempo mínimo de amostragem para os valores de pressão considerando os dados obtidos para a vazão de 4000 m³/s para os dados obtidos no modelo 1:50. Ressalta-se que esses valores foram os mais críticos entre todas as vazões e tomadas. Observa-se o mesmo tipo de comportamento encontrado no protótipo, ou seja, à medida que a frequência de aquisição diminui, o tempo de aquisição aumenta.

Tabela A.6 - Frequência mínima de aquisição e tempo mínimo de amostragem para diferentes probabilidades (modelo 1:50, tomada “dc”, Q = 4000 m³/s).

Frequência (Hz)	P _x	P _{0,1%}	P _{1%}	P _{99%}	P _{99,9%}
100	1,0	6,0	2,0	6,0	8,0
50	1,0	6,0	5,0	6,0	8,0
10	5,0	6,0	6,0	8,0	8,0

A.3 - Modelo 1:32

Na Tabela A.7 são apresentados os valores da pressão média e das pressões extremas para a tomada “d₁” (vazão de 4000 m³/s equivalente ao protótipo) considerando a amostra com duração de 15 minutos e frequência de aquisição igual a 100 Hz.

Tabela A.7 – Valores de pressão obtidos para a tomada “d1” considerando amostra de 15 minutos e frequência de aquisição igual a 100 Hz (modelo 1:32, Q = 4000 m³/s).

P _x	P _{0,1%}	P _{1%}	P _{5%}	P _{10%}	P _{90%}	P _{95%}	P _{99%}	P _{99,9%}
7,57	2,84	4,11	5,13	5,66	9,56	10,31	12,09	14,99

Estão apresentados na Figura A.5 e na Figura A.6, respectivamente, os valores de pressão com 1%. No caso do modelo 1:32, a dispersão natural em

função do erro do equipamento de medição é de $\pm 0,048$ m (valor equivalente no protótipo).

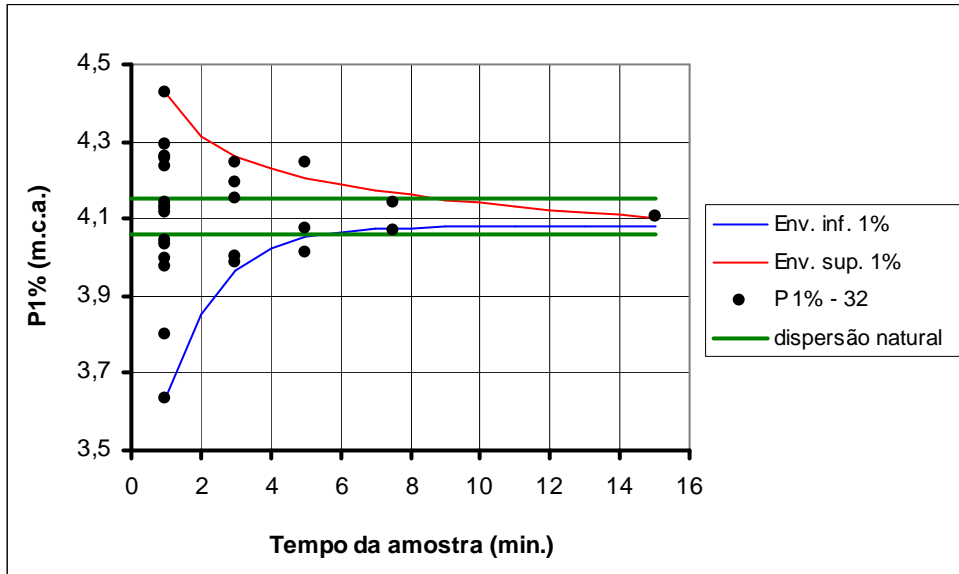


Figura A.5 - Valores da pressão com 1 % de probabilidade em função do tempo de amostra (modelo 1:32, tomada "d1", $Q = 4000$ m³/s).

Na Tabela A.8 estão apresentados os tempos mínimos de amostragem para os valores de pressão média e de pressão com diferentes probabilidades de ocorrência para a frequência de aquisição de 100 Hz. Observa-se o mesmo tipo de comportamento que o constatado no protótipo, ou seja, que os tempos de amostragem são maiores para as probabilidades extremas.

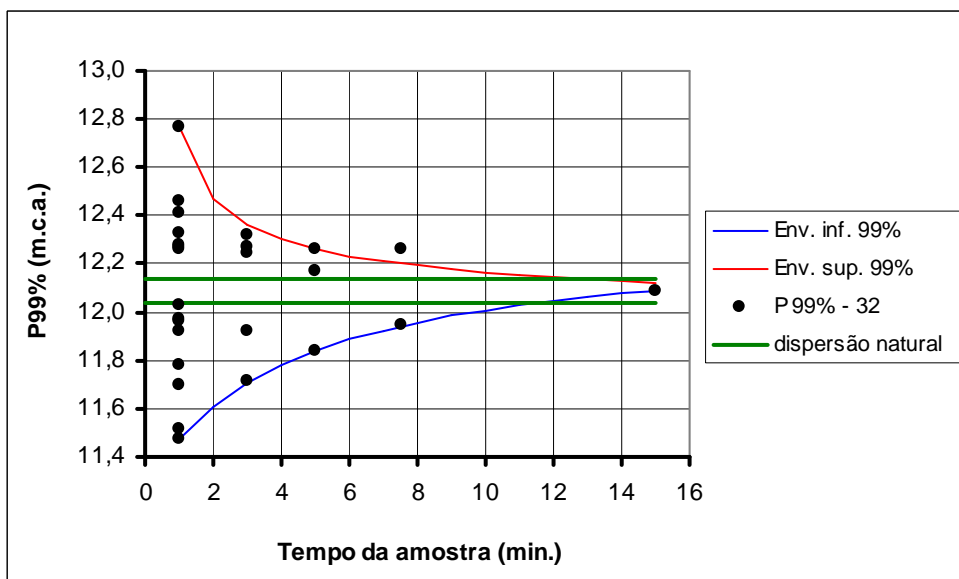


Figura A.6 - Valores da pressão com 99 % de probabilidade em função do tempo de amostra (modelo 1:32, tomada "d1", $Q = 4000$ m³/s).

Tabela A.8 - Tempos mínimos de amostragem (em minutos) para frequência de aquisição igual a 100 Hz (modelo 1:32, tomada "d1", Q = 4000 m³/s)

Parâmetros	P _x	P _{0,1%}	P _{1%}	P _{5%}	P _{10%}	P _{90%}	P _{95%}	P _{99%}	P _{99,9%}
Tempos (min.)	6,0	9,0	9,0	7,0	6,0	8,0	8,0	9,0	9,0

A Tabela A.9 a seguir ilustra os resultados obtidos de frequência mínima de aquisição e tempo mínimo de amostragem para os valores de pressão considerando os dados obtidos para a vazão de 4000 m³/s para os dados obtidos no modelo 1:32. Ressalta-se que esses valores foram os mais críticos entre todas as vazões e tomadas. Observa-se o mesmo tipo de comportamento encontrado no protótipo, ou seja, à medida que a frequência de aquisição diminui, o tempo de aquisição aumenta.

Tabela A.9 - Frequência mínima de aquisição e tempo mínimo de amostragem para diferentes probabilidades (modelo 1:32, tomada "d1", Q = 4000 m³/s).

Frequência (Hz)	P _x	P _{0,1%}	P _{1%}	P _{99%}	P _{99,9%}
100	6,0	9,0	9,0	9,0	9,0
50	8,0	9,0	9,0	9,0	9,0
10	9,0	10,0	9,0	9,0	10,0

Anexo B – Correlação cruzada entre as tomadas de pressão

B.1 - Modelo 1:100

Na Figura B.1 e Tabela B.1 são apresentados os valores de correlação entre as tomadas “d_C” e “d₁” do modelo reduzido na escala 1:100 (vazão de 4000 m³/s equivalente ao protótipo), considerando a amostra com duração de 15 minutos e diferentes freqüências de aquisição.

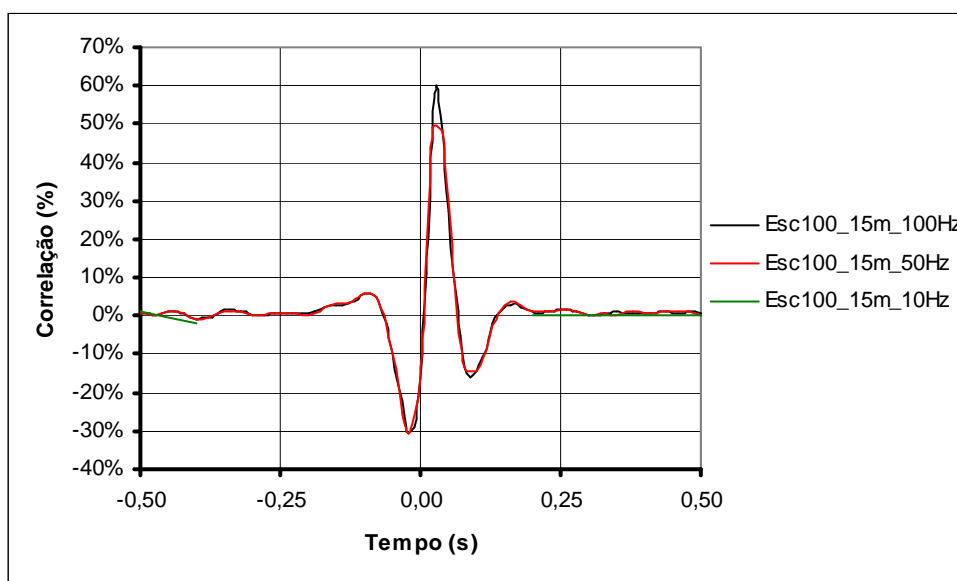


Figura B.1 - Correlação cruzada para amostras com duração de 15 minutos e diferentes freqüências de aquisição (modelo 1:100, tomadas “d_C – d₁”, Q = 4000 m³/s).

Tabela B.1 – Correlação cruzada máxima em função do tempo de pico para amostras de 15 minutos e diferentes freqüências de aquisição (modelo 1:100, tomadas “d_C – d₁”, Q = 4000 m³/s).

Parâmetros (amostra de 15 min. ¹)	Freqüência de aquisição		
	100 Hz ¹	50 Hz	10 Hz
Correlação máxima positiva (%)	60,03	49,36	2,53
Lag (segundos)	0,03	0,02	2,60

¹ A amostra com duração de 15 minutos e freqüência de aquisição de 100 Hz representa, nesta pesquisa, os valores reais.

De acordo com a Figura B.1 e Tabela B.1, nenhuma outra amostra de dados com freqüência de aquisição inferior a 100 Hz representa os valores obtidos da amostra com duração de 15 minutos.

Na Figura B.2 e Tabela B.2, são apresentados os resultados considerando a amostra com duração de 5 minutos e diferentes freqüências de aquisição.

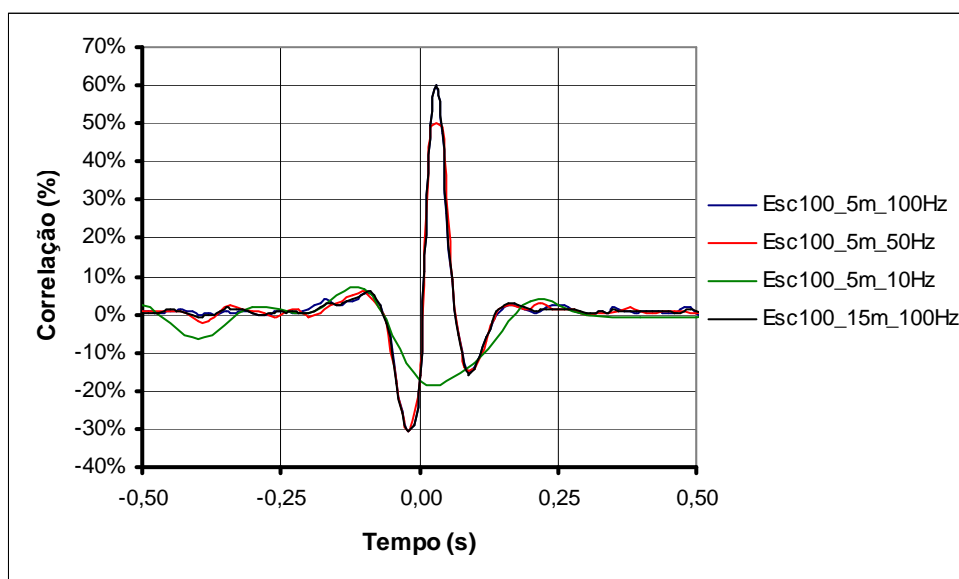


Figura B.2 - Correlação cruzada para amostras com duração de 5 minutos e diferentes freqüências de aquisição (modelo 1:100, tomadas “dC – d1”, $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$).

Tabela B.2 – Correlação cruzada máxima em função do tempo de pico para amostras de 5 minutos e diferentes freqüências de aquisição (modelo 1:100, tomadas “dC – d1”, $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$).

Parâmetros	Amostra de 5 min.			Amostra de 15 min. 100 Hz ¹
	100 Hz	50 Hz	10 Hz	
Correlação máxima positiva (%)	60,31	49,30	3,23	60,03
Lag (segundos)	0,03	0,04	0,20	0,03

¹ A amostra com duração de 15 minutos e freqüência de aquisição de 100 Hz representa, nesta pesquisa, os valores reais.

De acordo com a Figura B.2 e Tabela B.2, a amostra de dados com duração de 5 minutos e freqüência de aquisição igual a 100 Hz representa os valores obtidos da amostra ideal (amostra de 15 minutos e freqüência 100 Hz).

Na Figura B.3 e Tabela B.3 são apresentados os resultados considerando a amostra com duração de 5 minutos e diferentes freqüências de aquisição. De acordo com os resultados apresentados, a amostra de dados com duração de 1 minuto e freqüência de aquisição igual a 100 Hz representa os valores obtidos da amostra ideal.

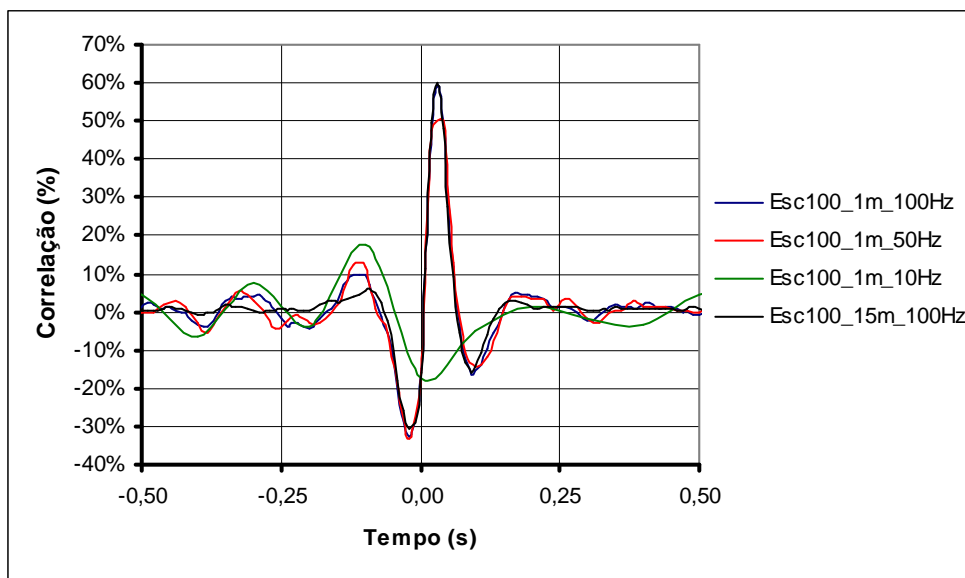


Figura B.3 - Correlação cruzada para amostras com duração de 1 minuto e diferentes freqüências de aquisição (modelo 1:100, tomadas “dC – d1”, $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$).

Tabela B.3 – Correlação cruzada máxima em função do tempo de pico para amostras de 1 minuto e diferentes freqüências de aquisição (modelo 1:100, tomadas “dC – d1”, $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$).

Parâmetros	Amostra de 1 min.			Amostra de 15 min.
	100 Hz	50 Hz	10 Hz	100 Hz ¹
Correlação máxima positiva (%)	59,33	50,16	11,40	60,03
Lag (segundos)	0,03	0,04	4,30	0,03

¹ A amostra com duração de 15 minutos e freqüência de aquisição de 100 Hz representa, nesta pesquisa, os valores reais.

A Tabela B.4 apresenta as mínimas freqüências de aquisição para o estudo de correlação cruzada no modelo reduzido na escala 1:100, considerando diferentes tempos de amostragem.

Tabela B.4 – Freqüência mínima de aquisição em função do tempo da amostra para estudos de correlação cruzada (modelo 1:100, tomadas dC – d1, $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$).

Tempo da amostra (min.)	Freqüência de aquisição (Hz)
15	100
5	100
1	100

B.2 - Modelo 1:50

Na Figura B.4 e Tabela B.5 são apresentados os valores de correlação entre as tomadas “d_C” e “d_I” do protótipo (vazão de 4000 m³/s equivalente ao protótipo), considerando a amostra com duração de 15 minutos e diferentes freqüências de aquisição.

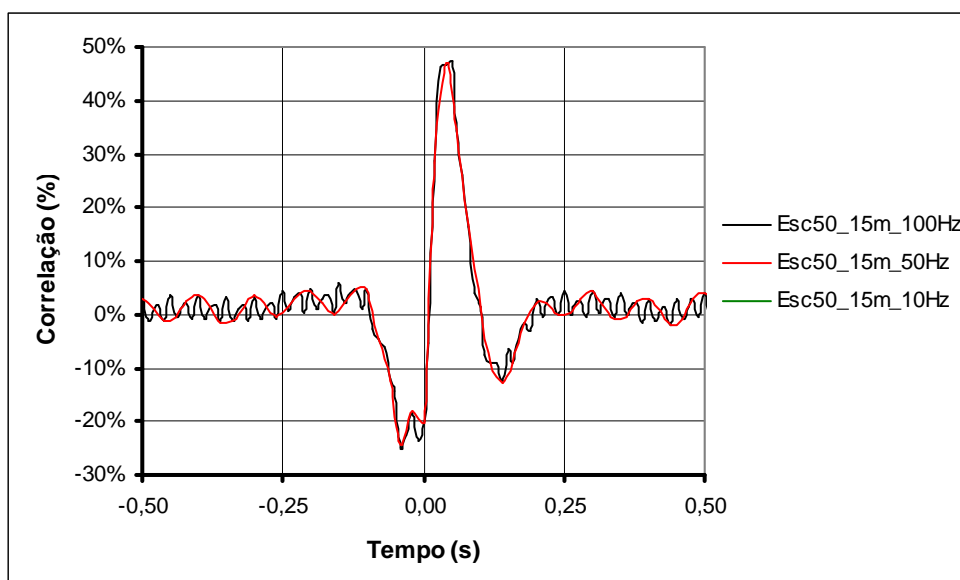


Figura B.4 - Correlação cruzada para amostras com duração de 15 minutos e diferentes freqüências de aquisição (modelo 1:50, tomadas “dC – dI”, Q = 4000 m³/s).

Tabela B.5 – Correlação cruzada máxima em função do tempo de pico para amostras de 15 minutos e diferentes freqüências de aquisição (modelo 1:50, tomadas “dC – dI”, Q = 4000 m³/s).

Parâmetros (amostra de 15 min. ¹)	Amostra de 15 min.		
	100 Hz ¹	50 Hz	10 Hz
Correlação máxima positiva (%)	47,75	46,97	5,25
Lag (segundos)	0,05	0,04	0,50

¹ A amostra com duração de 15 minutos e freqüência de aquisição de 100 Hz representa, nesta pesquisa, os valores reais.

De acordo com a Figura B.4 e Tabela B.5, a amostra de dados com duração de 15 minutos e freqüência de aquisição igual a 50 Hz representa os valores obtidos da amostra ideal (amostra de 15 minutos e freqüência 100 Hz).

Na Figura B.5 e Tabela B.6 são apresentados os resultados considerando a amostra com duração de 5 minutos e diferentes freqüências de aquisição.

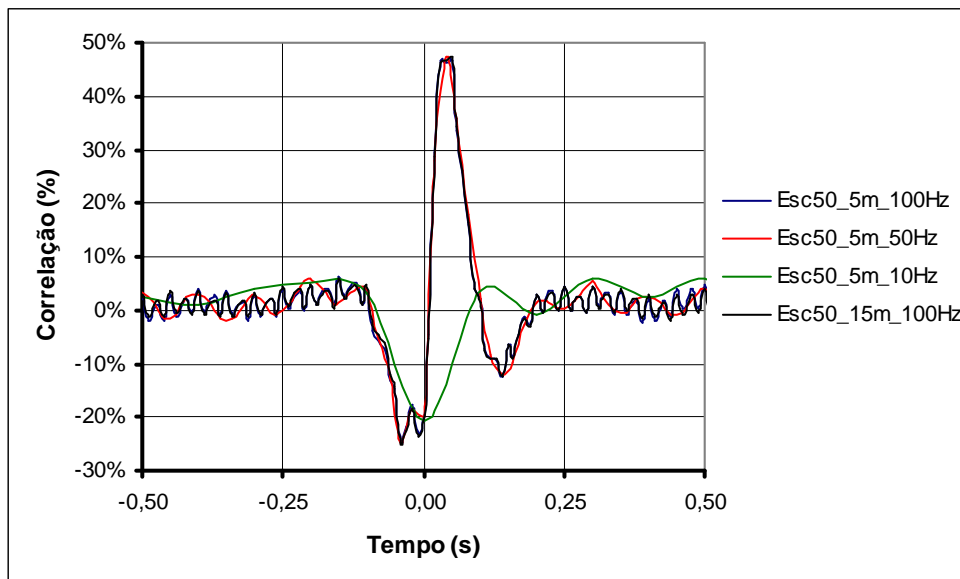


Figura B.5 - Correlação cruzada para amostras com duração de 5 minutos e diferentes frequências de aquisição (modelo 1:50, tomadas “dC – d1”, $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$).

Tabela B.6 – Correlação cruzada máxima em função do tempo de pico para amostras de 5 minutos e diferentes frequências de aquisição (modelo 1:50, tomadas “dC – d1”, $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$).

Parâmetros	Amostra de 5 min.			Amostra de 15 min.
	100 Hz	50 Hz	10 Hz	100 Hz ¹
Correlação máxima positiva (%)	46,79	47,27	6,22	47,75
Lag (segundos)	0,05	0,04	2,20	0,05

¹ A amostra com duração de 15 minutos e frequência de aquisição de 100 Hz representa, nesta pesquisa, os valores reais.

De acordo com a Figura B.5 e Tabela B.6, a amostra de dados com duração de 5 minutos e frequência de aquisição igual a 50 Hz representa os valores obtidos da amostra ideal.

Na Figura B.6 e Tabela B.7 são apresentados os resultados considerando a amostra com duração de 1 minuto e diferentes frequências de aquisição. A amostra de dados com duração de 1 minuto e frequência de aquisição igual a 50 Hz representa os valores obtidos da amostra ideal.

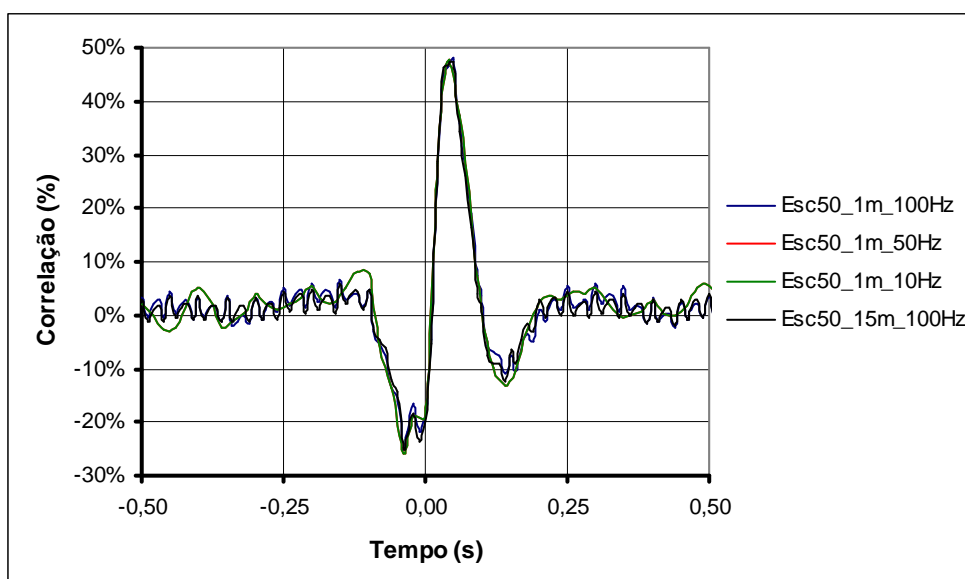


Figura B.6 - Correlação cruzada para amostras com duração de 1 minuto e diferentes freqüências de aquisição (modelo 1:50, tomadas “dC – d1”, $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$).

Tabela B.7 – Correlação cruzada máxima em função do tempo de pico para amostras de 1 minuto e diferentes freqüências de aquisição (modelo 1:50, tomadas “dC – d1”, $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$).

Parâmetros	Amostra de 1 min.			Amostra de 15 min.
	100 Hz	50 Hz	10 Hz	100 Hz ¹
Correlação máxima positiva (%)	47,85	47,53	47,53	47,75
Lag (segundos)	0,05	0,04	0,03	0,05

¹ A amostra com duração de 15 minutos e freqüência de aquisição de 100 Hz representa, nesta pesquisa, os valores reais.

A Tabela B.8 apresenta as mínimas freqüências de aquisição para o estudo de correlação cruzada no modelo reduzido na escala 1:50, considerando diferentes tempos de amostragem.

Tabela B.8 – Freqüência mínima de aquisição em função do tempo da amostra para estudos de correlação cruzada (modelo 1:50, tomadas dC – d1, $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$).

Tempo da amostra (min.)	Freqüência de aquisição (Hz)
15	50
5	50
1	100

B.3 - Modelo 1:32

Na Figura B.7 e Tabela B.9 são apresentados os valores de correlação entre as tomadas “d₁” e “d₃” do modelo reduzido na escala 1:32 (vazão de 4000 m³/s equivalente ao protótipo), considerando a amostra com duração de 15 minutos e diferentes frequências de aquisição.

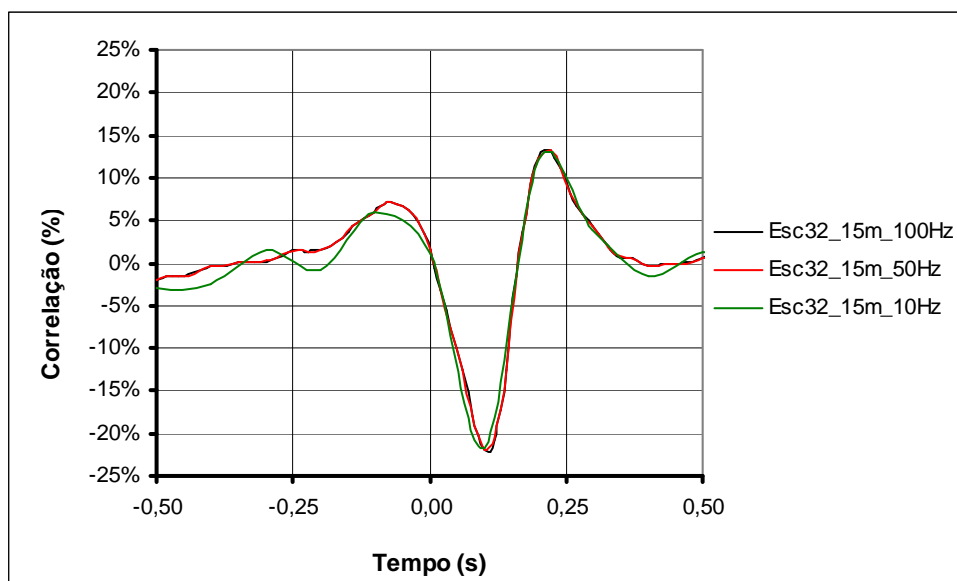


Figura B.7 - Correlação cruzada para amostras com duração de 15 minutos e diferentes frequências de aquisição (modelo 1:32, tomadas “d₁ – d₃”, Q = 4000 m³/s).

Tabela B.9 – Correlação cruzada máxima em função do tempo de pico para amostras de 15 minutos e diferentes frequências de aquisição (modelo 1:32, tomadas “d₁ – d₃”, Q = 4000 m³/s).

Parâmetros (amostra de 15 min. ¹)	Frequência de aquisição		
	100 Hz ¹	50 Hz	10 Hz
Correlação máxima positiva (%)	13,28	13,21	12,18
Lag (segundos)	0,21	0,22	0,20

¹ A amostra com duração de 15 minutos e frequência de aquisição de 100 Hz representa, nesta pesquisa, os valores reais.

De acordo com a Figura B.7 e Tabela B.9, a amostra de dados com duração de 15 minutos e frequência de aquisição igual a 50 Hz representa os valores obtidos da amostra ideal (amostra de 15 minutos e frequência 100 Hz).

Na Figura B.8 e Tabela B.10 são apresentados os resultados considerando a amostra com duração de 5 minutos e diferentes freqüências de aquisição.

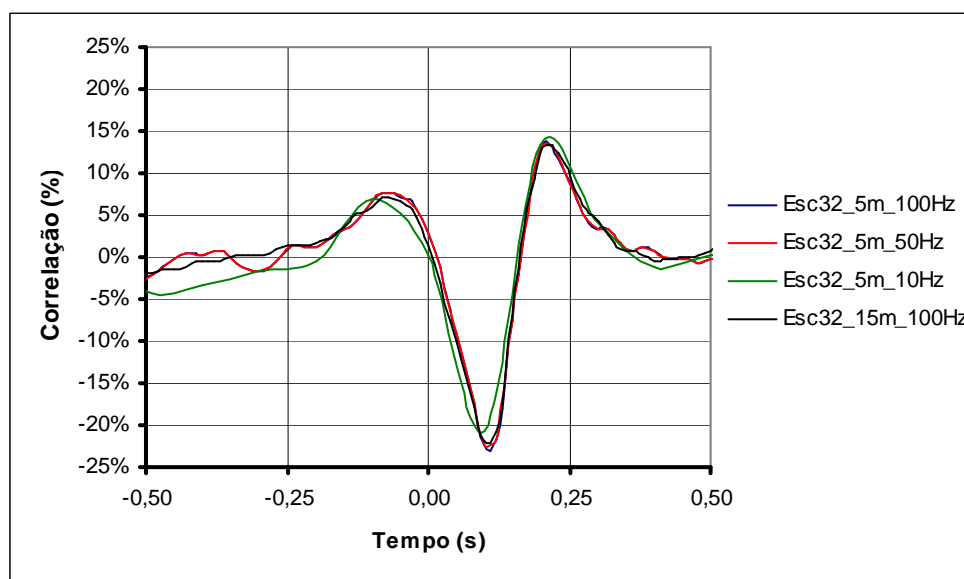


Figura B.8 - Correlação cruzada para amostras com duração de 5 minutos e diferentes freqüências de aquisição (modelo 1:32, tomadas “d1 – d3”, $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$).

Tabela B.10 – Correlação cruzada máxima em função do tempo de pico para amostras de 5 minutos e diferentes freqüências de aquisição (modelo 1:32, tomadas “d1 – d3”, $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$).

Parâmetros	Amostra de 5 min.			Amostra de 15 min. 100 Hz ¹
	100 Hz	50 Hz	10 Hz	
Correlação máxima positiva (%)	13,78	13,14	13,30	13,28
Lag (segundos)	0,21	0,20	0,20	0,21

¹ A amostra com duração de 15 minutos e freqüência de aquisição de 100 Hz representa, nesta pesquisa, os valores reais.

De acordo com a Figura B.8 e Tabela B.10, a amostra de dados com duração de 5 minutos e freqüência de aquisição igual a 50 Hz representa os valores obtidos da amostra ideal.

Na Figura B.9 e Tabela B.11 são apresentados os resultados considerando a amostra com duração de 1 minuto e diferentes freqüências de aquisição. A amostra de dados com duração de 1 minuto e freqüência de aquisição igual a 100 Hz representa os valores obtidos da amostra ideal.

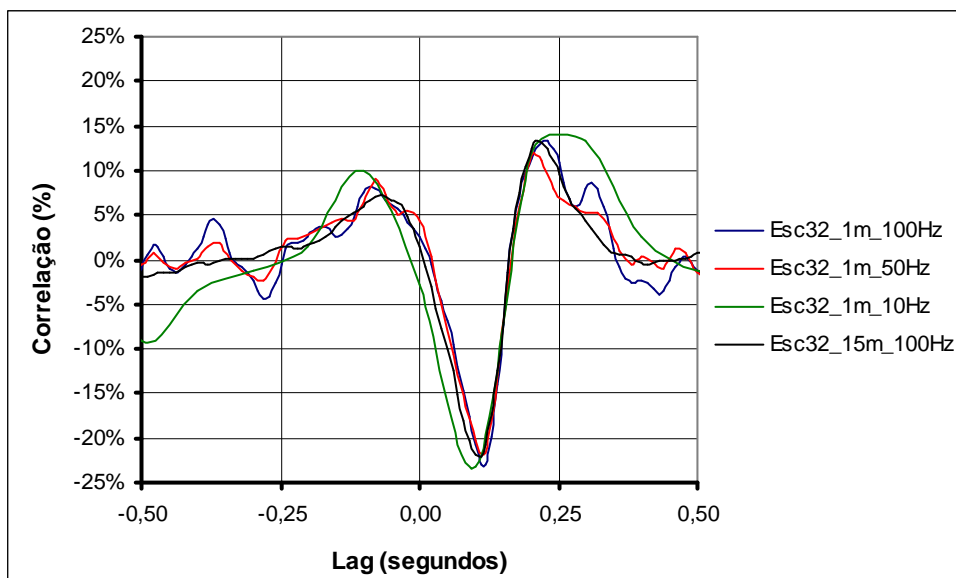


Figura B.9 - Correlação cruzada máxima em função do tempo de pico para tempo de amostragem de 1 minuto e diferentes frequências de aquisição (modelo 1:32, tomadas “d1 – d3”, $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$).

Tabela B.11 – Valores da máxima correlação cruzada e tempo de pico entre as tomadas “d₁” e “d₃” para diferentes frequências de aquisição (protótipo, amostra de 1 minuto, $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$).

Parâmetros	Amostra de 1 min.			Amostra de 15 min.
	100 Hz	50 Hz	10 Hz	100 Hz ¹
Correlação máxima positiva (%)	13,32	11,84	13,33	13,28
Lag (segundos)	0,23	0,20	0,30	0,21

¹ A amostra com duração de 15 minutos e frequência de aquisição de 100 Hz representa, nesta pesquisa, os valores reais.

A Tabela B.12 apresenta as mínimas frequências de aquisição para o estudo de correlação cruzada no modelo reduzido na escala 1:32, considerando diferentes tempos de amostragem.

Tabela B.12 – Frequência mínima de aquisição em função do tempo da amostra (protótipo, tomadas d1 –d3, $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$).

Tempo da amostra (min.)	Frequência de aquisição (Hz)
15	50
5	50
1	100

Anexo C – Posição de início do ressalto

Tabela C.1 - Condições dos ensaios realizados nos modelos reduzidos em diferentes escalas.

Modelo 1:100					Modelo 1:50					Modelo 1:32				
S	q (m ³ /s/m)	Z (m)	Fr	T _w (m)	S	q (m ³ /s/m)	Z (m)	Fr	T _w (m)	S	q (m ³ /s/m)	Z (m)	Fr	T _w (m)
1,97	7,40	7,56	10,91	8,44	2,12	7,39	7,73	10,50	8,92	1,99	7,41	7,65	10,99	8,53
2,30	7,43	9,46	10,18	9,62	2,43	7,44	8,82	9,99	10,08	2,33	7,41	9,08	10,29	9,78
3,24	7,43	13,25	7,90	13,35	3,40	7,45	11,28	8,43	13,79	3,31	7,41	13,33	7,80	13,58
1,65	14,81	8,16	7,58	9,76	1,76	14,81	8,20	7,25	10,26	1,63	14,86	7,56	7,56	9,68
1,79	14,81	8,98	7,30	10,44	1,92	14,78	9,19	6,91	10,96	1,80	14,86	8,55	7,22	10,51
1,89	14,77	10,03	6,57	11,36	2,11	14,78	10,07	6,52	11,92	2,02	14,86	9,78	6,71	11,59
2,82	14,81	14,70	4,73	15,56	2,91	14,78	12,00	5,57	16,09	2,91	14,86	14,15	4,68	15,92
1,51	22,13	8,45	6,05	10,76	1,61	22,22	8,08	5,89	11,36	1,52	22,19	7,36	6,15	10,87
1,59	22,18	9,05	5,87	11,18	1,70	22,26	8,87	5,58	11,77	1,57	22,19	7,94	5,98	11,11
2,00	22,20	12,27	4,92	13,89	2,12	22,19	10,63	4,98	14,33	2,07	22,19	11,35	4,77	13,99
2,31	22,20	13,47	4,38	15,64	2,41	22,26	11,63	4,59	16,06	2,44	22,19	13,33	4,01	15,95
1,44	29,56	8,46	5,20	11,66	1,51	29,64	7,94	5,11	12,16	1,42	29,62	7,15	5,35	11,66
1,47	29,63	8,62	5,14	11,86	1,55	29,68	8,29	4,94	12,34	1,47	29,62	7,54	5,25	11,95
1,58	29,68	9,31	4,97	12,66	1,66	29,72	9,43	4,74	13,03	1,60	29,62	8,77	4,94	12,75
2,07	29,68	13,57	3,79	15,77	2,10	29,78	11,28	4,07	16,05	2,14	29,62	12,56	3,68	16,07
1,34	44,38	7,80	4,35	13,26	1,43	44,41	8,45	4,08	13,82	1,34	44,39	7,22	4,33	13,23
1,60	44,41	10,25	3,79	15,07	1,70	44,50	11,00	3,44	15,67	1,63	44,39	10,05	3,68	15,23
1,72	44,47	11,19	3,56	16,05	1,77	44,59	10,72	3,44	16,32	1,74	44,39	10,76	3,48	16,04
1,31	59,35	7,56	3,79	14,80	1,42	59,25	8,50	3,53	15,55	1,28	59,25	6,71	3,83	14,60
1,52	59,35	9,97	3,35	16,28	1,63	59,30	11,05	2,96	17,10	1,56	59,25	9,80	3,20	16,54

Anexo D – Análise da pressão média

D.1 - Comparação das amostras de pressão média (obtidas através de piezômetros e transdutores) e de níveis d'água

D.1.1 - Pressão média obtida através de piezômetros

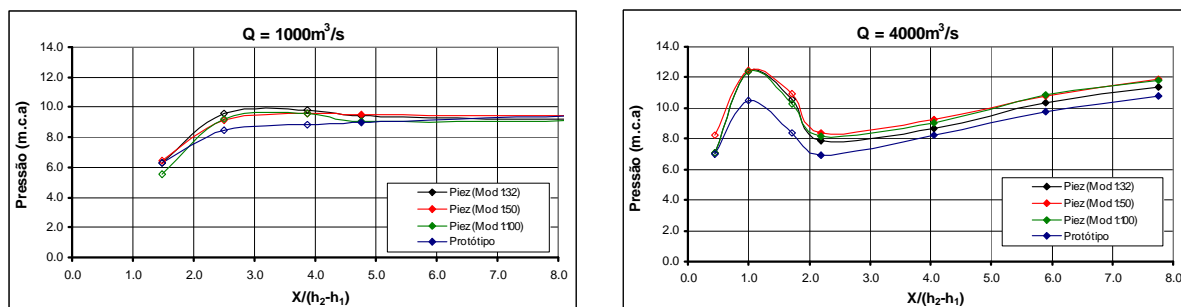


Figura D.1 – Comparação entre os valores de pressão obtidos através de medições realizadas com piezômetros nos modelos em diferentes escalas ($Q = 1000$ e 4000 m³/s, valor equivalente no protótipo). As tomadas no trecho curvo estão representadas pelos símbolos vazados (\diamond).

D.1.2- Níveis d'água obtidos através de pontas limnimétricas

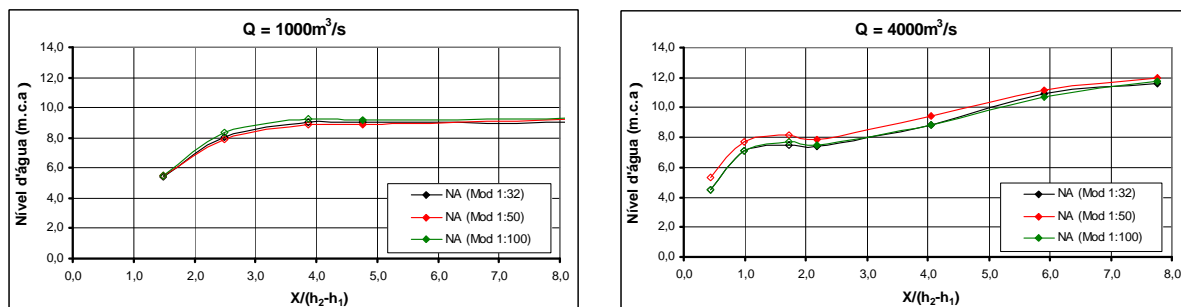


Figura D.2 - Comparação entre os valores de níveis d'água obtidos através de pontas limnimétricas nos modelos em diferentes escalas ($Q = 1000$ e 4000 m³/s, valor equivalente no protótipo). As tomadas no trecho curvo estão representadas pelos símbolos vazados (\diamond).

D.1.3 - Comparação dos valores de pressão média (obtida através de piezômetros) com níveis d'água

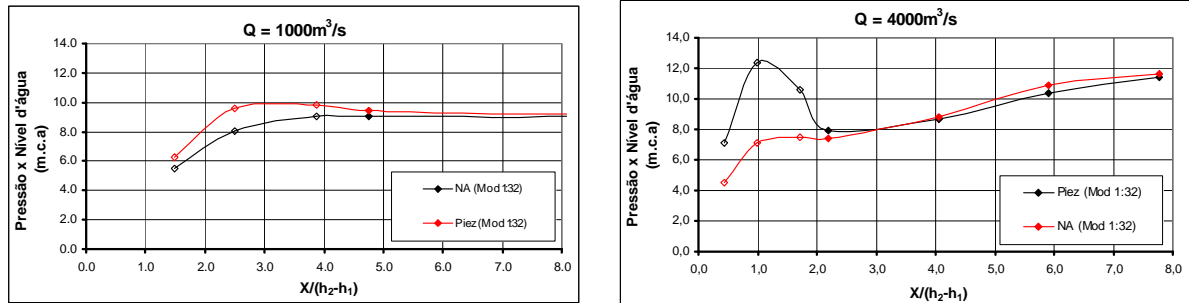


Figura D.3 – Comparação entre os valores de pressão (obtidos através de piezômetros) com valores de níveis d'água para a vazão de 1000 e 4000 m³/s (valor equivalente ao protótipo) no modelo 1:32. As tomadas no trecho curvo estão representadas pelos símbolos vazados (\diamond).

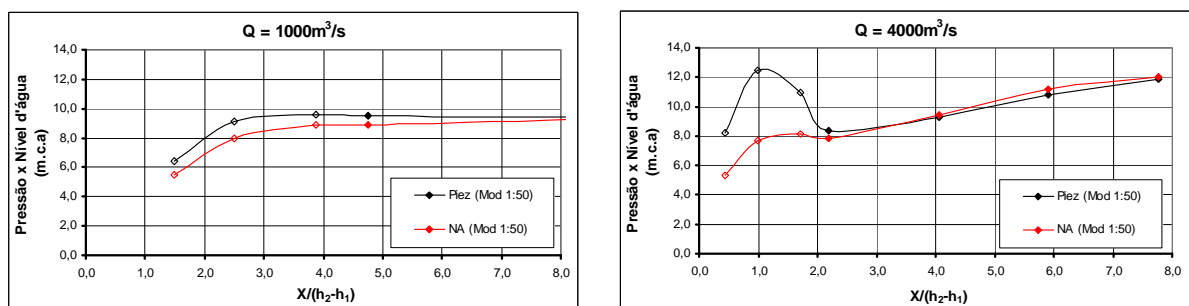


Figura D.4 – Comparação entre os valores de pressão (obtidos através de piezômetros) com valores de níveis d'água para a vazão de 1000 e 4000 m³/s (valor equivalente ao protótipo) no modelo 1:50. As tomadas no trecho curvo estão representadas pelos símbolos vazados (\diamond).

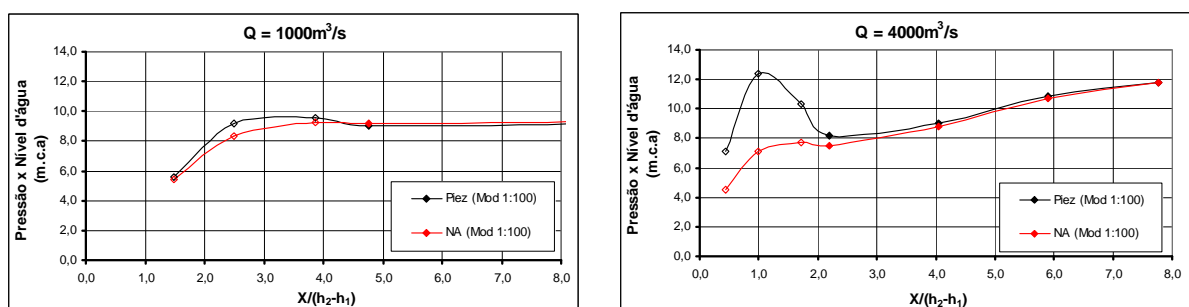


Figura D.5 – Comparação entre os valores de pressão (obtidos através de piezômetros) com valores de níveis d'água para a vazão de 1000 e 4000 m³/s (valor equivalente ao protótipo) no modelo 1:100. As tomadas no trecho curvo estão representadas pelos símbolos vazados (\diamond).

D.1.4 - Pressão média obtida através dos transdutores

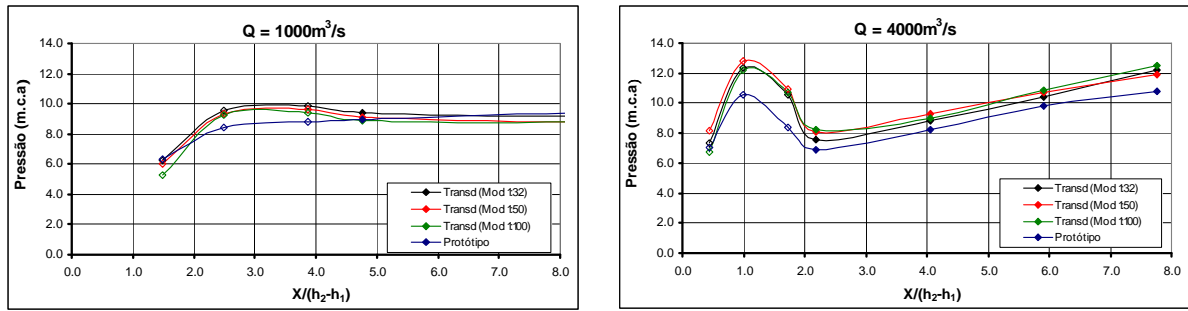


Figura D.6 - Comparação entre os valores de pressão média obtidos através de medições com transdutores nas diferentes escalas de modelos ($Q = 1000$ e $4000 \text{ m}^3/\text{s}$, valor equivalente no protótipo). As tomadas no trecho curvo estão representadas pelos símbolos vazados (\diamond).

D.1.5 - Comparação dos valores das pressões médias obtidas com piezômetros e transdutores

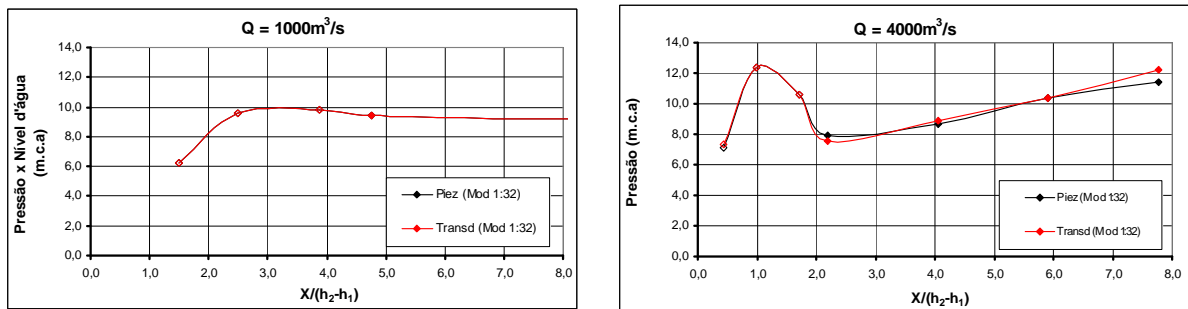


Figura D.7 – Comparação entre os valores de pressão média (obtidos através de piezômetros e transdutores) para a vazão de 1000 e $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ (valor equivalente ao protótipo) no modelo 1:32. As tomadas no trecho curvo estão representadas pelos símbolos vazados (\diamond).

Obs.: Para a condição de $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ no modelo 1:32, não foi realizada medição de pressão com piezômetros.

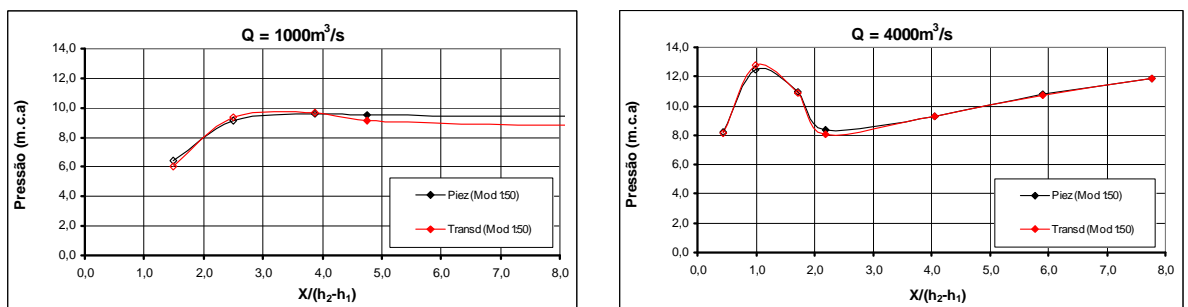


Figura D.8 – Comparação entre os valores de pressão média (obtidos através de piezômetros e transdutores) para a vazão de 1000 e $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ (valor equivalente ao protótipo) no modelo 1:50. As tomadas no trecho curvo estão representadas pelos símbolos vazados (\diamond).

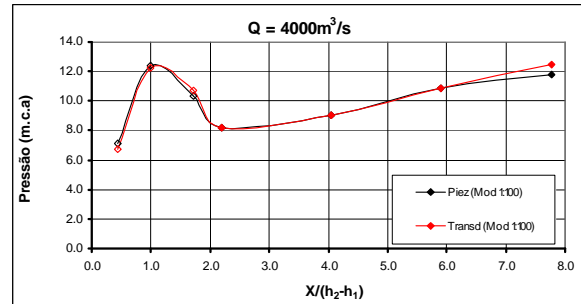
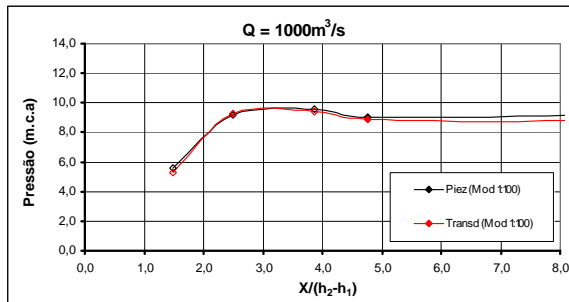


Figura D.9 - Comparação entre os valores de pressão média (obtidos através de piezômetros e transdutores) para a vazão de 1000 e 4000 m³/s (valor equivalente ao protótipo) no modelo 1:100. As tomadas no trecho curvo estão representadas pelos símbolos vazados (ϕ).

D.1.6 - Comparação dos valores de pressão média nas diferentes escalas de modelos (obtidos com o uso dos transdutores) com os resultados de Rodrigues (2002)

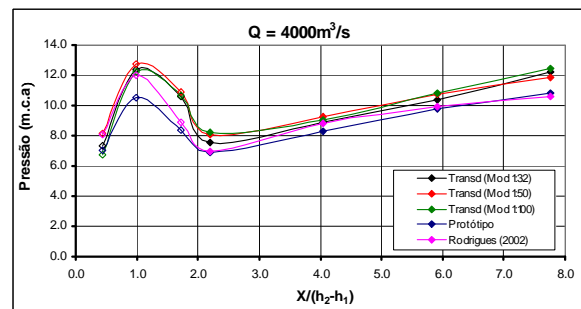
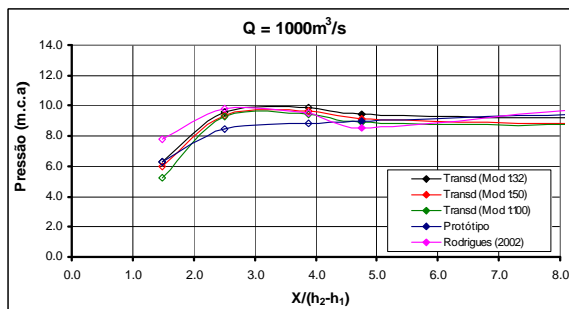


Figura D.10 - Comparação entre os valores de pressão média (para $Q = 1000$ e 4000 m³/s) obtidos nas diferentes escalas de modelos 1:32, 1:50 e 1:100, no modelo físico tridimensional na escala 1:100 utilizado por Rodrigues (2002) e no protótipo. As tomadas no trecho curvo estão representadas pelos símbolos vazados (ϕ).

D.2 - Análise da pressão média obtida nas diferentes escalas de modelo e no protótipo (valores obtidos através dos transdutores)

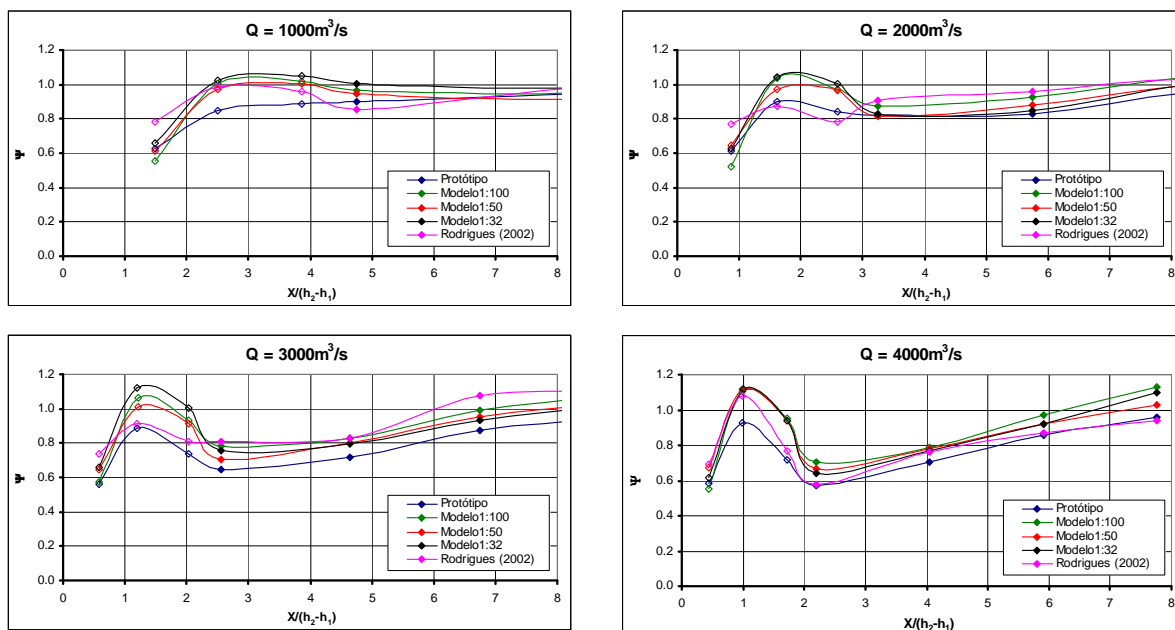


Figura D.11 - Distribuições longitudinais do coeficiente de pressão média (Ψ) observadas na bacia de dissipação da UHE Porto Colômbia, nos modelos nas escalas 1:32; 1:50 e 1:100 e obtidos por Rodrigues (2002). As tomadas situadas no trecho curvo estão representadas pelos símbolos vazados (\diamond).

D.2.1 - Análise da dispersão natural das amostras de pressão e dos efeitos escala

Tabela D.1 – Coeficientes de ajuste para a distribuição da pressão média ao longo do trecho curvo referentes à metodologia proposta por Wiest (2008) para o modelo 1:32.

Posição/Coefficientes	a	b	c	d
Ponto 1 (Tomada dA)	0,0032	11,4483	4,4338	8,3902
Ponto 2 (Tomada dB)	0,4631	36,2759	19,2217	-5,6435
Ponto 3 (Tomada dC)	0,2469	29,2035	17,6385	0,3917

Ajuste da pressão média em função da submergência (S) para o ponto 4 (intersecção entre o ressalto livre e afogado) de acordo com os dados do mod. 1:32:

$$\Psi \cdot S = \frac{-1,8735 + 2,0795 \cdot S}{1 + 0,1498 \cdot S - 0,0054 \cdot S^2}$$

Tabela D.2 - Ajustes para determinação das posições relativas dos pontos 4 e 5 referentes à metodologia de distribuição da pressão média proposta por Wiest (2008) para o modelo 1:32.

Ponto 4 (Intersecção)	$X_{adm} = -0,443.S^2 + 5,5298.S - 4,2903$
Ponto 5 (Idêntico ao ressalto livre)	$X_{adm} = 6,7433.S^{0,2451}$

Tabela D.3 – Coeficientes de ajuste para a distribuição da pressão média ao longo do trecho curvo referentes à metodologia proposta por Wiest (2008) para o modelo 1:50.

Posição/Coefficientes	a	b	c	d
Ponto 1 (Tomada dA)	0,0014	15,0450	11,3630	-1,4017
Ponto 2 (Tomada dB)	0,4629	27,5450	15,0440	-6,7244
Ponto 3 (Tomada dC)	0,2470	22,1590	13,7090	-1,6911

Ajuste da pressão média em função da submergência (S) para o ponto 4 (intersecção entre o ressalto livre e afogado) de acordo com os dados do mod. 1:50:

$$\Psi \cdot S = \frac{-1,3370 + 1,4990 \cdot S}{1 - 0,0812 \cdot S + 0,0345 \cdot S^2}$$

Tabela D.4 - Ajustes para determinação das posições relativas dos pontos 4 e 5 referentes à metodologia de distribuição da pressão média proposta por Wiest (2008) para o modelo 1:50.

Ponto 4 (Intersecção)	$X_{adm} = 1,0686.S^2 + 7,0784.S - 5,3693$
Ponto 5 (Idêntico ao ressalto livre)	$X_{adm} = 6,7473.S^{0,3453}$

Tabela D.5 – Coeficientes de ajuste para a distribuição da pressão média ao longo do trecho curvo referentes à metodologia proposta por Wiest (2008) para o modelo 1:100.

Posição/Coefficientes	a	b	c	d
Ponto 1 (Tomada dA)	0,0925	0,4630	0,2473	0,0925
Ponto 2 (Tomada dB)	9,1349	38,0464	29,1054	9,1349
Ponto 3 (Tomada dC)	1,6469	20,8664	17,9295	1,6469

Ajuste da pressão média em função da submergência (S) para o ponto 4 (intersecção entre o ressalto livre e afogado) de acordo com os dados do modelo 1:100:

$$\Psi \cdot S = \frac{-20,1155 + 21,5361 \cdot S}{1 + 8,1505 \cdot S - 1,1731 \cdot S^2}$$

Tabela D.6 - Ajustes para determinação das posições relativas dos pontos 4 e 5 referentes à metodologia de distribuição da pressão média proposta por Wiest (2008) para o modelo 1:100.

Ponto 4 (Intersecção)	$X_{adm} = 6,1767 \cdot \ln(S) + 0,9852$
Ponto 5 (Idêntico ao ressalto livre)	$X_{adm} = 6,6347 \cdot S^{0,1594}$

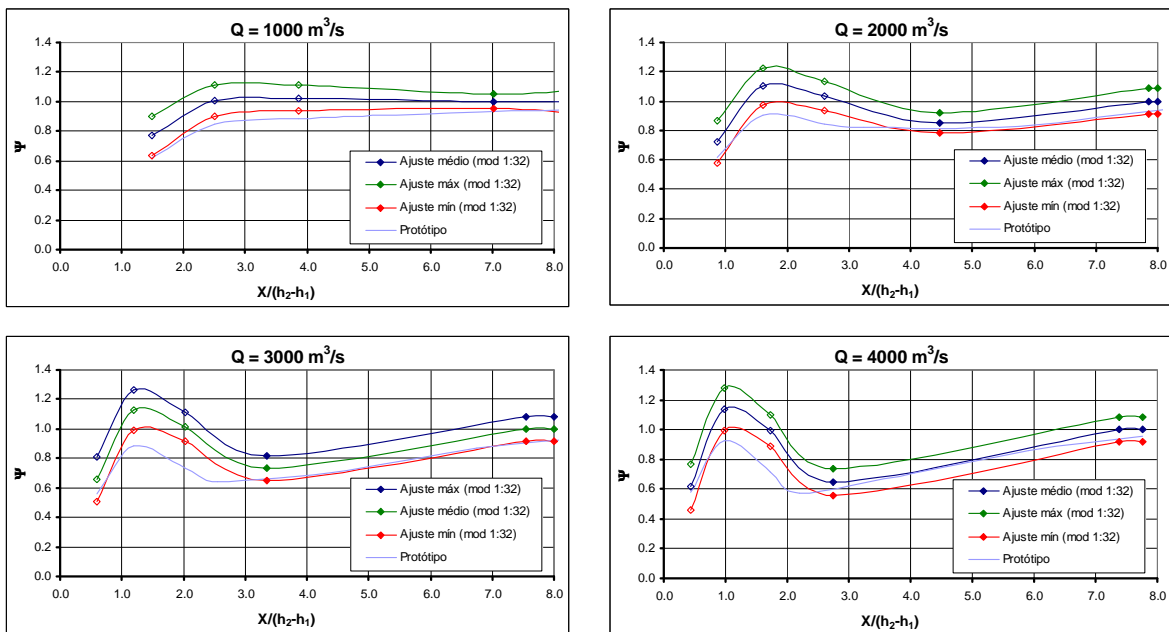


Figura D.12 – Dispersão natural do coeficiente de pressão média (Ψ) considerando as amostras obtidas no modelo 1:32 da UHE Porto Colômbia. Os pontos situados no trecho curvo estão representados pelos símbolos vazados (\diamond).

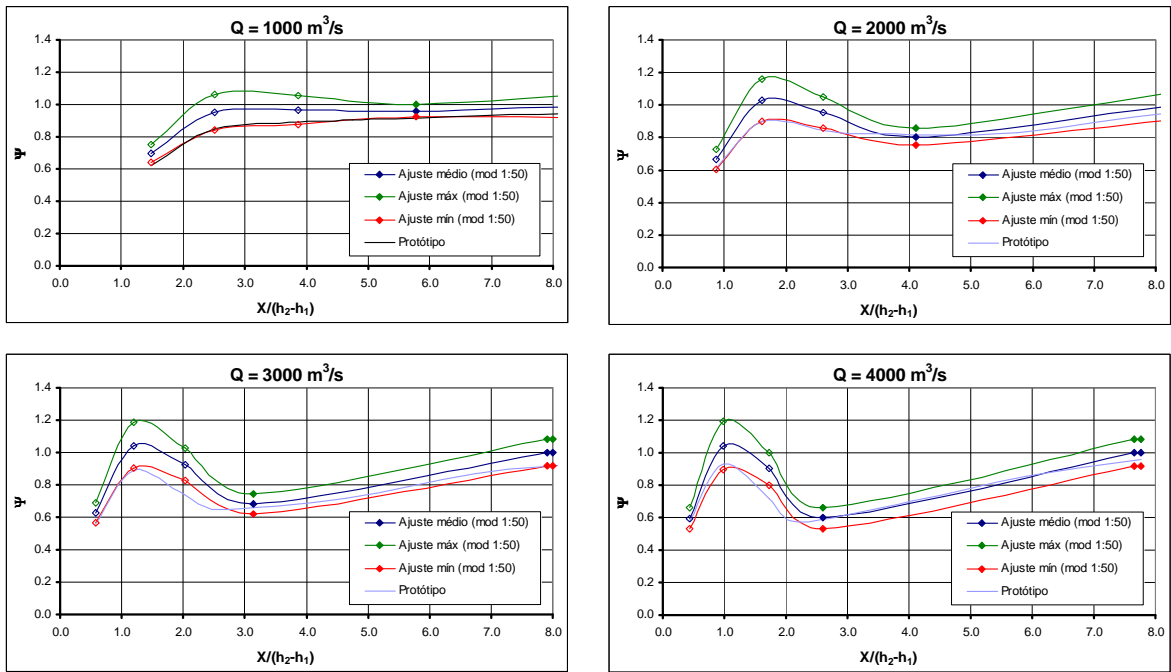


Figura D.13 – Dispersão natural do coeficiente de pressão média (Ψ) considerando as amostras obtidas no modelo 1:50 da UHE Porto Colômbia. Os pontos situados no trecho curvo estão representados pelos símbolos vazados (\diamond).

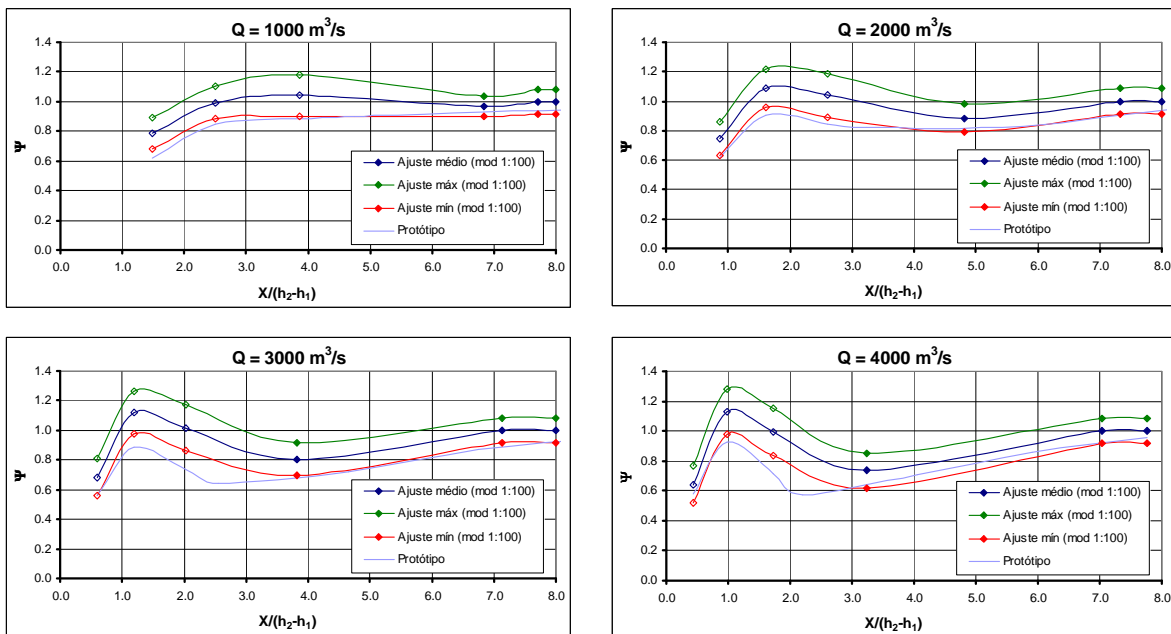


Figura D.14 – Dispersão natural do coeficiente de pressão média (Ψ) considerando as amostras obtidas no modelo 1:100 da UHE Porto Colômbia. Os pontos situados no trecho curvo estão representados pelos símbolos vazados (\diamond).

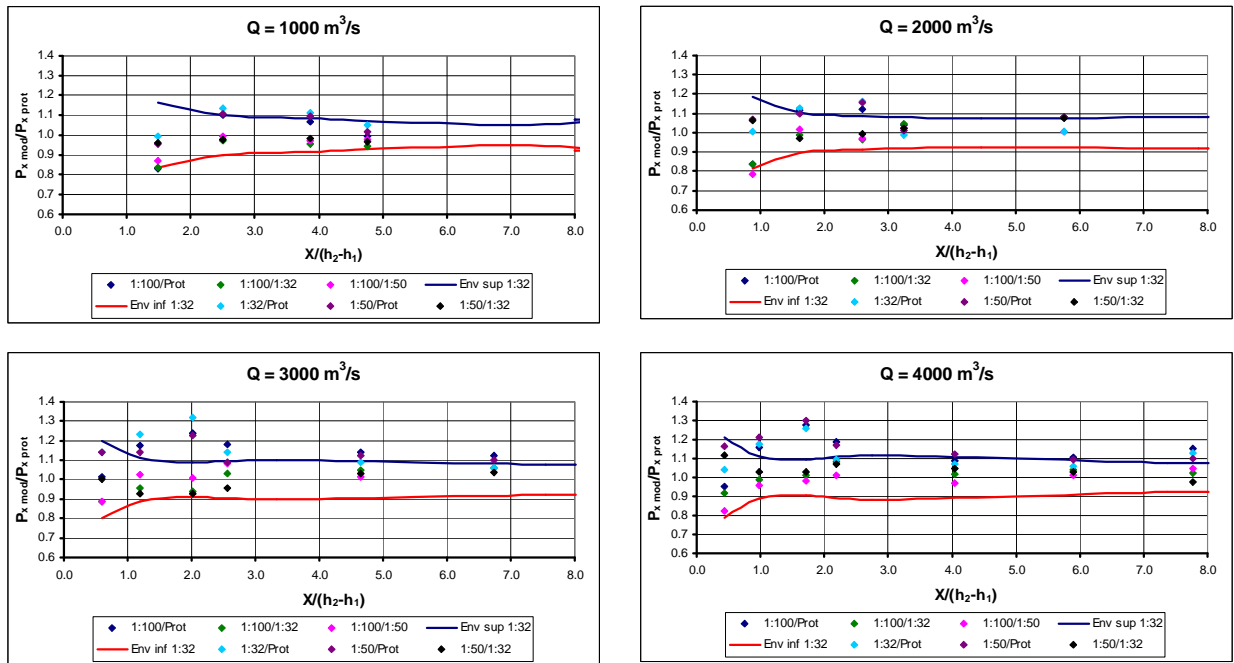


Figura D.15 – Distribuição longitudinal das diferenças relativas da pressão média (ψ), considerando as amostras obtidas nas diferentes escalas de modelo e no protótipo. As envoltórias foram definidas com base nos dados obtidos no modelo 1:32.

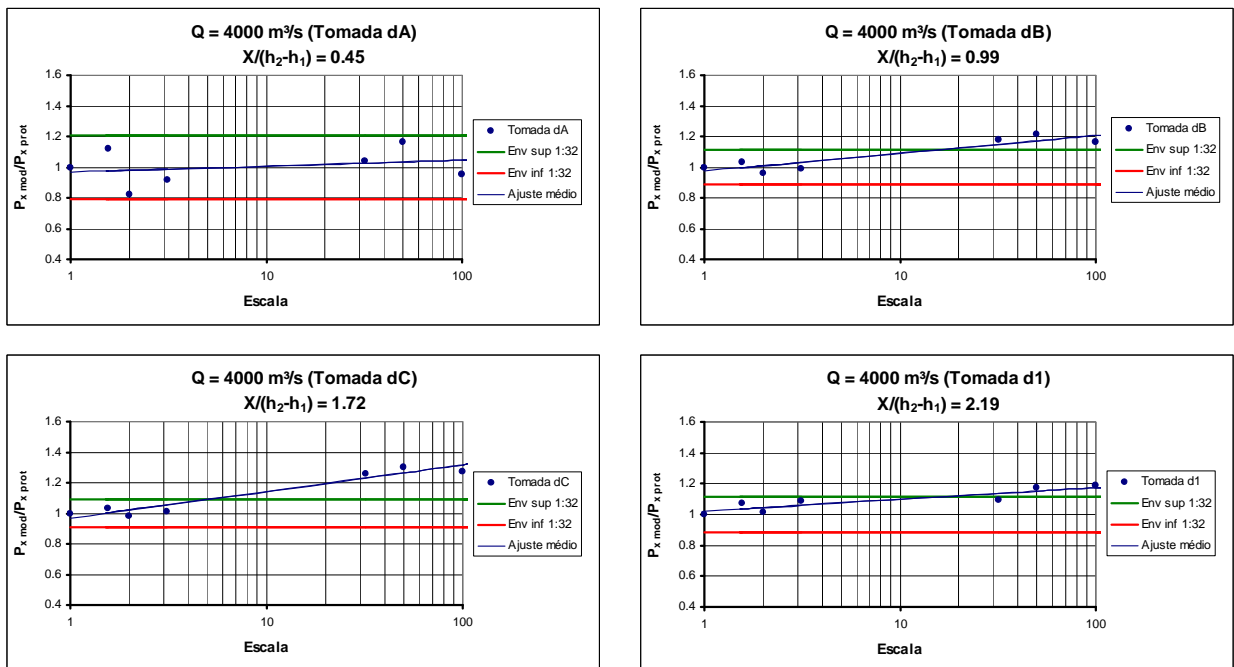


Figura D.16 – Diferenças relativas da pressão média para todas as tomadas de pressão, $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$, considerando as amostras obtidas nas diferentes escalas de modelo e no protótipo. As envoltórias foram definidas com base nos dados obtidos no modelo 1:32.

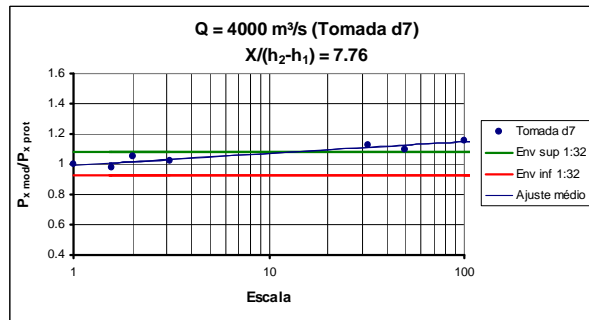
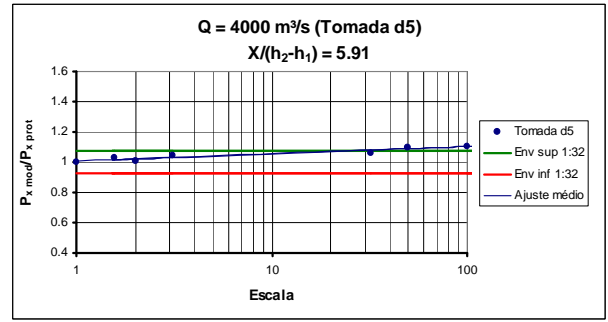
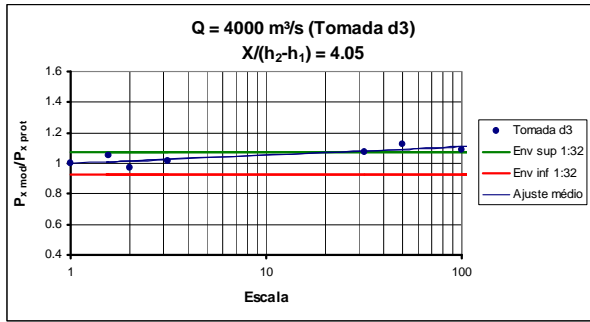


Figura D.16 (continuação) – Diferenças relativas da pressão média para todas as tomadas de pressão, $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$, considerando **as amostras** obtidas nas diferentes escalas de modelo e no protótipo. As envoltórias foram definidas com base nos dados obtidos no modelo 1:32.

D.2.2 - Análise dos efeitos de escala na pressão média com o uso do ajuste proposto por Wiest (2008)

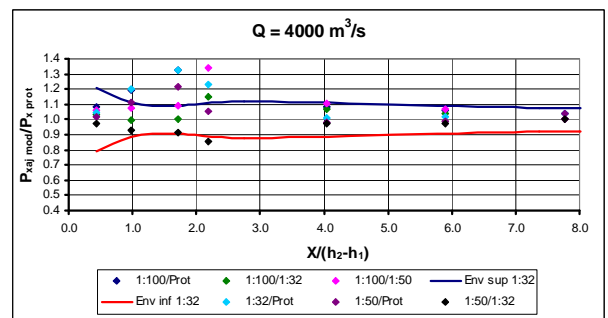
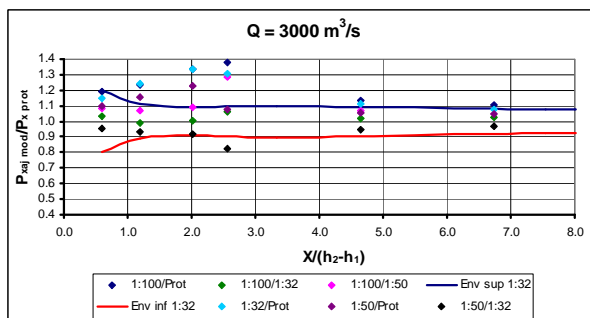
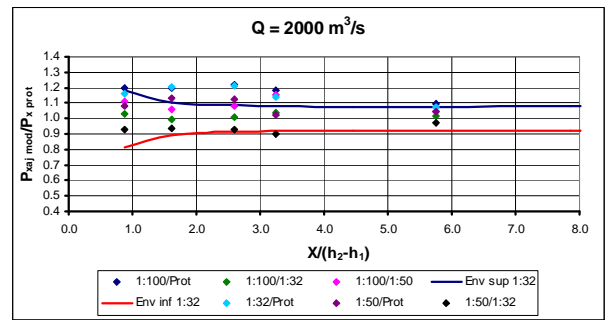
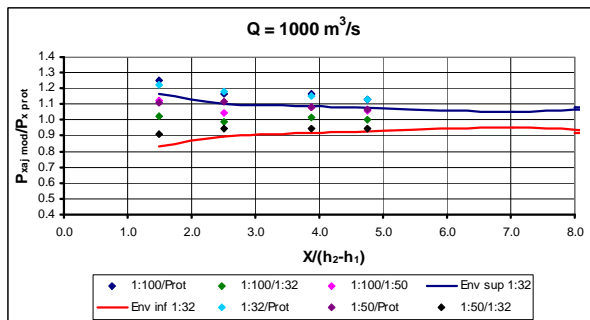


Figura D.17 – Distribuição longitudinal das diferenças relativas da pressão média (ψ), considerando **os ajustes** determinados com base nas diferentes escalas de modelo. As envoltórias foram definidas com base nos dados obtidos no modelo 1:32.

D.3 – Valores de pressão média para as diferentes tomadas e condições de escoamento (valores amostrais).

Tabela D.7 - Valores de pressão média não-adimensionalizados (considerando as amostras obtidas no protótipo e nas diferentes escalas de modelo reduzido).

Fr*	Tomada	X/(h ₂ -h ₁)*	P _{x prot}	P _{x mod. 1:32}	P _{x mod. 1:50}	P _{x mod. 1:100}
9,35	dA	1.49	6.31	6.28	6.02	5.24
	dB	2.50	8.46	9.58	9.36	9.30
	dC	3.87	8.83	9.85	9.67	9.41
	d1	4.76	8.96	9.41	9.11	8.89
	d3	8.23	9.40	9.18	8.82	8.78
	d5	11.71	9.59	9.90	9.40	9.62
	d7	15.18	9.72	9.91	9.74	9.89
7,01	dA	0.88	6.50	6.52	6.95	5.46
	dB	1.61	9.26	10.45	10.15	10.32
	dC	2.60	8.68	10.08	10.03	9.72
	d1	3.24	8.50	8.41	8.60	8.82
	d3	5.76	8.55	8.59	9.23	9.26
	d5	8.27	9.74	9.99	10.40	10.35
	d7	10.79	10.15	10.38	10.84	10.90
5,95	dA	0.59	6.37	7.28	7.28	6.46
	dB	1.20	9.57	11.77	10.94	11.25
	dC	2.02	8.08	10.66	9.92	10.01
	d1	2.56	7.21	8.24	7.86	8.51
	d3	4.65	7.89	8.60	8.86	8.99
	d5	6.74	9.40	9.97	10.34	10.56
	d7	8.84	10.14	10.74	11.11	11.38
5,23	dA	0.45	7.03	7.30	8.16	6.71
	dB	0.99	10.52	12.37	12.77	12.22
	dC	1.72	8.39	10.57	10.90	10.69
	d1	2.19	6.91	7.57	8.10	8.20
	d3	4.05	8.27	8.86	9.29	9.01
	d5	5.91	9.79	10.40	10.72	10.84
	d7	7.76	10.80	12.19	11.88	12.47

* Os valores apresentados correspondem ao protótipo da UHE Porto Colômbia.

D.4 – Valores de pressão média para as diferentes tomadas e condições de escoamento (obtidos a partir da metodologia proposta por Wiest, 2008).

Tabela D.8 - Valores de pressão média não-adimensionalizados (considerando os ajustes determinados com base nas diferentes escalas de modelo reduzido). Metodologia proposta por Wiest (2008).

Fr*	Tomada	X/(h ₂ -h ₁)*	P _{xaj mod. 1:32}	P _{xaj mod. 1:50}	P _{xaj mod. 1:100}
9,35	dA	1.49	7.70	7.01	7.88
	dB	2.50	9.96	9.45	9.86
	dC	3.87	10.15	9.57	10.31
	d1	4.76	10.10	9.55	10.15
	d3	8.23	9.92	9.80	9.92
	d5	11.71	9.92	9.92	9.92
	d7	15.18	9.92	9.92	9.92
7,01	dA	0.88	7.53	7.00	7.76
	dB	1.61	11.16	10.45	11.06
	dC	2.60	10.52	9.77	10.59
	d1	3.24	9.70	8.70	10.05
	d3	5.76	9.20	8.95	9.35
	d5	8.27	10.19	10.19	10.19
	d7	10.79	10.19	10.19	10.19
5,95	dA	0.59	7.34	7.00	7.58
	dB	1.20	11.90	11.07	11.82
	dC	2.02	10.78	9.92	10.80
	d1	2.56	9.40	7.75	9.95
	d3	4.65	8.80	8.35	8.95
	d5	6.74	10.15	9.85	10.40
	d7	8.84	10.65	10.65	10.65
5,23	dA	0.45	7.37	7.17	7.62
	dB	0.99	12.61	11.68	12.54
	dC	1.72	11.16	10.23	11.16
	d1	2.19	8.50	7.30	9.80
	d3	4.05	8.35	8.10	8.95
	d5	5.91	10.00	9.70	10.40
	d7	7.76	11.24	11.24	11.24

* Os valores apresentados correspondem ao protótipo da UHE Porto Colômbia.

Anexo E – Análise da flutuação de pressão

E.1 - Análise da flutuação de pressão nas diferentes escalas e protótipo

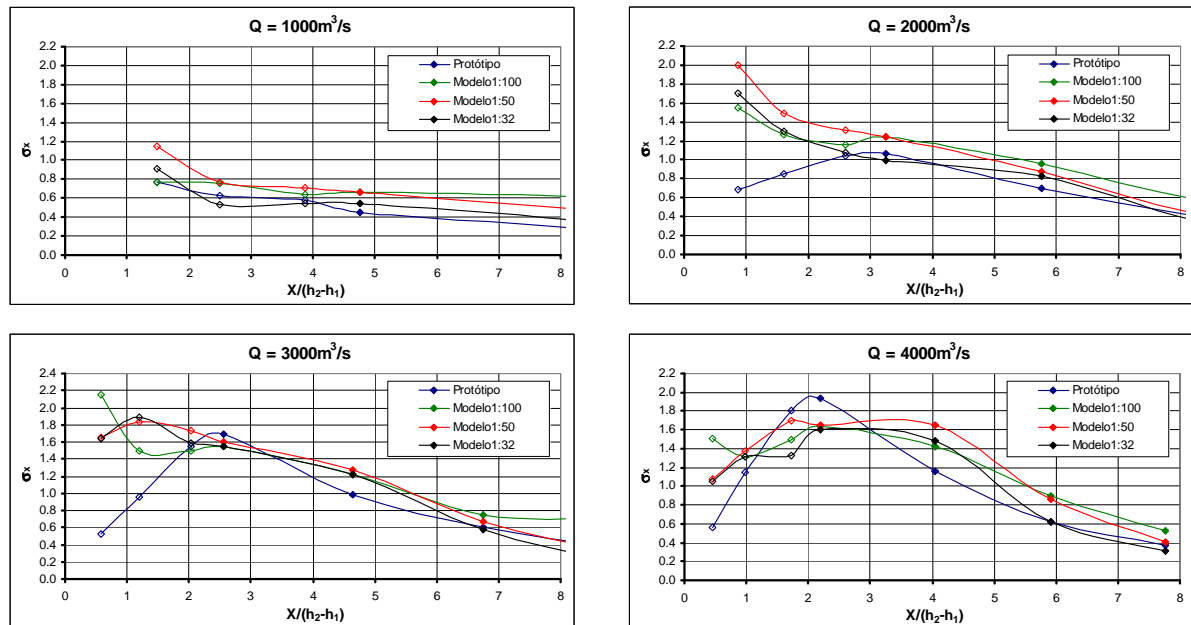


Figura E.1 - Distribuições longitudinais dos valores brutos de flutuação de pressão (σ_x) observadas na bacia de dissipação da UHE Porto Colômbia e nos modelos 1:32; 1:50 e 1:100. As tomadas situadas no trecho curvo estão representadas pelos símbolos vazados (\diamond).

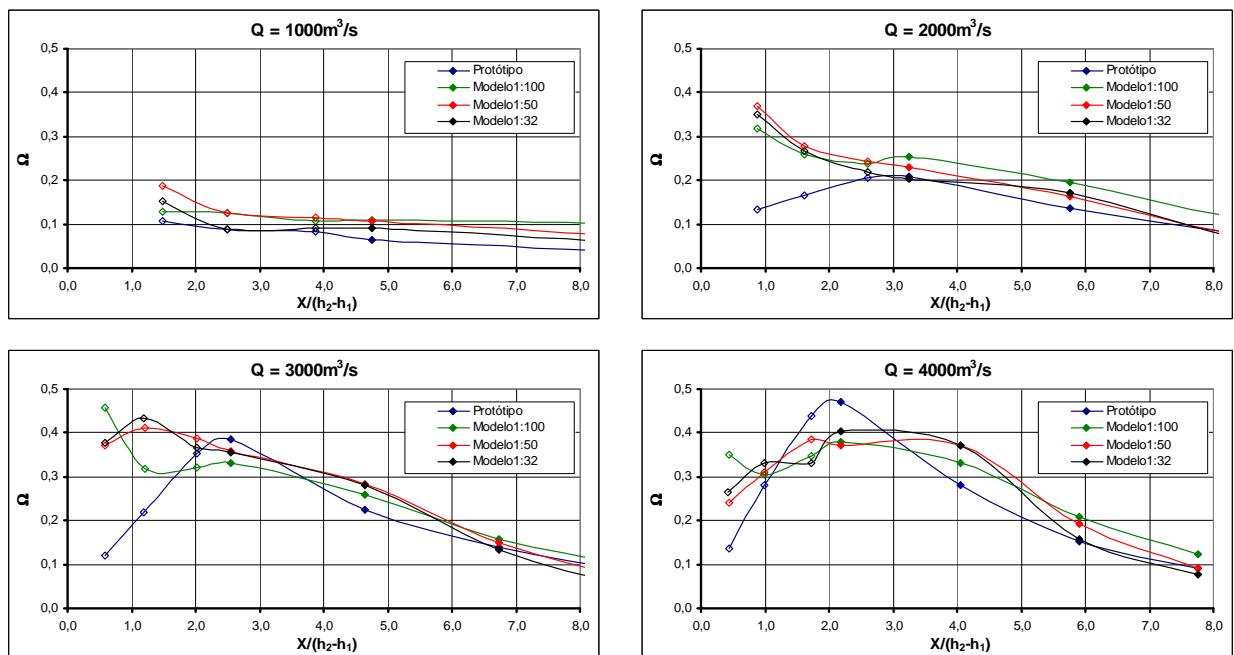


Figura E.2 - Distribuições longitudinais do coeficiente de flutuação de pressão (Ω) observadas na bacia de dissipação da UHE Porto Colômbia, e nos modelos 1:32; 1:50 e 1:100. As tomadas situadas no trecho curvo estão representadas pelos símbolos vazados (\diamond).

E.2 - Análise da dispersão natural das amostras e do efeito escala na flutuação

Tabela E.1 – Coeficientes de ajuste para a distribuição longitudinal da flutuação de pressão ao longo do trecho curvo referentes à metodologia proposta por Wiest (2008) para o modelo 1:32.

Posição/Coeficientes	a	b
Ponto 1 (Tomada dA)	0,0409	-1,0399
Ponto 2 (Tomada dB)	0,1991	-1,4324
Ponto 3 (Tomada dC)	0,5957	-1,5394

Tabela E.2 - Ajustes para os pontos característicos 4, 5 e 6, e as equações para cálculo de suas posições relativas de acordo com a metodologia proposta por Wiest (2008) para o modelo 1:32.

Ponto Característico	Ajuste para a flutuação	Posição relativa
Ponto 4 (Intersecção)	$\Omega = 1,0578 \cdot S^{-2,9505}$	$\Gamma = 4,2117 \cdot \ln(S) + 0,3205$
Ponto 5 (máximo)	$\Omega = 3,7927 \cdot e^{-1,5119 \cdot S}$	$\Gamma = 5,301 \cdot \ln(S) + 0,6556$
Ponto 6 (inflexão)	$\Omega = 4,0377 \cdot S^{-1,7363}$	$\Gamma = 8,1507 \cdot \ln(S) - 1,142$

Tabela E.3 – Coeficientes de ajuste para a distribuição longitudinal da flutuação de pressão ao longo do trecho curvo referentes à metodologia proposta por Wiest (2008) para o modelo 1:50..

Posição/Coeficientes	a	b
Ponto 1 (Tomada dA)	0,0576	-1,1176
Ponto 2 (Tomada dB)	0,1889	-1,3073
Ponto 3 (Tomada dC)	0,5853	-1,4242

Tabela E.4 - Ajustes para os pontos característicos 4, 5 e 6, e as equações para cálculo de suas posições relativas de acordo com a metodologia proposta por Wiest (2008) para o modelo 1:50..

Ponto Característico	Ajuste para a flutuação	Posição relativa
Ponto 4 (Intersecção)	$\Omega = 1,5046 \cdot S^{-3,338}$	$\Gamma = 9,3004 \cdot \ln(S) - 0,0156$
Ponto 5 (máximo)	$\Omega = 2,7450 \cdot e^{-1,3152 \cdot S}$	$\Gamma = 4,1312 \cdot \ln(S) + 1,6824$
Ponto 6 (inflexão)	$\Omega = 0,9090 \cdot S^{-2,4041}$	$\Gamma = 2,1527 \cdot \ln(S) + 1,4716$

Tabela E.5 – Coeficientes de ajuste para a distribuição longitudinal da flutuação de pressão ao longo do trecho curvo referentes à metodologia proposta por Wiest (2008) para o modelo 1:100.

Posição/Coeficientes	a	b
Ponto 1 (Tomada dA)	0,0988	-1,4978
Ponto 2 (Tomada dB)	0,1539	-1,2997
Ponto 3 (Tomada dC)	0,5193	-1,4887

Tabela E.6 - Ajustes para os pontos característicos 4, 5 e 6, e as equações para cálculo de suas respectivas posições relativas de acordo com a metodologia proposta por Wiest (2008) para o modelo 1:100.

Ponto Característico	Ajuste para a flutuação	Posição relativa
Ponto 4 (Intersecção)	$\Omega = 0,8418 \cdot S^{-2,6494}$	$\Gamma = 4,4874 \cdot \ln(S) + 0,0182$
Ponto 5 (máximo)	$\Omega = 2,733 \cdot e^{-1,3799 \cdot S}$	$\Gamma = 5,9813 \cdot \ln(S) + 0,6971$
Ponto 6 (inflexão)	$\Omega = 2,6351 \cdot S^{-1,4543}$	$\Gamma = 7,2653 \cdot \ln(S) + 15974$

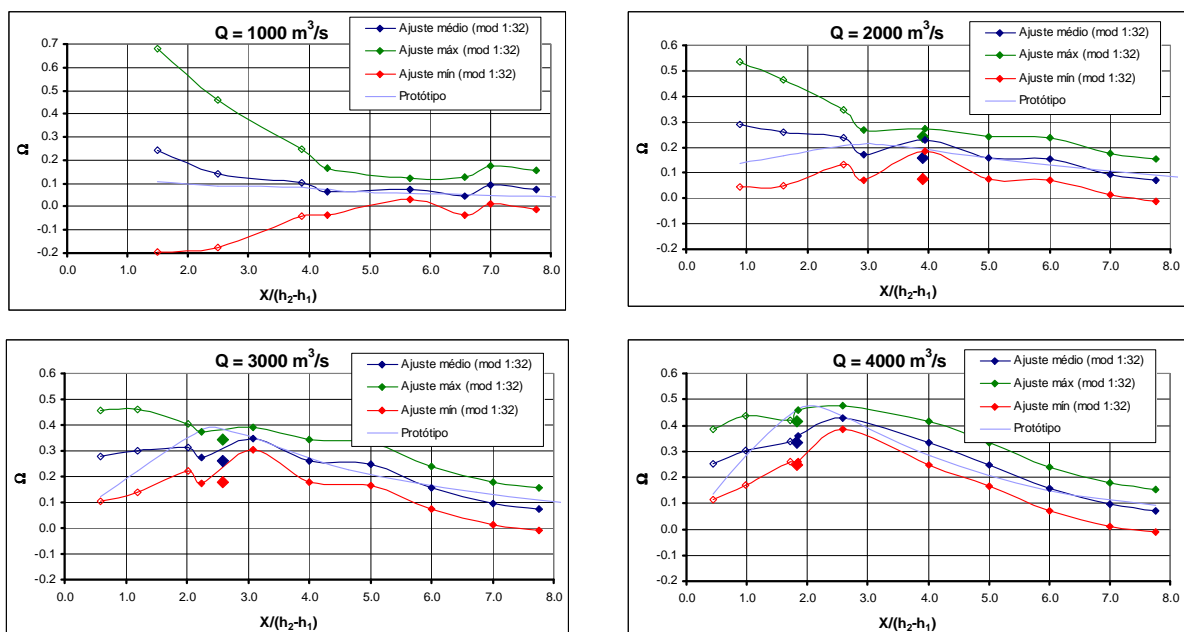


Figura E.3 - Dispersão natural do coeficiente de flutuação de pressão (Ω) considerando as amostras obtidas no modelo na escala 1:32 da UHE Porto Colômbia. Os pontos situados no trecho curvo estão representados pelos símbolos vazados (\diamond).

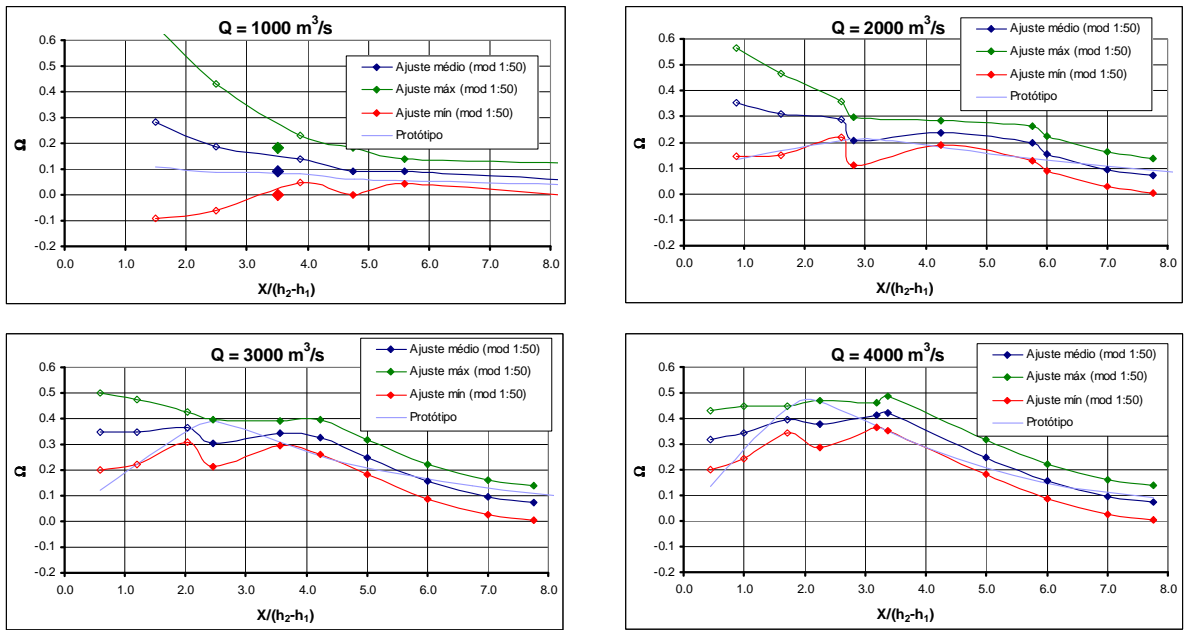


Figura E.4 - Dispersão natural do coeficiente de flutuação de pressão (Ω) considerando as amostras obtidas no modelo na escala 1:50 da UHE Porto Colômbia. Os pontos situados no trecho curvo estão representados pelos símbolos vazados (\diamond).

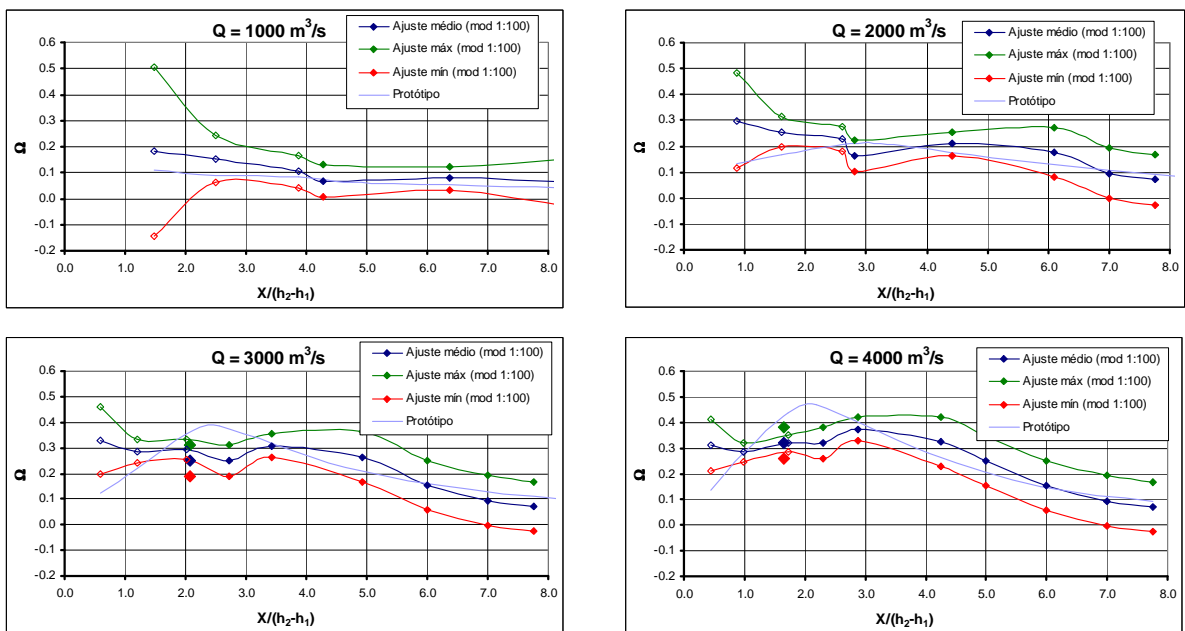


Figura E.5 - Dispersão natural do coeficiente de flutuação de pressão (Ω) considerando as amostras obtidas no modelo na escala 1:100 da UHE Porto Colômbia. Os pontos situados no trecho curvo estão representados pelos símbolos vazados (\diamond).

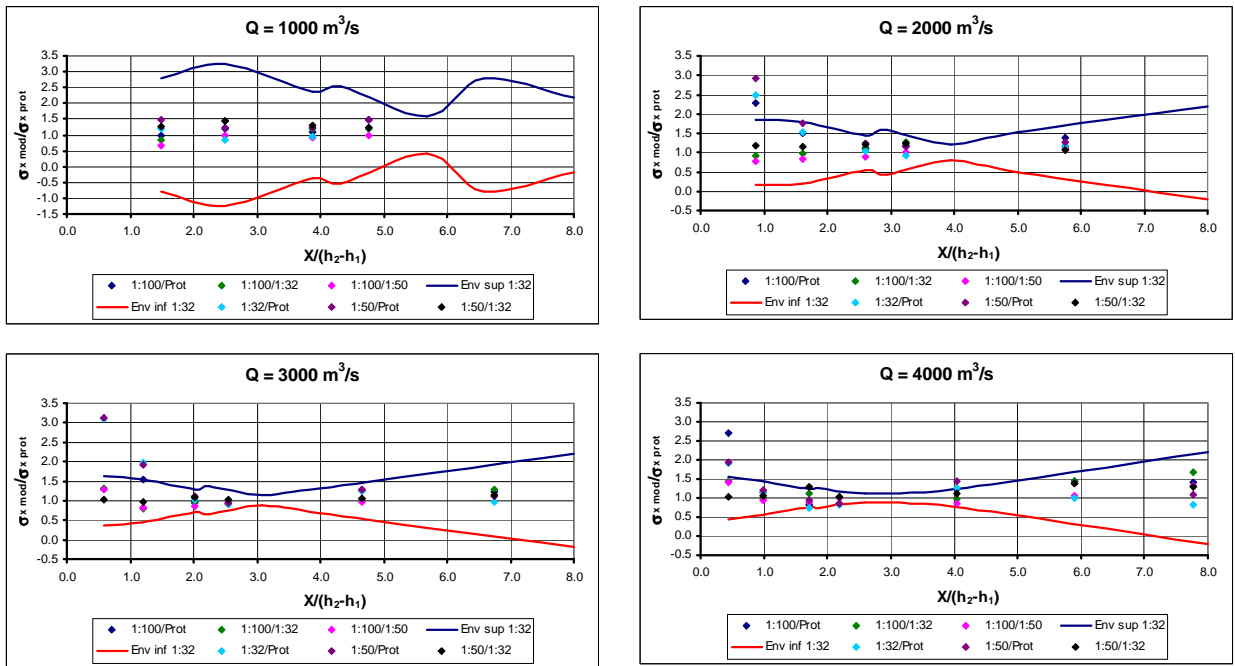


Figura E.6 - Distribuição longitudinal das diferenças relativas da flutuação de pressão, considerando **as amostras** obtidas nas diferentes escalas de modelo e no protótipo. As envoltórias foram definidas com base nos dados obtidos no modelo 1:32.

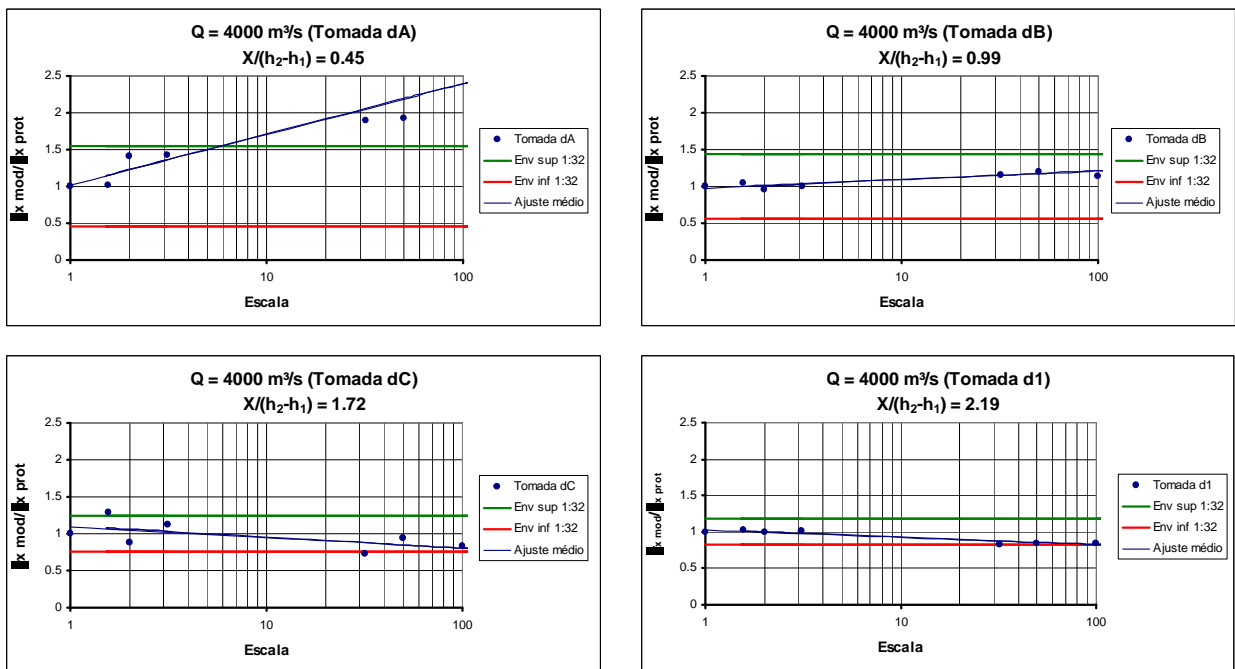


Figura E.7 – Diferenças relativas da flutuação de pressão para todas as tomadas de pressão, $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$, considerando as amostras obtidas nas diferentes escalas de modelo e no protótipo. As envoltórias foram definidas com base nos dados obtidos no modelo 1:32.

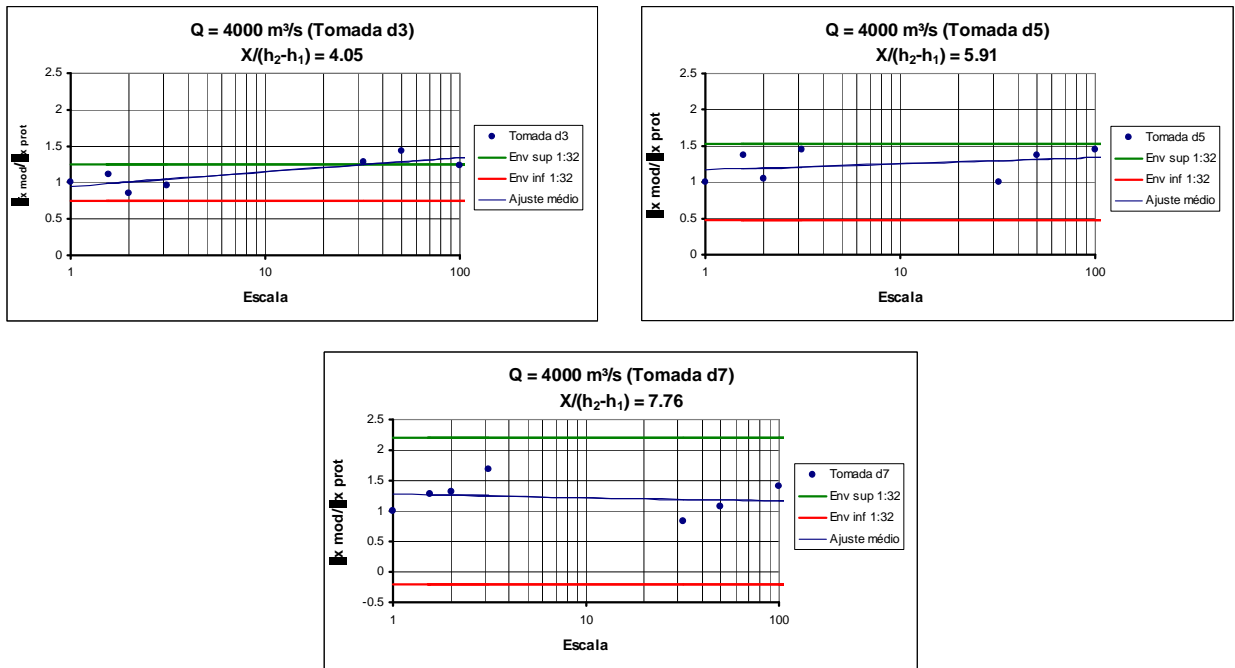


Figura E.7 (continuação) – Diferenças relativas da flutuação de pressão para todas as tomadas de pressão, $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$, considerando **as amostras** obtidas nas diferentes escalas de modelo e no protótipo. As envoltórias foram definidas com base nos dados obtidos no modelo 1:32.

E.3 - Análise dos efeitos de escala na flutuação de pressão com o uso do ajuste proposto por Wiest (2008)

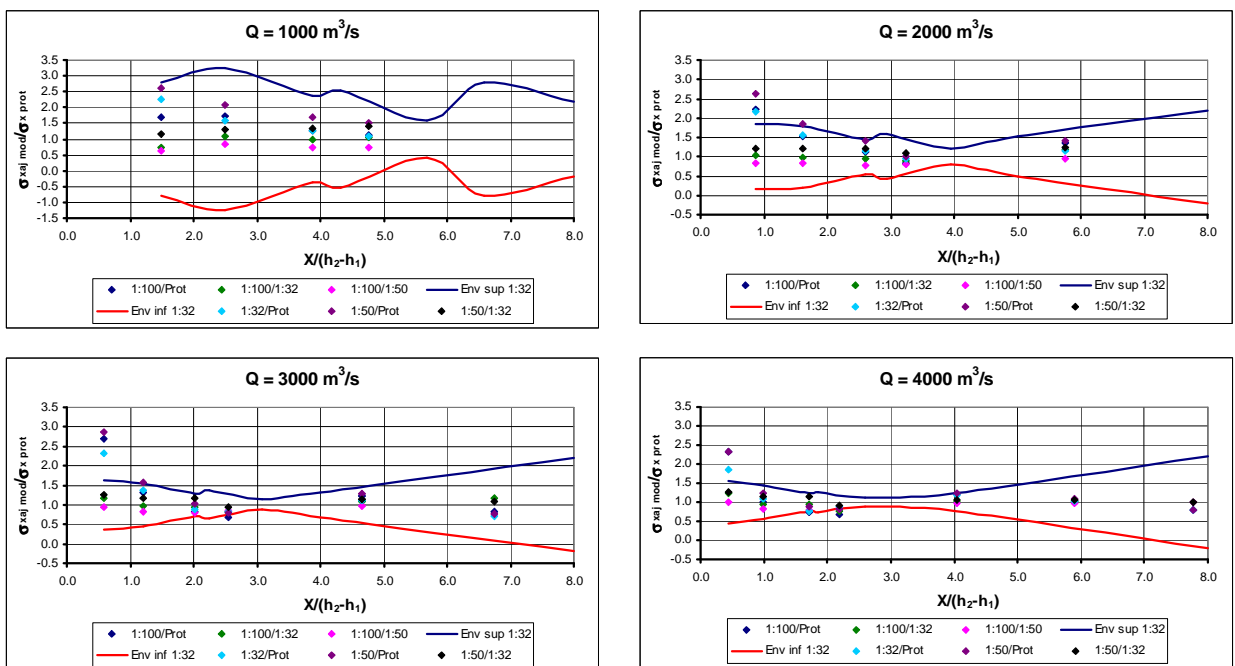


Figura E.8 - Distribuição longitudinal das diferenças relativas da flutuação de pressão (Ω), considerando **os ajustes** determinados para as diferentes escalas. As envoltórias foram definidas com base nas medições realizadas no modelo 1:32.

E.4 - Valores de flutuação de pressão para as diferentes tomadas e condições de escoamento (valores amostrais).

Tabela E.7 - Valores de flutuação de pressão não-adimensionalizados (considerando as amostras obtidas no protótipo e nas diferentes escalas de modelo reduzido).

Fr*	Tomada	X/(h ₂ -h ₁)*	$\sigma_{x \text{ prot}}$	$\sigma_{x \text{ mod. 1:32}}$	$\sigma_{x \text{ mod. 1:50}}$	$\sigma_{x \text{ mod. 1:100}}$
9,35	dA	1.49	0.77	0.91	1.15	0.77
	dB	2.50	0.63	0.53	0.77	0.76
	dC	3.87	0.58	0.54	0.71	0.64
	d1	4.76	0.45	0.55	0.66	0.66
	d3	8.23	0.29	0.36	0.48	0.61
	d5	11.71	0.07	0.09	0.27	0.49
	d7	15.18	0.06	0.04	0.24	0.41
7,01	dA	0.88	0.68	1.70	1.99	1.55
	dB	1.61	0.85	1.30	1.50	1.26
	dC	2.60	1.04	1.07	1.31	1.16
	d1	3.24	1.06	0.99	1.24	1.24
	d3	5.76	0.70	0.83	0.87	0.96
	d5	8.27	0.41	0.35	0.43	0.58
	d7	10.79	0.17	0.09	0.27	0.42
5,95	dA	0.59	0.53	1.64	1.66	2.14
	dB	1.20	0.96	1.89	1.84	1.49
	dC	2.02	1.55	1.59	1.73	1.50
	d1	2.56	1.69	1.54	1.60	1.55
	d3	4.65	0.98	1.22	1.27	1.22
	d5	6.74	0.61	0.58	0.67	0.74
	d7	8.84	0.36	0.20	0.30	0.71
5,23	dA	0.45	0.56	1.06	1.07	1.51
	dB	0.99	1.15	1.32	1.38	1.31
	dC	1.72	1.81	1.33	1.70	1.50
	d1	2.19	1.94	1.61	1.65	1.63
	d3	4.05	1.16	1.48	1.65	1.42
	d5	5.91	0.62	0.62	0.86	0.90
	d7	7.76	0.38	0.31	0.40	0.53

* Os valores apresentados correspondem ao protótipo da UHE Porto Colômbia.

E.5 - Valores de flutuação de pressão para as diferentes tomadas e condições de escoamento (obtidos a partir da metodologia proposta por Wiest, 2008).

Tabela E.8 - Valores de flutuação de pressão não-adimensionalizados (considerando os ajustes determinados com base nas diferentes escalas de modelo reduzido). Metodologia proposta por Wiest (2008).

Fr*	Tomada	X/(h ₂ -h ₁)*	$\sigma_{xaj \text{ mod. } 1:32}$	$\sigma_{xaj \text{ mod. } 1:50}$	$\sigma_{xaj \text{ mod. } 1:100}$
9,35	dA	1.49	1.74	2.01	1.29
	dB	2.50	1.01	1.32	1.10
	dC	3.87	0.75	0.99	0.74
	d1	4.76	0.48	0.67	0.50
	d3	8.23	0.44	0.42	0.44
	d5	11.71	0.44	0.39	0.44
	d7	15.18	0.44	0.39	0.44
7,01	dA	0.88	1.48	1.80	1.52
	dB	1.61	1.31	1.57	1.29
	dC	2.60	1.21	1.48	1.16
	d1	3.24	1.00	1.08	0.88
	d3	5.76	0.80	0.99	0.95
	d5	8.27	0.35	0.35	0.35
	d7	10.79	0.35	0.35	0.35
5,95	dA	0.59	1.22	1.53	1.43
	dB	1.20	1.31	1.52	1.25
	dC	2.02	1.36	1.60	1.29
	d1	2.56	1.40	1.33	1.15
	d3	4.65	1.10	1.25	1.20
	d5	6.74	0.43	0.46	0.50
	d7	8.84	0.30	0.30	0.30
5,23	dA	0.45	1.03	1.30	1.29
	dB	0.99	1.25	1.42	1.17
	dC	1.72	1.40	1.62	1.31
	d1	2.19	1.70	1.57	1.31
	d3	4.05	1.36	1.43	1.40
	d5	5.91	0.64	0.67	0.65
	d7	7.76	0.30	0.30	0.30

* Os valores apresentados correspondem ao protótipo da UHE Porto Colômbia.

Anexo F - Coeficiente Estatístico de Distribuição de Probabilidades

F.1 - Análise do coeficiente estatístico nas diferentes escalas de modelo e protótipo

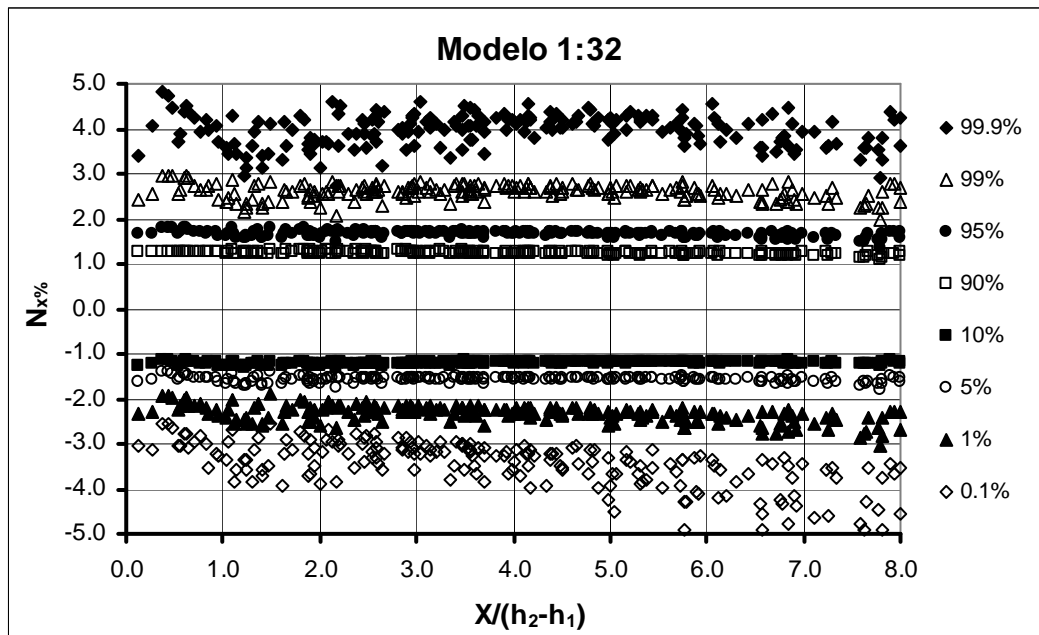


Figura F.1 - Distribuição longitudinal do $N_{x\%}$ para os dados do modelo 1:32 (considerando diferentes submergências) em função da posição relativa ao início do ressalto.

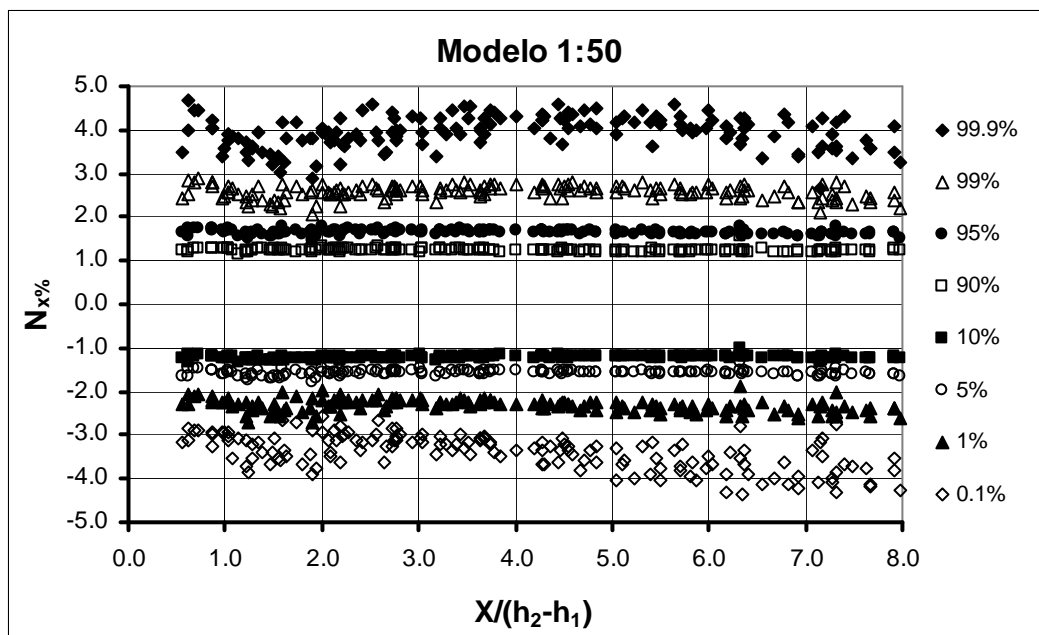


Figura F.2 - Distribuição longitudinal do N_x para os dados do modelo 1:50 (considerando diferentes submergências) em função da posição relativa ao início do ressalto.

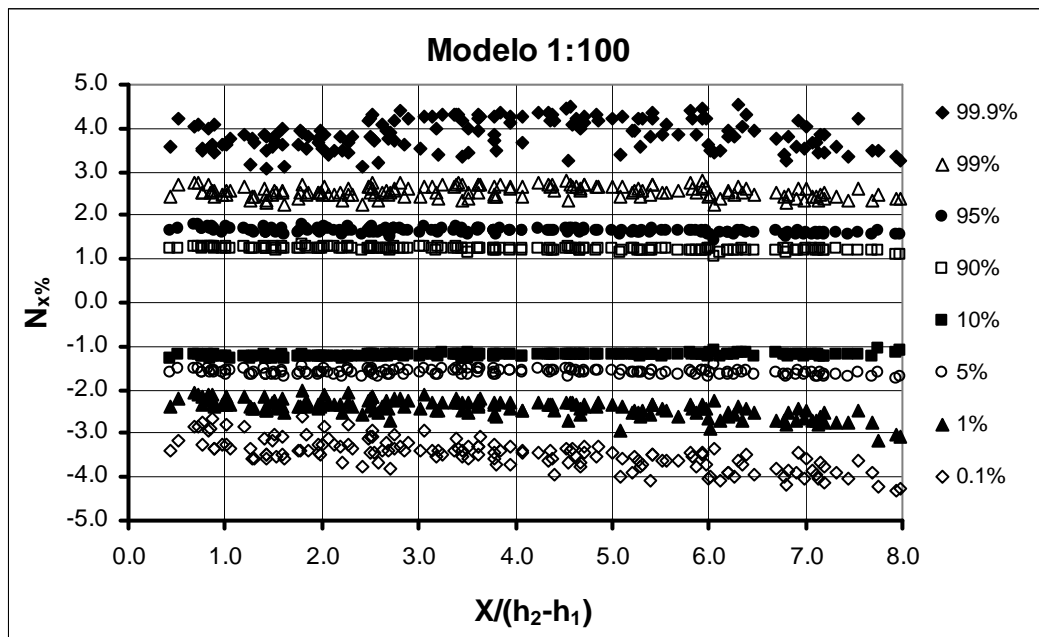


Figura F.3 - Distribuição longitudinal do $N_{x\%}$ para os dados do modelo 1:100 (considerando diferentes submergências) em função da posição relativa ao início do ressalto.

Tabela F.1 – Valores dos coeficientes estatísticos de distribuição de probabilidades ($N_{x\%}$) determinados para o modelo na escala 1:32.

Prob. (%)	$N_{x\%}$	Prob. (%)	$N_{x\%}$	Prob. (%)	$N_{x\%}$
0,1%	-3.525	30%	-0.500	80%	0.773
1%	-2.355	40%	-0.255	90%	1.237
5%	-1.571	50%	-0.026	95%	1.658
10%	-1.204	60%	0.207	99%	2.584
20%	-0.789	70%	0.463	99,9%	3.935

Tabela F.2 – Valores dos coeficientes estatísticos de distribuição de probabilidades ($N_{x\%}$) determinados para o modelo na escala 1:50.

Prob. (%)	$N_{x\%}$	Prob. (%)	$N_{x\%}$	Prob. (%)	$N_{x\%}$
0,1%	-3,415	30%	-0,522	80%	0,808
1%	-2,327	40%	-0,264	90%	1,243
5%	-1,575	50%	-0,017	95%	1,650
10%	-1,217	60%	0,233	99%	2,550
20%	-0,818	70%	0,499	99,9%	3,891

Tabela F.3 – Valores dos coeficientes estatísticos de distribuição de probabilidades ($N_{x\%}$) determinados para o modelo na escala 1:100.

Prob. (%)	$N_{x\%}$	Prob. (%)	$N_{x\%}$	Prob. (%)	$N_{x\%}$
0,1%	-3.528	30%	-0.484	80%	0.769
1%	-2.460	40%	-0.239	90%	1.224
5%	-1.602	50%	-0.013	95%	1.639
10%	-1.206	60%	0.216	99%	2.538
20%	-0.778	70%	0.467	99,9%	3.843

Ajuste médio que representa a distribuição longitudinal do $N_{x\%}$ em função da posição relativa ao início do resalto:

$$N = \frac{a + b.k}{(1 + c.k + d.k^2)}$$

Onde:

k = o valor da probabilidade desejada (em valores decimais: 90%=0,90)

Tabela F.4 – Valores dos coeficientes estatísticos de distribuição de probabilidades ($N_{x\%}$) determinados para as diferentes escalas de modelo.

Coeficiente/Modelo	Modelo 1:32	Modelo 1:50	Modelo 1:100
a	-3.269	-3.161	-3.321
b	6.386	6.150	6.505
c	15.898	14.351	15.997
d	-16.054	-14.526	-16.112

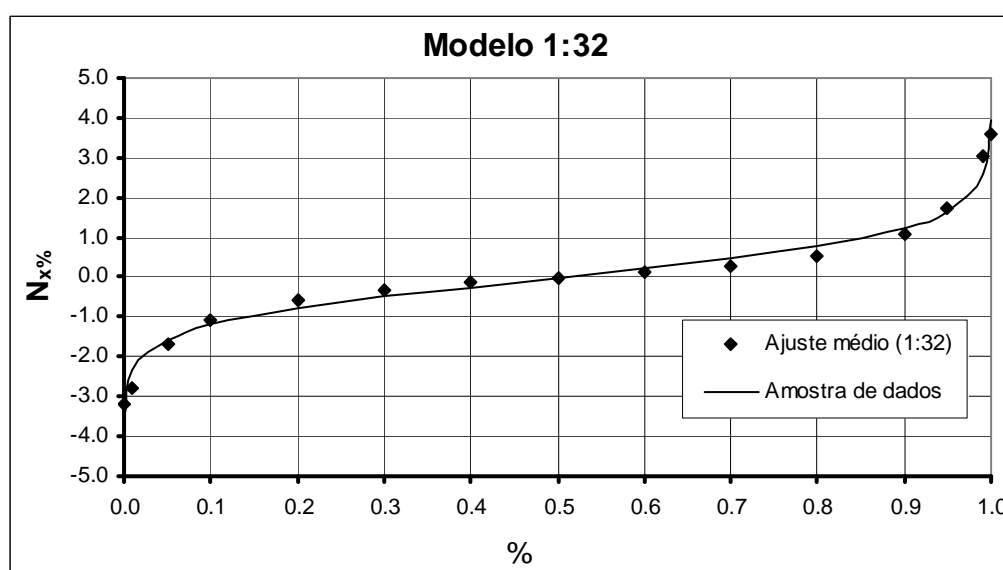


Figura F.4 - Ajuste médio proposto para determinação do coeficiente estatístico ($N_{x\%}$) considerando os dados obtidos no modelo 1:32 da UHE Porto Colômbia.

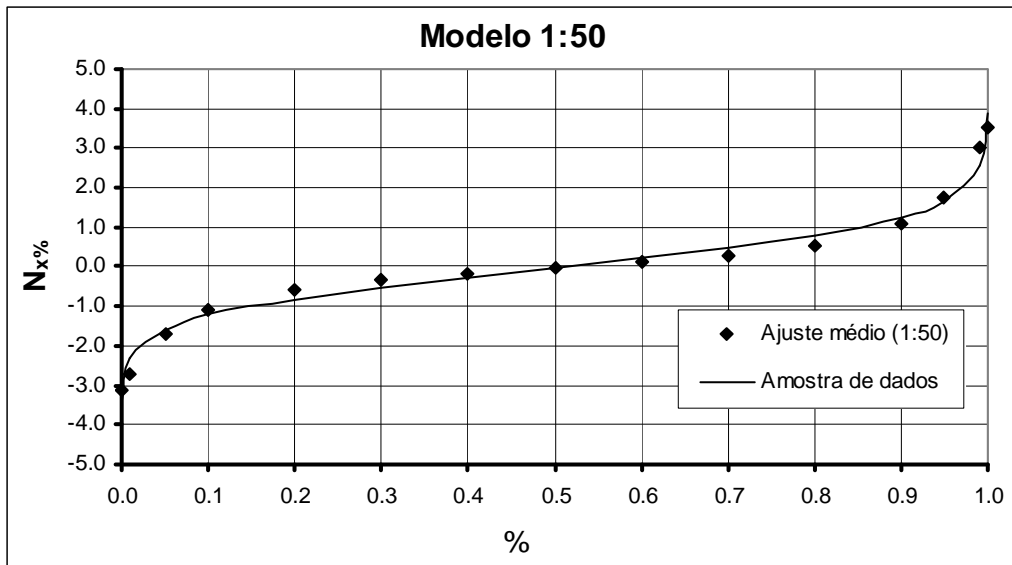


Figura F.5 - Ajuste médio proposto para determinação do coeficiente estatístico ($N_{x\%}$) considerando os dados obtidos no modelo 1:50 da UHE Porto Colômbia.

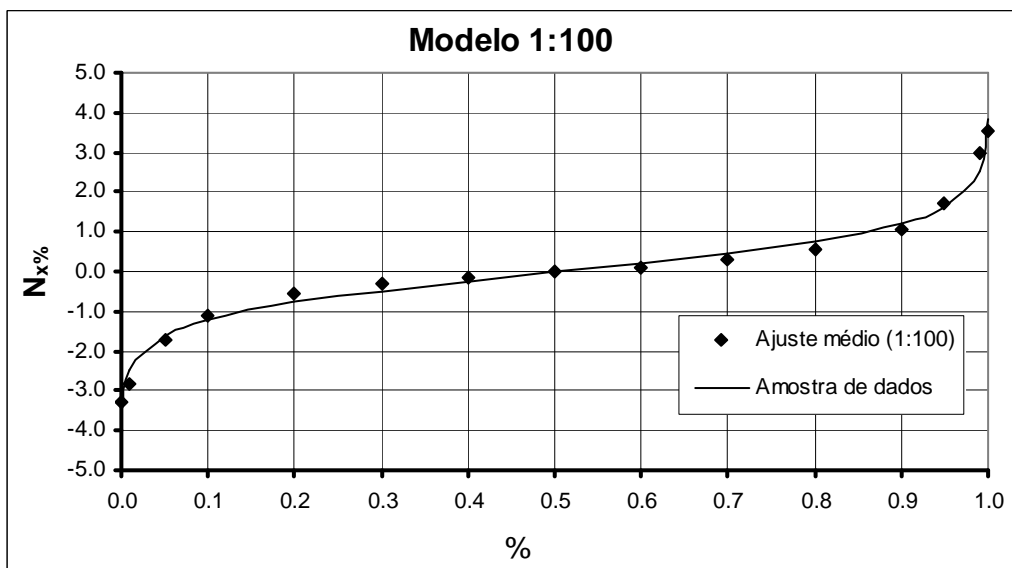


Figura F.6 - Ajuste médio proposto para determinação do coeficiente estatístico ($N_{x\%}$) considerando os dados obtidos no modelo 1:100 da UHE Porto Colômbia.

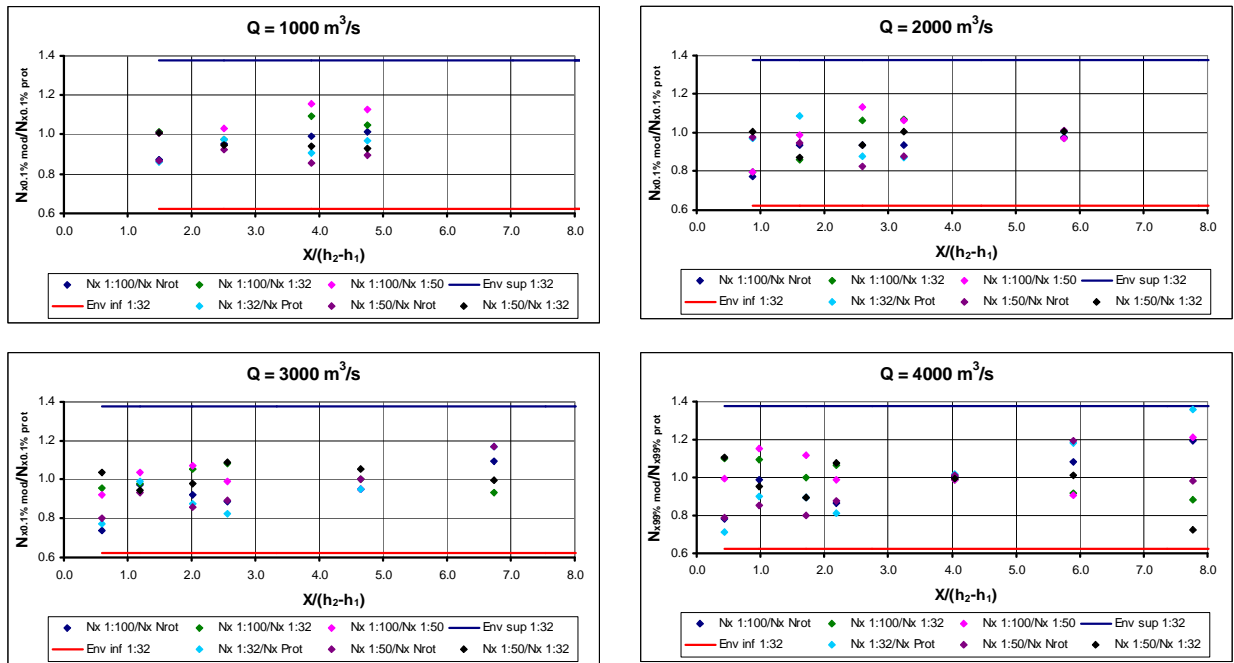


Figura F.7 - Distribuição longitudinal das diferenças relativas do coeficiente estatístico ($N_{x0,1\%}$) para a probabilidade de 0,1 %, considerando **as amostras** obtidas nas diferentes escalas de modelo e no protótipo. As envoltórias foram definidas com base nos dados obtidos no modelo 1:32.

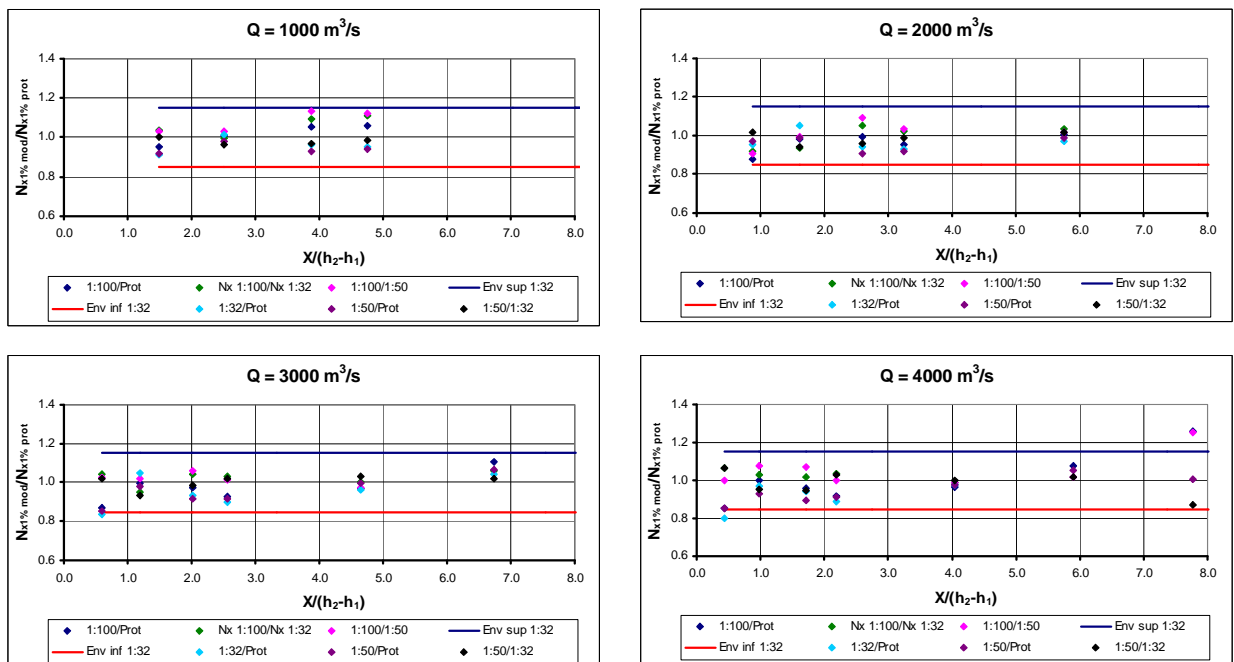


Figura F.8 - Distribuição longitudinal das diferenças relativas do coeficiente estatístico ($N_{x1\%}$) para a probabilidade de 1 %, considerando **as amostras** obtidas nas diferentes escalas de modelo e no protótipo. As envoltórias foram definidas com base nos dados obtidos no modelo 1:32.

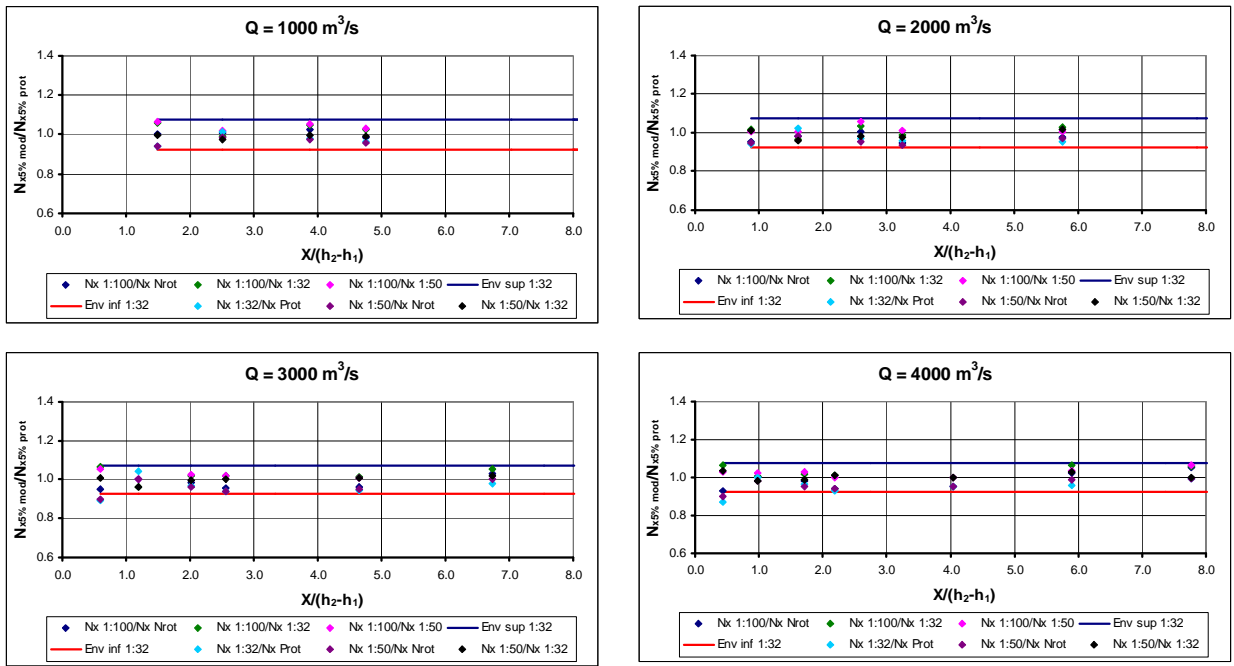


Figura F.9 - Distribuição longitudinal das diferenças relativas do coeficiente estatístico ($N_{x5\%}$) para a probabilidade de 5 %, considerando **as amostras** obtidas nas diferentes escalas de modelo e no protótipo. As envoltórias foram definidas com base nos dados obtidos no modelo 1:32.

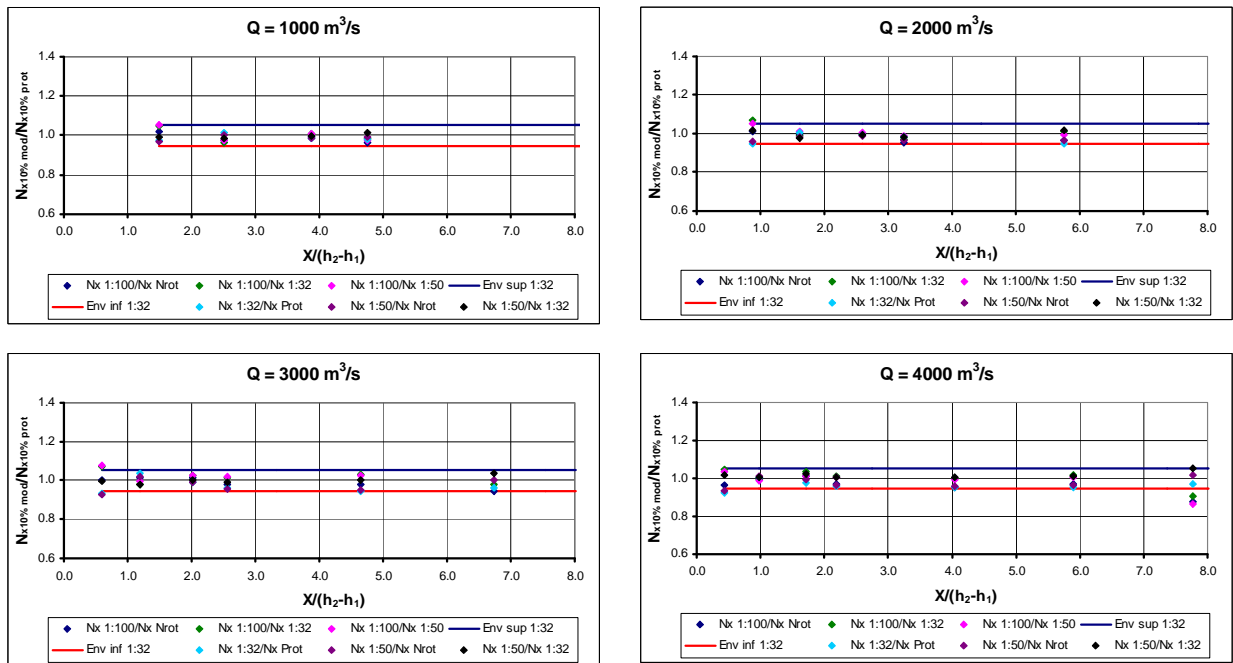


Figura F.10 - Distribuição longitudinal das diferenças relativas do coeficiente estatístico ($N_{x10\%}$) para a probabilidade de 10 %, considerando **as amostras** obtidas nas diferentes escalas de modelo e no protótipo. As envoltórias foram definidas com base nos dados obtidos no modelo 1:32.

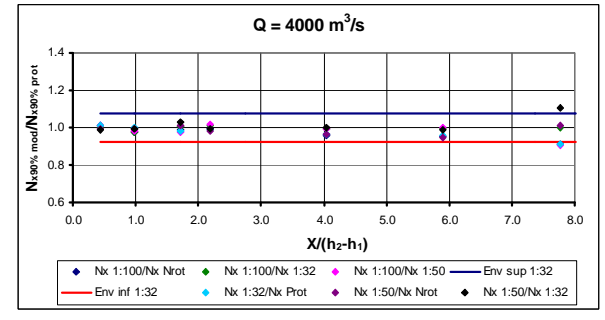
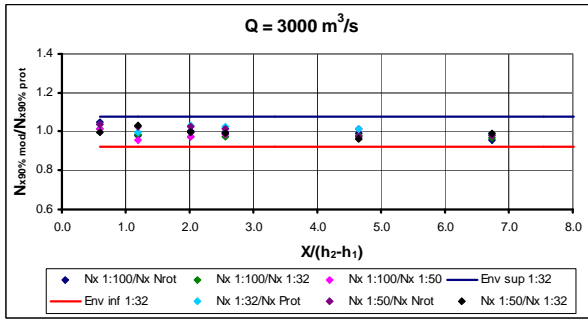
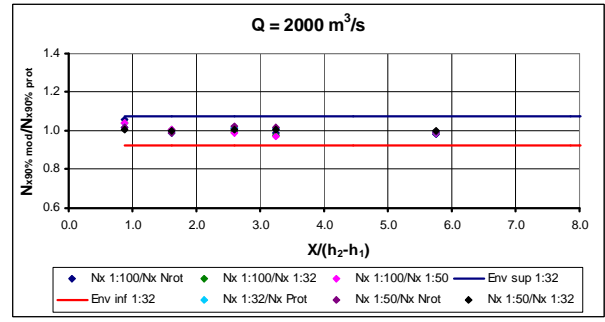
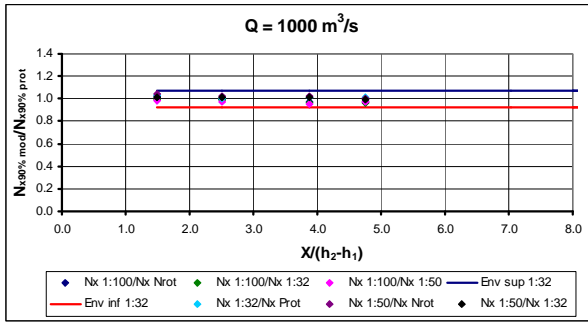


Figura F.11 - Distribuição longitudinal das diferenças relativas do coeficiente estatístico ($N_{x90\%}$) para a probabilidade de 90 %, considerando **as amostras** obtidas nas diferentes escalas de modelo e no protótipo. As envoltórias foram definidas com base nos dados obtidos no modelo 1:32.

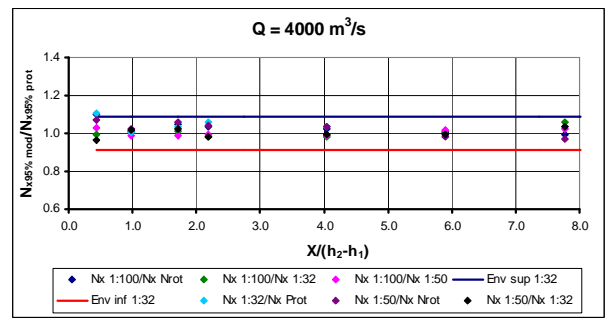
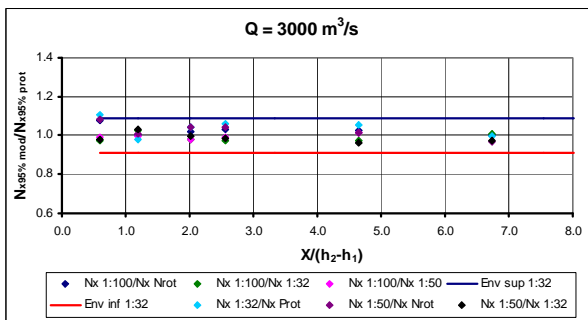
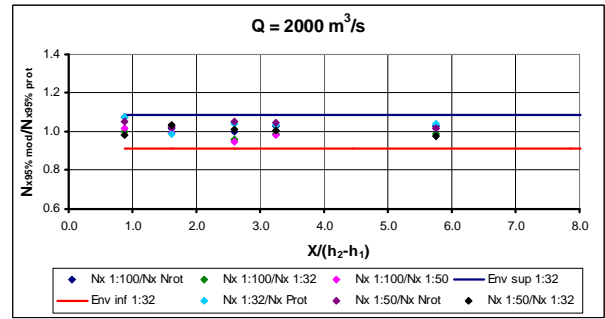
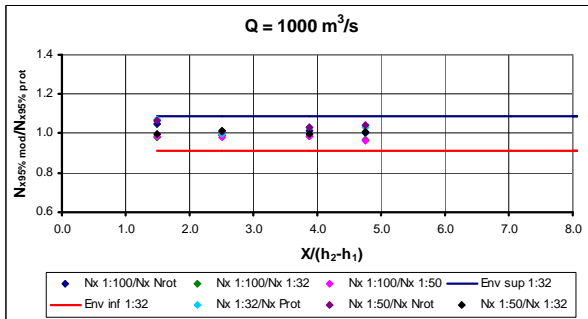


Figura F.12 - Distribuição longitudinal das diferenças relativas do coeficiente estatístico ($N_{x95\%}$) para a probabilidade de 95 %, considerando **as amostras** obtidas nas diferentes escalas de modelo e no protótipo. As envoltórias foram definidas com base nos dados obtidos no modelo 1:32.

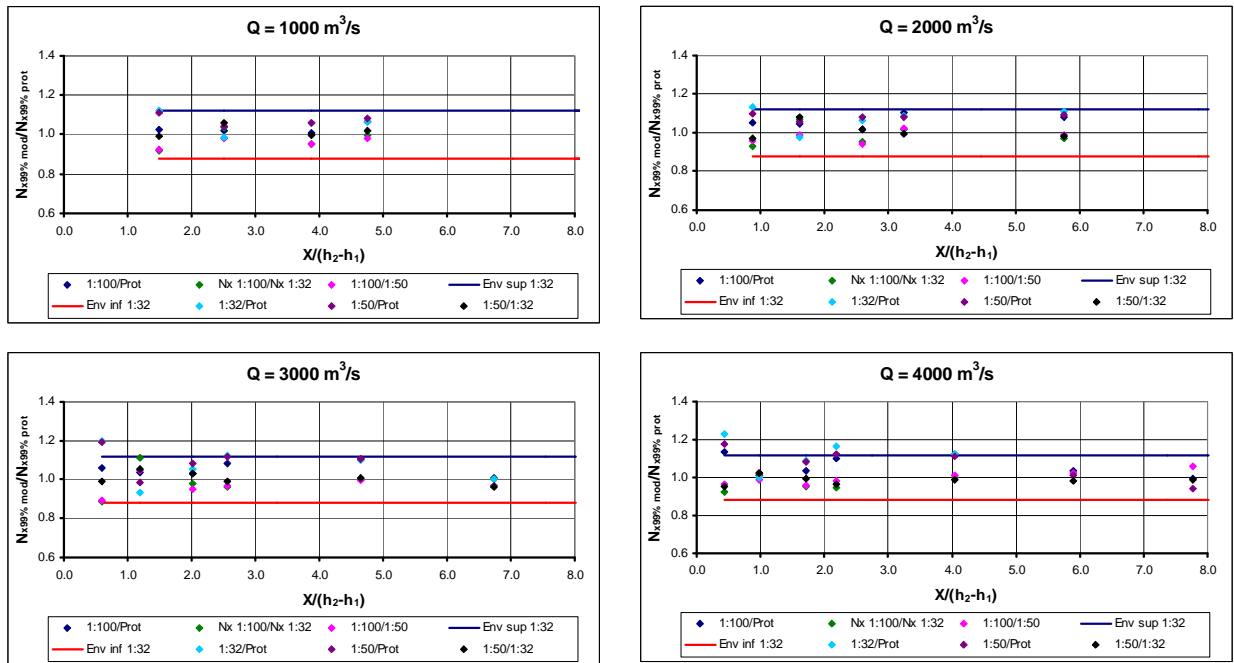


Figura F.13 - Distribuição longitudinal das diferenças relativas do coeficiente estatístico ($N_{x,99\%}$) para a probabilidade de 99 %, considerando **as amostras** obtidas nas diferentes escalas de modelo e no protótipo. As envoltórias foram definidas com base nos dados obtidos no modelo 1:32.

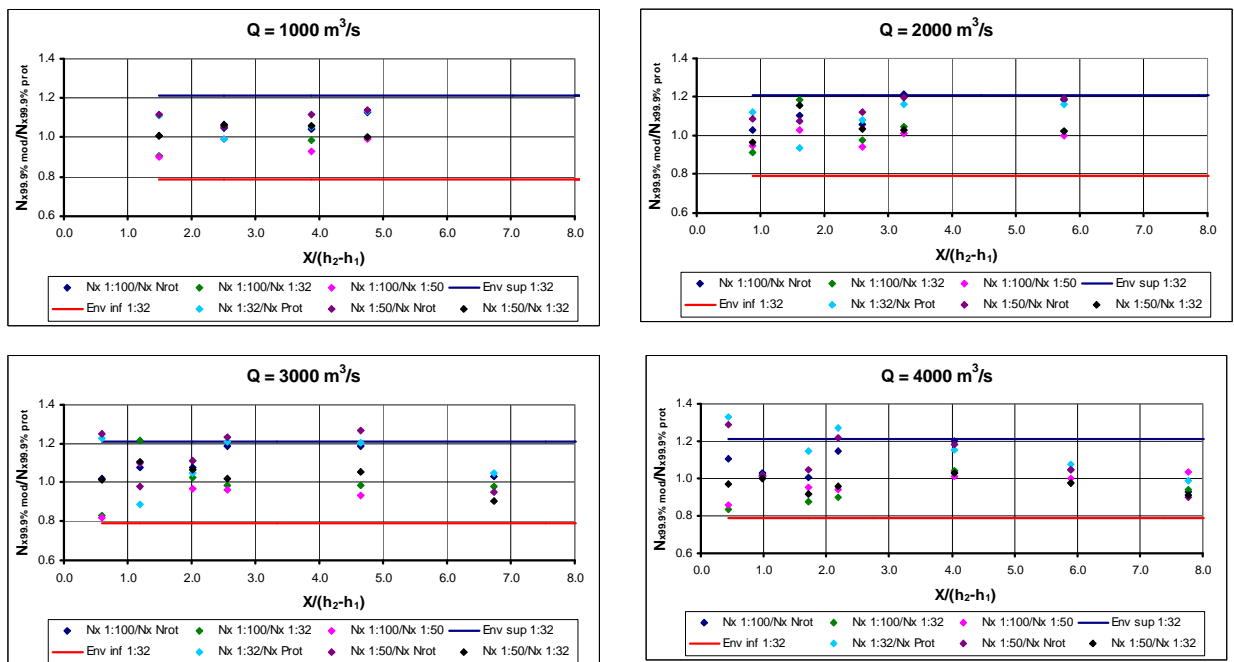


Figura F.14 - Distribuição longitudinal das diferenças relativas do coeficiente estatístico ($N_{x,99,9\%}$) para a probabilidade de 99,9 %, considerando **as amostras** obtidas nas diferentes escalas de modelo e no protótipo. As envoltórias foram definidas com base nos dados obtidos no modelo 1:32.

F.2 - Análise dos efeitos de escala no coeficiente estatístico com o uso do ajuste proposto por Wiest (2008)

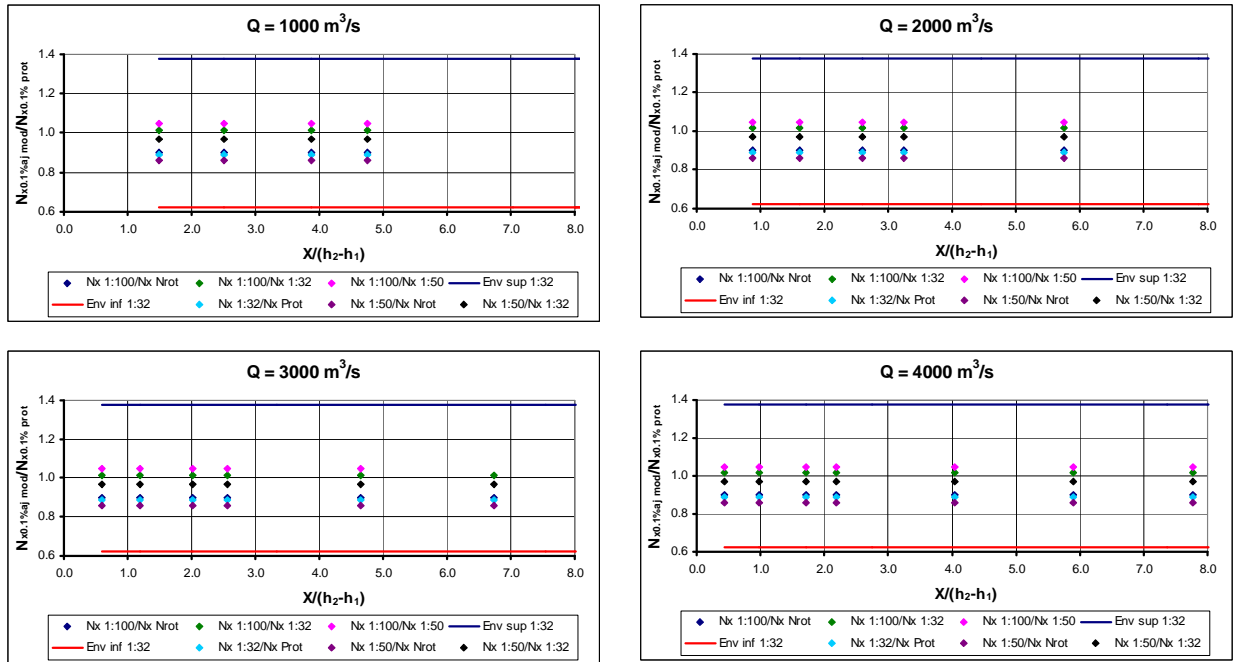


Figura F.15 - Distribuição longitudinal das diferenças relativas do coeficiente estatístico ($N_{x0,1\%}$) para a probabilidade de 0,1 %, considerando os ajustes determinados para as diferentes escalas. As envoltórias foram definidas com base nas medições realizadas no modelo 1:32.

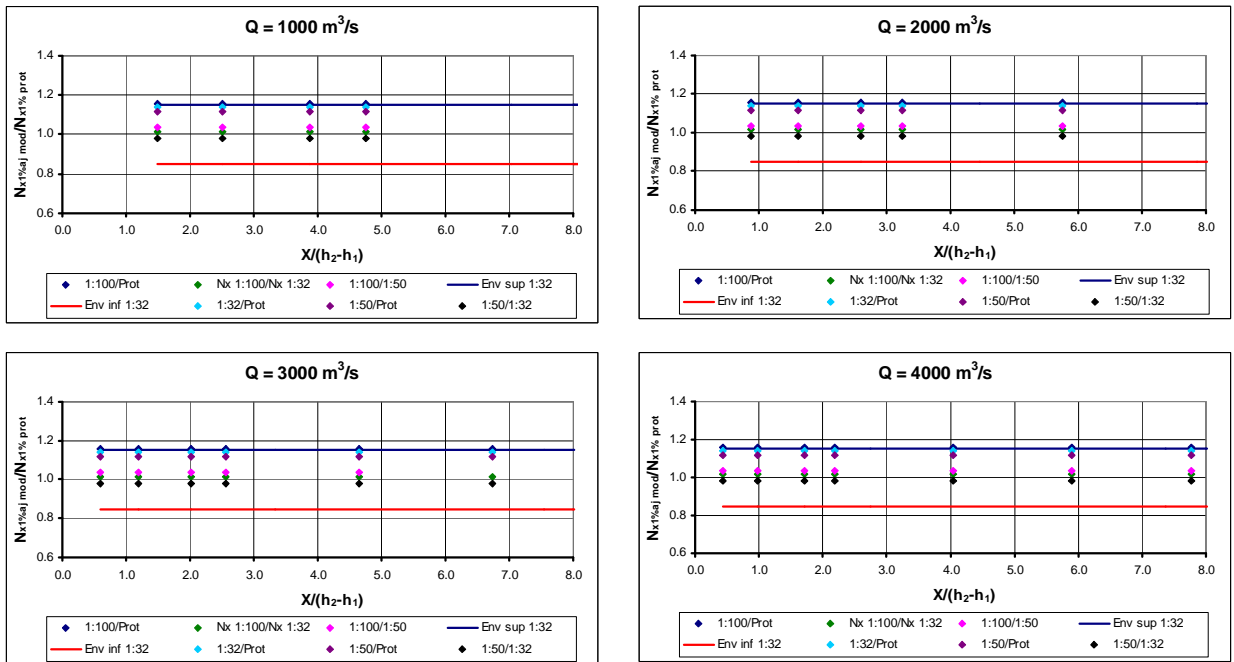


Figura F.16 - Distribuição longitudinal das diferenças relativas do coeficiente estatístico ($N_{x1\%}$) para a probabilidade de 1 %, considerando os ajustes determinados para as diferentes escalas. As envoltórias foram definidas com base nas medições realizadas no modelo 1:32.

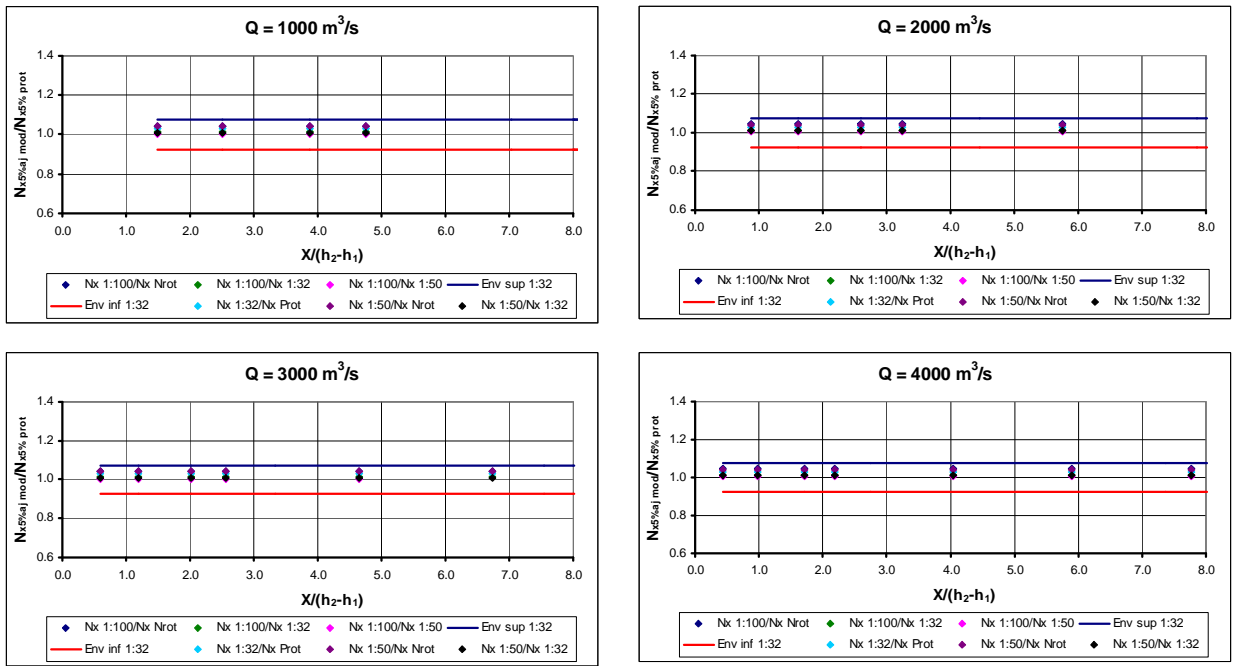


Figura F.17 - Distribuição longitudinal das diferenças relativas do coeficiente estatístico ($N_{x5\%}$) para a probabilidade de 5 %, considerando os ajustes determinados para as diferentes escalas. As envoltórias foram definidas com base nas medições realizadas no modelo 1:32.

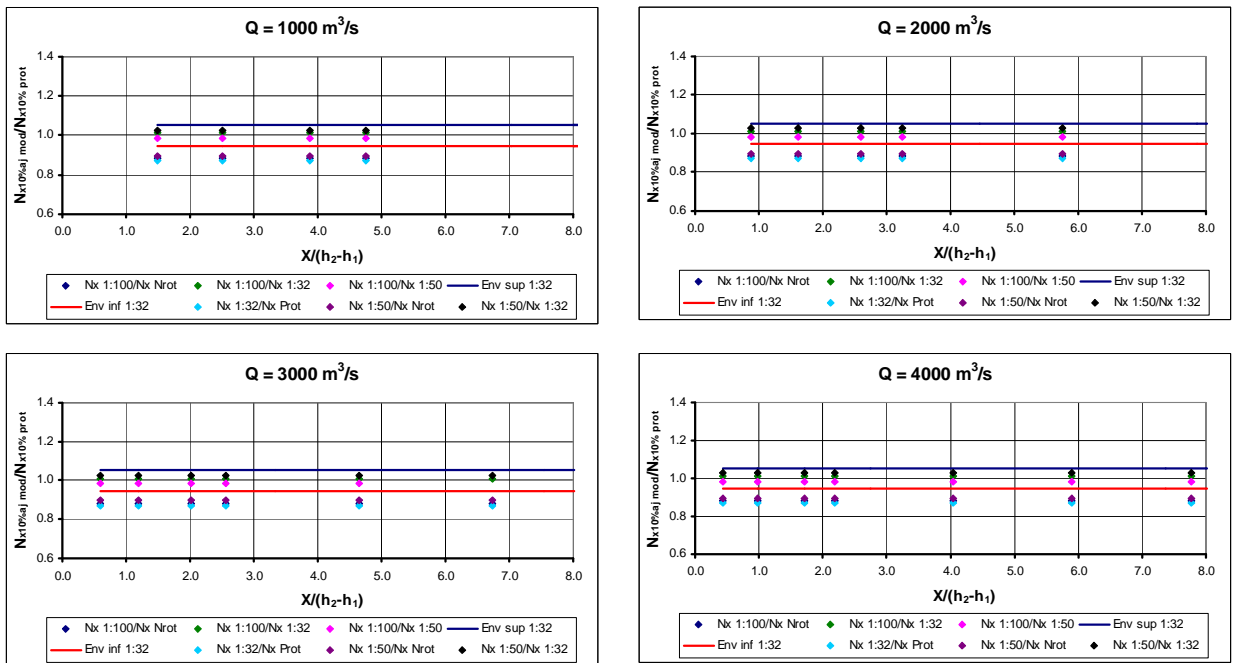


Figura F.18 - Distribuição longitudinal das diferenças relativas do coeficiente estatístico ($N_{x10\%}$) para a probabilidade de 10 %, considerando os ajustes determinados para as diferentes escalas. As envoltórias foram definidas com base nas medições realizadas no modelo 1:32.

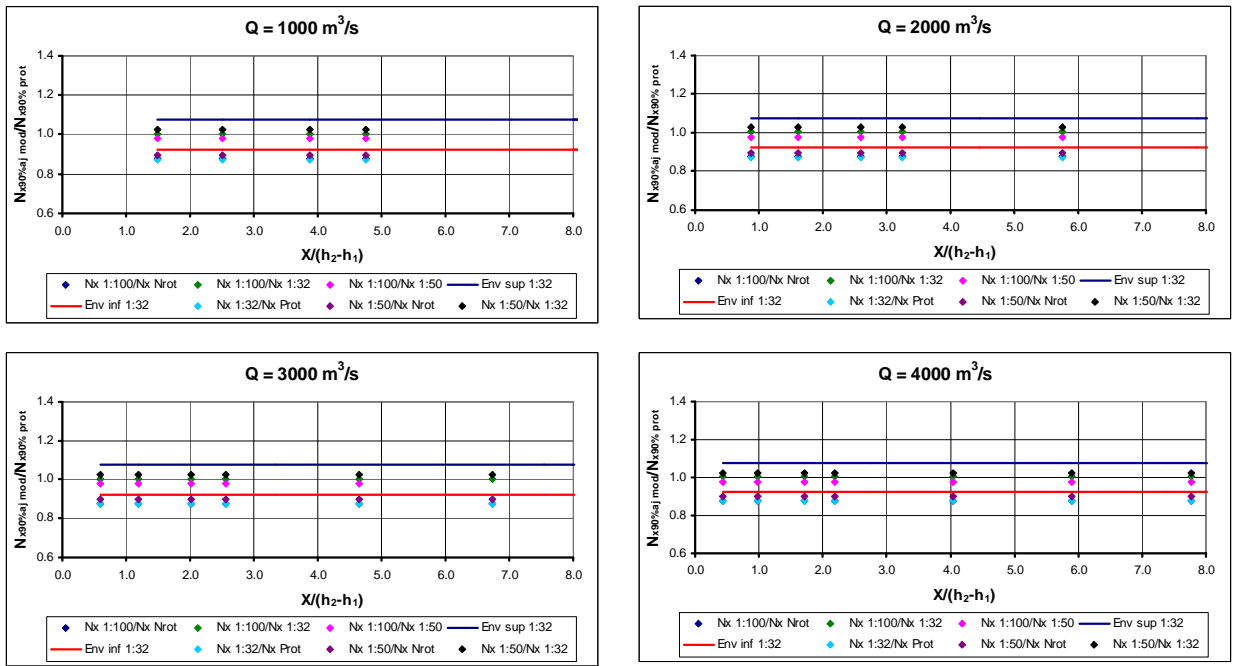


Figura F.19 - Distribuição longitudinal das diferenças relativas do coeficiente estatístico ($N_{x90\%}$) para a probabilidade de 90 %, considerando os ajustes determinados para as diferentes escalas. As envoltórias foram definidas com base nas medições realizadas no modelo 1:32.

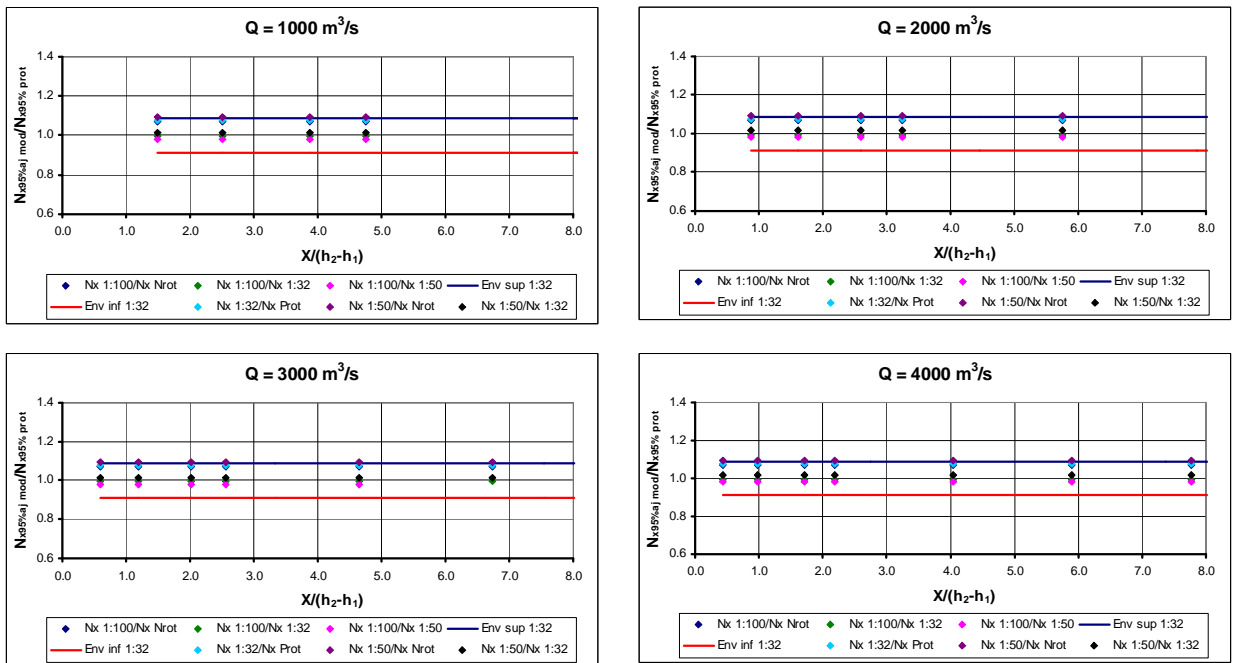


Figura F.20 - Distribuição longitudinal das diferenças relativas do coeficiente estatístico ($N_{x95\%}$) para a probabilidade de 95 %, considerando os ajustes determinados para as diferentes escalas. As envoltórias foram definidas com base nas medições realizadas no modelo 1:32.

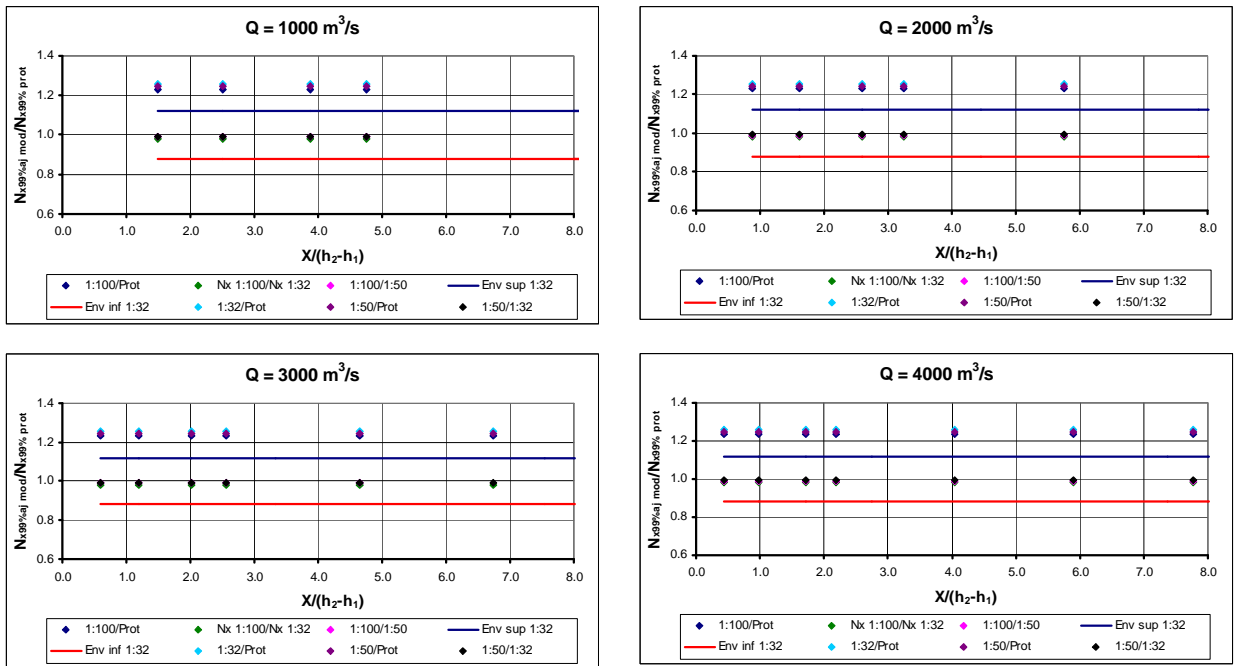


Figura F.21 - Distribuição longitudinal das diferenças relativas do coeficiente estatístico ($N_{x99\%}$) para a probabilidade de 99 %, considerando os ajustes determinados para as diferentes escalas. As envoltórias foram definidas com base nas medições realizadas no modelo 1:32.

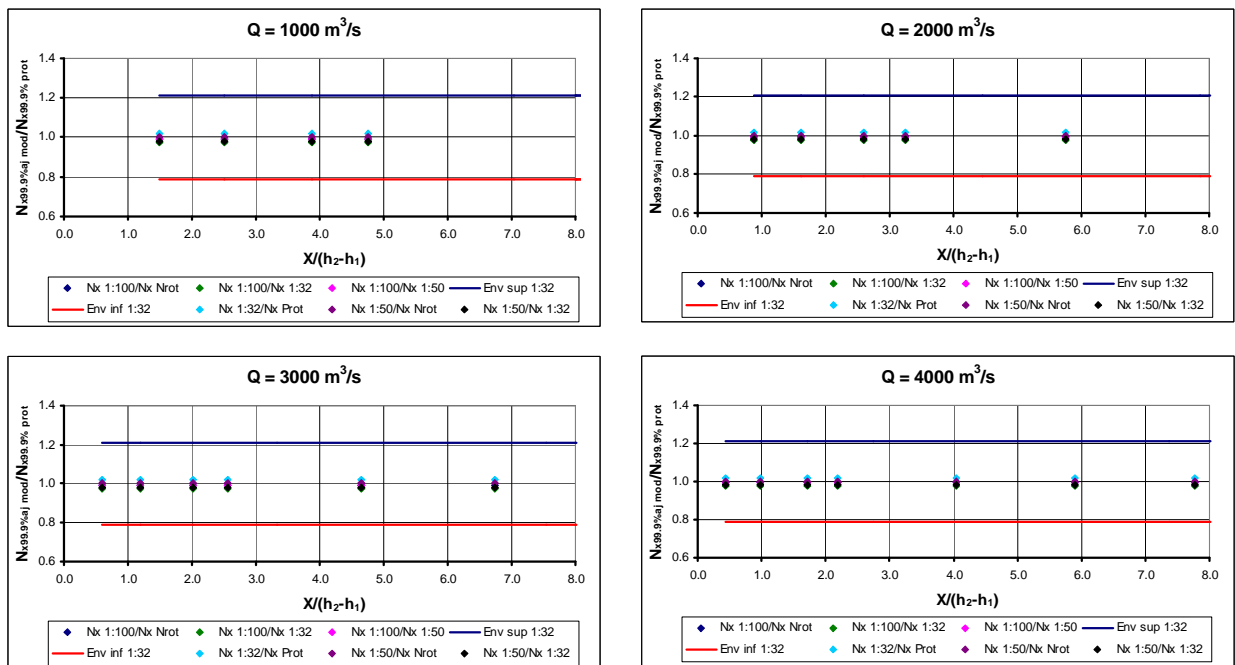


Figura F.22 - Distribuição longitudinal das diferenças relativas do coeficiente estatístico ($N_{x99.9\%}$) para a probabilidade de 99,9 %, considerando os ajustes determinados para as diferentes escalas. As envoltórias foram definidas com base nas medições realizadas no modelo 1:32.

F.3 - Valores do coeficiente estatístico para as diferentes tomadas, condições de escoamento e probabilidades de ocorrência (valores obtidos das amostras de dados).

Tabela F.5 - Valores do coeficiente estatístico para a probabilidade de 0,1 % (considerando as amostras obtidas no protótipo e nas diferentes escalas de modelo reduzido).

Fr*	X/(h ₂ -h ₁)*	N _{x0,1 prot}	N _{x0,1 mod. 1:32}	N _{x0,1 mod. 1:50}	N _{x0,1 mod. 1:100}
9,35	1.49	-3.62	-3.12	-3.14	-3.17
	2.50	-3.62	-3.54	-3.34	-3.45
	3.87	-3.62	-3.28	-3.09	-3.59
	4.76	-3.62	-3.50	-3.25	-3.67
	8.23	-3.62	-3.74	-3.52	-3.98
	11.71	-3.62	-5.72	-3.53	-4.48
	15.18	-3.62	-3.49	-3.29	-4.62
7,01	0.88	-3.62	-3.51	-3.53	-2.81
	1.61	-3.62	-3.94	-3.44	-3.39
	2.60	-3.62	-3.19	-2.99	-3.39
	3.24	-3.62	-3.16	-3.17	-3.39
	5.76	-3.62	-3.64	-3.65	-3.55
	8.27	-3.62	-5.19	-4.32	-4.19
	10.79	-3.62	-5.84	-3.07	-4.56
5,95	0.59	-3.62	-2.80	-2.91	-2.67
	1.20	-3.62	-3.59	-3.39	-3.52
	2.02	-3.62	-3.16	-3.10	-3.33
	2.56	-3.62	-2.98	-3.24	-3.22
	4.65	-3.62	-3.44	-3.64	-3.45
	6.74	-3.62	-4.24	-4.23	-3.96
	8.84	-3.62	-5.43	-3.18	-2.86
5,23	0.45	-3.62	-2.57	-2.85	-2.82
	0.99	-3.62	-3.26	-3.10	-3.57
	1.72	-3.62	-3.24	-2.89	-3.24
	2.19	-3.62	-2.94	-3.17	-3.14
	4.05	-3.62	-3.69	-3.67	-3.64
	5.91	-3.62	-4.28	-4.32	-3.91
	7.76	-3.62	-4.91	-3.56	-4.32

* Os valores apresentados correspondem ao protótipo da UHE Porto Colômbia.

Tabela F.6 - Valores do coeficiente estatístico para a probabilidade de 1 % (considerando as amostras obtidas no protótipo e nas diferentes escalas de modelo reduzido).

Fr*	$X/(h_2-h_1)^*$	$N_{x1 \text{ prot}}$	$N_{x1 \text{ mod. 1:32}}$	$N_{x1 \text{ mod. 1:50}}$	$N_{x1 \text{ mod. 1:100}}$
9,35	1.49	-2.43	-2.22	-2.23	-2.31
	2.50	-2.43	-2.47	-2.38	-2.46
	3.87	-2.43	-2.33	-2.26	-2.55
	4.76	-2.43	-2.31	-2.29	-2.57
	8.23	-2.43	-2.42	-2.38	-2.86
	11.71	-2.43	-2.95	-2.40	-3.33
	15.18	-2.43	-2.38	-1.92	-3.81
7,01	0.88	-2.43	-2.32	-2.36	-2.14
	1.61	-2.43	-2.55	-2.41	-2.39
	2.60	-2.43	-2.30	-2.21	-2.41
	3.24	-2.43	-2.26	-2.23	-2.31
	5.76	-2.43	-2.36	-2.40	-2.44
	8.27	-2.43	-3.01	-2.56	-2.97
	10.79	-2.43	-2.79	-2.09	-3.66
5,95	0.59	-2.43	-2.03	-2.07	-2.12
	1.20	-2.43	-2.55	-2.38	-2.43
	2.02	-2.43	-2.26	-2.23	-2.36
	2.56	-2.43	-2.19	-2.23	-2.26
	4.65	-2.43	-2.34	-2.42	-2.35
	6.74	-2.43	-2.53	-2.59	-2.70
	8.84	-2.43	-2.92	-2.30	-2.26
5,23	0.45	-2.43	-1.95	-2.07	-2.08
	0.99	-2.43	-2.36	-2.25	-2.42
	1.72	-2.43	-2.29	-2.17	-2.33
	2.19	-2.43	-2.15	-2.22	-2.22
	4.05	-2.43	-2.37	-2.37	-2.34
	5.91	-2.43	-2.52	-2.56	-2.61
	7.76	-2.43	-2.80	-2.44	-3.06

* Os valores apresentados correspondem ao protótipo da UHE Porto Colômbia.

Tabela F.7 - Valores do coeficiente estatístico para a probabilidade de 5 % (considerando as amostras obtidas no protótipo e nas diferentes escalas de modelo reduzido).

Fr*	$X/(h_2-h_1)^*$	$N_{x5 \text{ prot}}$	$N_{x5 \text{ mod. 1:32}}$	$N_{x5 \text{ mod. 1:50}}$	$N_{x5 \text{ mod. 1:100}}$
9,35	1.49	-1.63	-1.54	-1.53	-1.63
	2.50	-1.63	-1.66	-1.61	-1.65
	3.87	-1.63	-1.59	-1.59	-1.67
	4.76	-1.63	-1.57	-1.56	-1.61
	8.23	-1.63	-1.57	-1.59	-1.62
	11.71	-1.63	-1.49	-1.53	-1.70
	15.18	-1.63	-1.68	-1.52	-1.40
7,01	0.88	-1.63	-1.53	-1.55	-1.56
	1.61	-1.63	-1.67	-1.60	-1.61
	2.60	-1.63	-1.58	-1.55	-1.64
	3.24	-1.63	-1.56	-1.53	-1.55
	5.76	-1.63	-1.55	-1.58	-1.59
	8.27	-1.63	-1.75	-1.62	-1.67
	10.79	-1.63	-1.59	-1.56	-1.53
5,95	0.59	-1.63	-1.46	-1.47	-1.55
	1.20	-1.63	-1.70	-1.64	-1.64
	2.02	-1.63	-1.58	-1.57	-1.61
	2.56	-1.63	-1.53	-1.54	-1.56
	4.65	-1.63	-1.54	-1.55	-1.57
	6.74	-1.63	-1.60	-1.63	-1.68
	8.84	-1.63	-1.68	-1.59	-1.05
5,23	0.45	-1.63	-1.42	-1.47	-1.51
	0.99	-1.63	-1.63	-1.60	-1.64
	1.72	-1.63	-1.57	-1.56	-1.60
	2.19	-1.63	-1.51	-1.53	-1.53
	4.05	-1.63	-1.55	-1.55	-1.55
	5.91	-1.63	-1.57	-1.62	-1.67
	7.76	-1.63	-1.62	-1.62	-1.72

* Os valores apresentados correspondem ao protótipo da UHE Porto Colômbia.

Tabela F.8 - Valores do coeficiente estatístico para a probabilidade de 10 % (considerando as amostras obtidas no protótipo e nas diferentes escalas de modelo reduzido).

Fr*	$X/(h_2-h_1)^*$	$N_{x10\text{ prot}}$	$N_{x10\text{ mod. 1:32}}$	$N_{x10\text{ mod. 1:50}}$	$N_{x10\text{ mod. 1:100}}$
9,35	1.49	-1.24	-1.21	-1.20	-1.26
	2.50	-1.24	-1.26	-1.24	-1.21
	3.87	-1.24	-1.22	-1.22	-1.23
	4.76	-1.24	-1.21	-1.23	-1.20
	8.23	-1.24	-1.19	-1.24	-1.15
	11.71	-1.24	-1.04	-1.27	-1.03
	15.18	-1.24	-1.26	-1.33	-0.82
7,01	0.88	-1.24	-1.17	-1.19	-1.25
	1.61	-1.24	-1.25	-1.22	-1.23
	2.60	-1.24	-1.24	-1.23	-1.24
	3.24	-1.24	-1.22	-1.20	-1.18
	5.76	-1.24	-1.18	-1.20	-1.19
	8.27	-1.24	-1.23	-1.23	-1.18
	10.79	-1.24	-1.16	-1.29	-0.85
5,95	0.59	-1.24	-1.16	-1.15	-1.24
	1.20	-1.24	-1.29	-1.26	-1.26
	2.02	-1.24	-1.23	-1.23	-1.26
	2.56	-1.24	-1.20	-1.19	-1.21
	4.65	-1.24	-1.17	-1.18	-1.21
	6.74	-1.24	-1.20	-1.24	-1.17
	8.84	-1.24	-1.19	-1.27	-0.58
5,23	0.45	-1.24	-1.14	-1.16	-1.20
	0.99	-1.24	-1.25	-1.26	-1.24
	1.72	-1.24	-1.21	-1.24	-1.25
	2.19	-1.24	-1.19	-1.19	-1.20
	4.05	-1.24	-1.18	-1.19	-1.18
	5.91	-1.24	-1.18	-1.20	-1.20
	7.76	-1.24	-1.20	-1.26	-1.09

* Os valores apresentados correspondem ao protótipo da UHE Porto Colômbia.

Tabela F.9 - Valores do coeficiente estatístico para a probabilidade de 90 % (considerando as amostras obtidas no protótipo e nas diferentes escalas de modelo reduzido).

Fr*	$X/(h_2-h_1)^*$	$N_{x90 \text{ prot}}$	$N_{x90 \text{ mod. 1:32}}$	$N_{x90 \text{ mod. 1:50}}$	$N_{x90 \text{ mod. 1:100}}$
9,35	1.49	1.23	1.27	1.28	1.26
	2.50	1.23	1.23	1.25	1.22
	3.87	1.23	1.24	1.26	1.20
	4.76	1.23	1.24	1.24	1.20
	8.23	1.23	1.23	1.28	1.19
	11.71	1.23	1.12	1.25	1.08
	15.18	1.23	1.25	1.23	1.02
7,01	0.88	1.23	1.25	1.25	1.30
	1.61	1.23	1.22	1.22	1.23
	2.60	1.23	1.25	1.26	1.25
	3.24	1.23	1.24	1.25	1.22
	5.76	1.23	1.22	1.22	1.21
	8.27	1.23	1.10	1.25	1.18
	10.79	1.23	1.11	1.28	1.06
5,95	0.59	1.23	1.27	1.27	1.29
	1.20	1.23	1.23	1.26	1.21
	2.02	1.23	1.27	1.27	1.24
	2.56	1.23	1.26	1.25	1.23
	4.65	1.23	1.24	1.20	1.22
	6.74	1.23	1.21	1.21	1.17
	8.84	1.23	1.14	1.27	0.69
5,23	0.45	1.26	1.27	1.26	1.27
	0.99	1.26	1.26	1.25	1.23
	1.72	1.26	1.24	1.28	1.25
	2.19	1.26	1.24	1.24	1.26
	4.05	1.26	1.22	1.22	1.21
	5.91	1.26	1.21	1.20	1.20
	7.76	1.26	1.15	1.27	1.15

* Os valores apresentados correspondem ao protótipo da UHE Porto Colômbia.

Tabela F.10 - Valores do coeficiente estatístico para a probabilidade de 95 % (considerando as amostras obtidas no protótipo e nas diferentes escalas de modelo reduzido).

Fr*	$X/(h_2-h_1)^*$	$N_{x95 \text{ prot}}$	$N_{x95 \text{ mod. 1:32}}$	$N_{x95 \text{ mod. 1:50}}$	$N_{x95 \text{ mod. 1:100}}$
9,35	1.49	1.61	1.72	1.71	1.69
	2.50	1.61	1.61	1.62	1.59
	3.87	1.61	1.66	1.66	1.64
	4.76	1.61	1.66	1.68	1.61
	8.23	1.61	1.66	1.63	1.57
	11.71	1.61	1.49	1.51	1.56
	15.18	1.61	1.66	1.52	1.59
7,01	0.88	1.61	1.73	1.70	1.73
	1.61	1.61	1.59	1.65	1.64
	2.60	1.61	1.67	1.70	1.61
	3.24	1.61	1.67	1.68	1.65
	5.76	1.61	1.68	1.63	1.66
	8.27	1.61	1.42	1.58	1.58
	10.79	1.61	1.46	1.54	1.62
5,95	0.59	1.61	1.78	1.75	1.73
	1.20	1.61	1.57	1.62	1.62
	2.02	1.61	1.68	1.68	1.65
	2.56	1.61	1.71	1.68	1.66
	4.65	1.61	1.70	1.63	1.65
	6.74	1.61	1.60	1.56	1.62
	8.84	1.61	1.45	1.59	1.02
5,23	0.45	1.61	1.78	1.72	1.78
	0.99	1.61	1.62	1.65	1.63
	1.72	1.61	1.67	1.71	1.69
	2.19	1.61	1.70	1.67	1.67
	4.05	1.61	1.67	1.67	1.65
	5.91	1.61	1.60	1.59	1.62
	7.76	1.61	1.51	1.57	1.60

* Os valores apresentados correspondem ao protótipo da UHE Porto Colômbia.

Tabela F.11 - Valores do coeficiente estatístico para a probabilidade de 99 % (considerando as amostras obtidas no protótipo e nas diferentes escalas de modelo reduzido).

Fr*	$X/(h_2-h_1)^*$	$N_{x99 \text{ prot}}$	$N_{x99 \text{ mod. 1:32}}$	$N_{x99 \text{ mod. 1:50}}$	$N_{x99 \text{ mod. 1:100}}$
9,35	1.49	2.42	2.71	2.69	2.48
	2.50	2.42	2.38	2.52	2.47
	3.87	2.42	2.56	2.56	2.45
	4.76	2.42	2.57	2.62	2.57
	8.23	2.42	2.59	2.37	2.51
	11.71	2.42	2.38	1.95	2.42
	15.18	2.42	2.36	1.82	2.63
7,01	0.88	2.42	2.74	2.66	2.55
	1.61	2.42	2.36	2.56	2.53
	2.60	2.42	2.58	2.62	2.47
	3.24	2.42	2.63	2.61	2.67
	5.76	2.42	2.69	2.64	2.61
	8.27	2.42	2.10	2.19	2.40
	10.79	2.42	2.17	1.90	2.63
5,95	0.59	2.42	2.90	2.88	2.57
	1.20	2.42	2.26	2.38	2.50
	2.02	2.42	2.55	2.62	2.50
	2.56	2.42	2.73	2.71	2.62
	4.65	2.42	2.66	2.68	2.67
	6.74	2.42	2.43	2.34	2.44
	8.84	2.42	2.19	1.99	1.62
5,23	0.45	2.42	2.98	2.84	2.75
	0.99	2.42	2.42	2.48	2.45
	1.72	2.42	2.64	2.61	2.51
	2.19	2.42	2.81	2.71	2.66
	4.05	2.42	2.72	2.69	2.72
	5.91	2.42	2.49	2.45	2.50
	7.76	2.42	2.31	2.27	2.41

* Os valores apresentados correspondem ao protótipo da UHE Porto Colômbia.

Tabela F.12 - Valores do coeficiente estatístico para a probabilidade de 99,9 % (considerando as amostras obtidas no protótipo e nas diferentes escalas de modelo reduzido).

Fr*	$X/(h_2-h_1)^*$	$N_{x99,9 \text{ prot}}$	$N_{x99,9 \text{ mod. 1:32}}$	$N_{x99,9 \text{ mod. 1:50}}$	$N_{x99,9 \text{ mod. 1:100}}$
9,35	1.49	3.55	3.94	3.97	3.58
	2.50	3.55	3.51	3.75	3.72
	3.87	3.55	3.74	3.97	3.69
	4.76	3.55	4.03	4.04	4.01
	8.23	3.55	3.81	3.46	3.72
	11.71	3.55	3.89	2.47	3.29
	15.18	3.55	3.13	2.41	3.54
7,01	0.88	3.55	3.98	3.85	3.65
	1.61	3.55	3.31	3.82	3.93
	2.60	3.55	3.84	3.98	3.75
	3.24	3.55	4.12	4.25	4.31
	5.76	3.55	4.12	4.22	4.21
	8.27	3.55	3.10	3.07	3.29
	10.79	3.55	3.34	2.43	3.41
5,95	0.59	3.55	4.37	4.43	3.63
	1.20	3.55	3.15	3.48	3.83
	2.02	3.55	3.72	3.96	3.82
	2.56	3.55	4.29	4.38	4.22
	4.65	3.55	4.27	4.50	4.20
	6.74	3.55	3.73	3.37	3.65
	8.84	3.55	3.28	2.62	2.15
5,23	0.45	3.64	4.83	4.69	4.03
	0.99	3.64	3.70	3.70	3.75
	1.72	3.64	4.17	3.82	3.65
	2.19	3.64	4.62	4.43	4.17
	4.05	3.64	4.19	4.31	4.36
	5.91	3.64	3.91	3.81	3.81
	7.76	3.64	3.59	3.28	3.39

* Os valores apresentados correspondem ao protótipo da UHE Porto Colômbia.

F.4 - Valores do coeficiente estatístico para as diferentes tomadas, condições de escoamento e probabilidades de ocorrência (obtidos a partir da metodologia proposta por Wiest, 2008).

Tabela F.13 - Valores do coeficiente estatístico para a probabilidade de 0,1 % (considerando os ajustes determinados para as diferentes escalas de modelo reduzido). Metodologia proposta por Wiest (2008).

Fr*	X/(h ₂ -h ₁)*	N _{x0,1%aj mod. 1:32}	N _{x0,1%aj mod. 1:50}	N _{x0,1%aj mod. 1:100}
9,35	1.49	-3.21	-3.11	-3.26
	2.50	-3.21	-3.11	-3.26
	3.87	-3.21	-3.11	-3.26
	4.76	-3.21	-3.11	-3.26
	8.23	-3.21	-3.11	-3.26
	11.71	-3.21	-3.11	-3.26
	15.18	-3.21	-3.11	-3.26
7,01	0.88	-3.21	-3.11	-3.26
	1.61	-3.21	-3.11	-3.26
	2.60	-3.21	-3.11	-3.26
	3.24	-3.21	-3.11	-3.26
	5.76	-3.21	-3.11	-3.26
	8.27	-3.21	-3.11	-3.26
	10.79	-3.21	-3.11	-3.26
5,95	0.59	-3.21	-3.11	-3.26
	1.20	-3.21	-3.11	-3.26
	2.02	-3.21	-3.11	-3.26
	2.56	-3.21	-3.11	-3.26
	4.65	-3.21	-3.11	-3.26
	6.74	-3.21	-3.11	-3.26
	8.84	-3.21	-3.11	-3.26
5,23	0.45	-3.21	-3.11	-3.26
	0.99	-3.21	-3.11	-3.26
	1.72	-3.21	-3.11	-3.26
	2.19	-3.21	-3.11	-3.26
	4.05	-3.21	-3.11	-3.26
	5.91	-3.21	-3.11	-3.26
	7.76	-3.21	-3.11	-3.26

* Os valores apresentados correspondem ao protótipo da UHE Porto Colômbia.

Tabela F.14 - Valores do coeficiente estatístico para a probabilidade de 1 % (considerando os ajustes determinados para as diferentes escalas de modelo reduzido). Metodologia proposta por Wiest (2008).

Fr*	X/(h ₂ -h ₁)*	N _{x1%aj mod. 1:32}	N _{x1%aj mod. 1:50}	N _{x1%aj mod. 1:100}
9,35	1.49	-2.77	-2.71	-2.81
	2.50	-2.77	-2.71	-2.81
	3.87	-2.77	-2.71	-2.81
	4.76	-2.77	-2.71	-2.81
	8.23	-2.77	-2.71	-2.81
	11.71	-2.77	-2.71	-2.81
	15.18	-2.77	-2.71	-2.81
7,01	0.88	-2.77	-2.71	-2.81
	1.61	-2.77	-2.71	-2.81
	2.60	-2.77	-2.71	-2.81
	3.24	-2.77	-2.71	-2.81
	5.76	-2.77	-2.71	-2.81
	8.27	-2.77	-2.71	-2.81
	10.79	-2.77	-2.71	-2.81
5,95	0.59	-2.77	-2.71	-2.81
	1.20	-2.77	-2.71	-2.81
	2.02	-2.77	-2.71	-2.81
	2.56	-2.77	-2.71	-2.81
	4.65	-2.77	-2.71	-2.81
	6.74	-2.77	-2.71	-2.81
	8.84	-2.77	-2.71	-2.81
5,23	0.45	-2.77	-2.71	-2.81
	0.99	-2.77	-2.71	-2.81
	1.72	-2.77	-2.71	-2.81
	2.19	-2.77	-2.71	-2.81
	4.05	-2.77	-2.71	-2.81
	5.91	-2.77	-2.71	-2.81
	7.76	-2.77	-2.71	-2.81

* Os valores apresentados correspondem ao protótipo da UHE Porto Colômbia.

Tabela F.15 - Valores do coeficiente estatístico para a probabilidade de 5 % (considerando os ajustes determinados para as diferentes escalas de modelo reduzido). Metodologia proposta por Wiest (2008).

Fr*	X/(h ₂ -h ₁)*	N _{x5%aj mod. 1:32}	N _{x5%aj mod. 1:50}	N _{x5%aj mod. 1:100}
9,35	1.49	-1.68	-1.70	-1.70
	2.50	-1.68	-1.70	-1.70
	3.87	-1.68	-1.70	-1.70
	4.76	-1.68	-1.70	-1.70
	8.23	-1.68	-1.70	-1.70
	11.71	-1.68	-1.70	-1.70
	15.18	-1.68	-1.70	-1.70
7,01	0.88	-1.68	-1.70	-1.70
	1.61	-1.68	-1.70	-1.70
	2.60	-1.68	-1.70	-1.70
	3.24	-1.68	-1.70	-1.70
	5.76	-1.68	-1.70	-1.70
	8.27	-1.68	-1.70	-1.70
	10.79	-1.68	-1.70	-1.70
5,95	0.59	-1.68	-1.70	-1.70
	1.20	-1.68	-1.70	-1.70
	2.02	-1.68	-1.70	-1.70
	2.56	-1.68	-1.70	-1.70
	4.65	-1.68	-1.70	-1.70
	6.74	-1.68	-1.70	-1.70
	8.84	-1.68	-1.70	-1.70
5,23	0.45	-1.68	-1.70	-1.70
	0.99	-1.68	-1.70	-1.70
	1.72	-1.68	-1.70	-1.70
	2.19	-1.68	-1.70	-1.70
	4.05	-1.68	-1.70	-1.70
	5.91	-1.68	-1.70	-1.70
	7.76	-1.68	-1.70	-1.70

* Os valores apresentados correspondem ao protótipo da UHE Porto Colômbia.

Tabela F.16 - Valores do coeficiente estatístico para a probabilidade de 10 % (considerando os ajustes determinados para as diferentes escalas de modelo reduzido). Metodologia proposta por Wiest (2008).

Fr*	X/(h ₂ -h ₁)*	N _{x10%aj mod. 1:32}	N _{x10%aj mod. 1:50}	N _{x10%aj mod. 1:100}
9,35	1.49	-1.08	-1.11	-1.10
	2.50	-1.08	-1.11	-1.10
	3.87	-1.08	-1.11	-1.10
	4.76	-1.08	-1.11	-1.10
	8.23	-1.08	-1.11	-1.10
	11.71	-1.08	-1.11	-1.10
	15.18	-1.08	-1.11	-1.10
7,01	0.88	-1.08	-1.11	-1.10
	1.61	-1.08	-1.11	-1.10
	2.60	-1.08	-1.11	-1.10
	3.24	-1.08	-1.11	-1.10
	5.76	-1.08	-1.11	-1.10
	8.27	-1.08	-1.11	-1.10
	10.79	-1.08	-1.11	-1.10
5,95	0.88	-1.08	-1.11	-1.10
	1.61	-1.08	-1.11	-1.10
	2.60	-1.08	-1.11	-1.10
	3.24	-1.08	-1.11	-1.10
	5.76	-1.08	-1.11	-1.10
	8.27	-1.08	-1.11	-1.10
	10.79	-1.08	-1.11	-1.10
5,23	0.88	-1.08	-1.11	-1.10
	1.61	-1.08	-1.11	-1.10
	2.60	-1.08	-1.11	-1.10
	3.24	-1.08	-1.11	-1.10
	5.76	-1.08	-1.11	-1.10
	8.27	-1.08	-1.11	-1.10
	10.79	-1.08	-1.11	-1.10

* Os valores apresentados correspondem ao protótipo da UHE Porto Colômbia.

Tabela F.17 - Valores do coeficiente estatístico para a probabilidade de 90 % (considerando os ajustes determinados para as diferentes escalas de modelo reduzido). Metodologia proposta por Wiest (2008).

Fr*	X/(h ₂ -h ₁)*	N _{x90%aj mod. 1:32}	N _{x90%aj mod. 1:50}	N _{x90%aj mod. 1:100}
9,35	1.49	1.08	1.10	1.08
	2.50	1.08	1.10	1.08
	3.87	1.08	1.10	1.08
	4.76	1.08	1.10	1.08
	8.23	1.08	1.10	1.08
	11.71	1.08	1.10	1.08
	15.18	1.08	1.10	1.08
7,01	1.49	1.08	1.10	1.08
	2.50	1.08	1.10	1.08
	3.87	1.08	1.10	1.08
	4.76	1.08	1.10	1.08
	8.23	1.08	1.10	1.08
	11.71	1.08	1.10	1.08
	15.18	1.08	1.10	1.08
5,95	1.49	1.08	1.10	1.08
	2.50	1.08	1.10	1.08
	3.87	1.08	1.10	1.08
	4.76	1.08	1.10	1.08
	8.23	1.08	1.10	1.08
	11.71	1.08	1.10	1.08
	15.18	1.08	1.10	1.08
5,23	1.49	1.08	1.10	1.08
	2.50	1.08	1.10	1.08
	3.87	1.08	1.10	1.08
	4.76	1.08	1.10	1.08
	8.23	1.08	1.10	1.08
	11.71	1.08	1.10	1.08
	15.18	1.08	1.10	1.08

* Os valores apresentados correspondem ao protótipo da UHE Porto Colômbia.

Tabela F.18 - Valores do coeficiente estatístico para a probabilidade de 95 % (considerando os ajustes determinados para as diferentes escalas de modelo reduzido). Metodologia proposta por Wiest (2008).

Fr*	X/(h ₂ -h ₁)*	N _{x95%aj mod. 1:32}	N _{x95%aj mod. 1:50}	N _{x95%aj mod. 1:100}
9,35	1.49	1.73	1.76	1.73
	2.50	1.73	1.76	1.73
	3.87	1.73	1.76	1.73
	4.76	1.73	1.76	1.73
	8.23	1.73	1.76	1.73
	11.71	1.73	1.76	1.73
	15.18	1.73	1.76	1.73
7,01	1.49	1.73	1.76	1.73
	2.50	1.73	1.76	1.73
	3.87	1.73	1.76	1.73
	4.76	1.73	1.76	1.73
	8.23	1.73	1.76	1.73
	11.71	1.73	1.76	1.73
	15.18	1.73	1.76	1.73
5,95	1.49	1.73	1.76	1.73
	2.50	1.73	1.76	1.73
	3.87	1.73	1.76	1.73
	4.76	1.73	1.76	1.73
	8.23	1.73	1.76	1.73
	11.71	1.73	1.76	1.73
	15.18	1.73	1.76	1.73
5,23	1.49	1.73	1.76	1.73
	2.50	1.73	1.76	1.73
	3.87	1.73	1.76	1.73
	4.76	1.73	1.76	1.73
	8.23	1.73	1.76	1.73
	11.71	1.73	1.76	1.73
	15.18	1.73	1.76	1.73

* Os valores apresentados correspondem ao protótipo da UHE Porto Colômbia.

Tabela F.19 - Valores do coeficiente estatístico para a probabilidade de 99 % (considerando os ajustes determinados para as diferentes escalas de modelo reduzido). Metodologia proposta por Wiest (2008).

Fr*	X/(h ₂ -h ₁)*	N _{x99%aj mod. 1:32}	N _{x99%aj mod. 1:50}	N _{x99%aj mod. 1:100}
9,35	1.49	3.04	3.02	2.98
	2.50	3.04	3.02	2.98
	3.87	3.04	3.02	2.98
	4.76	3.04	3.02	2.98
	8.23	3.04	3.02	2.98
	11.71	3.04	3.02	2.98
	15.18	3.04	3.02	2.98
7,01	1.49	3.04	3.02	2.98
	2.50	3.04	3.02	2.98
	3.87	3.04	3.02	2.98
	4.76	3.04	3.02	2.98
	8.23	3.04	3.02	2.98
	11.71	3.04	3.02	2.98
	15.18	3.04	3.02	2.98
5,95	1.49	3.04	3.02	2.98
	2.50	3.04	3.02	2.98
	3.87	3.04	3.02	2.98
	4.76	3.04	3.02	2.98
	8.23	3.04	3.02	2.98
	11.71	3.04	3.02	2.98
	15.18	3.04	3.02	2.98
5,23	1.49	3.04	3.02	2.98
	2.50	3.04	3.02	2.98
	3.87	3.04	3.02	2.98
	4.76	3.04	3.02	2.98
	8.23	3.04	3.02	2.98
	11.71	3.04	3.02	2.98
	15.18	3.04	3.02	2.98

* Os valores apresentados correspondem ao protótipo da UHE Porto Colômbia.

Tabela F.20 - Valores do coeficiente estatístico para a probabilidade de 99,9 % (considerando os ajustes determinados para as diferentes escalas de modelo reduzido). Metodologia proposta por Wiest (2008).

Fr*	X/(h ₂ -h ₁)*	N _{x99,9%aj mod. 1:32}	N _{x99,9%aj mod. 1:50}	N _{x99,9%aj mod. 1:100}
9,35	1.49	3.62	3.55	3.53
	2.50	3.62	3.55	3.53
	3.87	3.62	3.55	3.53
	4.76	3.62	3.55	3.53
	8.23	3.62	3.55	3.53
	11.71	3.62	3.55	3.53
	15.18	3.62	3.55	3.53
7,01	1.49	3.62	3.55	3.53
	2.50	3.62	3.55	3.53
	3.87	3.62	3.55	3.53
	4.76	3.62	3.55	3.53
	8.23	3.62	3.55	3.53
	11.71	3.62	3.55	3.53
	15.18	3.62	3.55	3.53
5,95	1.49	3.62	3.55	3.53
	2.50	3.62	3.55	3.53
	3.87	3.62	3.55	3.53
	4.76	3.62	3.55	3.53
	8.23	3.62	3.55	3.53
	11.71	3.62	3.55	3.53
	15.18	3.62	3.55	3.53
5,23	1.49	3.62	3.55	3.53
	2.50	3.62	3.55	3.53
	3.87	3.62	3.55	3.53
	4.76	3.62	3.55	3.53
	8.23	3.62	3.55	3.53
	11.71	3.62	3.55	3.53
	15.18	3.62	3.55	3.53

* Os valores apresentados correspondem ao protótipo da UHE Porto Colômbia.

Anexo G - Previsão dos valores extremos de pressão com base na metodologia proposta por Wiest (2008)

G.1 - Análise das pressões extremas (dados amostrais) nas diferentes escalas de modelo e protótipo

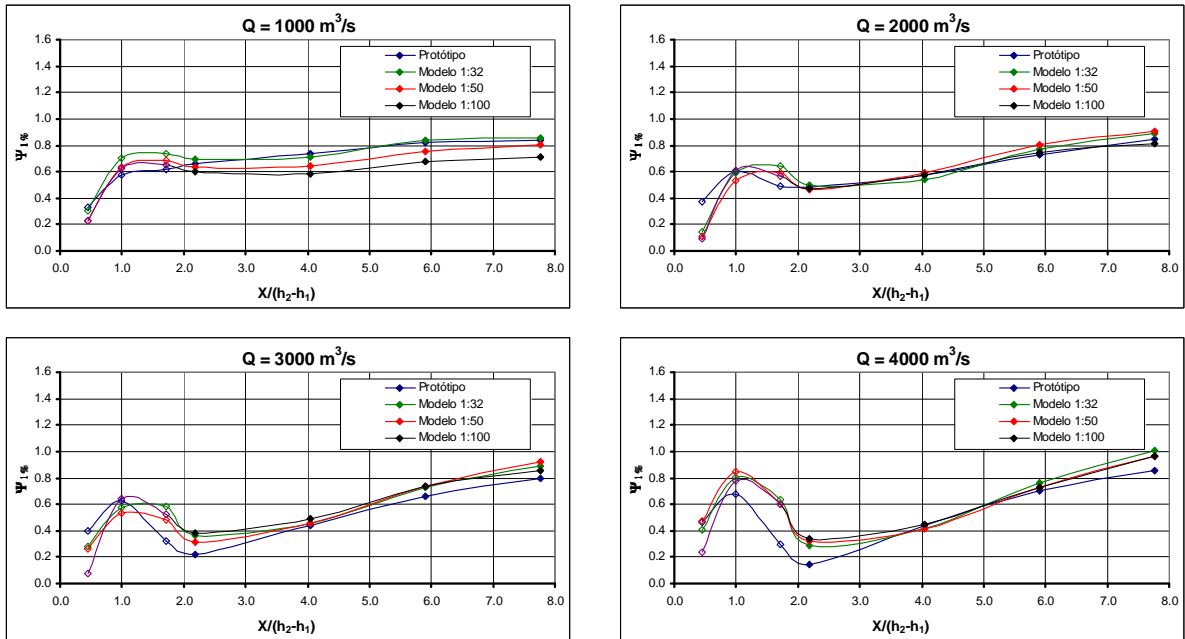


Figura G.1 - Distribuições longitudinais do coeficiente da pressão com 1 % de probabilidade ($\Psi_{1\%}$) observadas no protótipo e nos modelos nas escalas 1:32; 1:50 e 1:100, para as vazões 1000 a 4000 m^3/s . As tomadas situadas no trecho curvo estão representadas pelos símbolos vazados (\diamond).

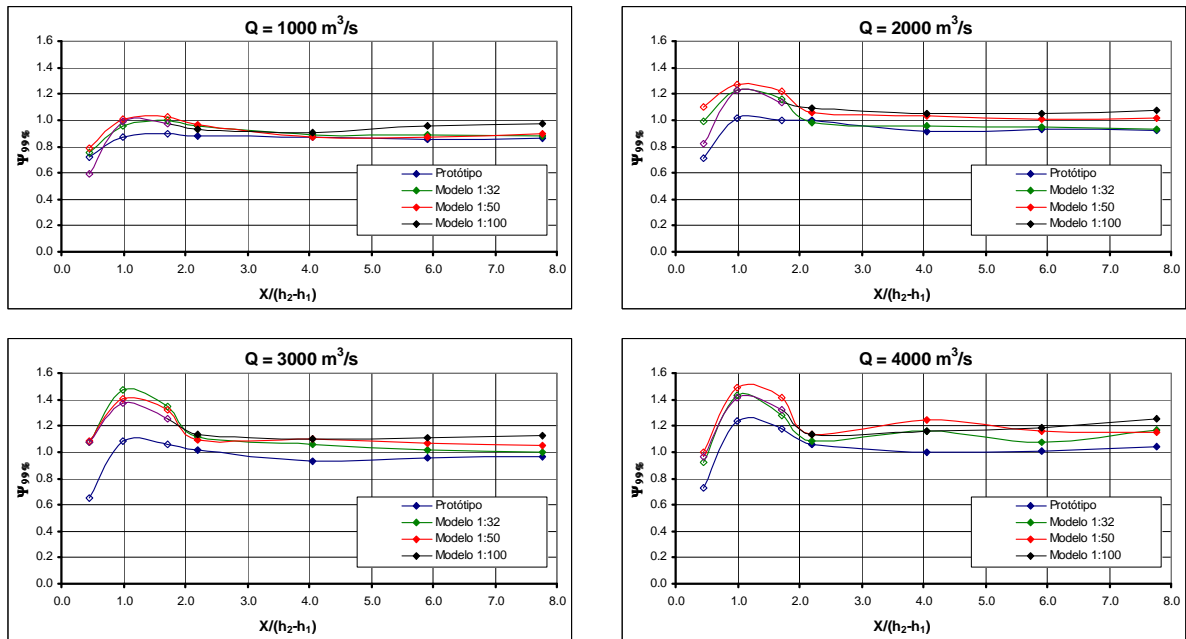


Figura G.2 - Distribuições longitudinais do coeficiente da pressão com 99 % de probabilidade ($\Psi_{99\%}$) observadas no protótipo e nos modelos nas escalas 1:32; 1:50 e 1:100, para as vazões 1000 a 4000 m^3/s . As tomadas situadas no trecho curvo estão representadas pelos símbolos vazados (\diamond).

G.2 - Análise da dispersão natural das pressões extremas e dos efeitos de escala

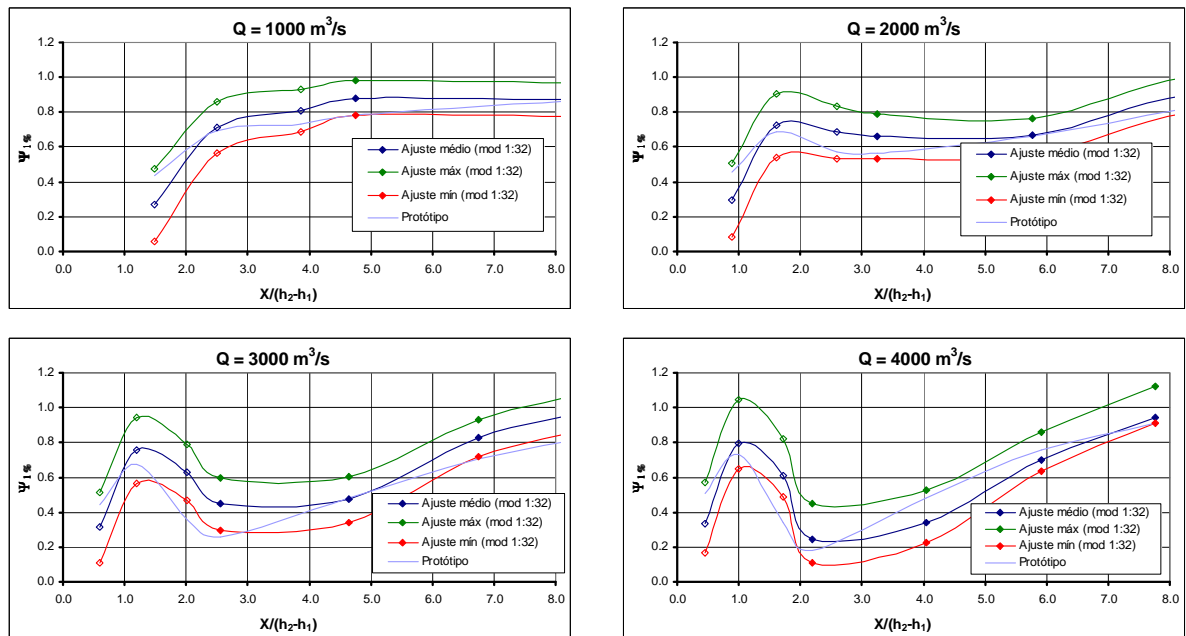


Figura G.3 - Dispersão natural da pressão com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 1 % ($\Psi_{1\%}$) considerando as amostras obtidas no modelo 1:32 da UHE Porto Colômbia. Os pontos situados no trecho curvo estão representados pelos símbolos vazados (\diamond).

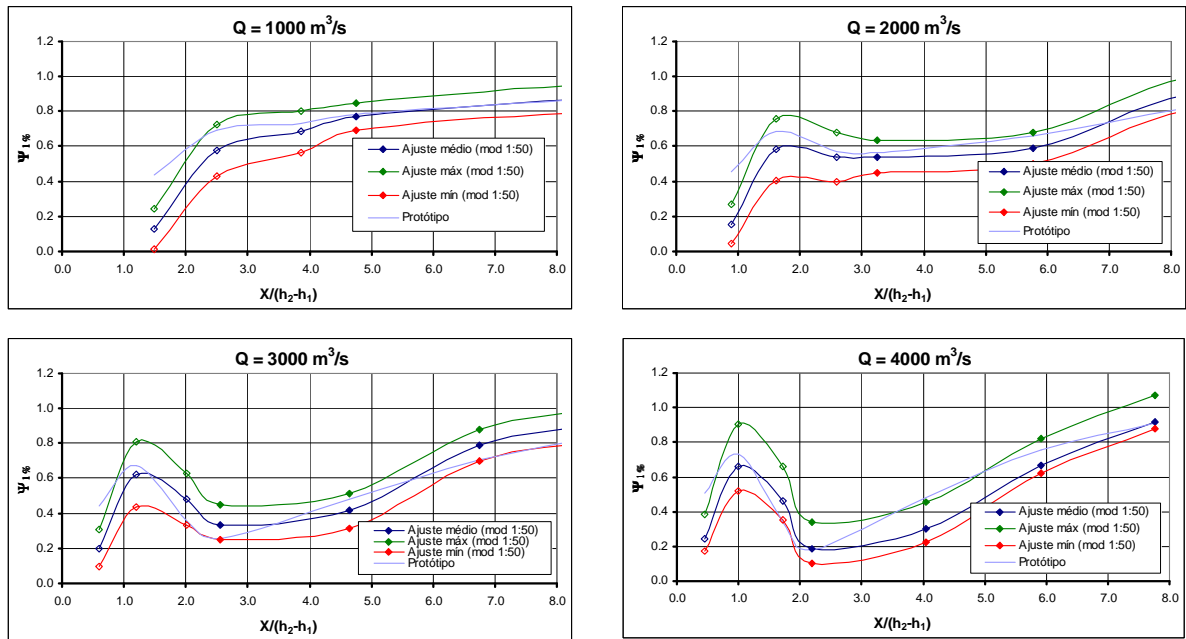


Figura G.4 - Dispersão natural da pressão com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 1 % ($\Psi_{1\%}$) considerando as amostras obtidas no modelo 1:50 da UHE Porto Colômbia. Os pontos situados no trecho curvo estão representados pelos símbolos vazados (\diamond).

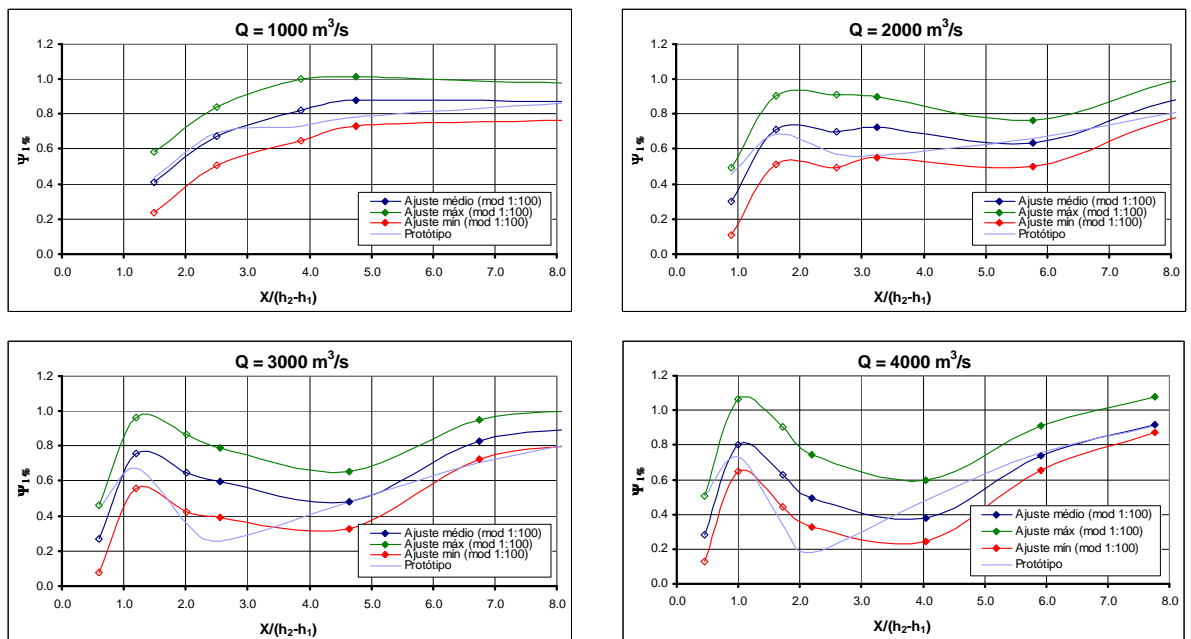


Figura G.5 - Dispersão natural da pressão com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 1 % ($\Psi_{1\%}$) considerando as amostras obtidas no modelo 1:100 da UHE Porto Colômbia. Os pontos situados no trecho curvo estão representados pelos símbolos vazados (\diamond).

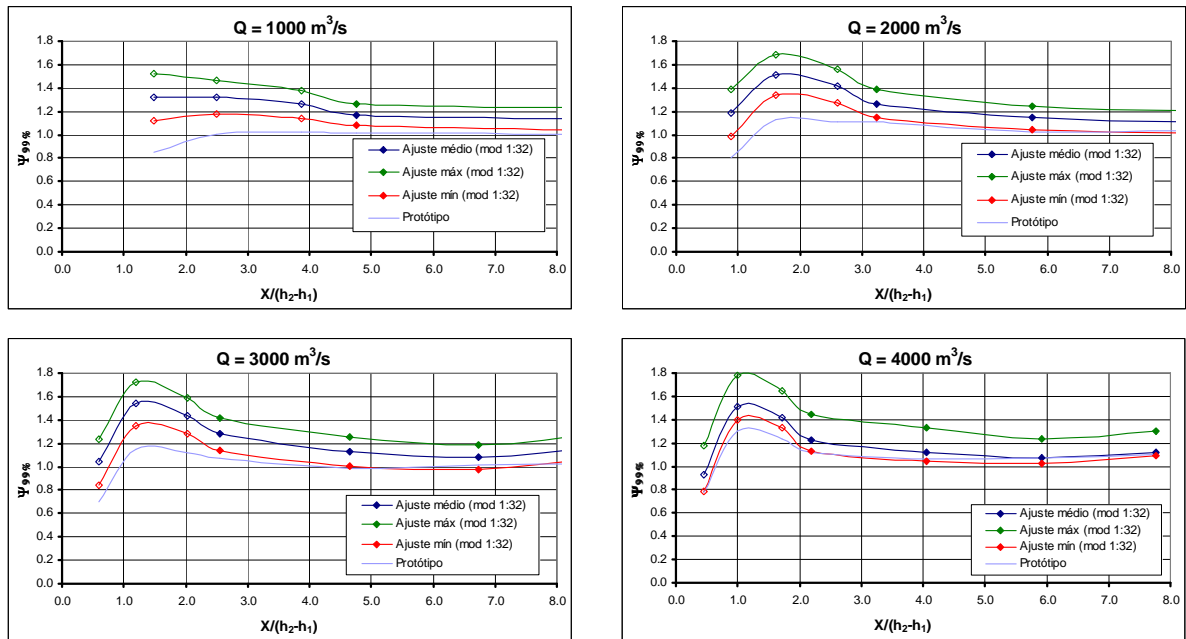


Figura G.6 - Dispersão natural da pressão com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 99 % ($\Psi_{99\%}$) considerando as amostras obtidas no modelo 1:32 da UHE Porto Colômbia. Os pontos situados no trecho curvo estão representados pelos símbolos vazados (\diamond).

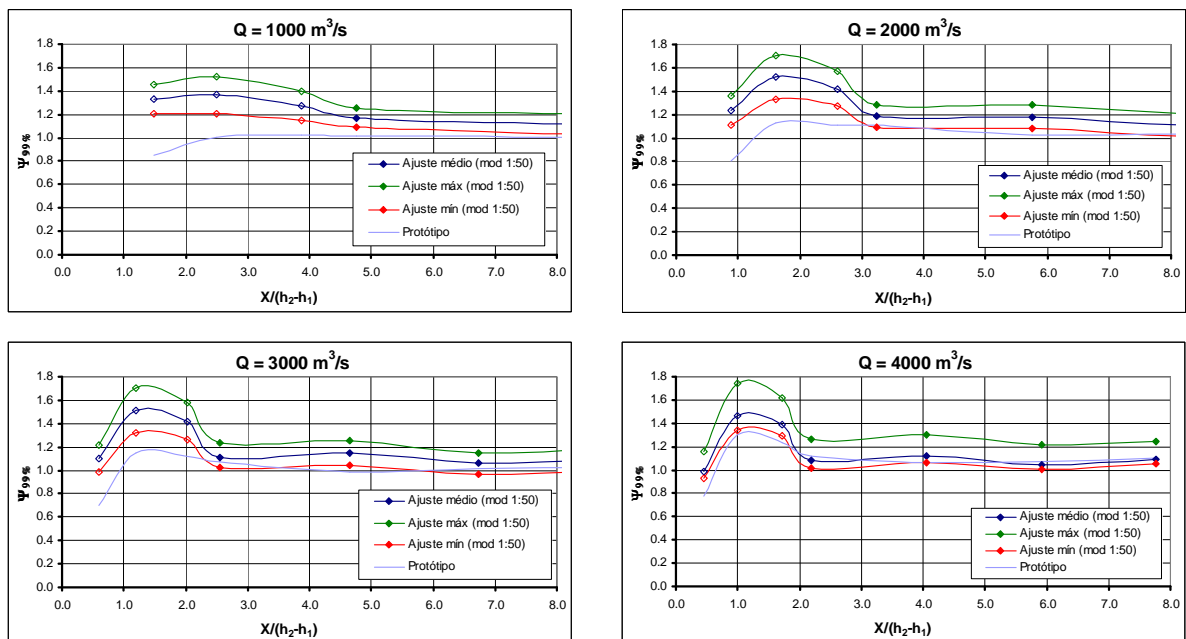


Figura G.7 - Dispersão natural da pressão com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 99 % ($\Psi_{99\%}$) considerando as amostras obtidas no modelo 1:50 da UHE Porto Colômbia. Os pontos situados no trecho curvo estão representados pelos símbolos vazados (\diamond).

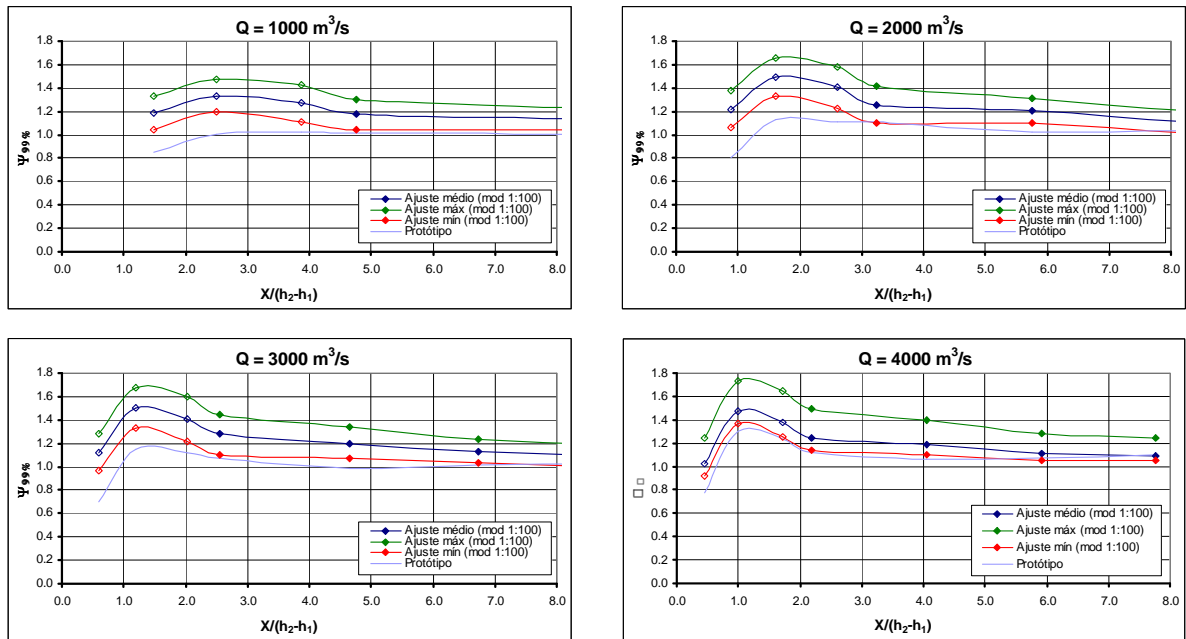


Figura G.8 - Dispersão natural da pressão com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 99 % ($\Psi_{99\%}$) considerando as amostras obtidas no modelo 1:100 da UHE Porto Colômbia. Os pontos situados no trecho curvo estão representados pelos símbolos vazados (\diamond).

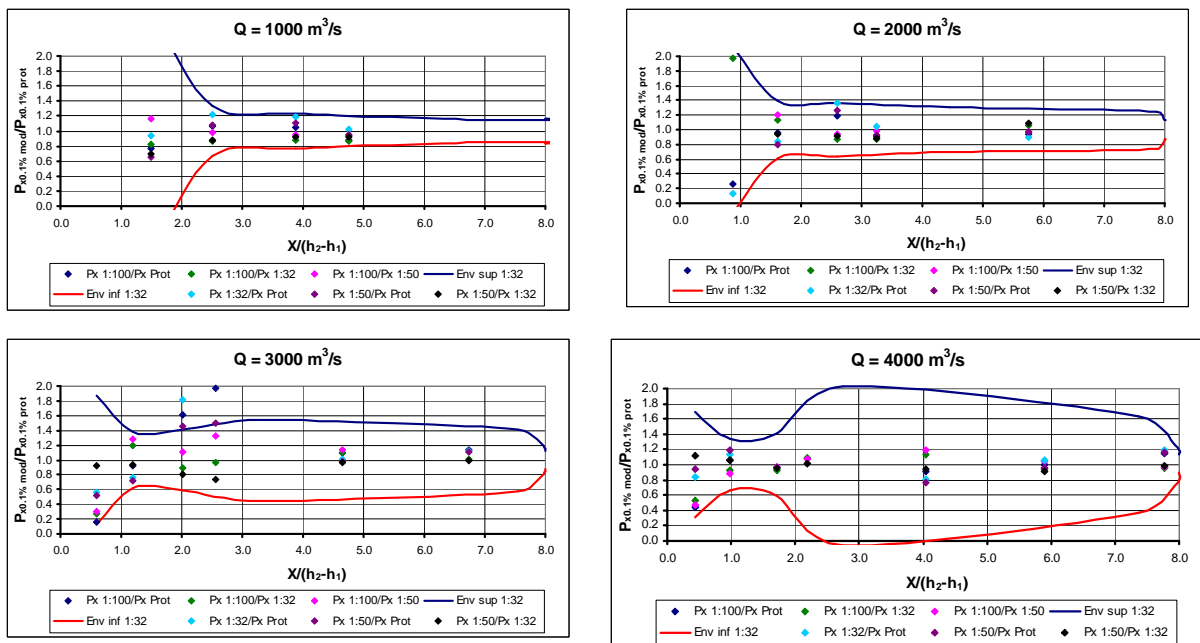


Figura G.9 - Distribuição longitudinal das diferenças relativas da pressão com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 0,1 % ($P_{0,1\%}$), considerando as amostras obtidas nas diferentes escalas de modelo e no protótipo. As envoltórias foram definidas com base nos dados obtidos no modelo 1:32.

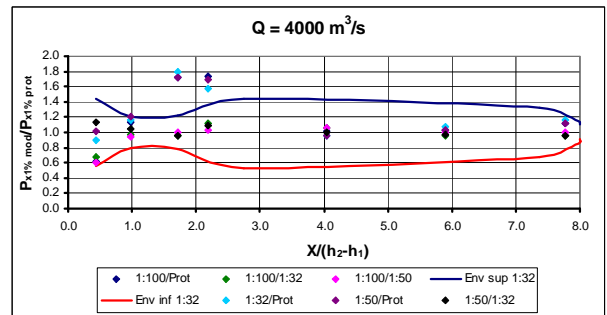
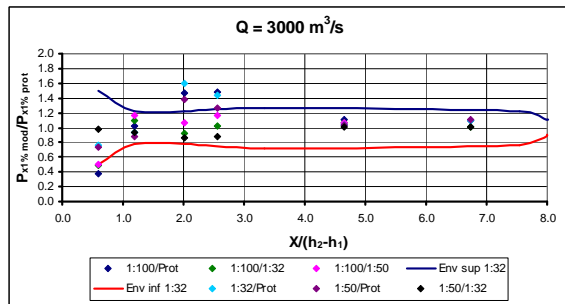
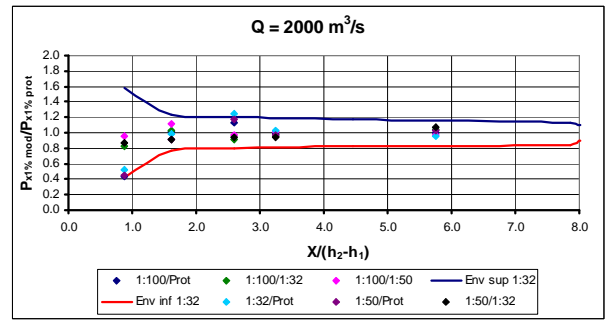
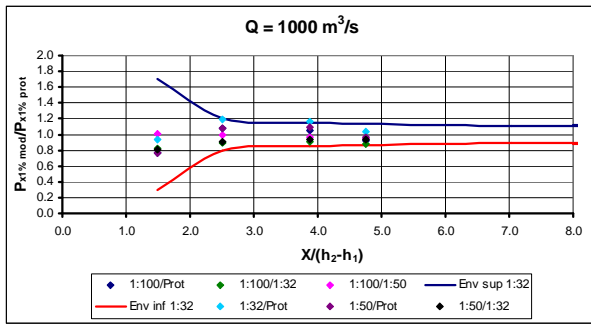


Figura G.10 - Distribuição longitudinal das diferenças relativas da pressão com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 1% ($\Psi_{1\%}$), considerando as amostras obtidas nas diferentes escalas de modelo e no protótipo. As envoltórias foram definidas com base nos dados obtidos no modelo 1:32.

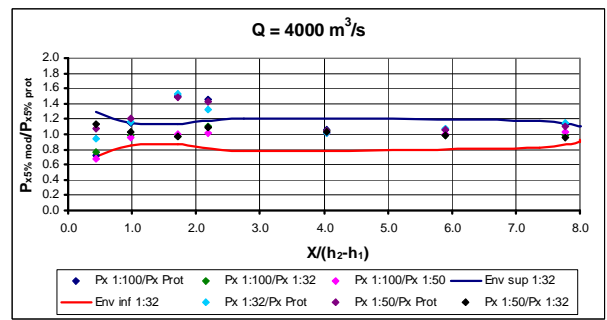
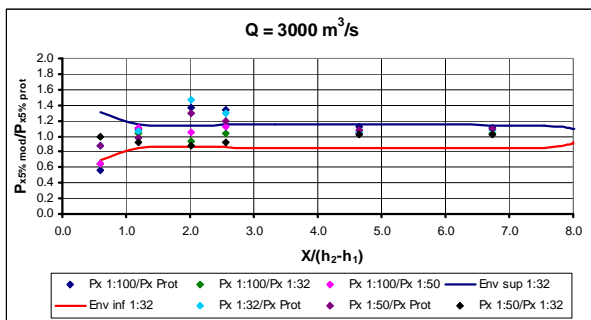
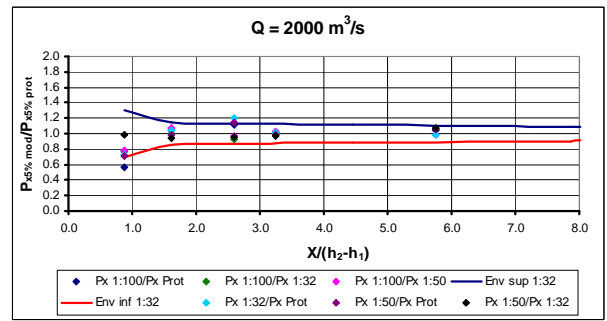
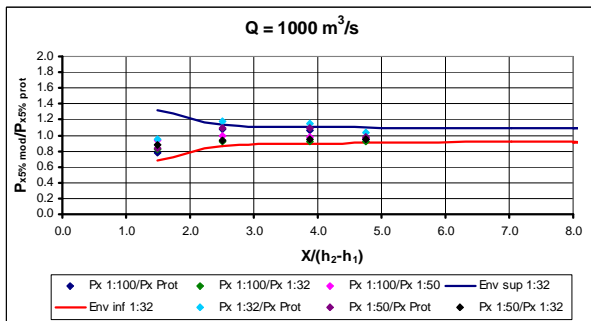


Figura G.11 - Distribuição longitudinal das diferenças relativas da pressão com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 5% ($\Psi_{5\%}$), considerando as amostras obtidas nas diferentes escalas de modelo e no protótipo. As envoltórias foram definidas com base nos dados obtidos no modelo 1:32.

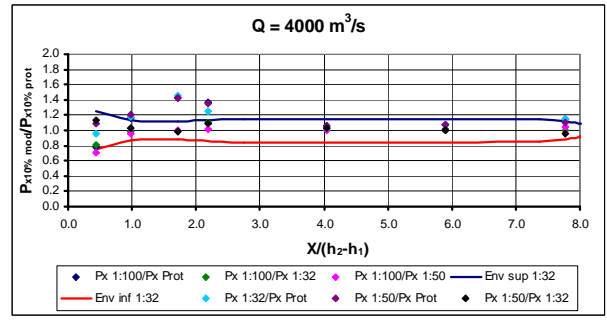
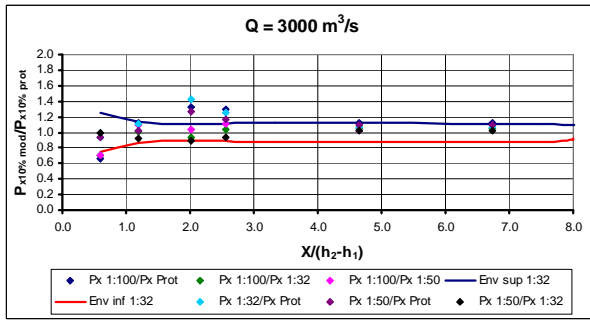
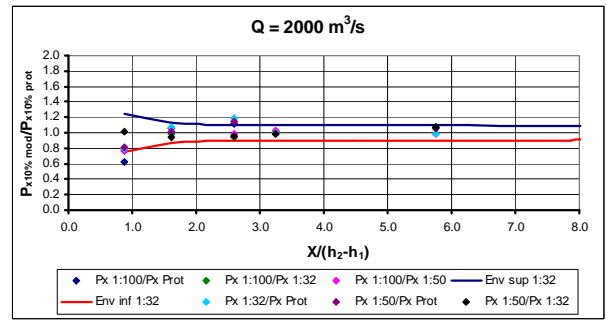
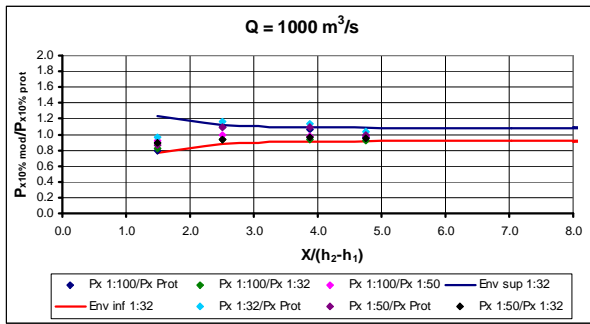


Figura G.12 - Distribuição longitudinal das diferenças relativas da pressão com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 10 % ($\Psi_{10\%}$), considerando as amostras obtidas nas diferentes escalas de modelo e no protótipo. As envoltórias foram definidas com base nos dados obtidos no modelo 1:32.

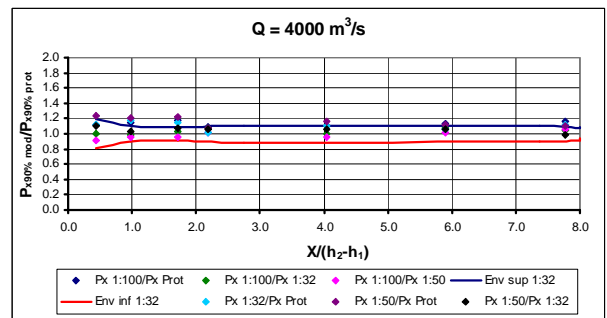
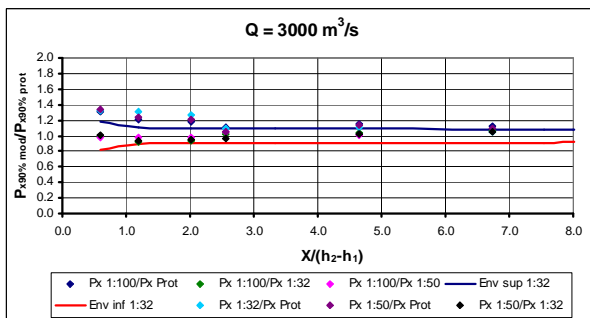
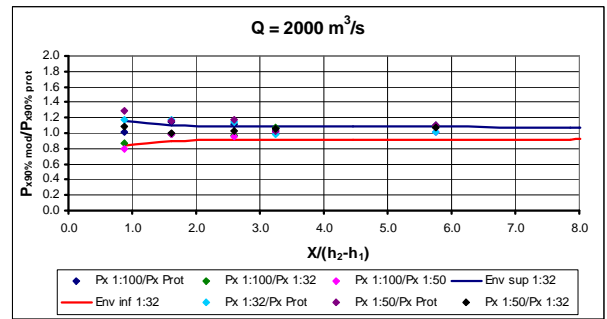
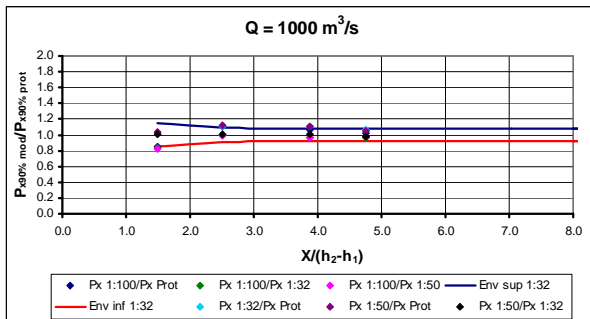


Figura G.13 - Distribuição longitudinal das diferenças relativas da pressão com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 90 % ($\Psi_{90\%}$), considerando as amostras obtidas nas diferentes escalas de modelo e no protótipo. As envoltórias foram definidas com base nos dados obtidos no modelo 1:32.

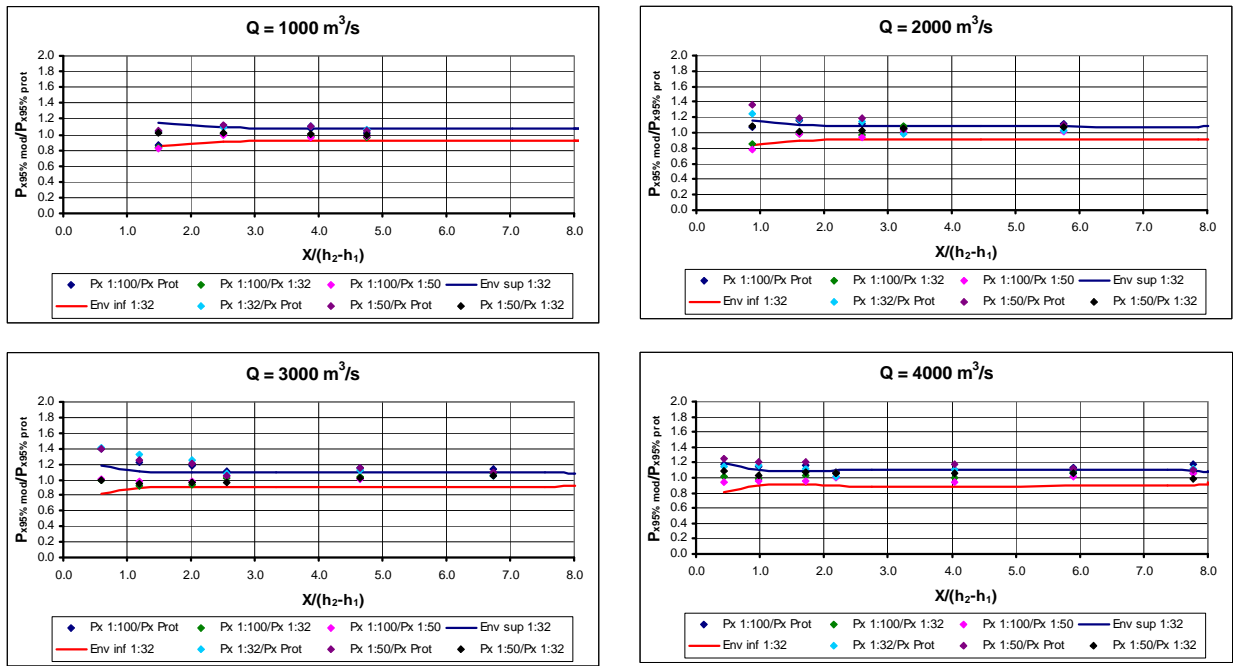


Figura G.14 - Distribuição longitudinal das diferenças relativas da pressão com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 95 % ($\Psi_{95\%}$), considerando as amostras obtidas nas diferentes escalas de modelo e no protótipo. As envoltórias foram definidas com base nos dados obtidos no modelo 1:32.

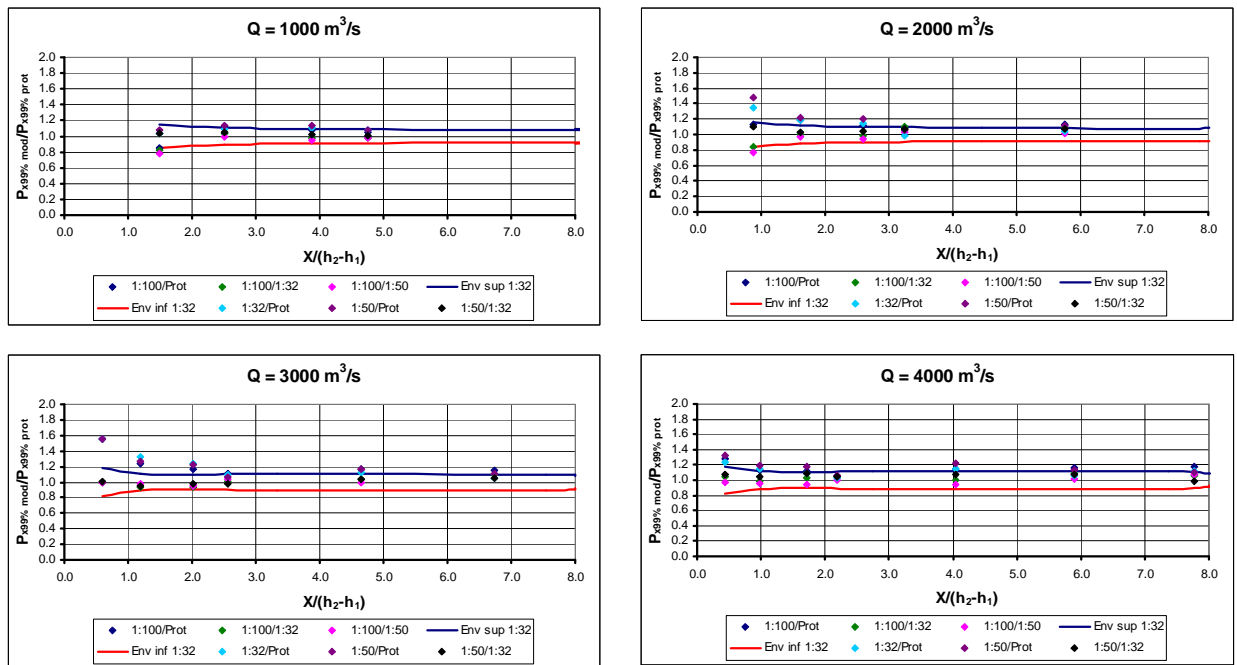


Figura G.15 - Distribuição longitudinal das diferenças relativas da pressão com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 99 % ($\Psi_{99\%}$), considerando as amostras obtidas nas diferentes escalas de modelo e no protótipo. As envoltórias foram definidas com base nos dados obtidos no modelo 1:32.

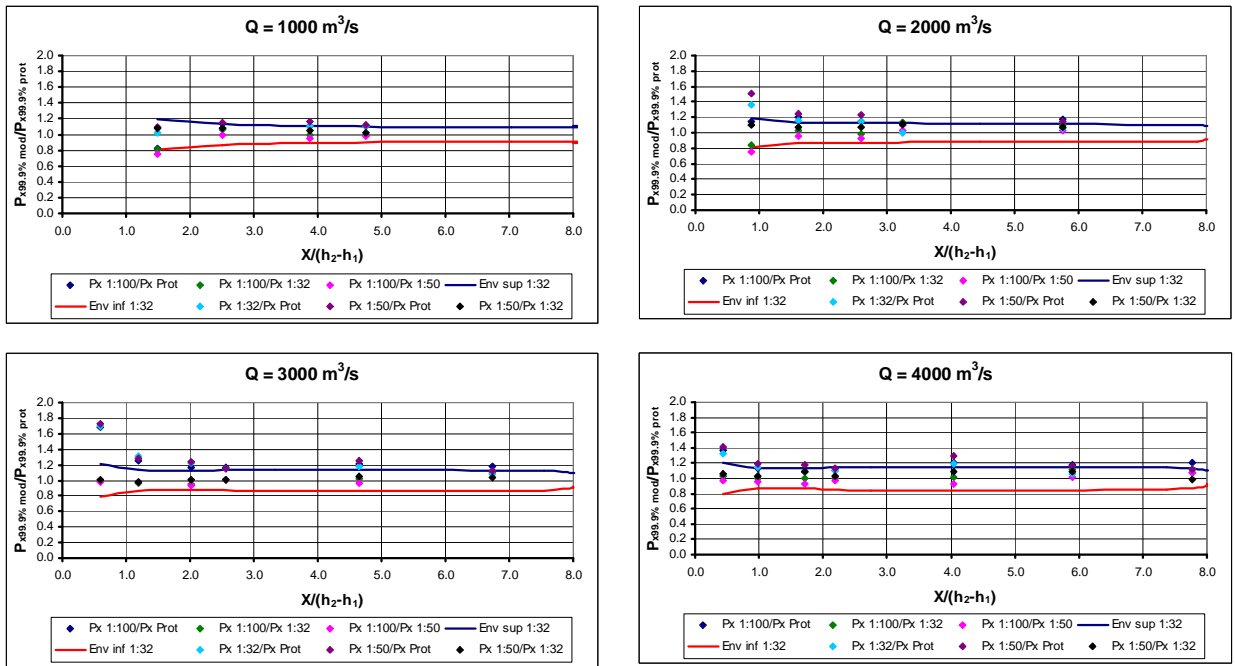


Figura G.16 - Distribuição longitudinal das diferenças relativas da pressão com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 99,9 % ($\Psi_{99,9\%}$), considerando **as amostras** obtidas nas diferentes escalas de modelo e no protótipo. As envoltórias foram definidas com base nos dados obtidos no modelo 1:32.

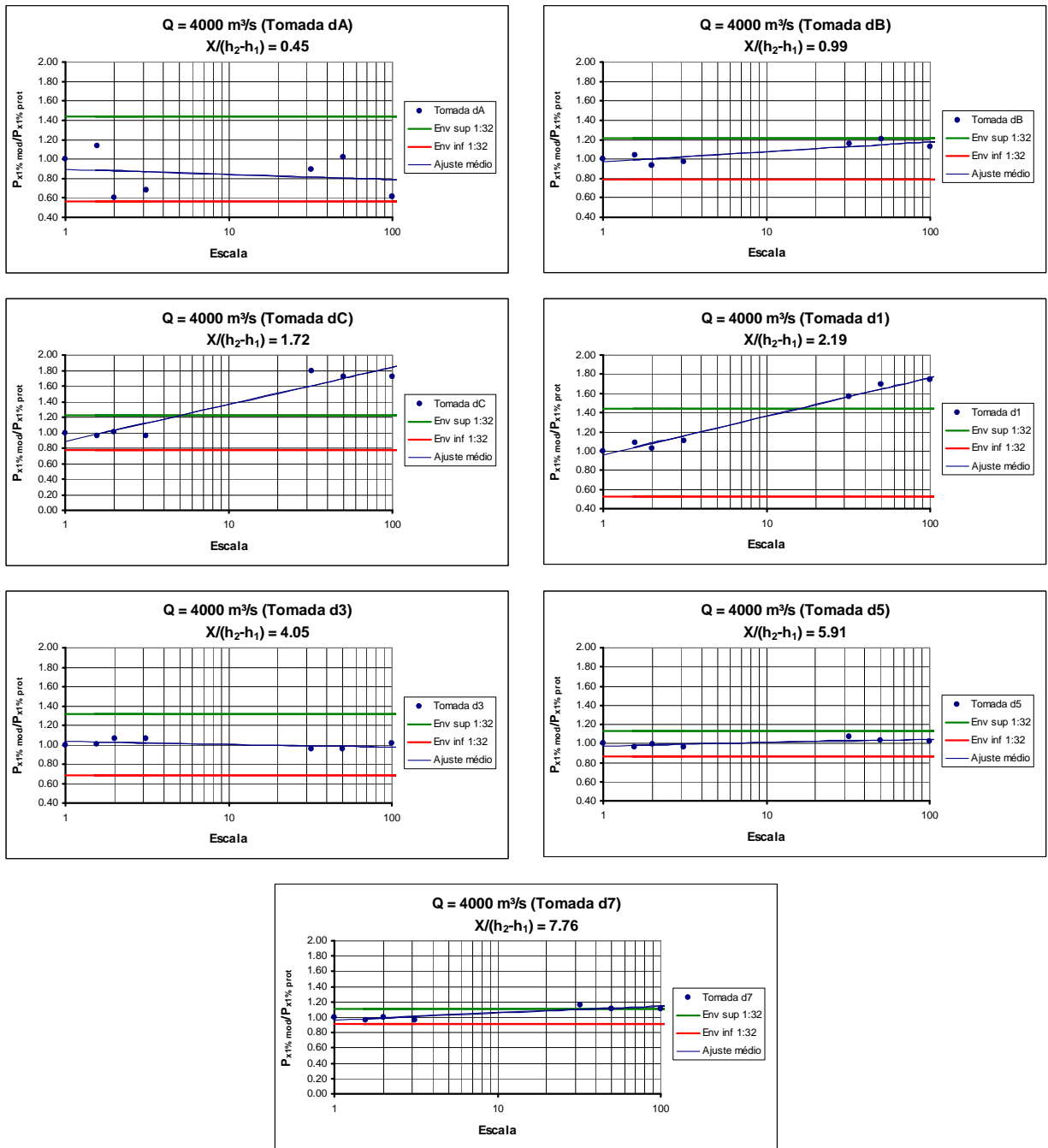


Figura G.17 - Diferenças relativas da pressão com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 1 % ($\Psi_{1\%}$), para todas as tomadas de pressão, considerando **as amostras** obtidas nas diferentes escalas de modelo e no protótipo. As envoltórias foram definidas com base nos dados obtidos no modelo 1:32.

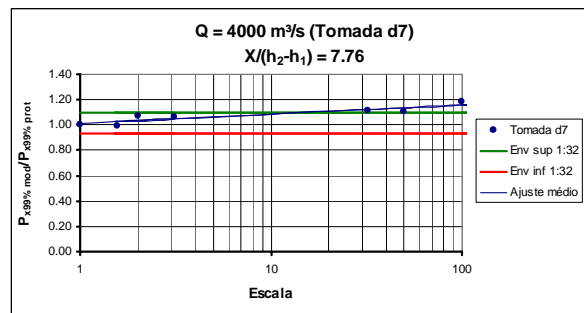
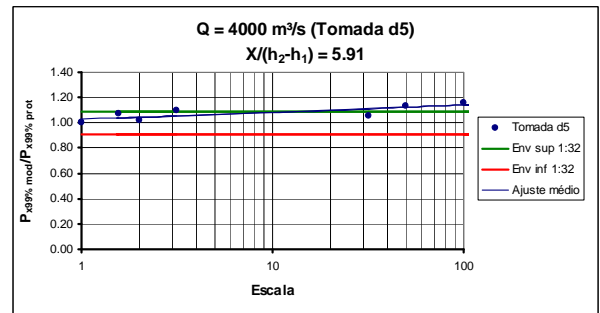
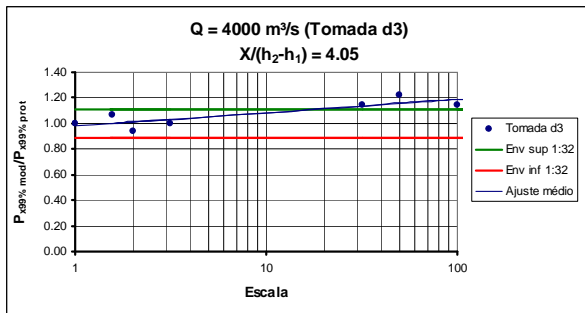
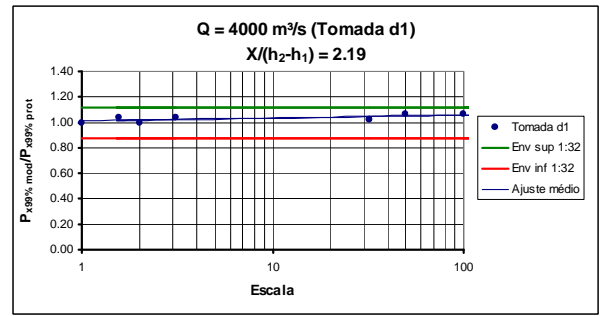
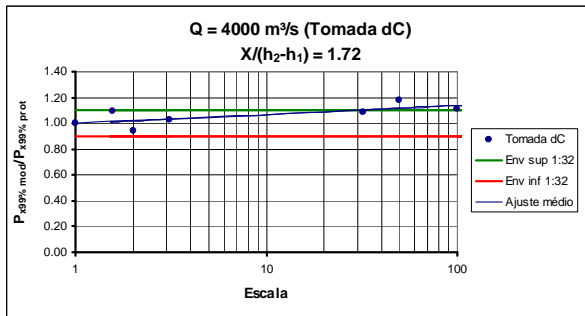
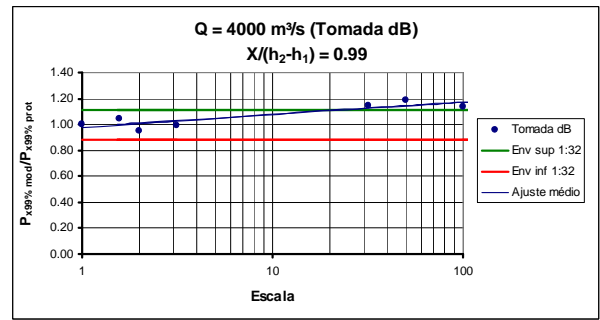
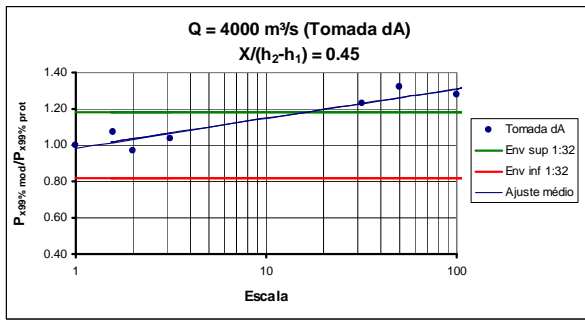


Figura G.18 - Diferenças relativas da pressão com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 99 % ($\Psi_{99\%}$), para todas as tomadas de pressão, considerando **as amostras** obtidas nas diferentes escalas de modelo e no protótipo. As envoltórias foram definidas com base nos dados obtidos no modelo 1:32.

G.3 - Análise dos efeitos de escala nas pressões com o uso dos ajustes para a P_x , a σ_x e o $N_{x\%}$ propostos por Wiest (2008)

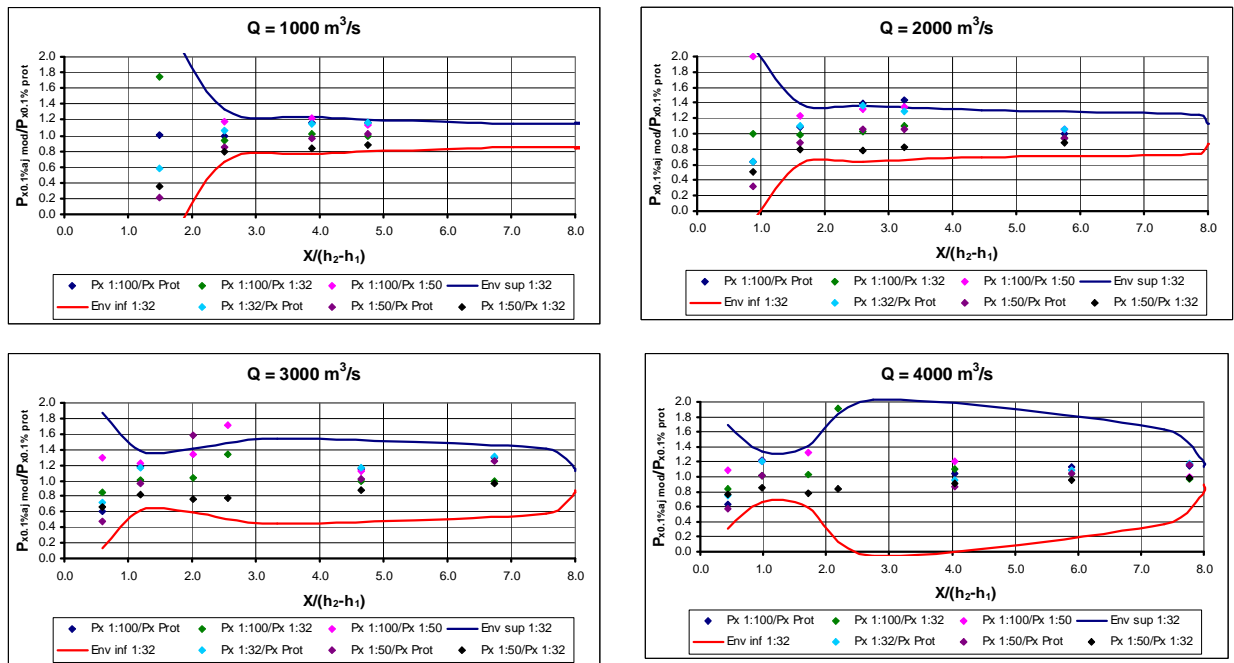


Figura G.19 - Distribuição longitudinal das diferenças relativas da pressão com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 0,1 % ($\Psi_{0,1\%}$), considerando **os ajustes** determinados para as diferentes escalas. As envoltórias foram definidas com base no modelo 1:32.

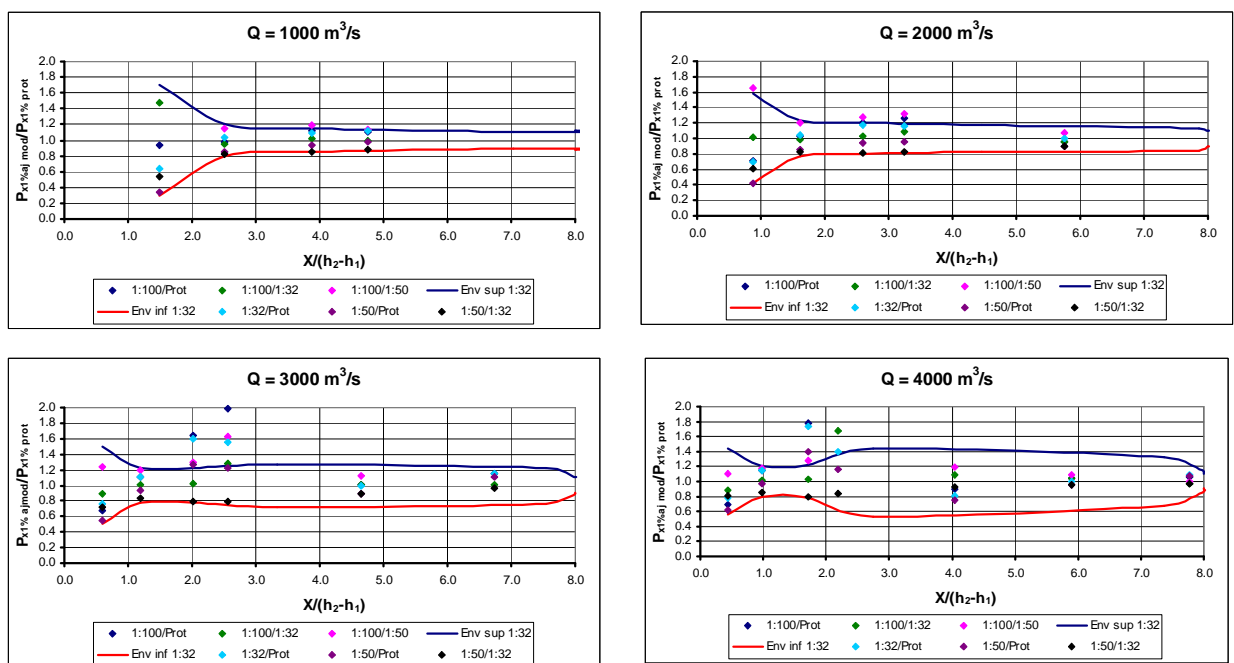


Figura G.20 - Distribuição longitudinal das diferenças relativas da pressão com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 1 % ($\Psi_{1\%}$), considerando **os ajustes** determinados para as diferentes escalas. As envoltórias foram definidas com base no modelo 1:32.

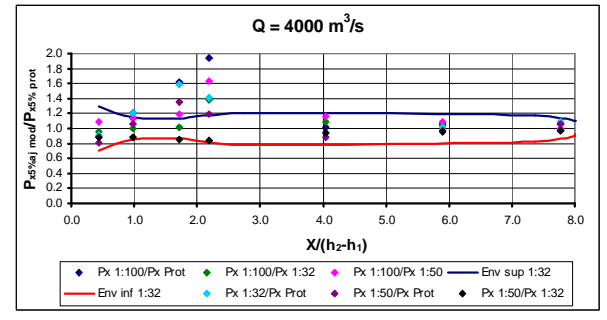
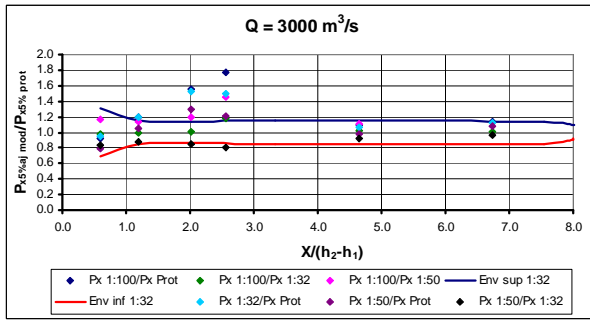
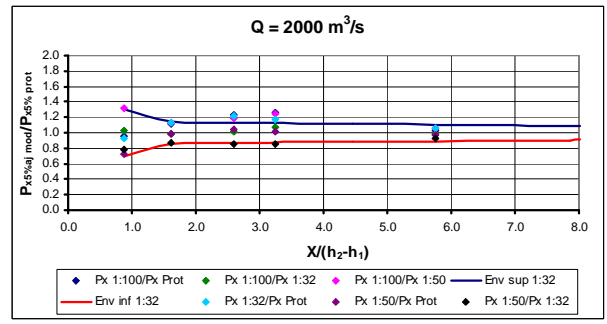
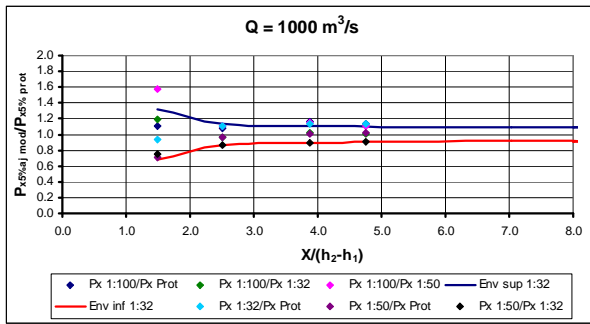


Figura G.21 - Distribuição longitudinal das diferenças relativas da pressão com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 5% ($\Psi_{5\%}$), considerando os ajustes determinados para as diferentes escalas. As envoltórias foram definidas com base no modelo 1:32.

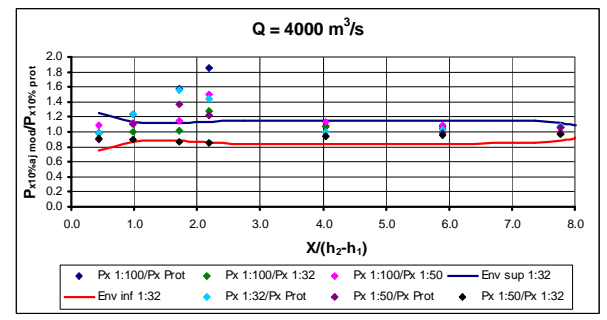
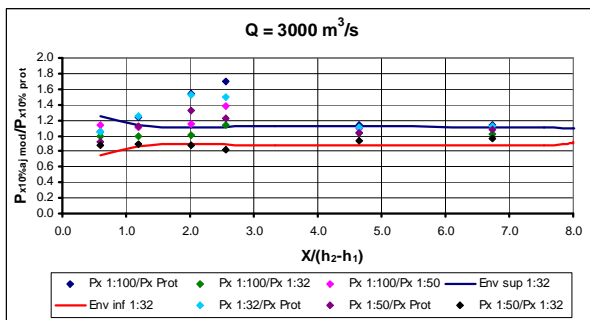
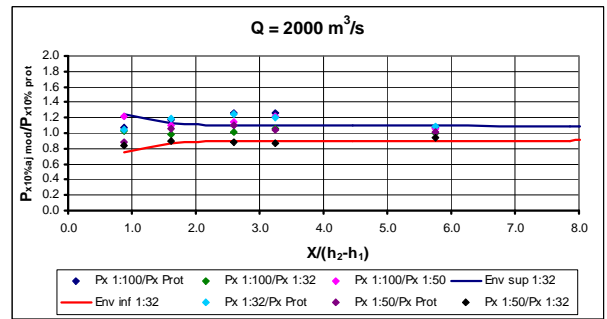
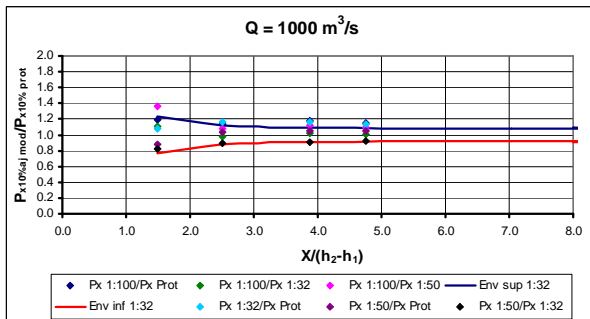


Figura G.22 - Distribuição longitudinal das diferenças relativas da pressão com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 10% ($\Psi_{10\%}$), considerando os ajustes determinados para as diferentes escalas. As envoltórias foram definidas com base no modelo 1:32.

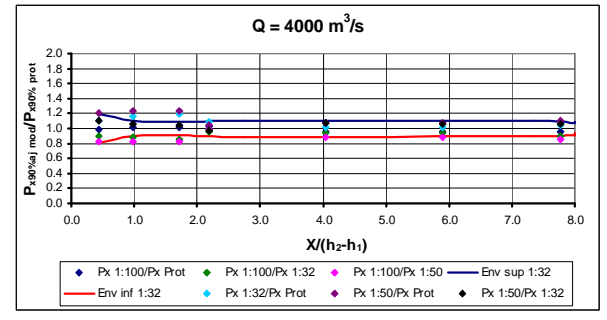
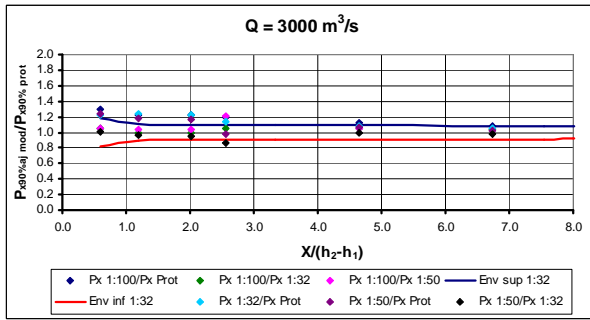
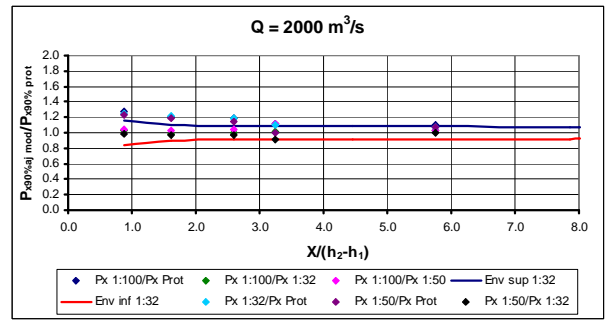
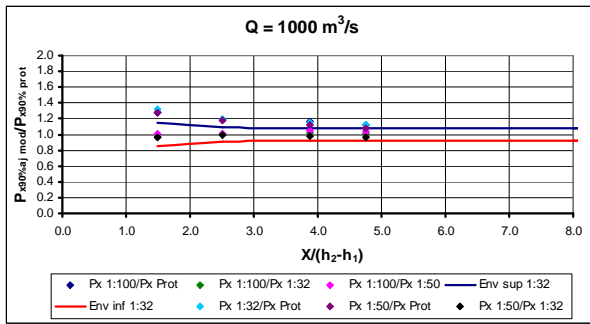


Figura G.23 - Distribuição longitudinal das diferenças relativas da pressão com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 90 % ($\Psi_{90\%}$), considerando os ajustes determinados para as diferentes escalas. As envoltórias foram definidas com base no modelo 1:32.

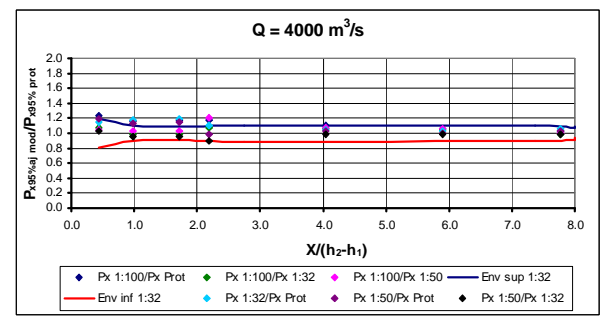
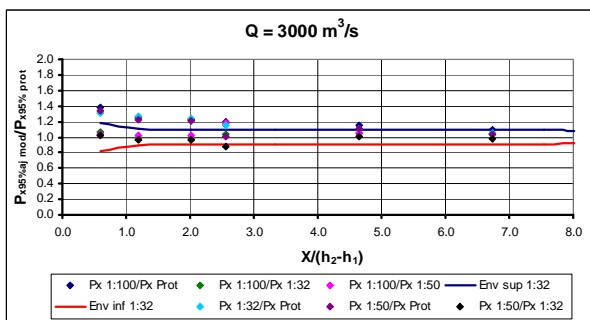
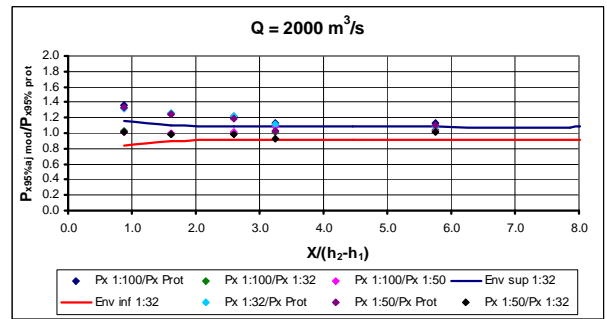
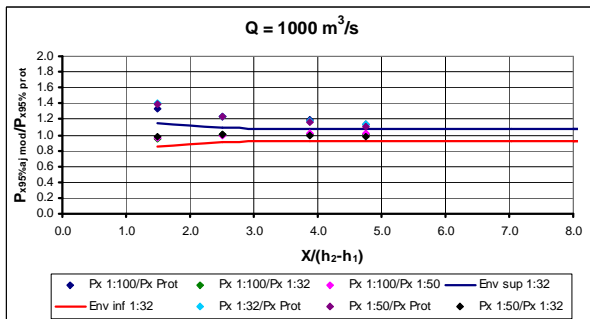


Figura G.24 - Distribuição longitudinal das diferenças relativas da pressão com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 95 % ($\Psi_{95\%}$), considerando os ajustes determinados para as diferentes escalas. As envoltórias foram definidas com base no modelo 1:32.

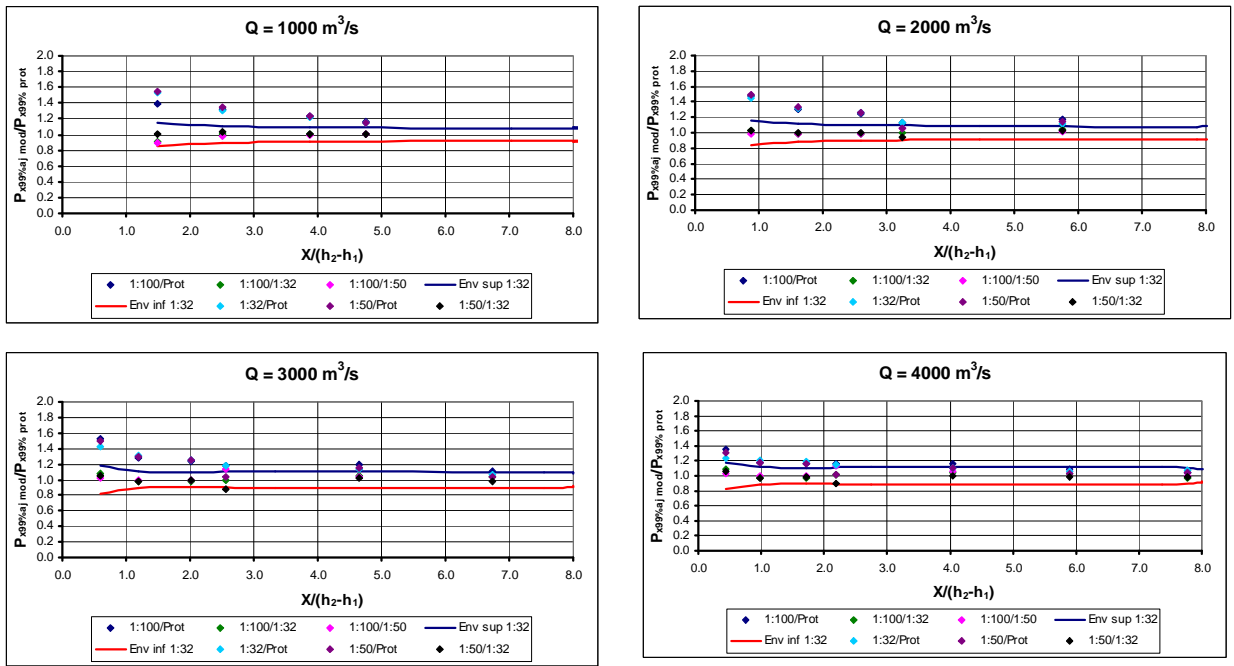


Figura G.25 - Distribuição longitudinal das diferenças relativas da pressão com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 99 % ($\Psi_{99\%}$), considerando **os ajustes** determinados para as diferentes escalas. As envoltórias foram definidas com base no modelo 1:32.

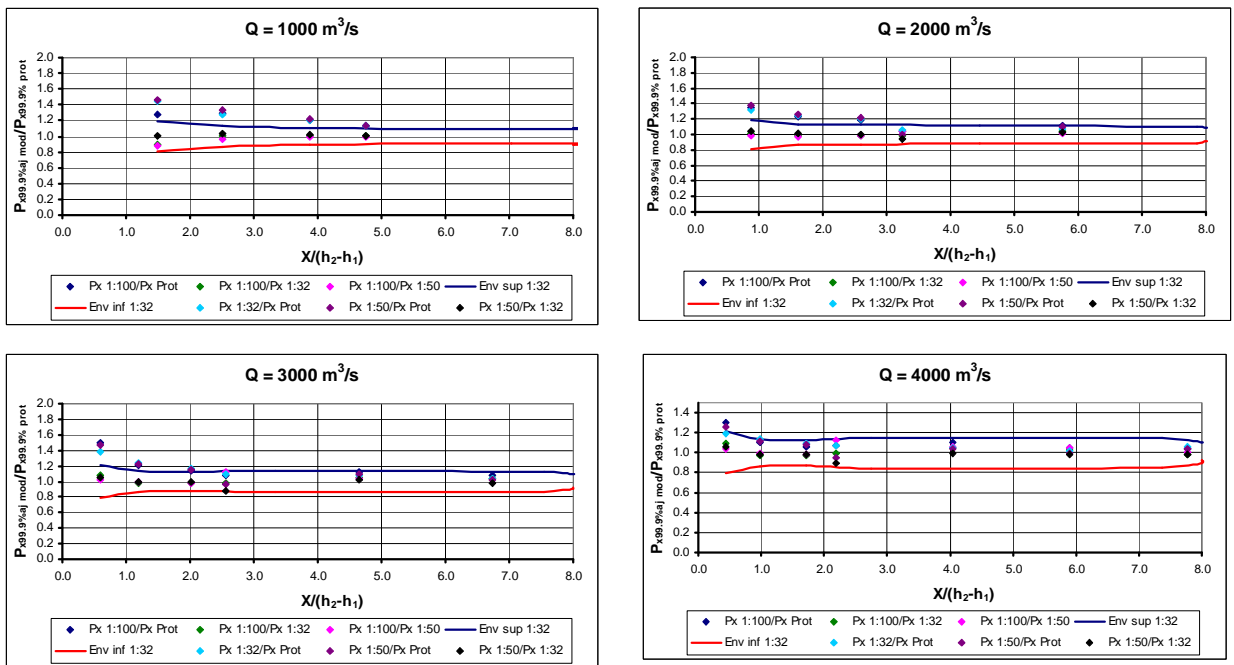


Figura G.26 - Distribuição longitudinal das diferenças relativas da pressão com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 99,9 % ($\Psi_{99,9\%}$), considerando **os ajustes** determinados para as diferentes escalas. As envoltórias foram definidas com base no modelo 1:32.

G.4 - Valores extremos de pressão para as diferentes tomadas, condições de escoamento e probabilidades de ocorrência (obtidos a partir das amostras).

Tabela G.1 - Valores de pressão não-adimensionalizados com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 0,1 % (considerando as amostras obtidas no protótipo e nas diferentes escalas de modelo reduzido).

Fr*	X/(h ₂ -h ₁)*	P _{x0,1% prot}	P _{x0,1% mod. 1:32}	P _{x0,1% mod. 1:50}	P _{x0,1% mod. 1:100}
9,35	1.49	3.66	3.43	2.40	2.80
	2.50	6.29	7.72	6.80	6.69
	3.87	6.77	8.06	7.47	7.10
	4.76	7.34	7.50	6.96	6.48
	8.23	8.14	7.83	7.13	6.33
	11.71	9.34	9.37	8.43	7.43
	15.18	9.54	9.76	8.94	7.98
7,01	0.88	4.34	0.56	-0.08	1.10
	1.61	6.31	5.34	5.01	6.03
	2.60	4.88	6.67	6.13	5.77
	3.24	5.03	5.28	4.67	4.62
	5.76	6.23	5.58	6.04	5.87
	8.27	7.30	8.16	8.54	7.93
	10.79	9.40	9.87	10.02	8.98
5,95	0.59	4.77	2.70	2.47	0.73
	1.20	6.57	5.01	4.71	6.01
	2.02	3.11	5.62	4.54	5.03
	2.56	1.78	3.64	2.66	3.51
	4.65	4.36	4.40	4.24	4.79
	6.74	6.73	7.51	7.51	7.62
	8.84	8.64	9.64	10.16	9.35
5,23	0.45	5.45	4.58	5.11	2.44
	0.99	7.13	8.08	8.51	7.53
	1.72	2.38	6.28	5.97	5.84
	2.19	1.04	2.84	2.88	3.07
	4.05	4.20	3.41	3.23	3.85
	5.91	7.33	7.73	7.04	7.30
	7.76	8.93	10.64	10.44	10.19

* Os valores apresentados correspondem ao protótipo da UHE Porto Colômbia.

Tabela G.2 - Valores de pressão não-adimensionalizados com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 1 % (considerando as amostras obtidas no protótipo e nas diferentes escalas de modelo reduzido).

Fr*	X/(h ₂ -h ₁)*	P _{x1% prot}	P _{x1% mod. 1:32}	P _{x1% mod. 1:50}	P _{x1% mod. 1:100}
9,35	1.49	4.52	4.25	3.45	3.47
	2.50	6.95	8.28	7.54	7.44
	3.87	7.37	8.58	8.07	7.77
	4.76	7.86	8.14	7.60	7.20
	8.23	8.61	8.31	7.67	7.03
	11.71	9.42	9.62	8.74	7.99
	15.18	9.58	9.81	9.27	8.32
7,01	0.88	4.95	2.59	2.25	2.14
	1.61	7.22	7.13	6.55	7.30
	2.60	6.08	7.62	7.15	6.91
	3.24	6.01	6.18	5.84	5.95
	5.76	6.96	6.63	7.14	6.93
	8.27	8.49	8.93	9.30	8.63
	10.79	9.66	10.14	10.28	9.36
5,95	0.59	5.21	3.96	3.85	1.91
	1.20	7.45	6.96	6.56	7.64
	2.02	4.40	7.05	6.06	6.47
	2.56	3.38	4.86	4.29	5.00
	4.65	5.56	5.74	5.79	6.13
	6.74	7.78	8.50	8.60	8.56
	8.84	9.15	10.15	10.42	9.78
5,23	0.45	5.84	5.25	5.94	3.58
	0.99	8.02	9.26	9.67	9.03
	1.72	4.19	7.54	7.21	7.21
	2.19	2.62	4.11	4.45	4.56
	4.05	5.62	5.35	5.37	5.69
	5.91	8.27	8.83	8.54	8.48
	7.76	9.77	11.31	10.89	10.85

* Os valores apresentados correspondem ao protótipo da UHE Porto Colômbia.

Tabela G.3 - Valores de pressão não-adimensionalizados com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 5 % (considerando as amostras obtidas no protótipo e nas diferentes escalas de modelo reduzido).

Fr*	X/(h ₂ -h ₁)*	P _{x5% prot}	P _{x5% mod. 1:32}	P _{x5% mod. 1:50}	P _{x5% mod. 1:100}
9,35	1.49	5.11	4.87	4.26	3.98
	2.50	7.44	8.71	8.13	8.06
	3.87	7.82	8.98	8.54	8.33
	4.76	8.24	8.55	8.08	7.83
	8.23	8.90	8.61	8.06	7.79
	11.71	9.47	9.76	8.98	8.79
	15.18	9.62	9.84	9.37	9.31
7,01	0.88	5.43	3.92	3.87	3.04
	1.61	7.91	8.29	7.76	8.29
	2.60	6.96	8.39	8.00	7.81
	3.24	6.81	6.86	6.70	6.90
	5.76	7.46	7.30	7.85	7.74
	8.27	9.01	9.37	9.70	9.38
	10.79	9.83	10.24	10.42	10.26
5,95	0.59	5.55	4.89	4.85	3.14
	1.20	8.08	8.56	7.94	8.81
	2.02	5.56	8.14	7.20	7.60
	2.56	4.53	5.87	5.40	6.08
	4.65	6.35	6.72	6.89	7.09
	6.74	8.42	9.04	9.25	9.31
	8.84	9.48	10.40	10.64	10.63
5,23	0.45	6.16	5.80	6.58	4.43
	0.99	8.76	10.23	10.57	10.07
	1.72	5.53	8.49	8.25	8.30
	2.19	3.89	5.13	5.58	5.69
	4.05	6.48	6.56	6.73	6.81
	5.91	8.81	9.42	9.35	9.33
	7.76	10.18	11.68	11.22	11.56

* Os valores apresentados correspondem ao protótipo da UHE Porto Colômbia.

Tabela G.4 - Valores de pressão não-adimensionalizados com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 10 % (considerando as amostras obtidas no protótipo e nas diferentes escalas de modelo reduzido).

Fr*	X/(h ₂ -h ₁)*	P _{x10% prot}	P _{x10% mod. 1:32}	P _{x10% mod. 1:50}	P _{x10% mod. 1:100}
9,35	1.49	5.40	5.17	4.64	4.27
	2.50	7.66	8.92	8.41	8.38
	3.87	8.07	9.18	8.80	8.62
	4.76	8.41	8.74	8.30	8.10
	8.23	9.04	8.75	8.22	8.08
	11.71	9.50	9.80	9.05	9.12
	15.18	9.64	9.86	9.42	9.55
7,01	0.88	5.67	4.53	4.58	3.51
	1.61	8.23	8.83	8.32	8.76
	2.60	7.38	8.76	8.43	8.28
	3.24	7.20	7.21	7.11	7.35
	5.76	7.70	7.61	8.18	8.12
	8.27	9.24	9.56	9.87	9.67
	10.79	9.93	10.28	10.50	10.54
5,95	0.59	5.73	5.38	5.37	3.80
	1.20	8.41	9.35	8.62	9.38
	2.02	6.12	8.70	7.79	8.12
	2.56	5.10	6.39	5.95	6.62
	4.65	6.72	7.17	7.36	7.52
	6.74	8.66	9.28	9.51	9.69
	8.84	9.66	10.50	10.73	10.97
5,23	0.45	6.34	6.10	6.92	4.90
	0.99	9.14	10.73	11.04	10.59
	1.72	6.18	8.97	8.80	8.82
	2.19	4.53	5.66	6.13	6.23
	4.05	6.89	7.11	7.32	7.34
	5.91	9.03	9.66	9.70	9.75
	7.76	10.34	11.81	11.37	11.89

* Os valores apresentados correspondem ao protótipo da UHE Porto Colômbia.

Tabela G.5 - Valores de pressão não-adimensionalizados com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 90 % (considerando as amostras obtidas no protótipo e nas diferentes escalas de modelo reduzido).

Fr*	X/(h ₂ -h ₁)*	P _{x90% prot}	P _{x90% mod. 1:32}	P _{x90% mod. 1:50}	P _{x90% mod. 1:100}
9,35	1.49	7.23	7.43	7.49	6.21
	2.50	9.25	10.23	10.33	10.22
	3.87	9.54	10.52	10.56	10.18
	4.76	9.52	10.08	9.94	9.68
	8.23	9.75	9.63	9.44	9.51
	11.71	9.66	10.00	9.74	10.15
	15.18	9.80	9.97	10.03	10.31
7,01	0.88	7.34	8.64	9.46	7.48
	1.61	10.30	12.03	11.97	11.87
	2.60	9.94	11.42	11.68	11.17
	3.24	9.82	9.64	10.15	10.33
	5.76	9.41	9.60	10.30	10.41
	8.27	10.18	10.38	10.94	11.03
	10.79	10.34	10.48	11.19	11.35
5,95	0.59	7.04	9.36	9.39	9.24
	1.20	10.78	14.09	13.27	13.05
	2.02	10.00	12.68	12.11	11.86
	2.56	9.36	10.18	9.85	10.41
	4.65	9.10	10.12	10.39	10.48
	6.74	10.15	10.68	11.15	11.43
	8.84	10.55	10.97	11.49	11.87
5,23	0.45	7.73	8.65	9.51	8.63
	0.99	12.00	14.04	14.50	13.84
	1.72	10.68	12.21	13.08	12.56
	2.19	9.41	9.56	10.13	10.25
	4.05	9.72	10.66	11.30	10.73
	5.91	10.57	11.15	11.75	11.92
	7.76	11.25	12.55	12.39	13.08

* Os valores apresentados correspondem ao protótipo da UHE Porto Colômbia.

Tabela G.6 - Valores de pressão não-adimensionalizados com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 95 % (considerando as amostras obtidas no protótipo e nas diferentes escalas de modelo reduzido).

Fr*	X/(h ₂ -h ₁)*	P _{x95% prot}	P _{x95% mod. 1:32}	P _{x95% mod. 1:50}	P _{x95% mod. 1:100}
9,35	1.49	7.61	7.85	7.99	6.54
	2.50	9.49	10.43	10.62	10.50
	3.87	9.74	10.75	10.84	10.46
	4.76	9.68	10.31	10.23	9.95
	8.23	9.84	9.78	9.60	9.75
	11.71	9.69	10.03	9.81	10.39
	15.18	9.82	9.99	10.11	10.54
7,01	0.88	7.61	9.46	10.34	8.14
	1.61	10.65	12.52	12.61	12.39
	2.60	10.35	11.88	12.25	11.59
	3.24	10.27	10.06	10.68	10.87
	5.76	9.71	9.97	10.66	10.84
	8.27	10.28	10.49	11.09	11.27
	10.79	10.38	10.51	11.26	11.58
5,95	0.59	7.26	10.19	10.18	10.18
	1.20	11.19	14.75	13.93	13.66
	2.02	10.60	13.33	12.82	12.48
	2.56	10.01	10.87	10.55	11.09
	4.65	9.53	10.67	10.94	11.01
	6.74	10.36	10.90	11.39	11.76
	8.84	10.66	11.04	11.59	12.10
5,23	0.45	7.97	9.19	10.01	9.39
	0.99	12.54	14.51	15.05	14.35
	1.72	11.45	12.78	13.81	13.22
	2.19	10.23	10.31	10.85	10.92
	4.05	10.25	11.33	12.04	11.35
	5.91	10.81	11.40	12.08	12.29
	7.76	11.37	12.66	12.51	13.31

* Os valores apresentados correspondem ao protótipo da UHE Porto Colômbia.

Tabela G.7 - Valores de pressão não-adimensionalizados com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 99 % (considerando as amostras obtidas no protótipo e nas diferentes escalas de modelo reduzido).

Fr*	X/(h ₂ -h ₁)*	P _{x99% prot}	P _{x99% mod. 1:32}	P _{x99% mod. 1:50}	P _{x99% mod. 1:100}
9,35	1.49	8.46	8.75	9.11	7.15
	2.50	9.98	10.84	11.30	11.16
	3.87	10.16	11.24	11.49	10.98
	4.76	10.04	10.81	10.85	10.59
	8.23	9.99	10.12	9.96	10.32
	11.71	9.74	10.12	9.93	10.81
	15.18	9.87	10.02	10.18	10.97
7,01	0.88	8.31	11.18	12.26	9.42
	1.61	11.42	13.52	13.97	13.52
	2.60	11.23	12.85	13.46	12.59
	3.24	11.24	11.02	11.83	12.13
	5.76	10.39	10.81	11.54	11.75
	8.27	10.51	10.73	11.35	11.74
	10.79	10.46	10.57	11.35	12.01
5,95	0.59	7.74	12.03	12.06	11.98
	1.20	12.09	16.03	15.33	14.98
	2.02	11.85	14.71	14.46	13.76
	2.56	11.39	12.44	12.19	12.58
	4.65	10.51	11.85	12.27	12.25
	6.74	10.78	11.38	11.91	12.37
	8.84	10.85	11.19	11.71	12.53
5,23	0.45	8.50	10.45	11.21	10.85
	0.99	13.61	15.57	16.18	15.44
	1.72	12.99	14.07	15.36	14.45
	2.19	11.80	12.09	12.56	12.55
	4.05	11.26	12.87	13.73	12.88
	5.91	11.32	11.95	12.82	13.09
	7.76	11.61	12.91	12.79	13.74

* Os valores apresentados correspondem ao protótipo da UHE Porto Colômbia.

Tabela G.8 - Valores de pressão não-adimensionalizados com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 99,9 % (considerando as amostras obtidas no protótipo e nas diferentes escalas de modelo reduzido).

Fr*	X/(h ₂ -h ₁)*	P _{x99,9% prot}	P _{x99,9% mod. 1:32}	P _{x99,9% mod. 1:50}	P _{x99,9% mod. 1:100}
9,35	1.49	9.71	9.87	10.59	8.00
	2.50	10.63	11.43	12.25	12.11
	3.87	10.68	11.88	12.48	11.79
	4.76	10.49	11.60	11.79	11.53
	8.23	10.18	10.56	10.49	11.06
	11.71	9.82	10.25	10.07	11.24
	15.18	9.91	10.05	10.32	11.35
7,01	0.88	9.71	13.29	14.63	11.12
	1.61	12.72	14.76	15.87	15.28
	2.60	12.36	14.19	15.23	14.08
	3.24	12.56	12.49	13.86	14.16
	5.76	11.34	11.99	12.93	13.28
	8.27	10.91	11.09	11.73	12.26
	10.79	10.56	10.68	11.50	12.34
5,95	0.59	8.47	14.43	14.62	14.24
	1.20	13.49	17.73	17.34	16.96
	2.02	13.55	16.58	16.78	15.74
	2.56	12.97	14.85	14.88	15.06
	4.65	11.71	13.81	14.58	14.11
	6.74	11.23	12.14	12.60	13.26
	8.84	11.19	11.41	11.90	12.91
5,23	0.45	9.35	12.41	13.20	12.79
	0.99	15.05	17.25	17.87	17.13
	1.72	14.87	16.10	17.41	16.15
	2.19	13.54	14.99	15.39	15.01
	4.05	12.65	15.05	16.41	15.20
	5.91	12.11	12.84	13.99	14.27
	7.76	11.88	13.32	13.20	14.26

* Os valores apresentados correspondem ao protótipo da UHE Porto Colômbia

G.5 - Valores extremos de pressão para as diferentes tomadas, condições de escoamento e probabilidades de ocorrência (obtidos a partir da metodologia proposta por Wiest, 2008).

Tabela G.9 - Valores de pressão não-adimensionalizados com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 0,1 % (considerando os ajustes determinados para as diferentes escalas de modelo reduzido). Metodologia proposta por Wiest (2008).

Fr*	X/(h ₂ -h ₁)*	P _{x0,1%aj mod. 1:32}	P _{x0,1%aj mod. 1:50}	P _{x0,1%aj mod. 1:100}
9,35	1.49	2.11	0.76	3.68
	2.50	6.73	5.35	6.29
	3.87	7.75	6.50	7.89
	4.76	8.56	7.47	8.52
	8.23	8.50	8.49	8.48
	11.71	8.50	8.72	8.48
	15.18	8.50	8.72	8.48
7,01	0.88	2.78	1.39	2.80
	1.61	6.96	5.57	6.84
	2.60	6.63	5.18	6.81
	3.24	6.49	5.34	7.18
	5.76	6.63	5.87	6.25
	8.27	9.07	9.10	9.05
	10.79	9.07	9.10	9.05
5,95	0.59	3.40	2.25	2.90
	1.20	7.68	6.34	7.73
	2.02	6.41	4.93	6.61
	2.56	4.65	3.61	6.20
	4.65	5.07	4.46	5.03
	6.74	8.77	8.42	8.77
	8.84	10.53	9.71	9.67
5,23	0.45	4.06	3.12	3.41
	0.99	8.60	7.28	8.73
	1.72	6.67	5.18	6.88
	2.19	2.89	2.42	5.53
	4.05	3.98	3.65	4.38
	5.91	7.94	7.62	8.28
	7.76	10.55	10.32	10.27

* Os valores apresentados correspondem ao protótipo da UHE Porto Colômbia.

Tabela G.10 - Valores de pressão não-adimensionalizados com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 1 % (considerando os ajustes determinados para as diferentes escalas de modelo reduzido). Metodologia proposta por Wiest (2008).

Fr*	X/(h ₂ -h ₁)*	P _{x1%aj mod. 1:32}	P _{x1%aj mod. 1:50}	P _{x1%aj mod. 1:100}
9,35	1.49	2.88	1.56	4.26
	2.50	7.17	5.87	6.78
	3.87	8.08	6.89	8.23
	4.76	8.77	7.73	8.74
	8.23	8.70	8.66	8.68
	11.71	8.70	8.87	8.68
	15.18	8.70	8.87	8.68
7,01	0.88	3.44	2.11	3.49
	1.61	7.54	6.20	7.42
	2.60	7.17	5.77	7.33
	3.24	6.93	5.77	7.58
	5.76	6.98	6.26	6.68
	8.27	9.22	9.24	9.21
	10.79	9.22	9.24	9.21
5,95	0.59	3.95	2.85	3.54
	1.20	8.26	6.94	8.30
	2.02	7.01	5.57	7.19
	2.56	5.27	4.14	6.72
	4.65	5.55	4.96	5.58
	6.74	8.96	8.60	8.99
	8.84	10.66	9.83	9.80
5,23	0.45	4.52	3.63	4.00
	0.99	9.15	7.84	9.25
	1.72	7.29	5.83	7.47
	2.19	3.64	3.04	6.12
	4.05	4.58	4.22	5.01
	5.91	8.23	7.88	8.57
	7.76	10.68	10.43	10.40

* Os valores apresentados correspondem ao protótipo da UHE Porto Colômbia.

Tabela G.11 - Valores de pressão não-adimensionalizados com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 5 % (considerando os ajustes determinados para as diferentes escalas de modelo reduzido). Metodologia proposta por Wiest (2008).

Fr*	X/(h ₂ -h ₁)*	P _{x5%aj mod. 1:32}	P _{x5%aj mod. 1:50}	P _{x5%aj mod. 1:100}
9,35	1.49	4.77	3.60	5.69
	2.50	8.27	7.21	7.99
	3.87	8.89	7.89	9.05
	4.76	9.29	8.41	9.30
	8.23	9.18	9.09	9.17
	11.71	9.18	9.27	9.17
	15.18	9.18	9.27	9.17
7,01	0.88	5.04	3.94	5.17
	1.61	8.96	7.79	8.86
	2.60	8.49	7.27	8.62
	3.24	8.02	6.87	8.55
	5.76	7.86	7.27	7.73
	8.27	9.60	9.59	9.60
	10.79	9.60	9.59	9.60
5,95	0.59	5.28	4.41	5.13
	1.20	9.69	8.49	9.69
	2.02	8.49	7.20	8.61
	2.56	6.80	5.49	7.99
	4.65	6.75	6.23	6.91
	6.74	9.43	9.07	9.55
	8.84	10.99	10.14	10.14
5,23	0.45	5.64	4.95	5.42
	0.99	10.51	9.28	10.55
	1.72	8.81	7.48	8.93
	2.19	5.49	4.64	7.57
	4.05	6.06	5.67	6.57
	5.91	8.92	8.56	9.29
	7.76	11.00	10.74	10.73

* Os valores apresentados correspondem ao protótipo da UHE Porto Colômbia.

Tabela G.12 - Valores de pressão não-adimensionalizados com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 10 % (considerando os ajustes determinados para as diferentes escalas de modelo reduzido). Metodologia proposta por Wiest (2008).

Fr*	X/(h ₂ -h ₁)*	P _{x10%aj mod. 1:32}	P _{x10%aj mod. 1:50}	P _{x10%aj mod. 1:100}
9,35	1.49	5.81	4.78	6.47
	2.50	8.87	7.98	8.66
	3.87	9.34	8.47	9.50
	4.76	9.58	8.81	9.60
	8.23	9.44	9.33	9.44
	11.71	9.44	9.49	9.44
	15.18	9.44	9.49	9.44
7,01	0.88	5.93	5.00	6.10
	1.61	9.74	8.71	9.64
	2.60	9.21	8.13	9.32
	3.24	8.62	7.50	9.09
	5.76	8.33	7.85	8.31
	8.27	9.81	9.80	9.81
	10.79	9.81	9.80	9.81
5,95	0.59	6.01	5.30	6.01
	1.20	10.48	9.38	10.45
	2.02	9.31	8.14	9.40
	2.56	7.63	6.27	8.69
	4.65	7.41	6.96	7.64
	6.74	9.68	9.34	9.85
	8.84	11.17	10.31	10.32
5,23	0.45	6.26	5.71	6.21
	0.99	11.26	10.11	11.26
	1.72	9.65	8.43	9.72
	2.19	6.51	5.55	8.37
	4.05	6.88	6.51	7.42
	5.91	9.31	8.96	9.69
	7.76	11.18	10.91	10.91

* Os valores apresentados correspondem ao protótipo da UHE Porto Colômbia.

Tabela G.13 - Valores de pressão não-adimensionalizados com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 90 % (considerando os ajustes determinados para as diferentes escalas de modelo reduzido). Metodologia proposta por Wiest (2008).

Fr*	X/(h ₂ -h ₁)*	P _{x90%aj mod. 1:32}	P _{x90%aj mod. 1:50}	P _{x90%aj mod. 1:100}
9,35	1.49	9.57	9.23	9.28
	2.50	11.04	10.90	11.04
	3.87	10.95	10.66	11.12
	4.76	10.62	10.29	10.69
	8.23	10.39	10.26	10.39
	11.71	10.39	10.35	10.39
	15.18	10.39	10.35	10.39
7,01	0.88	9.12	8.99	9.41
	1.61	12.57	12.18	12.46
	2.60	11.83	11.40	11.85
	3.24	10.78	9.89	11.00
	5.76	10.06	10.04	10.38
	8.27	10.57	10.58	10.57
	10.79	10.57	10.58	10.57
5,95	0.59	8.65	8.69	9.13
	1.20	13.32	12.74	13.17
	2.02	12.25	11.70	12.19
	2.56	10.66	9.22	11.19
	4.65	9.78	9.73	10.25
	6.74	10.61	10.36	10.94
	8.84	11.82	10.98	10.98
5,23	0.45	8.48	9.34	7.66
	0.99	13.95	14.84	12.21
	1.72	12.66	13.18	10.87
	2.19	10.18	9.85	9.71
	4.05	9.81	10.48	9.25
	5.91	10.69	11.34	10.05
	7.76	11.82	12.43	10.68

* Os valores apresentados correspondem ao protótipo da UHE Porto Colômbia.

Tabela G.14 - Valores de pressão não-adimensionalizados com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 95 % (considerando os ajustes determinados para as diferentes escalas de modelo reduzido). Metodologia proposta por Wiest (2008).

Fr*	X/(h ₂ -h ₁)*	P _{x95%aj mod. 1:32}	P _{x95%aj mod. 1:50}	P _{x95%aj mod. 1:100}
9,35	1.49	10.71	10.55	10.11
	2.50	11.70	11.77	11.75
	3.87	11.45	11.31	11.60
	4.76	10.93	10.73	11.01
	8.23	10.68	10.54	10.68
	11.71	10.68	10.60	10.68
	15.18	10.68	10.60	10.68
7,01	0.88	10.09	10.17	10.39
	1.61	13.43	13.20	13.30
	2.60	12.63	12.37	12.60
	3.24	11.43	10.60	11.57
	5.76	10.59	10.69	10.99
	8.27	10.80	10.81	10.80
	10.79	10.80	10.81	10.80
5,95	0.59	9.46	9.69	10.05
	1.20	14.18	13.74	13.98
	2.02	13.14	12.75	13.02
	2.56	11.58	10.09	11.94
	4.65	10.51	10.55	11.02
	6.74	10.90	10.66	11.26
	8.84	12.02	11.18	11.17
5,23	0.45	9.16	9.45	9.84
	0.99	14.77	14.18	14.55
	1.72	13.58	13.08	13.42
	2.19	11.30	10.06	12.06
	4.05	10.71	10.62	11.37
	5.91	11.11	10.88	11.52
	7.76	12.02	11.76	11.75

* Os valores apresentados correspondem ao protótipo da UHE Porto Colômbia.

Tabela G.15 - Valores de pressão não-adimensionalizados com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 99 % (considerando os ajustes determinados para as diferentes escalas de modelo reduzido). Metodologia proposta por Wiest (2008).

Fr*	X/(h ₂ -h ₁)*	P _{x99%aj mod. 1:32}	P _{x99%aj mod. 1:50}	P _{x99%aj mod. 1:100}
9,35	1.49	12.99	13.07	11.73
	2.50	13.02	13.42	13.13
	3.87	12.42	12.55	12.53
	4.76	11.56	11.57	11.64
	8.23	11.26	11.07	11.23
	11.71	11.26	11.08	11.23
	15.18	11.26	11.08	11.23
7,01	0.88	12.02	12.44	12.31
	1.61	15.14	15.17	14.92
	2.60	14.21	14.22	14.06
	3.24	12.74	11.96	12.67
	5.76	11.63	11.94	12.18
	8.27	11.26	11.25	11.24
	10.79	11.26	11.25	11.24
5,95	0.59	11.06	11.60	11.86
	1.20	15.90	15.65	15.56
	2.02	14.92	14.76	14.64
	2.56	13.41	11.76	13.38
	4.65	11.94	12.12	12.53
	6.74	11.46	11.24	11.89
	8.84	12.42	11.56	11.55
5,23	0.45	10.51	11.08	11.46
	0.99	16.40	15.96	16.02
	1.72	15.41	15.12	15.07
	2.19	13.52	12.03	13.71
	4.05	12.48	12.41	13.13
	5.91	11.95	11.72	12.34
	7.76	12.40	12.14	12.13

* Os valores apresentados correspondem ao protótipo da UHE Porto Colômbia.

Tabela G.16 - Valores de pressão não-adimensionalizados com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 99,9 % (considerando os ajustes determinados para as diferentes escalas de modelo reduzido). Metodologia proposta por Wiest (2008).

Fr*	X/(h ₂ -h ₁)*	P _{x99,9%aj mod. 1:32}	P _{x99,9%aj mod. 1:50}	P _{x99,9%aj mod. 1:100}
9,35	1.49	13.99	14.15	12.43
	2.50	13.60	14.13	13.72
	3.87	12.85	13.08	12.93
	4.76	11.84	11.93	11.91
	8.23	11.51	11.29	11.47
	11.71	11.51	11.29	11.47
	15.18	11.51	11.29	11.47
7,01	0.88	12.87	13.41	13.13
	1.61	15.89	16.01	15.63
	2.60	14.91	15.01	14.69
	3.24	13.32	12.54	13.15
	5.76	12.09	12.47	12.70
	8.27	11.46	11.44	11.43
	10.79	11.46	11.44	11.43
5,95	0.59	11.77	12.42	12.64
	1.20	16.66	16.46	16.24
	2.02	15.71	15.62	15.34
	2.56	14.21	12.47	14.00
	4.65	12.58	12.79	13.18
	6.74	11.71	11.48	12.16
	8.84	12.59	11.72	11.71
5,23	0.45	11.10	11.78	12.16
	0.99	17.12	16.71	16.65
	1.72	16.22	15.99	15.78
	2.19	14.50	12.88	14.42
	4.05	13.27	13.18	13.89
	5.91	12.32	12.08	12.69
	7.76	12.58	12.30	12.29

* Os valores apresentados correspondem ao protótipo da UHE Porto Colômbia.

Anexo H - Previsão dos valores extremos de pressão com base na metodologia proposta por Cerezer, 2008.

Tabela H.1 - Estimativa dos parâmetros da distribuição GEV para os valores extremos máximos de pressão (Mmat. (esc. 1:32)).

Q = 1000 m ³ /s			
Tomadas	μ_{adm}	σ_{adm}	ξ
dA	0,907	0,063	-0,093
dB	1,151	0,030	0,000
dC	1,179	0,034	0,000
d1	1,131	0,044	0,000
d3	1,036	0,027	0,000
d5	1,061	0,008	0,000
d7	1,059	0,004	-0,238

Q = 2000 m ³ /s			
Tomadas	μ_{adm}	σ_{adm}	ξ
dA	1,067	0,115	0,000
dB	1,364	0,069	0,000
dC	1,285	0,071	0,000
d1	1,057	0,070	0,166
d3	1,055	0,064	0,000
d5	1,063	0,028	0,000
d7	1,065	0,007	0,000

Q = 3000 m ³ /s			
Tomadas	μ_{adm}	σ_{adm}	ξ
dA	1,106	0,139	0,000
dB	1,572	0,093	0,000
dC	1,427	0,091	0,000
d1	1,134	0,114	0,000
d3	1,096	0,090	0,000
d5	1,060	0,039	0,000
d7	1,074	0,016	-0,087

Q = 4000 m ³ /s			
Tomadas	μ_{adm}	σ_{adm}	ξ
dA	1,014	0,031	-0,637
dB	1,538	0,078	0,095
dC	1,339	0,092	0,145
d1	1,115	0,135	0,000
d3	1,217	0,113	0,000
d5	1,132	0,049	0,000
d7	1,255	0,024	-0,101

Tabela H.2 - Estimativa dos parâmetros da distribuição GEV para os valores extremos máximos de pressão (Mmat. (esc. 1:50)).

Q = 1000 m ³ /s			
Tomadas	μ_{adm}	σ_{adm}	ξ
dA	0,926	0,075	0,000
dB	1,167	0,048	0,000
dC	1,186	0,048	0,000
d1	1,111	0,049	0,000
d3	1,020	0,031	0,000
d5	1,026	0,011	-0,223
d7	1,059	0,007	-0,171

Q = 2000 m ³ /s			
Tomadas	μ_{adm}	σ_{adm}	ξ
dA	1,157	0,122	-0,093
dB	1,346	0,086	0,000
dC	1,288	0,085	0,000
d1	1,120	0,091	0,000
d3	1,093	0,061	0,000
d5	1,082	0,026	0,000
d7	1,094	0,010	-0,168

Q = 3000 m ³ /s			
Tomadas	μ_{adm}	σ_{adm}	ξ
dA	1,077	0,122	0,000
dB	1,440	0,088	0,000
dC	1,347	0,108	0,000
d1	1,107	0,123	0,000
d3	1,129	0,098	0,119
d5	1,095	0,037	-0,084
d7	1,085	0,014	-0,278

Q = 4000 m ³ /s			
Tomadas	μ_{adm}	σ_{adm}	ξ
dA	0,933	0,083	0,000
dB	1,427	0,076	0,000
dC	1,340	0,091	0,000
d1	1,046	0,121	0,119
d3	1,165	0,114	0,000
d5	1,102	0,053	0,000
d7	1,106	0,020	0,000

Tabela H.3 - Estimativa dos parâmetros da distribuição GEV para os valores extremos máximos de pressão (Mmat. (esc. 1:100)).

Q = 1000 m ³ /s			
Tomadas	μ_{adm}	σ_{adm}	ξ
dA	0,754	0,048	0,000
dB	1,214	0,041	0,000
dC	1,192	0,041	0,000
d1	1,138	0,048	0,000
d3	1,108	0,040	0,000
d5	1,170	0,028	-0,164
d7	1,193	0,023	-0,190

Q = 2000 m ³ /s			
Tomadas	μ_{adm}	σ_{adm}	ξ
dA	0,988	0,081	0,000
dB	1,374	0,081	0,000
dC	1,278	0,075	0,000
d1	1,204	0,095	0,127
d3	1,150	0,064	0,000
d5	1,182	0,033	-0,132
d7	1,197	0,023	-0,166

Q = 3000 m ³ /s			
Tomadas	μ_{adm}	σ_{adm}	ξ
dA	1,128	0,116	0,000
dB	1,431	0,094	0,000
dC	1,292	0,078	0,000
d1	1,160	0,109	0,104
d3	1,143	0,085	0,000
d5	1,164	0,042	0,000
d7	1,190	0,022	-0,174

Q = 4000 m ³ /s			
Tomadas	μ_{adm}	σ_{adm}	ξ
dA	0,942	0,105	-0,124
dB	1,412	0,069	0,000
dC	1,314	0,084	0,000
d1	1,113	0,115	0,000
d3	1,156	0,104	0,000
d5	1,179	0,053	0,070
d7	1,260	0,027	0,000

Tabela H.4 - Estimativa dos parâmetros da distribuição GEV para os valores extremos mínimos de pressão (Mmat. (esc. 1:32))

Q = 1000 m ³ /s				Q = 2000 m ³ /s			
Tomadas	μ_{adm}	σ_{adm}	ξ	Tomadas	μ_{adm}	σ_{adm}	ξ
dA	0,415	0,063	-0,583	dA	0,196	0,150	-0,543
dB	0,867	0,041	-0,374	dB	0,685	0,125	-0,467
dC	0,906	0,039	-0,480	dC	0,750	0,064	-0,342
d1	0,846	0,047	-0,531	d1	0,595	0,064	-0,396
d3	0,879	0,040	-0,451	d3	0,638	0,074	-0,549
d5	1,039	0,014	-0,608	d5	0,919	0,074	-0,639
d7	1,048	0,005	-0,408	d7	1,046	0,013	-0,579

Q = 3000 m ³ /s				Q = 4000 m ³ /s			
Tomadas	μ_{adm}	σ_{adm}	ξ	Tomadas	μ_{adm}	σ_{adm}	ξ
dA	0,309	0,098	-0,487	dA	0,456	0,057	-0,451
dB	0,616	0,150	-0,433	dB	0,856	0,093	-0,427
dC	0,630	0,111	-0,490	dC	0,703	0,090	-0,447
d1	0,399	0,093	-0,426	d1	0,302	0,090	-0,397
d3	0,493	0,115	-0,500	d3	0,438	0,123	-0,501
d5	0,801	0,075	-0,462	d5	0,835	0,086	-0,403
d7	1,014	0,031	-0,637	d7	1,136	0,044	-0,482

Tabela H.5 - Estimativa dos parâmetros da distribuição GEV para os valores extremos mínimos de pressão (Mmat. (esc. 1:50))

Q = 1000 m ³ /s				Q = 2000 m ³ /s			
Tomadas	μ_{adm}	σ_{adm}	ξ	Tomadas	μ_{adm}	σ_{adm}	ξ
dA	0,306	0,074	-0,475	dA	0,098	0,148	-0,467
dB	0,758	0,052	-0,410	dB	0,566	0,098	-0,373
dC	0,813	0,044	-0,389	dC	0,639	0,069	-0,416
d1	0,762	0,045	-0,452	d1	0,496	0,076	-0,468
d3	0,768	0,111	0,000	d3	0,638	0,066	-0,378
d5	0,903	0,020	-0,474	d5	0,875	0,060	-0,462
d7	0,948	0,018	-0,594	d7	0,980	0,018	-0,456

Q = 3000 m ³ /s				Q = 4000 m ³ /s			
Tomadas	μ_{adm}	σ_{adm}	ξ	Tomadas	μ_{adm}	σ_{adm}	ξ
dA	0,271	0,090	-0,493	dA	0,439	0,052	-0,367
dB	0,518	0,128	-0,467	dB	0,789	0,072	-0,460
dC	0,478	0,098	-0,378	dC	0,547	0,077	-0,382
d1	0,282	0,119	-0,475	d1	0,267	0,098	-0,489
d3	0,452	0,099	-0,537	d3	0,343	0,126	-0,503
d5	0,760	0,069	-0,574	d5	0,669	0,085	-0,447
d7	0,960	0,020	-0,432	d7	0,936	0,031	-0,516

Tabela H.6 - Estimativa dos parâmetros da distribuição GEV para os valores extremos mínimos de pressão (Mmat. (esc. 1:100))

Q = 1000 m ³ /s			
Tomadas	μ_{adm}	σ_{adm}	ξ
dA	0,328	0,051	-0,421
dB	0,769	0,052	-0,345
dC	0,810	0,044	-0,351
d1	0,747	0,046	-0,351
d3	0,724	0,049	-0,345
d5	0,836	0,047	-0,269
d7	0,882	0,029	-0,107

Q = 2000 m ³ /s			
Tomadas	μ_{adm}	σ_{adm}	ξ
dA	0,165	0,067	-0,381
dB	0,676	0,088	-0,440
dC	0,644	0,078	-0,389
d1	0,542	0,083	-0,488
d3	0,621	0,071	-0,501
d5	0,830	0,048	-0,341
d7	0,902	0,027	-0,128

Q = 3000 m ³ /s			
Tomadas	μ_{adm}	σ_{adm}	ξ
dA	0,064	0,076	-0,347
dB	0,629	0,106	-0,383
dC	0,528	0,094	-0,375
d1	0,377	0,099	-0,433
d3	0,488	0,094	-0,541
d5	0,737	0,195	0,114
d7	0,893	0,029	-0,184

Q = 4000 m ³ /s			
Tomadas	μ_{adm}	σ_{adm}	ξ
dA	0,197	0,076	-0,375
dB	0,743	0,106	-0,532
dC	0,573	0,085	-0,412
d1	0,287	0,102	-0,461
d3	0,381	0,125	-0,610
d5	0,698	0,074	-0,433
d7	0,945	0,047	-0,349

H.1 - Análise dos efeitos de escala nas pressões extremas através da metodologia proposta por Cerezer (2008)

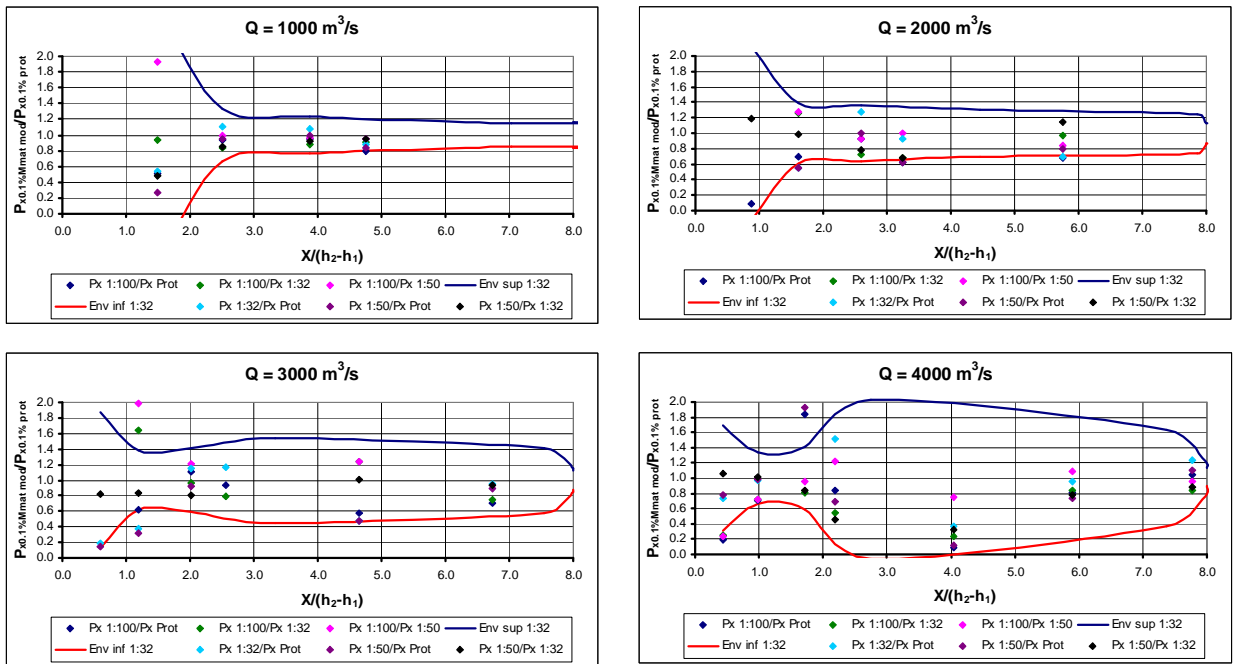


Figura H.1 - Distribuição longitudinal das diferenças relativas da pressão com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 0,1 % ($P_{x0,1\%Mmat}$), considerando a metodologia proposta por Cerezer (2008). As envoltórias foram definidas com base nos dados obtidos no modelo 1:32.

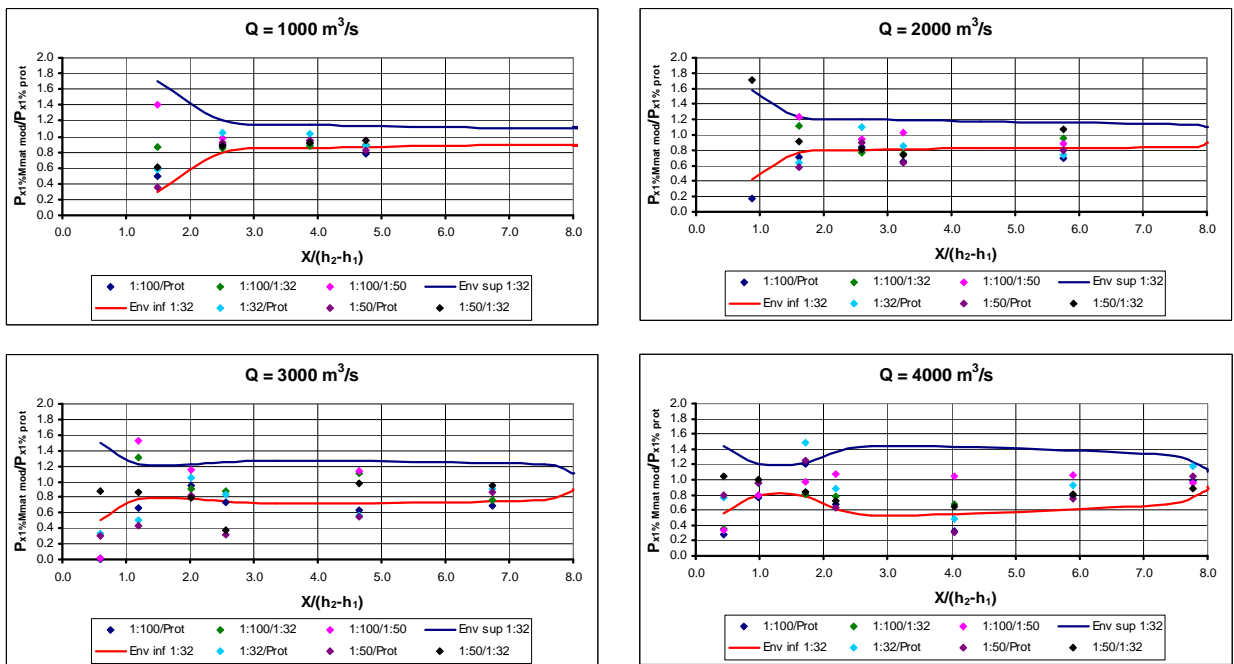


Figura H.2 - Distribuição longitudinal das diferenças relativas da pressão com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 1 % ($P_{x1\%Mmat}$), considerando a metodologia proposta por Cerezer (2008). As envoltórias foram definidas com base nos dados obtidos no modelo 1:32.

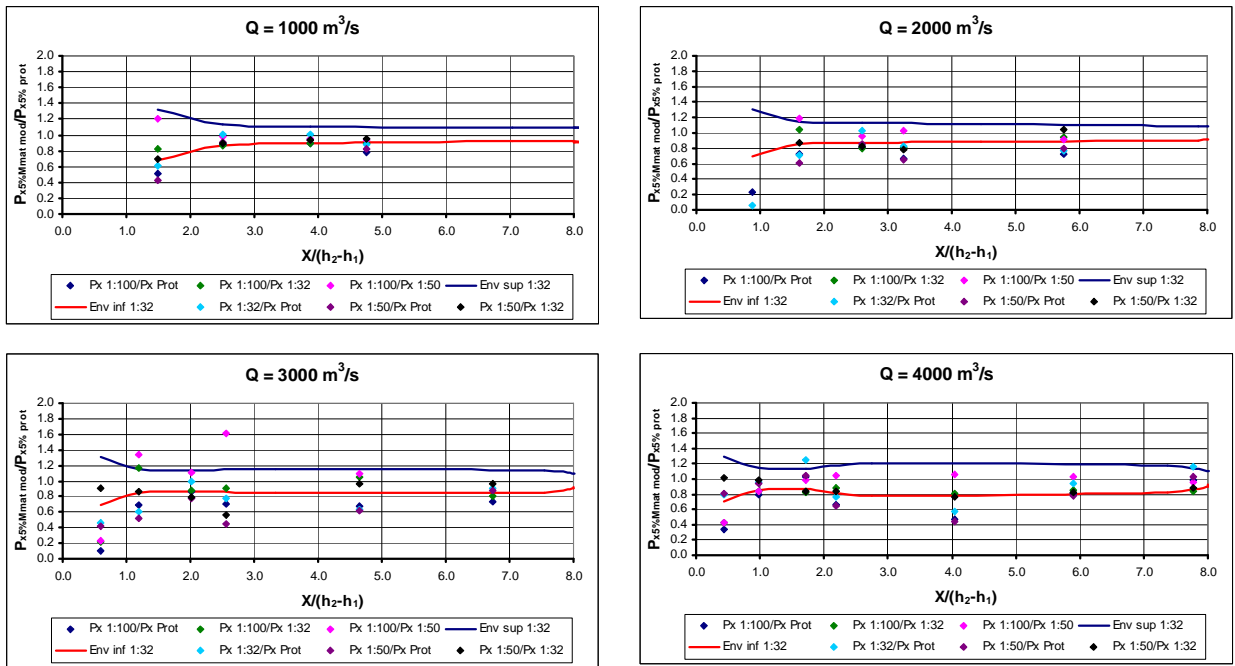


Figura H.3 - Distribuição longitudinal das diferenças relativas da pressão com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 5 % ($P_{x5\%Mmat}$), considerando a metodologia proposta por **Cerezer (2008)**. As envoltórias foram definidas com base nos dados obtidos no modelo 1:32.

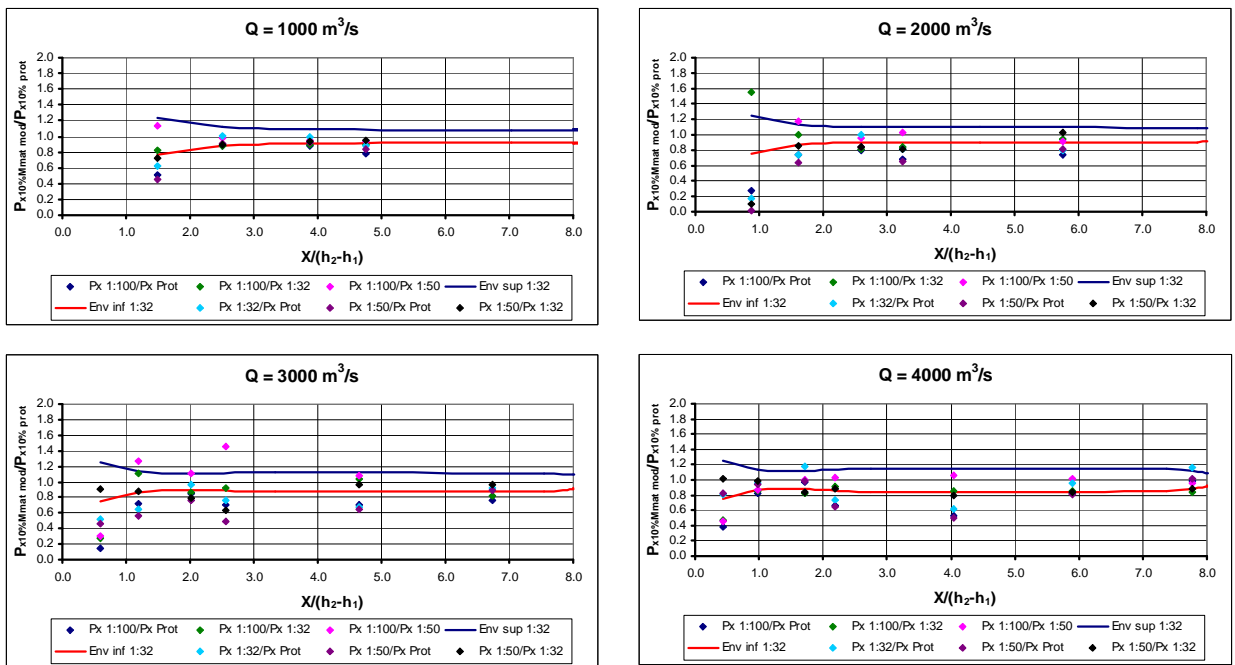


Figura H.4 - Distribuição longitudinal das diferenças relativas da pressão com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 10 % ($P_{x10\%Mmat}$), considerando a metodologia proposta por **Cerezer (2008)**. As envoltórias foram definidas com base nos dados obtidos no modelo 1:32.

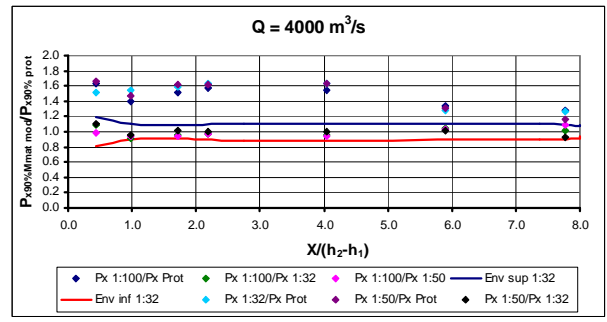
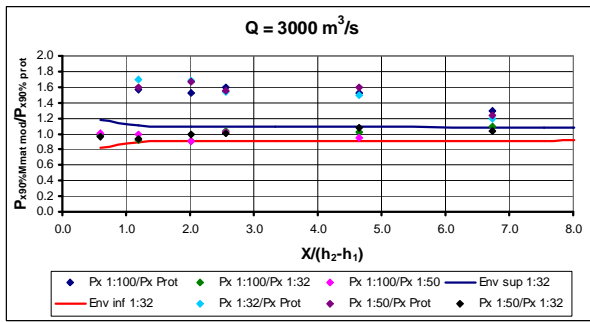
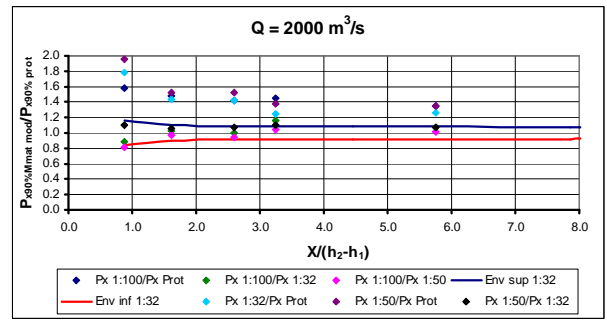
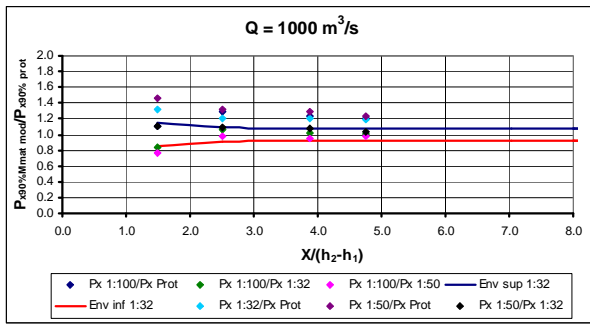


Figura H.5 - Distribuição longitudinal das diferenças relativas da pressão com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 90 % ($P_{x90\%Mmat}$), considerando a metodologia proposta por Cerezer (2008). As envoltórias foram definidas com base nos dados obtidos no modelo 1:32.

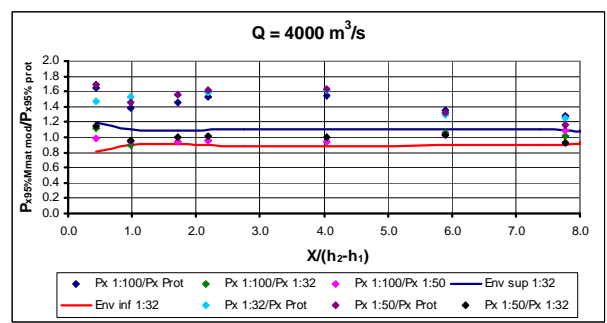
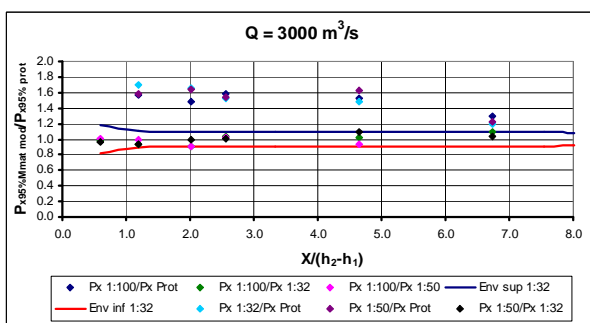
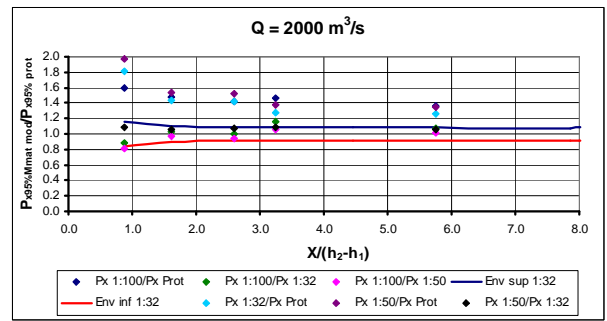
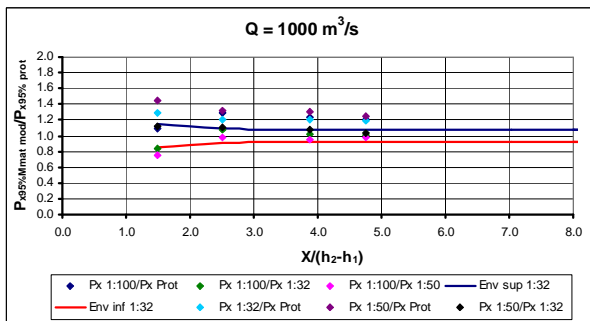


Figura H.6 - Distribuição longitudinal das diferenças relativas da pressão com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 95 % ($P_{x95\%Mmat}$), considerando a metodologia proposta por Cerezer (2008). As envoltórias foram definidas com base nos dados obtidos no modelo 1:32.

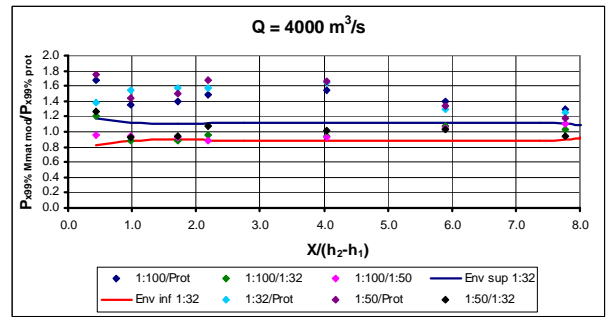
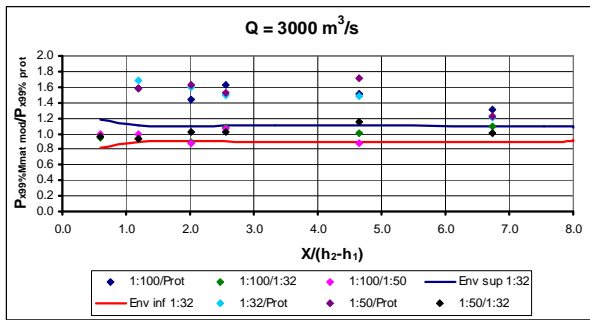
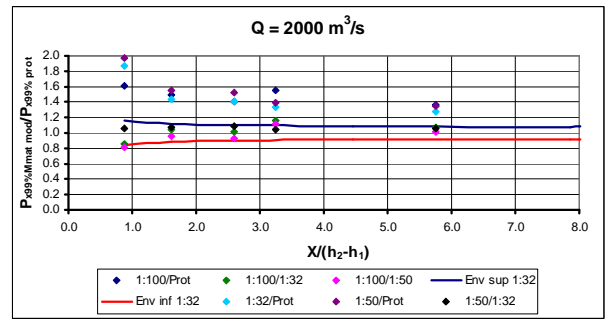
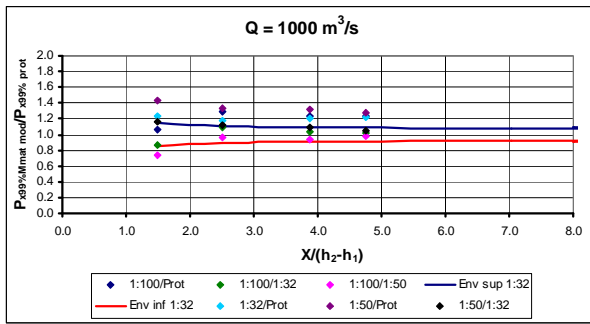


Figura H.7 - Distribuição longitudinal das diferenças relativas da pressão com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 99 % ($P_{x99\%Mmat}$), considerando a metodologia proposta por Cerezer (2008). As envoltórias foram definidas com base nos dados obtidos no modelo 1:32.

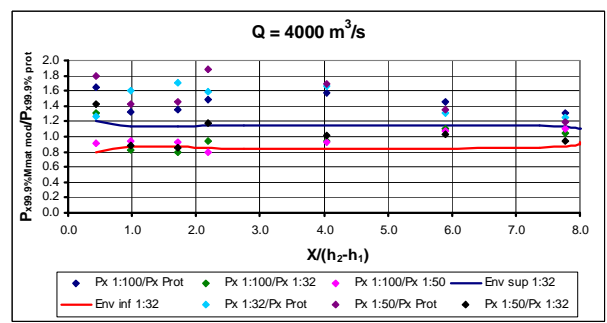
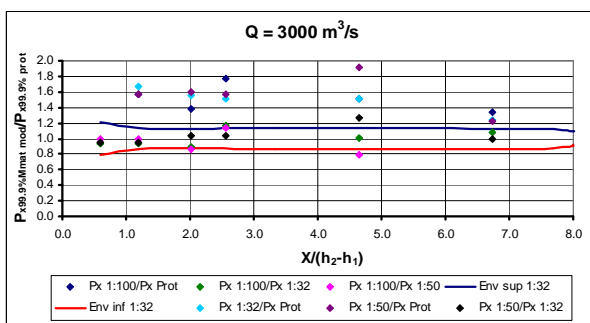
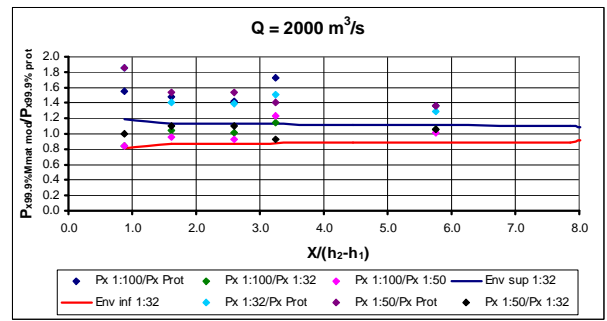
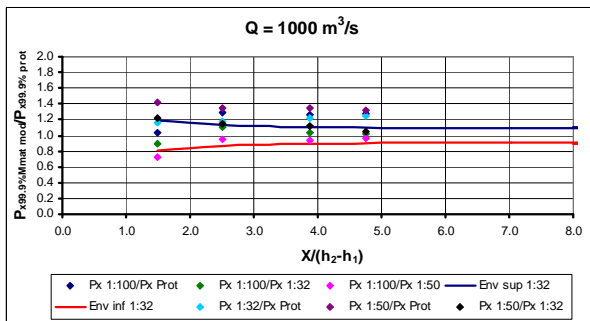


Figura H.8 - Distribuição longitudinal das diferenças relativas da pressão com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 99,9 % ($P_{x99.9\%Mmat}$), considerando a metodologia proposta por Cerezer (2008). As envoltórias foram definidas com base nos dados obtidos no modelo 1:32.

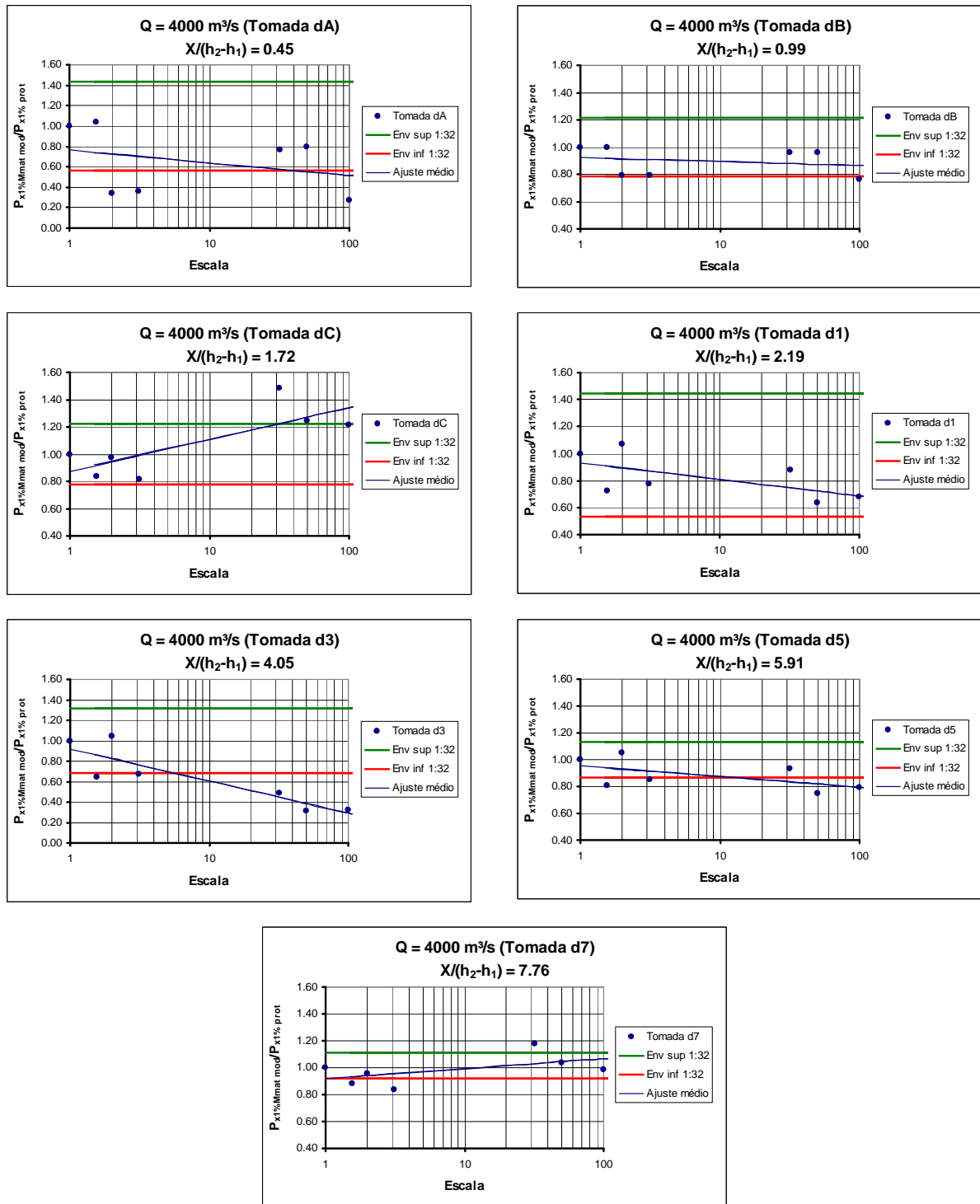


Figura H.9 - Diferenças relativas da pressão com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 1 %, para todas as tomadas de pressão, considerando a metodologia proposta por Cerezer (2008) para as diferentes escalas de modelo. As envoltórias foram definidas com base nos dados obtidos no modelo 1:32.

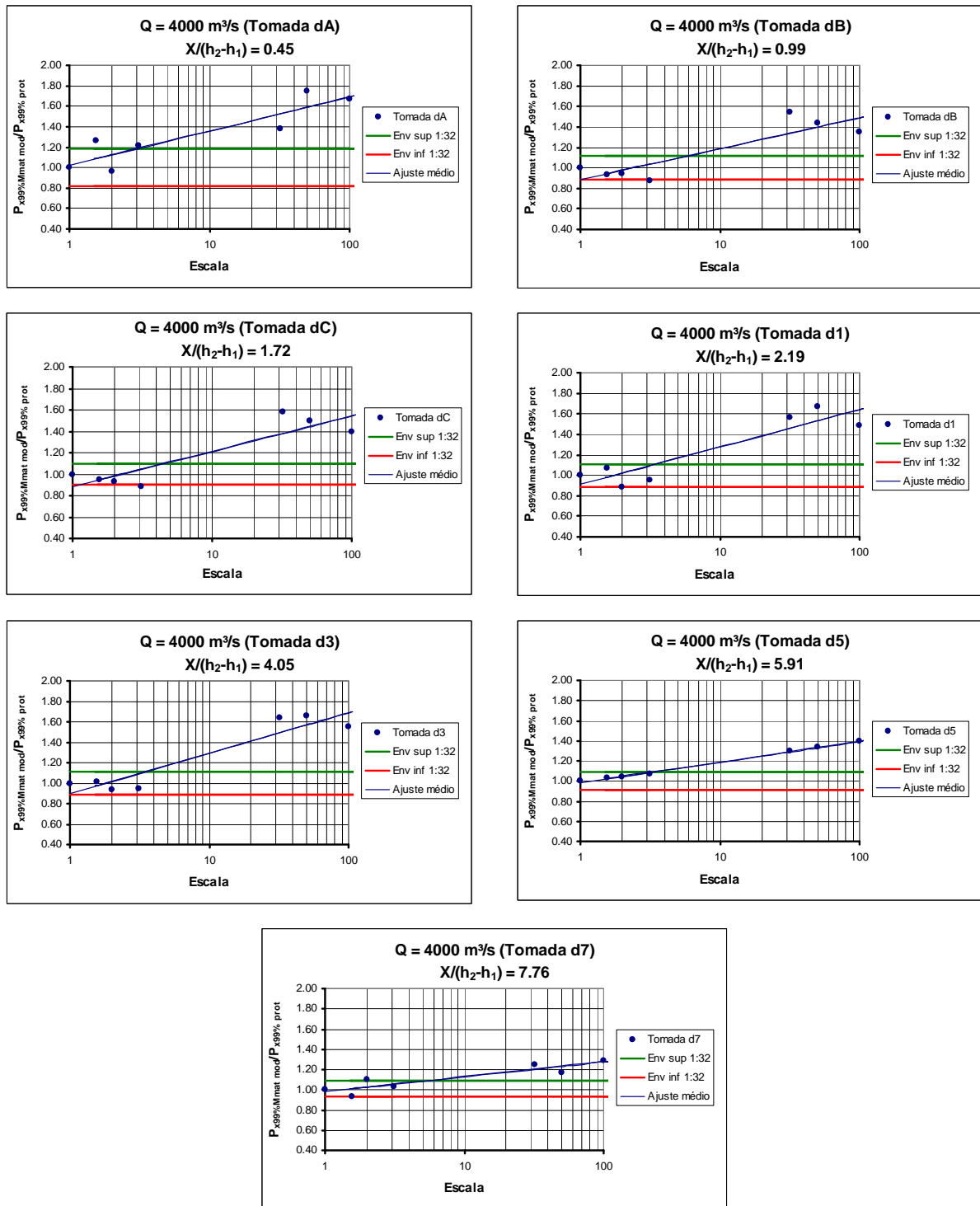


Figura H.10 - Diferenças relativas da pressão com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 99 %, para todas as tomadas de pressão, considerando a metodologia proposta por Cerezer (2008) para as diferentes escalas de modelo. As envoltórias foram definidas com base nos dados obtidos no modelo 1:32.

H.2 - Valores extremos de pressão para as diferentes tomadas, condições de escoamento e probabilidades de ocorrência (obtidos a partir da metodologia proposta por Cerezer, 2008).

Tabela H.7 - Valores de pressão não-adimensionalizados com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 0,1 % (considerando os ajustes determinados para as diferentes escalas de modelo reduzido). Metodologia proposta por Cerezer (2008).

Fr*	X/(h ₂ -h ₁)*	P _{x0,1%Mmat mod. 1:32}	P _{x0,1%Mmat mod. 1:50}	P _{x0,1%Mmat mod. 1:100}
9,35	1.49	1.99	0.97	1.88
	2.50	6.99	5.96	5.90
	3.87	7.27	6.71	6.44
	4.76	6.44	6.13	5.84
	8.23	7.03	5.46	5.57
	11.71	9.12	8.13	6.70
	15.18	9.53	8.53	7.62
7,01	0.88	-2.49	-2.96	0.36
	1.61	3.48	3.45	4.41
	2.60	6.23	4.86	4.52
	3.24	4.63	3.14	3.16
	5.76	4.35	5.01	4.23
	8.27	6.85	7.35	7.15
	10.79	10.39	9.65	8.50
5,95	0.59	0.86	0.70	-0.52
	1.20	2.48	2.05	4.08
	2.02	3.57	2.86	3.45
	2.56	2.08	-0.03	1.65
	4.65	2.04	2.05	2.54
	6.74	6.43	6.02	4.79
	8.84	9.62	9.81	8.96
5,23	0.45	3.97	4.23	1.00
	0.99	6.92	7.03	5.02
	1.72	5.45	4.58	4.37
	2.19	1.58	0.72	0.87
	4.05	1.55	0.50	0.38
	5.91	6.99	5.43	5.91
	7.76	11.09	9.81	9.31

* Os valores apresentados correspondem ao protótipo da UHE Porto Colômbia.

Tabela H.8 - Valores de pressão não-adimensionalizados com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 1 % (considerando os ajustes determinados para as diferentes escalas de modelo reduzido). Metodologia proposta por Cerezer (2008).

Fr*	X/(h ₂ -h ₁)*	P _{x1%Mmat mod. 1:32}	P _{x1%Mmat mod. 1:50}	P _{x1%Mmat mod. 1:100}
9,35	1.49	2.62	1.61	2.26
	2.50	7.28	6.36	6.24
	3.87	7.60	7.04	6.73
	4.76	6.87	6.50	6.15
	8.23	7.35	5.88	5.89
	11.71	9.26	8.30	6.97
	15.18	9.56	8.73	7.75
7,01	0.88	-0.96	-1.65	0.85
	1.61	4.59	4.19	5.13
	2.60	6.69	5.42	5.10
	3.24	5.13	3.81	3.90
	5.76	5.12	5.52	4.88
	8.27	7.73	7.88	7.48
	10.79	10.53	9.81	8.63
5,95	0.59	1.76	1.55	0.03
	1.20	3.74	3.21	4.89
	2.02	4.59	3.62	4.16
	2.56	2.85	1.05	2.48
	4.65	3.13	3.06	3.48
	6.74	7.09	6.77	5.43
	8.84	10.00	9.98	9.12
5,23	0.45	4.47	4.64	1.59
	0.99	7.71	7.71	6.10
	1.72	6.23	5.21	5.08
	2.19	2.31	1.67	1.79
	4.05	2.73	1.76	1.83
	5.91	7.69	6.20	6.54
	7.76	11.50	10.14	9.66

* Os valores apresentados correspondem ao protótipo da UHE Porto Colômbia.

Tabela H.9 - Valores de pressão não-adimensionalizados com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 5 % (considerando os ajustes determinados para as diferentes escalas de modelo reduzido). Metodologia proposta por Cerezer (2008).

Fr*	X/(h ₂ -h ₁)*	P _{x5%Mmat mod. 1:32}	P _{x5%Mmat mod. 1:50}	P _{x5%Mmat mod. 1:100}
9,35	1.49	3.14	2.17	2.60
	2.50	7.54	6.71	6.55
	3.87	7.88	7.33	7.00
	4.76	7.23	6.82	6.42
	8.23	7.63	6.33	6.18
	11.71	9.38	8.46	7.23
	15.18	9.59	8.89	7.88
7,01	0.88	0.33	-0.50	1.29
	1.61	5.56	4.86	5.77
	2.60	7.12	5.92	5.63
	3.24	5.58	4.40	4.54
	5.76	5.76	5.98	5.43
	8.27	8.46	8.34	7.78
	10.79	10.65	9.95	8.75
5,95	0.59	2.53	2.28	0.54
	1.20	4.85	4.21	5.63
	2.02	5.48	4.31	4.81
	2.56	3.53	2.00	3.22
	4.65	4.06	3.92	4.29
	6.74	7.66	7.39	6.13
	8.84	10.30	10.14	9.27
5,23	0.45	4.92	5.01	2.12
	0.99	8.41	8.30	7.01
	1.72	6.92	5.77	5.71
	2.19	2.96	2.50	2.59
	4.05	3.75	2.85	3.03
	5.91	8.32	6.88	7.10
	7.76	11.86	10.41	9.97

* Os valores apresentados correspondem ao protótipo da UHE Porto Colômbia.

Tabela H.10 - Valores de pressão não-adimensionalizados com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 10 % (considerando os ajustes determinados para as diferentes escalas de modelo reduzido). Metodologia proposta por Cerezer (2008).

Fr*	X/(h ₂ -h ₁)*	P _{x10%Mmat mod. 1:32}	P _{x10%Mmat mod. 1:50}	P _{x10%Mmat mod. 1:100}
9,35	1.49	3.40	2.45	2.78
	2.50	7.68	6.90	6.72
	3.87	8.03	7.49	7.15
	4.76	7.41	6.99	6.57
	8.23	7.78	6.60	6.34
	11.71	9.44	8.54	7.37
	15.18	9.61	8.97	7.95
7,01	0.88	0.98	0.10	1.53
	1.61	6.07	5.22	6.10
	2.60	7.35	6.19	5.91
	3.24	5.82	4.71	4.87
	5.76	6.08	6.22	5.72
	8.27	8.81	8.58	7.95
	10.79	10.71	10.02	8.83
5,95	0.59	2.93	2.66	0.81
	1.20	5.44	4.74	6.02
	2.02	5.93	4.68	5.15
	2.56	3.89	2.49	3.60
	4.65	4.54	4.35	4.69
	6.74	7.96	7.71	6.58
	8.84	10.45	10.22	9.36
5,23	0.45	5.15	5.22	2.41
	0.99	8.78	8.60	7.48
	1.72	7.28	6.08	6.04
	2.19	3.30	2.93	3.01
	4.05	4.28	3.40	3.62
	5.91	8.65	7.24	7.39
	7.76	12.05	10.55	10.14

* Os valores apresentados correspondem ao protótipo da UHE Porto Colômbia.

Tabela H.11 - Valores de pressão não-adimensionalizados com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 90 % (considerando os ajustes determinados para as diferentes escalas de modelo reduzido). Metodologia proposta por Cerezer (2008).

Fr*	X/(h ₂ -h ₁)*	P _{x90%Mmat mod. 1:32}	P _{x90%Mmat mod. 1:50}	P _{x90%Mmat mod. 1:100}
9,35	1.49	9.54	10.52	8.00
	2.50	11.19	12.21	11.97
	3.87	11.52	12.38	11.76
	4.76	11.29	11.70	11.42
	8.23	10.09	10.48	11.00
	11.71	9.93	10.07	11.21
	15.18	9.82	10.31	11.33
7,01	0.88	13.03	14.35	11.57
	1.61	14.85	15.67	15.19
	2.60	14.15	15.08	14.18
	3.24	12.29	13.57	14.21
	5.76	11.84	12.63	12.73
	8.27	11.16	11.76	12.28
	10.79	10.73	11.50	12.23
5,95	0.59	14.73	14.30	14.44
	1.20	18.27	17.14	16.91
	2.02	16.82	16.67	15.20
	2.56	14.47	14.60	14.91
	4.65	13.56	14.58	13.91
	6.74	12.10	12.52	13.17
	8.84	11.69	11.88	12.90
5,23	0.45	11.66	12.80	12.61
	0.99	18.45	17.73	16.79
	1.72	16.95	17.21	16.15
	2.19	15.32	15.27	14.85
	4.05	15.84	15.92	15.02
	5.91	13.56	13.84	14.21
	7.76	14.16	13.13	14.35

* Os valores apresentados correspondem ao protótipo da UHE Porto Colômbia.

Tabela H.12 - Valores de pressão não-adimensionalizados com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 95 % (considerando os ajustes determinados para as diferentes escalas de modelo reduzido). Metodologia proposta por Cerezer (2008).

Fr*	X/(h ₂ -h ₁)*	P _{x95%Mmat mod. 1:32}	P _{x95%Mmat mod. 1:50}	P _{x95%Mmat mod. 1:100}
9,35	1.49	9.85	11.03	8.31
	2.50	11.38	12.53	12.24
	3.87	11.74	12.70	12.02
	4.76	11.58	12.02	11.72
	8.23	10.26	10.69	11.26
	11.71	9.98	10.11	11.33
	15.18	9.83	10.34	11.43
7,01	0.88	13.81	15.03	12.12
	1.61	15.32	16.28	15.74
	2.60	14.63	15.68	14.69
	3.24	13.02	14.21	15.10
	5.76	12.27	13.06	13.16
	8.27	11.35	11.94	12.44
	10.79	10.78	11.54	12.33
5,95	0.59	15.71	15.17	15.26
	1.20	18.92	17.78	17.57
	2.02	17.47	17.45	15.75
	2.56	15.27	15.48	15.91
	4.65	14.20	15.53	14.50
	6.74	12.37	12.73	13.46
	8.84	11.78	11.93	13.00
5,23	0.45	11.71	13.42	13.15
	0.99	19.17	18.30	17.29
	1.72	17.91	17.89	16.75
	2.19	16.29	16.51	15.68
	4.05	16.65	16.77	15.77
	5.91	13.92	14.23	14.66
	7.76	14.29	13.28	14.54

* Os valores apresentados correspondem ao protótipo da UHE Porto Colômbia.

Tabela H.13 - Valores de pressão não-adimensionalizados com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 99 % (considerando os ajustes determinados para as diferentes escalas de modelo reduzido). Metodologia proposta por Cerezer (2008).

Fr*	X/(h ₂ -h ₁)*	P _{x99%Mmat mod. 1:32}	P _{x99%Mmat mod. 1:50}	P _{x99%Mmat mod. 1:100}
9,35	1.49	10.49	12.16	9.01
	2.50	11.82	13.26	12.84
	3.87	12.24	13.43	12.61
	4.76	12.22	12.76	12.42
	8.23	10.65	11.17	11.84
	11.71	10.09	10.18	11.55
	15.18	9.86	10.40	11.59
7,01	0.88	15.58	16.40	13.36
	1.61	16.38	17.66	16.99
	2.60	15.72	17.04	15.84
	3.24	15.03	15.65	17.45
	5.76	13.24	14.02	14.13
	8.27	11.78	12.34	12.75
	10.79	10.88	11.63	12.51
5,95	0.59	17.91	17.14	17.10
	1.20	20.40	19.20	19.07
	2.02	18.92	19.20	16.98
	2.56	17.09	17.46	18.49
	4.65	15.63	18.00	15.85
	6.74	13.00	13.17	14.13
	8.84	11.96	12.01	13.18
5,23	0.45	11.75	14.83	14.22
	0.99	20.98	19.57	18.41
	1.72	20.49	19.43	18.11
	2.19	18.49	19.73	17.55
	4.05	18.48	18.69	17.45
	5.91	14.72	15.12	15.77
	7.76	14.56	13.62	14.99

* Os valores apresentados correspondem ao protótipo da UHE Porto Colômbia.

Tabela H.14 - Valores de pressão não-adimensionalizados com probabilidade de ocorrência igual ou inferior a 99,9 % (considerando os ajustes determinados para as diferentes escalas de modelo reduzido). Metodologia proposta por Cerezer (2008).

Fr*	X/(h ₂ -h ₁)*	P _{x99,9%Mmat mod. 1:32}	P _{x99,9%Mmat mod. 1:50}	P _{x99,9%Mmat mod. 1:100}
9,35	1.49	11.25	13.78	10.00
	2.50	12.45	14.30	13.69
	3.87	12.95	14.46	13.45
	4.76	13.13	13.81	13.40
	8.23	11.21	11.85	12.66
	11.71	10.24	10.25	11.77
	15.18	9.88	10.46	11.75
7,01	0.88	18.07	18.01	15.12
	1.61	17.88	19.61	18.75
	2.60	17.26	18.95	17.47
	3.24	18.98	17.70	21.74
	5.76	14.62	15.39	15.51
	8.27	12.39	12.92	13.08
	10.79	11.03	11.72	12.71
5,95	0.59	21.04	19.94	19.71
	1.20	22.50	21.23	21.18
	2.02	20.98	21.68	18.73
	2.56	19.66	20.26	22.96
	4.65	17.66	22.43	17.75
	6.74	13.88	13.70	15.08
	8.84	12.18	12.07	13.36
5,23	0.45	11.77	16.82	15.40
	0.99	24.07	21.38	19.99
	1.72	25.35	21.61	20.04
	2.19	21.60	25.50	20.20
	4.05	21.08	21.41	19.83
	5.91	15.85	16.37	17.58
	7.76	14.87	14.10	15.62

* Os valores apresentados correspondem ao protótipo da UHE Porto Colômbia.