

Estimativa dos Valores Extremos de Pressão em Bacias de Dissipação por Ressalto Hidráulico

M. G. Marques, IPH/UFRGS; E. D. Teixeira, IPH/UFRGS; S. M. Cerezer, IPH/UFRGS; A. A. A. Mees, IPH/UFRGS; C. Palauro, IPH/UFRGS; L. A. M. Endres, IPH/UFRGS; F. M. Almeida, LAHE/FURNAS; R. P. Feraudy Filho, LAHE/FURNAS; M. Dai Prá, LAHE/FURNAS e A. V. B. Canellas, LAHE/FURNAS.

Resumo - Este trabalho apresenta um resumo dos resultados obtidos até o momento no projeto de P&D “Análise da Macroturbulência em Dissipadores por Ressalto Hidráulico”, que visa o dimensionamento de estruturas mais seguras e econômicas. O desenvolvimento dos estudos foi realizado através da comparação de dados de pressões obtidos diretamente na UHE Porto Colômbia com os valores obtidos em modelos físicos reduzidos nas escalas 1:50 e 1:100. São apresentados aqui os resultados para a vazão equivalente a 4000 m³/s no protótipo. As principais conclusões foram: a) os resultados dos modelos estão a favor da segurança desde que obedecem a certas condições; b) os valores das pressões extremas podem ser estimados por equações obtidas a partir de medições efetuadas em laboratório, associadas às técnicas de análise estatística, com uma margem de segurança considerada adequada.

Abstract - The present work summarizes the conclusions found so far in the R&D project 'Analysis of the Macroturbulence in Hydraulic Jump Dissipators' aiming for safer and more cost effective structures. This analysis was developed through the comparison of data obtained in the HPP Porto Colômbia and data obtained in scaled models (1:50 e 1:100 ratio). In this paper are presented the results for a discharge equivalent to 4000m³/s in the prototype structure. It is concluded that: a) the results in the models are toward safer values, as long as they follow certain conditions; b) equations for the prediction of extreme pressure values can be obtained from laboratory data, associated with statistical analysis, within a reasonable margin of safety.

Palavras-chave - bacia de dissipação, flutuação de pressão, pressões extremas e ressalto hidráulico.

I. INTRODUÇÃO

O presente estudo faz parte do projeto de P&D “Análise da Macroturbulência em Dissipadores por Ressalto Hidráulico”, que vem sendo desenvolvido em uma parceria entre o Laboratório de Hidráulica Experimental e Recursos Hídricos (LAHE), de Furnas Centrais Elétricas S.A., e o Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. São apresentados os principais resultados sobre a análise das pressões extremas e dos efeitos de escala com base nos dados obtidos na bacia de dissipação de energia por ressalto hidráulico da UHE Porto Colômbia e em modelos reduzidos desta, nas escalas 1:50 e 1:100 existentes no LAHE.

Na Figura 1 pode ser visualizado o ressalto hidráulico formado na UHE Porto Colômbia durante a obtenção das amostras de dados de pressão, quando do vertimento de 4000 m³/s. As Figuras 2 e 3 apresentam o mesmo escoamento nos modelos nas escalas de 1:50 e 1:100.



Figura 1. Ressonância hidráulica formada na UHE Porto Colômbia para a vazão de 4000 m³/s (número de Froude = 5,23).

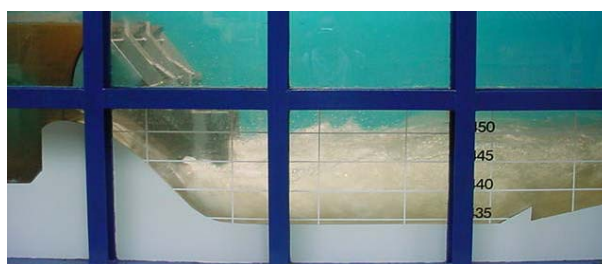


Figura 2. Ressonância hidráulica formada no modelo na escala 1:50 com vazão equivalente a 4000 m³/s no protótipo (número de Froude = 5,11).



Figura 3. Ressonância hidráulica formada no modelo na escala 1:100 com vazão equivalente a 4000 m³/s no protótipo (número de Froude = 5,20).

A proposta dessa linha de pesquisa visa fornecer aos engenheiros de estruturas hidráulicas metodologias capazes de estimar as características da distribuição longitudinal das pressões médias, de suas flutuações e dos valores extremos com diferentes probabilidades de ocorrência, de maneira a permitir o dimensionamento de estruturas mais seguras, econômicas e que considerem a dinâmica do fenômeno.

Entre as falhas que podem ocorrer em uma barragem podem-se citar problemas de sobre-elevação da laje de

fundo da bacia de dissipação, tais como o que ocorreu nas Barragens de Netzahualcóyotl – Malpaso/México, que deslocou uma laje de 70 toneladas (Figura 4) ou os problemas de cavitação como os que ocorreram na bacia de dissipação da barragem de Keban – Turquia (Figura 5).

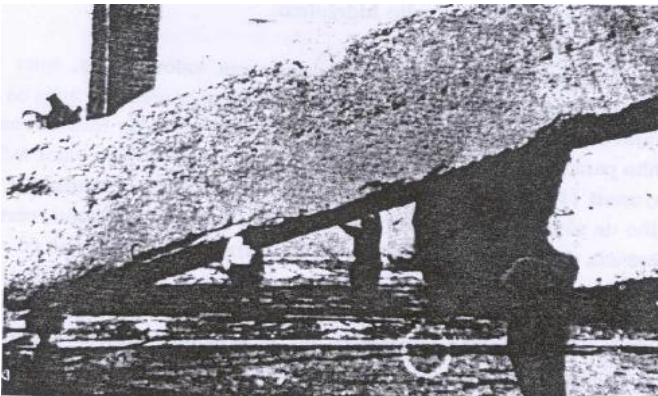


Figura 4. Sobre-elevação da laje de fundo da bacia de dissipação da Barragem de Netzahualcóyotl – Malpaso/México por subpressão [01].



Figura 5. Danos provocados por cavitação na barragem de Keban [02].

Devido à complexidade do processo de dissipação de energia, geralmente utilizam-se modelos físicos como ferramenta para compreender e interpretar as características oscilatórias das pressões que ocorrem junto ao fundo de uma bacia de dissipação. Dessa forma, torna-se fundamental que se conheça os efeitos de escala envolvidos e quais as dimensões mínimas dos modelos reduzidos a serem utilizados. Apesar do grande interesse envolvido nessas determinações, medições efetuadas em protótipos são raras na literatura devido à complexidade para obtenção de dados. Os dados obtidos na UHE Porto Colômbia associados às medições em modelos reduzidos em diferentes tamanhos permitem que se tenha uma compreensão dos efeitos de escala. Além disto, estas medições beneficiam o desenvolvimento de pesquisas aplicadas no estudo da turbulência e na verificação das metodologias que vêm sendo desenvolvidas para estimar os valores de pressão em bacias de dissipação por ressalto a partir de resultados de laboratório.

II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As condições de contorno a serem analisadas nesse estudo apresentam a configuração de um ressalto hidráulico afogado tipo B (Figura 6), segundo [03]. Mesmo em modelos físicos reduzidos, existe um pequeno número de

trabalhos que contemplam a medição de pressão para a situação de ressalto afogado a jusante de um vertedouro. Podem-se citar os estudos de [04], [05], [06], [07], [08], [09], [10], [11], [12], entre outros.

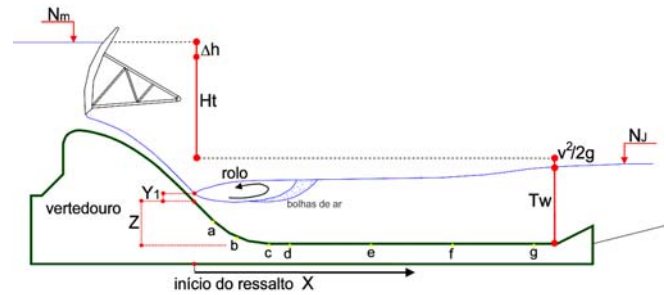


Figura 6. Parâmetros hidráulicos e geométricos considerados na análise dimensional do ressalto afogado.

A maior parte dos estudos apresenta somente dados de distribuição longitudinal do coeficiente de flutuação de pressão (C_p), em função da posição relativa no ressalto hidráulico (X).

$$C_p = \sigma^2 \cdot \frac{2 \cdot g}{V^2} \quad (1)$$

Sendo:

C_p = coeficiente de flutuação de pressão (m.c.a.);

σ = desvio padrão da amostra (m.c.a.);

V = velocidade média na entrada do ressalto (m/s) e;

g = aceleração da gravidade (m/s^2).

$$X = \frac{x}{Y_1} \quad (2)$$

Sendo:

X = posição adimensional relativa ao ressalto hidráulico;

x = distância em relação ao início do ressalto hidráulico (m);

Y_1 = altura de água na entrada do ressalto (m).

Os trabalhos citados apresentam, de forma resumida, as seguintes conclusões sobre o coeficiente C_p para ressaltos hidráulicos formados a jusante de vertedouros:

a) O valor máximo de C_p varia com o número de Froude e é inversamente proporcional a ele; e

b) A posição do máximo valor de C_p é diretamente proporcional ao número de Froude.

As referências [08] e [13] sugerem uma adimensionalização para a análise da distribuição longitudinal da pressão média (3) e da flutuação de pressão (5) para ressaltos livres, baseados em ensaios de modelos de laboratório com números de Froude entre 4,5 e 10,0 e número de Reynolds maior que 106.

$$\psi = \frac{(P - Y_1)}{(Y_2 - Y_1)} \cdot \frac{l}{S} \quad (3)$$

$$S = \frac{T_w}{Y_2} \quad (4)$$

Sendo:

Ψ = pressão média da amostra adimensionalizada;
 P_X = pressão média na posição X (m.c.a);
 Y_1 = altura conjugada rápida do ressalto hidráulico (m);
 Y_2 = altura conjugada lenta do ressalto hidráulico (m);
 S = grau de submergência.
 T_w = altura de água a jusante (m);

$$\Omega = \frac{\sigma_x}{H_t} \cdot \frac{Y_2}{Y_1} \cdot \left(\frac{I}{S} \right) \quad (5)$$

Sendo:

Ω = flutuação de pressão da amostra adimensionalizada;
 σ_x = flutuação da pressão média (desvio padrão) em X;
 H_t = perda de energia no ressalto hidráulico.

A referência [09], com base na adimensionalização proposta por [08] e em dados de laboratório obtidos por diferentes autores, sugere uma metodologia de previsão de pressões com diferentes probabilidades de ocorrência junto ao fundo de bacias de dissipação para o ressalto hidráulico livre, baseado na seguinte função estatística:

$$P_{X\%} = P_X \pm N_{X\%} \cdot \sigma_X \quad (6)$$

Sendo:

$P_{X\%}$ = pressão com probabilidade de ser inferior ou igual para uma certa posição X;
 $N_{X\%}$ = coeficiente de distribuição estatística de uma determinada probabilidade para uma certa posição X.

A equação (7) apresenta o ajuste sugerido por [09] para a distribuição longitudinal da pressão média adimensionalizada com base nos dados de [08].

$$\Psi = -0,015 \cdot \Gamma^2 + 0,237 \cdot \Gamma + 0,07 \quad (7)$$

Obs: a equação é válida para o intervalo $0 \leq \Gamma \leq 8,0$.

$$\Gamma = \frac{X}{Y_2 - Y_1} \quad (8)$$

Sendo:

Ψ = coeficiente de pressão média da amostra adimensionalizado e;
 Γ = posição relativa do início do ressalto.

As equações (9) e (10) representam os ajustes propostos por [09] para o desvio padrão adimensionalizado.

$$\Omega = -0,159 \cdot \Gamma^2 + 0,573 \cdot \Gamma + 0,19 \quad (9)$$

Obs.: a equação é válida para o intervalo $0 \leq \Gamma \leq 2,4$.

$$\Omega = 0,017 \cdot \Gamma^2 - 0,281 \cdot \Gamma + 1,229 \quad (10)$$

Obs.: a equação é válida para o intervalo $2,4 \leq \Gamma \leq 8,25$.

A equação 11 representa o ajuste para o coeficiente estatístico de distribuição de probabilidade (N_X).

$$N_X = a \cdot \Gamma^2 + b \cdot \Gamma + c \quad (11)$$

Sendo:

a, b e c = coeficientes dependentes da probabilidade de interesse [09].

A referência [10], baseada em estudos realizados em laboratório (Figura 2) para ressaltos afogados (tipo B) a jusante de vertedouros tipo Creager e utilizando a metodologia proposta por [14], observara os seguintes aspectos sobre o coeficiente estatístico de probabilidade:

a) apresenta influência da submergência na parte inicial do ressalto (trecho curvo) onde os valores do coeficiente (N_X) são inferiores se comparados com o ressalto livre;

b) apresenta a tendência de manter os valores praticamente constantes para uma mesma probabilidade de ocorrência, após o trecho curvo. Para efeitos práticos, pode-se considerar o valor médio de, aproximadamente, -2,3 para a probabilidade de 1%, e um valor médio de, aproximadamente, +2,4 para a probabilidade de 99%. Estes valores são levemente superiores (menos de 10%) se comparados aos do ressalto livre.

A referência [15] estudou o campo de pressões em ressalto hidráulico (livre e submergido) 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 referência [11], baseados nos dados registrados quando do vertimento de 4000 m³/s na UHE Porto Colômbia ([16], [17] e [18]), concluíram que as probabilidades de ocorrência de pressões extremas (máximas e mínimas) podem ser modeladas pela Distribuição Generalizada de Valores Extremos (12), com erros relativos inferiores a 10 % e sempre a favor da segurança. Esta distribuição inclui as distribuições de valores extremos:

$$F(x) = \exp \left\{ - \left[1 + \xi \left(\frac{x - P_x}{\sigma_x} \right) \right]^{\frac{-1}{\xi}} \right\} \quad (12)$$

a) Fréchet quando $\xi > 0$ definida em $P_x - \frac{\sigma_x}{\xi} < x < +\infty$

b) Weibull quando $\xi < 0$ definida em $-\infty < x < P_x - \frac{\sigma_x}{\xi}$

c) Gumbel quando $\xi \rightarrow 0$ definida em $-\infty < x < +\infty$

Sendo:

ξ = parâmetro de forma da amostra, com $\sigma > 0$ para a posição x no ressalto.

A referência [19] mostra que a distribuição longitudinal da pressão média adimensionalizada (Ψ) e a flutuação de pressão adimensionalizada (Ω), a jusante de um vertedouro, para o trecho plano da bacia, apresenta um comportamento semelhante ao do ressalto livre se for levada em

consideração a submergência (S). Enquanto que, para o trecho curvo a pressão (Ψ) sofre um aumento como seria esperado, a flutuação de pressão (Ω) apresenta uma diminuição significativa nos seus valores. Para os valores de N_x correspondente à probabilidade de 1%, os autores observam que eles decrescem lentamente do início para o fim do ressalto. Os valores médios encontrados foram muito próximos dos sugeridos por [10].

A referência [20] baseado na análise de dados de flutuação de pressão de 18 submergências diferentes ($1,0 \leq S \leq 3,4$) constata que o coeficiente de flutuação de pressão (Ω) deveria considerar o afogamento do ressalto hidráulico para um melhor ajuste dos dados, uma vez que o desvio padrão é um momento estatístico mais elevado, ou seja, eleva as diferenças dos valores em relação à média ao quadrado. Desta maneira o coeficiente de flutuação de pressão (Ω^*) pode ser apresentado conforme (13).

$$\Omega^* = \Omega \cdot \frac{I}{S} = \frac{\sigma_X}{H_t} \cdot \frac{Y_2}{Y_1} \cdot \left(\frac{I}{S}\right)^2 \quad (13)$$

Sendo:

Ω = flutuação de pressão segundo [08] conforme (5);

Ω^* = flutuação de pressão segundo [20].

III. METODOLOGIA

As análises realizadas buscaram basicamente:

a) comparar valores das pressões médias, das flutuações de pressão e das pressões extremas obtidas no protótipo e nos modelos através das metodologias de adimensionalização propostas por [08], [13], [14], [20] e [11], para o ressalto hidráulico livre visando avaliar e quantificar as diferenças atribuídas à submergência;

b) determinar qual o efeito de escala existente nas medições realizadas em modelo reduzido procurando delimitar as condições mínimas em que os ensaios devem ser executados;

c) verificar e desenvolver as metodologias de previsão das pressões extremas junto à laje da bacia de dissipação, visando o dimensionamento de estruturas mais seguras e econômicas.

Os estudos foram desenvolvidos através da comparação de dados de pressões obtidas na UHE Porto Colômbia com os valores determinados em modelos nas escalas 1:50 e 1:100.

A análise do efeito de escala foi desenvolvida através da verificação do erro relativo entre os valores de protótipo e dos modelos de três maneiras, conforme é apresentado a seguir:

a) comparação direta dos valores de pressões extremas do protótipo e dos modelos;

b) comparação dos resultados das metodologias sugeridas por [14] e por [11];

c) determinação de novos parâmetros para as metodologias sugeridas por [14] e por [11].

A. Posição de Início do Ressalto

Para a determinação da posição de início do ressalto hidráulico afogado no protótipo, em função da impossibilidade de determinar este ponto quando do vertimento dos 4000 m³/s, foi utilizado (14) sugerida por

[20], obtida a partir de ensaios realizados no modelo reduzido na escala 1:50 da UHE Porto Colômbia, instalado no LAHE/FURNAS (Figura 2).

$$\frac{Z}{h_c} = 1,007 \cdot [Fr \cdot (S - 1)]^{0,611} \quad (14)$$

Sendo:

Z = altura onde ocorre o início do ressalto hidráulico afogado junto ao perfil do vertedouro, em relação ao nível da cota da bacia de dissipação (a representação deste parâmetro está demonstrada na Figura 6);

h_c = altura crítica do escoamento;

Fr = número de Froude no ponto do início do ressalto (na altura Z);

B. Erro Relativo

O erro relativo entre os valores de protótipo e modelos foi calculado conforme (15).

$$\varepsilon = \frac{P_{X1\%_P} - P_{X1\%_M}}{P_{X1\%_P}} \quad (15)$$

Sendo:

ε = erro relativo;

$P_{X1\%_P}$ = pressão com probabilidade de ocorrência de 1% no protótipo;

$P_{X1\%_M}$ = pressão com probabilidade de ocorrência de 1% no modelo.

Baseado na análise das amostras de pressão (com 1 % de probabilidade de ocorrência) para vertimento equivalente a 4000 m³/s obtidas no protótipo e nos modelos, variações de 7,5% no protótipo, 1,4% na escala 1:50 e 0,8% na escala 1:100 seriam normais em função das características do fenômeno e dos efeitos de medição e de laboratório. Desse modo, neste trabalho, admite-se que variações de 10% na comparação dos resultados seriam aceitáveis segundo [21].

IV ORIGEM DOS DADOS

A. Os Dados de Protótipo

Através de uma proposição e iniciativa da Comissão de Hidráulica do CBDB (Comitê Brasileiro de Barragens), foram realizadas medições de pressões “instantâneas” na UHE Porto Colômbia (Figura 1), no período de 17 a 23 de maio de 1996. A concessionária de energia FURNAS, além de disponibilizar as instalações da usina, executou todas as obras necessárias à instrumentação da bacia de dissipação, a compra dos equipamentos de medição, o planejamento da campanha de ensaios, o fornecimento de infra-estrutura básica para a realização dos testes e a aquisição de dados na bacia de dissipação. Além do LAHE/FURNAS, participaram da definição dos pontos de medição, da especificação da instrumentação e da coleta de dados com sistemas próprios mais duas instituições: a Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica (FCTH) e o Centro de Hidráulica Prof. Parigot de Souza (CEHPAR). Todos esses processos estão descritos em [16], [17], [22] e [18].

As amostras de pressão foram coletadas para as vazões de 500 m³/s, 1000 m³/s, 2000 m³/s, 3000 m³/s e 4000 m³/s e com as condições de contorno apresentadas na Tabela I.

TABELA I
PARÂMETROS DO ESCOAMENTO PARA AS MEDIÇÕES
REALIZADAS NA UHE PORTO COLÔMBIA.

Vazão (m ³ /s)	Fr	Z* (m)	Y ₁ (m)	Y ₂ ** (m)	T _w (m)	S
500	12,30	9,59	0,17	2,83	10,42	3,68
1000	9,40	9,24	0,32	4,04	10,42	2,58
2000	7,00	8,20	0,61	5,76	10,72	1,86
3000	6,00	7,33	0,89	7,08	11,17	1,58
4000	5,20	6,79	1,18	8,15	11,76	1,44

* calculado por (14) e ** calculado pela equação de Bélanger.

Estas condições foram baseadas nos níveis que ocorreram à jusante da bacia, quando da realização das medições. Os dados foram coletados com uma frequência de aquisição de 100 Hz, durante um período variável entre 15 e 45 minutos, em 7 tomadas de pressão (Figura 6), sendo 3 na concordância do perfil do vertedouro (“a”, “b” e “c”) e 4 na parte plana do fundo da bacia (“d”, “e”, “f” e “g”). Foram utilizados transdutores com faixa de trabalho de 50 m.c.a., com uma precisão de 0,25% do fundo de escala, ou seja, de cerca de 0,125 m.c.a.

B. Dados de Modelo

Durante o desenvolvimento do P&D “Análise da Macroturbulência em Dissipadores por Ressalto Hidráulico”, foram executadas medições de flutuação de pressão nos modelos nas escalas 1:50 (Figura 2) e 1:100 (Figura 3) instalados no LAHE. Nestas estruturas foram obtidos dados de pressão junto ao fundo da bacia de dissipação nas posições equivalentes às 7 tomadas instaladas na UHE Porto Colômbia (Figura 6). Os ensaios foram realizados com vazões e níveis equivalentes aos de protótipo, respeitando as escalas determinadas pela lei de Semelhança de Froude. As amostras coletadas tiveram duração de 15 minutos com frequência de aquisição de 100 Hz e 500 Hz.

V. COMPARAÇÃO DOS DADOS EXPERIMENTAIS

A. Pressões Médias

A Figura 7 apresenta a distribuição longitudinal do coeficiente de pressão média (Ψ) em função da posição relativa ao início do ressalto hidráulico (Γ). Os resultados observados ao longo da bacia de dissipação da UHE de Porto Colômbia foram comparados com os dados de [23] e [08], para o ressalto livre ($S = 1$), conforme adimensionalização sugerida por [08] e [14].

Analisando-se os resultados apresentados na Figura 7, pode-se verificar que a distribuição longitudinal das pressões médias adimensionalizadas para o trecho plano (entre as tomadas “d” e “g”, conforme Figura 6) apresenta um comportamento semelhante ao do ressalto livre, entretanto com valores um pouco abaixo do esperado. Julga-se que está diferença possa ser justificada pela imprecisão na determinação da posição do início do ressalto.

No entanto, os valores referentes às tomadas situadas no trecho curvo (“a”, “b” e “c”, conforme Figura 6), para cada

uma das vazões observadas (símbolos vazados (\diamond) na Figura 7) apresentam um aumento dos valores da pressão média, fato este que já era esperado. Neste trecho, constata-se também que o efeito da curvatura na pressão média diminui com o aumento da submergência. Este fato pode ser observado na vazão de 500 m³/s ($S = 3,68$) onde, praticamente, o efeito da submergência desaparece.

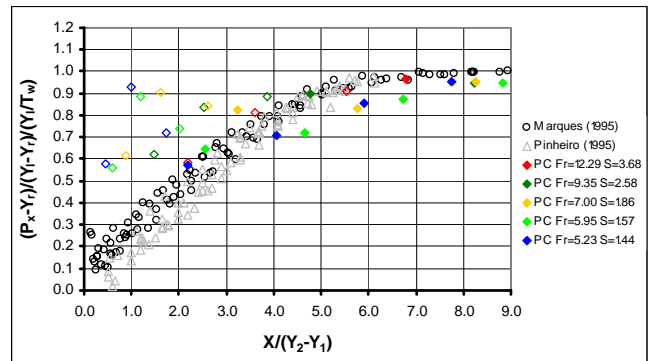


Figura 7. Distribuições longitudinais do coeficiente de pressão média (Ψ) observadas na bacia de dissipação da UHE Porto Colômbia comparados com dados de ressalto livre. As tomadas situadas no trecho curvo (“a”, “b” e “c”) estão representadas pelos símbolos vazados (\diamond).

Na Figura 8 está apresentada a distribuição longitudinal do coeficiente de pressão média (Ψ) em função da posição relativa ao início do ressalto hidráulico (Γ) para a vazão equivalente a 4000 m³/s ($S = 1,44$) na UHE Porto Colômbia e nos modelos reduzidos. Constata-se que os valores dos modelos tendem a resultar um pouco acima dos dados de protótipo, com a tendência dos valores da escala 1:100 ficarem mais distantes dos valores de protótipo, mas bem próximos da escala 1:50. Julga-se que isto se deva à menor entrada de ar no escoamento. Os resultados obtidos para as outras vazões serão apresentados em [21].

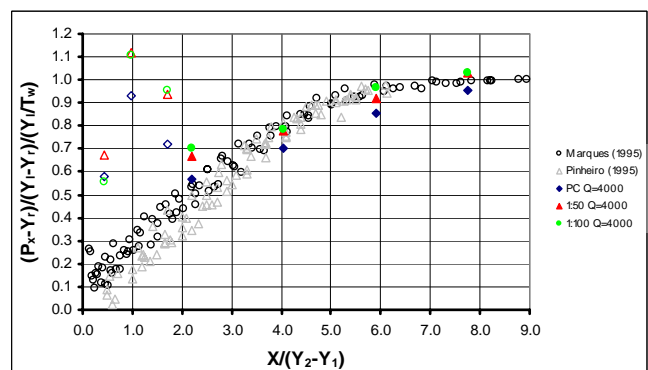


Figura 8. Distribuições longitudinais do coeficiente de pressão média (Ψ) observadas na bacia de dissipação da UHE Porto Colômbia e nos modelos nas escalas 1:50 e 1:100, para a vazão equivalente a 4000 m³/s comparados com dados de ressalto livre. As tomadas situadas no trecho curvo (“a”, “b” e “c”) estão representadas pelos símbolos vazados (\diamond).

B. Flutuações de Pressão

Analisando-se os resultados apresentados na Figura 9, para os valores de protótipo, pode-se verificar que a distribuição longitudinal do coeficiente de flutuações de pressão (Ω^*) para as 3 primeiras tomadas (“a”, “b” e “c”), apresentam uma diminuição significativa nos seus valores. Aparentemente, o efeito da curva tem uma influência no início do trecho reto, que pode ser visto nos valores da tomada “d”, em função do aumento da submergência. O

restante do trecho plano (tomadas “d” a “g”) apresenta um comportamento semelhante ao do ressalto livre.

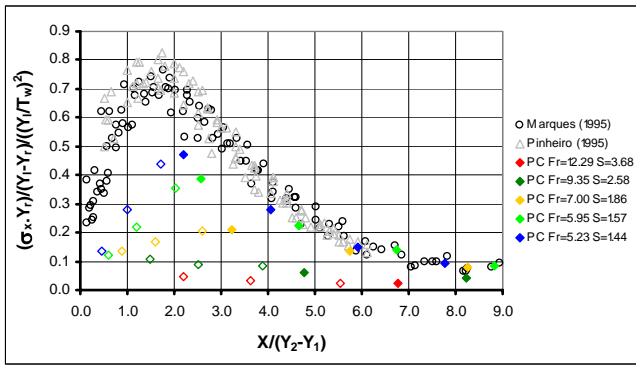


Figura 9 Distribuições longitudinais do coeficiente de flutuação de pressão (Ω^*) observados na bacia de dissipação da UHE Porto Colômbia comparados com dados de ressalto livre. As tomadas situadas no trecho curvo (“a”, “b” e “c”) estão representadas pelos símbolos vazados (\diamond).

Na Figura 10 está apresentada a distribuição longitudinal do coeficiente de flutuação de pressão (Ω^*) em função da posição relativa ao início do ressalto hidráulico (Γ) para a vazão equivalente a $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ na UHE Porto Colômbia e nos modelos reduzidos. Pela análise desta figura constata-se que os valores de protótipo e dos modelos apresentam uma mesma tendência, mas sem ser possível definir um comportamento em função das escalas. Aparentemente, no trecho reto, há uma tendência dos valores do modelo 1:100 serem superiores ao modelo 1:50 e ao protótipo. Os resultados obtidos para as outras vazões serão apresentados em [21], [20] e [12].

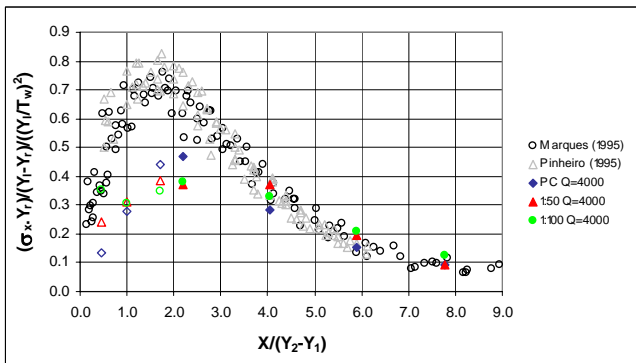


Figura 10. Distribuições longitudinais do coeficiente de flutuação de pressão (Ω^*) observadas na bacia de dissipação da UHE Porto Colômbia e nos modelos 1:50 e 1:100 para a vazão equivalente a $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ comparados com dados de ressalto livre. As tomadas situadas no trecho curvo (“a”, “b” e “c”) estão representadas pelos símbolos vazados (\diamond).

C. Pressões Extremas

Na Figura 11 são apresentados os valores de pressões extremas com a probabilidade de 1% de serem inferiores ou iguais em um ponto no interior do ressalto para as vazões de protótipo. Como era de se esperar, as pressões crescem com o aumento da submergência. A vazão de $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ é que apresenta, de um modo geral, os menores valores. Observa-se que para a vazão de $500 \text{ m}^3/\text{s}$, que possui a maior submergência, o efeito da curvatura nestas pressões praticamente desaparece.

Para a comparação das pressões extremas entre protótipo e os modelos apresentados na Figura 12, no presente trabalho foi escolhida a probabilidade de ocorrência de 1% de serem inferiores ou iguais em um ponto no interior do

ressalto para a vazão equivalente a $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ no protótipo. Esta vazão foi escolhida por ser a de maior energia e apresentar os menores valores de pressão de 1% de probabilidade conforme constatado na Figura 11.

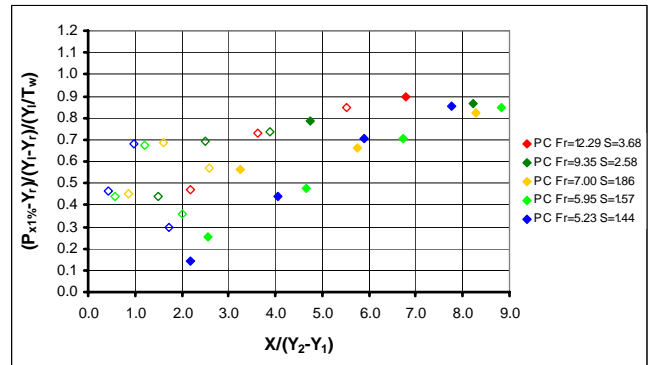


Figura 11. Comparação entre as distribuições longitudinais do coeficiente de pressão com probabilidade de ocorrência de 1% ($\Psi_{1\%}$) observadas na bacia de dissipação da UHE Porto Colômbia. As tomadas situadas no trecho curvo (“a”, “b” e “c”) estão representadas pelos símbolos vazados (\diamond).

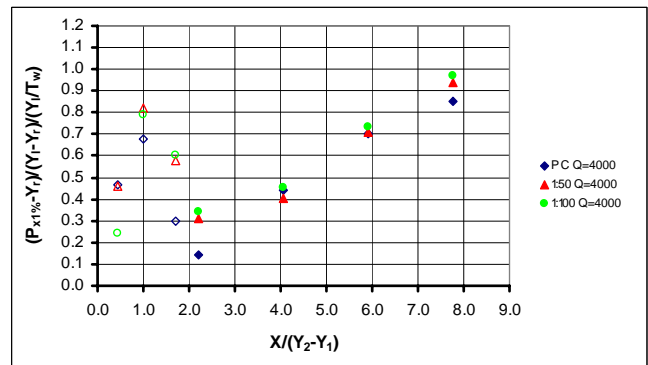


Figura 12. Distribuições longitudinais do coeficiente de pressão extrema (1%) observadas na bacia de dissipação da UHE Porto Colômbia e nos modelos 1:50 e 1:100 para a vazão equivalente a $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ comparados com dados de ressalto livre. As tomadas situadas no trecho curvo (“a”, “b” e “c”) estão representadas pelos símbolos vazados (\diamond).

Através da análise da Figura 12, observa-se que os valores de modelo são praticamente idênticos aos de protótipo no trecho plano. Entretanto, no trecho curvo verifica-se uma maior dispersão nos resultados, havendo uma tendência dos valores de protótipo serem inferiores aos dos modelos. Os resultados das outras vazões, probabilidades e tomadas serão publicados em [21] e outras submergências em [20].

D. Coeficiente de Distribuição Estatística

A partir da distribuição dos valores extremos de pressões observadas, para cada uma das vazões vertidas, e utilizando a metodologia sugerida por [14], pode-se determinar os valores do coeficiente estatístico ($N_{x1\%}$) para a probabilidade de ocorrência de 1%. Os valores encontrados para as vazões vertidas na UHE Porto Colômbia estão apresentados na Figura 13.

Se as amostras seguissem uma distribuição normal o valor de $N_{x1\%}$ seria em torno de $-2,575$. Observa-se que os valores, independentemente da vazão, demonstram seguir a mesma tendência, não havendo influência da submergência nem da curva. No início do ressalto, o valor do coeficiente $N_{x1\%}$ é da ordem de $-2,11$ e decresce linearmente até o valor de $-2,75$ no final do ressalto, na posição $8(Y_2-Y_1)$.

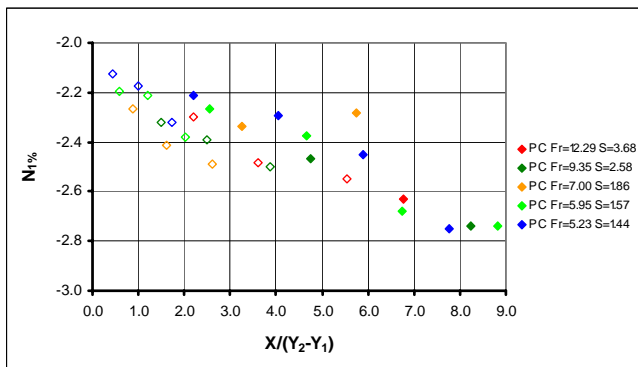


Figura 13. Comparação entre as distribuições longitudinais do coeficiente estatístico ($N_{x1\%}$) para a probabilidade de ocorrência de 1 %, observadas na bacia de dissipação da UHE Porto Colômbia. As tomadas situadas no trecho curvo (“a”, “b” e “c”) estão representadas pelos símbolos vazados (\diamond).

Quando são comparados os valores de $N_{x1\%}$ para os dados da UHE Porto Colômbia com os dos modelos nas escalas 1:50 e 1:100, para a vazão equivalente a $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figura 14), verifica-se que, independentemente da escala do modelo, os valores apresentam a mesma tendência. Os resultados das outras vazões, probabilidades e tomadas serão publicados em [21] e outras submergências em [20].

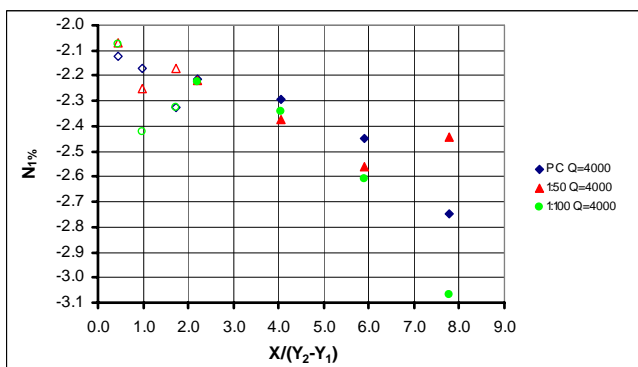


Figura 14. Comparação entre as distribuições longitudinais do coeficiente estatístico ($N_{x1\%}$) observada na bacia de dissipação da UHE Porto Colômbia e nos modelos nas escalas 1:50 e 1:100, para a vazão equivalente a $4000 \text{ m}^3/\text{s}$. As tomadas situadas no trecho curvo (“a”, “b” e “c”) estão representadas pelos símbolos vazados (\diamond).

A referência [14] sugere, para o ressalto livre, que o valor de $N_{x1\%}$ varia com a posição relativa. Para a posição relativa da tomada “d”, vazão de $4000 \text{ m}^3/\text{s}$, este valor corresponde a -2,4. Para ressalto afogado [10] sugere o valor médio e constante, igualmente ao do ressalto livre, de -2,4.

E. Conclusões sobre a comparação dos dados experimentais

Através da análise de dados realizada foi possível constatar que:

- a) a adimensionalização pelos coeficientes Ψ e Ω^* permite a comparação da distribuição de pressão ao longo do ressalto hidráulico livre e afogado, desde que levado em consideração o fator de submergência (S);
- b) o comportamento é semelhante no trecho plano da bacia;
- c) a maior diferença deve-se principalmente ao efeito da curva de concordância do perfil do vertedouro com o fundo da bacia;
- d) o aumento da submergência aumenta as pressões médias;

e) o aumento da submergência diminui a flutuação de pressão;

f) o valor do coeficiente de distribuição de probabilidade (N) é independente da submergência e é função somente da posição relativa no interior do ressalto;

g) existem diferenças em relação aos valores das pressões médias, das flutuações de pressão e das pressões extremas medidas nos modelos e no protótipo devido a efeito de escala, provavelmente em função da entrada de ar nos modelos ser menor que no protótipo;

h) observa-se que os valores dos modelos de menores dimensões estão mais distanciados dos valores de protótipo e com valores mais elevados. Entretanto, a distribuição do coeficiente N praticamente continua a mesma.

VI. EFEITO DE ESCALA

Para cada uma das tomadas de pressão, considerando as diferentes vazões e escalas de modelo, foram determinadas as características estatísticas das amostras (média, desvio padrão, coeficientes de assimetria e curtose, frequência dominante, pressão com diferentes probabilidades de ocorrência e coeficiente de distribuição). Na Tabela II são apresentados estes resultados para a vazão equivalente a $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ para a tomada “d”. Esta tomada foi escolhida por ser a que apresenta a maior flutuação de pressão (para este escoamento) e por julgar-se que é representativa para uma análise preliminar sobre o efeito de escala.

TABELA II
CARACTERÍSTICAS ESTATÍSTICAS PARA A VAZÃO EQUIVALENTE A $4000 \text{ M}^3/\text{S}$ NA TOMADA “D”.

Local	P_x^* (m.c.a.)	σ_x^* (m.c.a.)	$P_{x1\%}^*$ (m.c.a.)	N	fd* (Hz)
Protótipo	6.91	1.94	2.62	-2.21	0.78
modelo 1:50	8.10	1.65	4.45	-2.22	0.61
modelo 1:100	8.20	1.63	4.56	-2.23	0.84

*valores transpostos para valores de protótipo pela escala de Froude

Observando os resultados apresentados na Tabela 2 notam-se os seguintes aspectos:

a) a pressão média (P_x) tende a ser superior nos modelos, apresentando uma tendência de aumentar a diferença em relação ao valor de protótipo se a dimensão do modelo diminuir;

b) o desvio padrão (σ_x) tende a ser inferior nos modelos apresentando uma tendência de aumentar a diferença em relação ao valor de protótipo se a dimensão do modelo diminuir, ou seja, é inversamente proporcional a escala;

c) a pressão com probabilidade de 1% de ocorrência ($P_{x1\%}$) demonstra ser superior nos modelos, apresentando uma tendência de aumentar a diferença em relação ao valor de protótipo se a dimensão do modelo diminuir. Este fato mostra que a probabilidade de 1% no protótipo corresponde a valores inferiores de probabilidade nos modelos;

d) o coeficiente de distribuição de probabilidade (N) não apresenta efeito de escala, indicando que a maneira em que ocorre a distribuição de pressões, caracterizada por este coeficiente, no protótipo e nos modelos é a mesma;

e) a frequência dominante (fd) apresenta valores equivalentes indicando que a periodicidade significativa do fenômeno, neste ponto, ocorre a uma frequência inferior a 1 Hz.

Quando são comparados os valores obtidos nos modelos 1:50 e 1:100, relação de escalas geométricas 1:2, observa-se que, praticamente, inexistem efeitos de escala, se considerarmos, um e outro, protótipo e modelo, respectivamente.

Quando são analisados os efeitos de escala em modelos que respeitam a relação de Froude, não há semelhança em todos os outros adimensionais característicos do escoamento tais como, números de Reynolds, Euler, Weber, entre outros. Neste trabalho, os efeitos de escala foram caracterizados através da razão entre números de Reynolds, no protótipo e modelos (froudianos), que resulta $1/\lambda^{3/2}$. A Figura 15 apresenta as diferenças relativas entre as diferentes escalas das estruturas, onde se pode constatar que para uma diferença máxima de 10 % (considerada satisfatória) a relação entre a escala dos números de Reynolds deve ser inferior a:

- análise da pressão média: $\approx 55 \leq \lambda^{3/2}$ ou $\approx 15 \leq \lambda$;
- análise da flutuação: $\approx 55 \leq \lambda^{3/2}$ ou $\approx 15 \leq \lambda$;
- análise das pressões extremas: $\approx 5 \leq \lambda^{3/2}$ ou $\approx 3 \leq \lambda$.

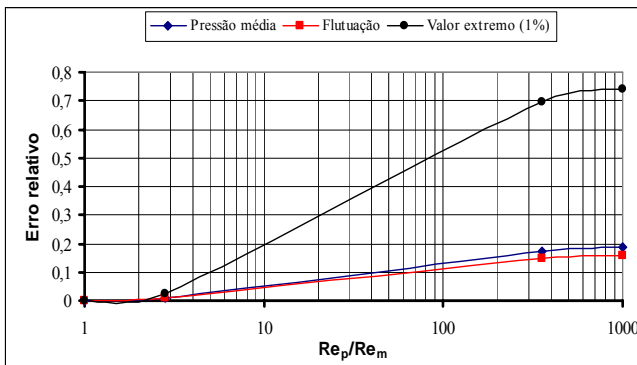


Figura 15. Comparação do erro relativo (ϵ) na tomada “d” para o a pressão média (P_x), flutuação de pressão (σ_x) e o valor de pressão extrema ($P_{x1\%}$) em função da relação de escalas do número de Reynolds para a vazão equivalente a 4000 m³/s.

Além disso, não há semelhança quanto à entrada de ar entre estruturas de diferentes escalas. Acredita-se que o efeito de escala deva-se, em grande parte, à incorporação de ar, que nos modelos é bastante inferior. A maior quantidade de ar no protótipo resulta em uma menor densidade do fluido em escoamento o que pode explicar os menores valores na pressão média e de pressão extrema comparados aos modelos.

VII. COMPARAÇÃO ENTRE AS METODOLOGIAS DE PREVISÃO DE VALORES EXTREMOS

Foram comparadas as metodologias de previsão de valores extremos de pressões sugeridas por [14] e [11], para valores de probabilidade de 1% de serem igualados ou inferiores.

A. Metodologia Sugerida por [14]

A Tabela III apresenta as previsões dos valores de pressão com probabilidade de 1% de ocorrência para a UHE Porto Colômbia utilizando-se a metodologia descrita por [14].

Foram utilizados de (7) a (11) para a pressão média, flutuação de pressão e para o coeficiente de distribuição de probabilidade, válidas para o resalto livre e também a equação obtida através da análise dos resultados dos modelos 1:50 e 1:100 para diferentes submergências. Para

poder-se comparar os resultados obtidos por [14], (17) foi determinada utilizando-se apenas os valores obtidos nas tomadas do trecho reto da bacia de dissipação.

$$N_{x1\%} = -1.660 - 0.448.\Gamma - 0.0512.\Gamma^2 \quad [14] \quad (16)$$

$$N_{x1\%} = -2.105 - 0.07978.\Gamma - \text{modelos 1:50 e 1:100} \quad (17)$$

TABELA III
PREVISÕES PARA A PRESSÃO COM PROBABILIDADE DE 1 % PARA A UHE PORTO COLÔMBIA UTILIZANDO-SE A METODOLOGIA SUGERIDA POR [14], PARA VAZÃO EQUIVALENTE A 4000 M³/S.

Tomada	$P_{x1\%E}$	$P_{x1\%E}$	$P_{x1\%M}$	ϵ	ϵ
	$N_{x1\%(16)}$	$N_{x1\%(17)}$	Protótipo		
	estimado		medido	$N_{x1\%(16)}$	$N_{x1\%(17)}$
d	2.59	2.77	2.62	0.01	-0.06
e	6.75	6.92	5.62	-0.20	-0.23
f	9.66	9.64	8.27	-0.17	-0.17
g	10.85	10.74	9.77	-0.11	-0.10

Analisando a Tabela III observa-se que os valores estimados através dos ajustes para o coeficiente de distribuição são bastante próximos. Os valores estimados são superiores aos valores medidos no protótipo.

B. Metodologia Sugerida por [11]

As estimativas das pressões extremas com probabilidade de 1% de ocorrência ($P_{x1\%}$) utilizando o método sugerido por [11] para a vazão de 4000 m³/s no protótipo estão apresentadas na Tabela IV.

Foram utilizados de (8) a (10) para determinação da pressão média e da flutuação de pressão. Para o coeficiente ξ foram utilizados os valores sugeridos por [11], ajustados por (18) (válida somente para o trecho reto da bacia) e os valores encontrados a partir da análise dos resultados dos modelos 1:50 e 1:100, em [21], para diferentes submergências, por (19) e (20).

$$\xi = -0.287 + 0.0344.\Gamma - [11] \quad (18)$$

$$\xi = -0.607 + 0.0275.\Gamma - \text{modelo 1:50} - [14] \quad (19)$$

$$\xi = -482 - 0.0013.\Gamma - \text{modelo 1:100} - [14] \quad (20)$$

TABELA IV
COMPARAÇÃO ENTRE OS PARÂMETROS REAIS E OS ESTIMADOS PELA DISTRIBUIÇÃO “GEV” (MÉTODO DE [11]) PARA CADA UMA DAS TOMADAS DA VAZÃO DE 4000 M³/S DA UHE PORTO COLÔMBIA.

Tomada	$P_{x1\%E}$	$P_{x1\%E}$	$P_{x1\%E}$	$P_{x1\%M}$	ϵ	ϵ	ϵ
	$\xi(18)$	$\xi(19)$	$\xi(20)$	Protótipo			
	estimado			medido	$\xi(18)$	$\xi(19)$	$\xi(20)$
d	0.82	1.67	1.79	2.62	0.69	0.62	0.61
e	5.08	1.76	1.83	5.62	0.10	0.67	0.68
f	8.62	6.20	6.54	8.27	-0.04	0.27	0.23
g	10.75	10.14	9.66	9.77	-0.10	0.07	0.11

Pela análise da Tabela IV observa-se que, considerando (18) proposta por [11], a tomada “d” apresenta o maior erro relativo. Considerando (19) e (20) definidas com base nos

valores dos modelos, as tomadas “d” e “e” apresentam o maior erro relativo. No entanto, o erro absoluto é da ordem de 1,80 m.c.a. nestas tomadas, sendo inferiores aos valores medidos (estando a favor da segurança neste caso).

C. Comparativo entre as metodologias propostas

A metodologia proposta por [14] apresenta valores estimados mais próximos dos valores de protótipo na zona de maior flutuação de pressão (tomadas “d” e “e”). Para as demais tomadas apresentam valores na mesma ordem de grandeza. Estas conclusões estão considerando apenas os resultados da vazão de 4000 m³/s e probabilidade de ocorrência de 1%. Em [21] serão apresentadas as estimativas para as demais probabilidades e vazões.

VIII. CONCLUSÕES

Os resultados deste estudo ainda são preliminares e salientam que os efeitos de escala devem ser levados em consideração no momento da transposição dos dados para o protótipo. Além disso, deve-se ter consciência que quanto menor as dimensões do modelo maiores serão os efeitos de escala. A partir da comparação com os dados obtidos na UHE Porto Colômbia com as medições nos modelos reduzidos está sendo possível determinar qual seria a máxima redução geométrica a ser adotada para obter resultados onde os efeitos de escala podem ser negligenciados com alguma segurança. Os estudos têm indicado que este valor deve situar-se em torno da escala geométrica de 1:15. Entretanto, é possível utilizar os resultados de modelos físicos com escalas maiores que 1:15 associados a metodologias de previsão de pressões extremas, tais como, as sugeridas por [14] e [11].

Os resultados aqui apresentados são um pequeno resumo das análises que estão sendo efetuadas pela equipe de trabalho. Em estudos futuros e na conclusão deste, utilizando-se técnicas de adimensionalização e análise espectral, novas conclusões deverão ser agregadas e relacionadas à influência da submergência na distribuição de pressões extremas e aos efeitos de escala existentes em função da aeração do escoamento.

IX. AGRADECIMENTOS

Ao corpo técnico do Laboratório de Hidráulica Experimental e Recursos Hídricos de Furnas Centrais Elétricas S.A. por disponibilizar os dados de pressão “instantânea” obtidos no sistema dissipador de energia da Usina Hidrelétrica de Porto Colômbia e dos modelos reduzidos. Agradecimento especial aos engenheiros Erton Cavalho, Marcos da Rocha Botelho e Igor Afonso Frago.

X. REFERÊNCIAS

- [01] J. S. Bribiesca, and A. C. Viscaino, “Turbulence Effects on the Lining of Stilling Basins”, in *Proc. 1973 ICOLD XI Congress*, Madrid, Q41, Vol. 2.
- [02] F. Senturk, *Hydraulics of dams and reservoirs*, Highlands Ranch: Water Resources Publications, 1998.
- [03] W. H. Hager, “Ressaut hydraulique du type b dans um canal à forte pente”, *Journal of Hydraulic Research*, v. 26, n. 5, p. 539-558, 1988.
- [04] S. Narasimhan, and V. P. Bhargava, “Pressure Fluctuations in Submerged Jump”, *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, v. 102, n. HY3, pp. 339-350, 1976.
- [05] R. Narayanam, “Pressure Fluctuations Beneath Submerged Jump”, *Journal of the Hydraulic Division*, v. 104, n. HY9, pp. 1331-1342, 1978.
- [06] R. A. Lopardo, *Apunte sobre fluctuaciones macroturbulentas de presión, medición, análisis y aplicación al resalto hidráulico*, São Paulo: Escola Politécnica. 44 p., 1986.
- [07] L. C. S. Pinto, J. E. D. Vasconcellos, R. L. Seyssel. “Análise experimental da flutuação de pressão na base de um ressalto livre e afogado”, in *Proc. Congresso Latinoamericano de Hidráulica*, Memórias, Habana: Asociación Internacional de Investigaciones Hidráulicas, v. 2, p. 182-194, 1988.
- [08] M. G. Marques, J. Drapeau, J. L. Varrette, “Análise da flutuação de pressão provocada pela formação de um ressalto hidráulico a jusante de vertedouro”, in *Proc. Congresso Latinoamericano de Hidráulica*, Memórias, Guayaquil: Asociación Internacional de Investigaciones Hidráulicas, 17, p. 1-11, 1996.
- [09] E. D. Teixeira, “Previsão dos valores de pressão junto ao fundo em bacias de dissipação por ressalto hidráulico”, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.
- [10] R. A. Wiest, M. G. Marques, E. D. Teixeira, E. F. N. Trierweiler, A. A. A. Mees, M. Dai Prá, L. A. M. Endres, A. V. B. Canellas, R. P. Feraudy Filho, “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, Anais, João Pessoa: ABRH, CR-ROM, v. 1, 2005.
- [11] S. M. Cerezer, M. G. Marques, R. T. Clarke, “Estimação da probabilidade da ocorrência de valores extremos de pressão”, in *XXX Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional (CNMAC)*, Florianópolis (a ser publicado em setembro de 2007).
- [12] A. A. A. Mees, “Estudo dos esforços hidrodinâmicos em bacias de dissipação por ressalto hidráulico”, Dissertação a ser submetida ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (a ser publicado em março de 2008).
- [13] M. G. Marques, F. M. Almeida, L. A. M. Endres, “Adimensionalização de pressões médias em bacias de dissipação por ressalto hidráulico”, in *Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, 13, Anais, Belo Horizonte: ABRH, CD-ROM, v. 1, 1999.
- [14] E. D. Teixeira, E. F. N. Trierweiler, L. A. M. Endres, M. G. Marques, “Determinação do coeficiente estatístico de distribuição de probabilidade para valores extremos de pressões no ressalto hidráulico”,

- In Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 15, Anais, Curitiba: ABRH, CD-ROM, v. 1, 2003.
- [15] E. F. N. Trierweiler, “Avaliação do campo de pressões em ressalto hidráulico formado à jusante de uma comporta com diferentes graus de submergência”, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.
- [16] FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A., “Usina Hidrelétrica de Porto Colômbia. Estudos hidráulicos em modelo reduzido – modelo de conjunto – escala 1:100 – memória conceitual do modelo”. Rio de Janeiro, 1996.
- [17] ABRH/FURNAS, “Relato do Trabalho da Subcomissão Desenvolvimento de Pesquisa – Estudo de Flutuação de Pressão em Bacia de Dissipação – Caso da Usina de Porto Colômbia”, Rio de Janeiro, 1997.
- [18] International Commission on Large Dams - Bazilian Committee on Dams (Org.). “*Large Brazilian spillways: overview of Brazilian practice and experience in designing and building spillways for large dams*”, Rio de Janeiro. 2002.
- [19] M. G. Marques, E. D. Teixeira, C. B. Martinez, J. F. Gomes, L. A. M. Endres, “Análise de Macroturbulência em Estruturas de Dissipação de Energia Através do Estudo de Variação de Pressões e Níveis”, *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 9, n. 1, p. 127-153, 2004.
- [20] R. A. Wiest, “Análise da influência da submergência nas características do ressalto hidráulico a jusante de um vertedouro”, Dissertação a ser submetida ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (a ser publicado em novembro de 2007).
- [21] E. D. Teixeira, “Efeito de escala na previsão dos valores extremos de pressão junto ao fundo em bacias de dissipação por ressalto hidráulico”, Tese a ser 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 Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (a ser publicado em novembro de 2007).
- [22] J. P. Ortiz, F. M. Almeida, E. Carvalho, R. Borsari, “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, Anais, Rio de Janeiro: ABCM, v. 1, p. 293-320.
- [23] A. A. N. Pinheiro, “Ações hidrodinâmicas em soleiras de bacia de dissipação de energia por ressalto hidráulico”, Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 1995.