

## Efeito de Escala nos Valores de Pressão Média junto ao Fundo em Bacias de Dissipação por Ressalto Hidráulico Submerso

Eder Daniel Teixeira, Mauricio Dai Prá, Rafael André Wiest, Marcelo Giulian Marques

Instituto de Pesquisas Hidráulicas - UFRGS

eteixeira@vogbr.com.br, mauricio.daipra@ufpel.edu.br, rafael.wiest@ceee.com.br, mmarques@iph.ufrgs.br

Recebido: 16/04/10 - revisado: 17/08/11 - aceito: 03/11/11

---

### RESUMO

O conhecimento dos valores de pressão média, das flutuações de pressão e dos valores extremos, junto ao fundo de bacias de dissipação por ressalto hidráulico, é de elevada importância para os projetistas que buscam um dimensionamento eficiente e econômico. O presente trabalho tem por objetivo apresentar os efeitos de escala e de laboratório nos valores de pressão média a partir de dados experimentais de três modelos físicos reduzidos parciais, nas escalas geométricas 1:100, 1:50 e 1:32, e de medições realizadas na UHE Porto Colômbia, pertencente a Furnas Centrais Elétricas S.A. Por fim, são apresentadas sugestões de escalas mínimas a serem utilizadas em modelos físicos reduzidos para avaliação das pressões médias ao longo de bacias de dissipação por ressalto hidráulico.

**Palavras-chave:** ressalto hidráulico, efeito de escala, pressões médias.

---

### INTRODUÇÃO

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 comportamento das mesmas 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.

Sabe-se que praticamente inexistem dados coletados em protótipo e, ainda mais raros, são os estudos comparativos entre medições de pressões ditas instantâneas (dada a alta taxa de registro das mesmas) efetuadas em laboratório com valores obtidos em protótipo. Desta forma, pela falta de trabalhos que apresentem tais informações, ainda não são plenamente identificados e mensurados os possíveis efeitos de escala e de laboratório na determinação dos esforços hidrodinâmicos que agem sobre as bacias de dissipação por ressalto hidráulico.

O objetivo específico deste trabalho foi verificar os efeitos de escala nas pressões médias atuantes, junto ao fundo em bacias de dissipação por ressalto hidráulico, a partir de medições efetuadas em

modelos físicos reduzidos parciais (nas escalas geométricas 1:100, 1:50 e 1:32), no período de 2004 a 2007, e da coleta de dados efetuada na Usina Hidrelétrica (UHE) Porto Colômbia, pertencente a FURNAS, no ano de 1996.

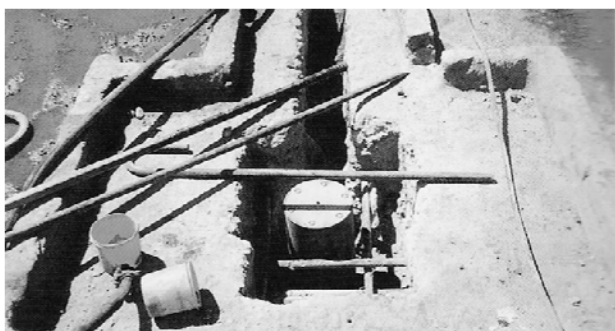
### MATERIAIS E MÉTODOS

Foram analisados dados de pressão instantânea medidos em bacias de dissipação por ressalto hidráulico obtidos diretamente na UHE Porto Colômbia (protótipo), no ano de 1996, e também nos modelos físicos bidimensionais parciais (escalas geométricas 1:100, 1:50 e 1:32) montados no Laboratório de Hidráulica Experimental e Recursos Hídricos de Furnas Centrais Elétricas S.A. (LAHE/FURNAS). Através da caracterização dessas amostras foi possível analisar os valores de pressão média junto ao fundo da bacia e os efeitos de escala nas medições.

#### UHE Porto Colômbia (protótipo)

A UHE 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, através de uma iniciativa do LAHE/FURNAS, 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 (Figura 1). A coleta de dados foi realizada para as vazões de 500, 1000, 2000, 3000 e 4000 m<sup>3</sup>/s (Figura 3a). A intenção principal foi obter informações que pudessem contribuir para os estudos sobre os efeitos de escala nos valores de flutuações de pressão entre protótipos e modelos.



**Figura 1 - Instalação dos transdutores de pressão na bacia de dissipação da UHE Porto Colômbia. ICOLD/CBDB (2002).**

As amostras de pressão instantânea foram coletadas com frequência de 100Hz durante período variável entre 20 minutos e 45 minutos, nas 07 tomadas de pressão, sendo 03 na concordância do trecho curvo do vertedouro (dA, dB e dC), e 04 no trecho plano da bacia (d1, d3, d5 e d7). No presente trabalho foram contempladas as vazões de 1000, 2000, 3000 e 4000m<sup>3</sup>/s com a utilização dos valores contidos nos 15 minutos centrais de cada amostra. A Figura 2 apresenta a posição dos transdutores no protótipo.

O número de Froude na entrada do ressalto ( $Fr_1$ ) variou entre 5,23 e 9,35. As condições hidráulicas da campanha de medições de pressão instantânea na UHE Porto Colômbia estão dispostas na Tabela 1. A Figura 3a apresenta a formação do ressalto hidráulico para a vazão de 4000m<sup>3</sup>/s ( $Fr_1 = 5,23$ ).

Os transdutores de pressão foram instalados faceados junto ao fundo da bacia no centro do vão extremo direito do vertedouro. Os sensores possuíam faixa de operação de zero a 50mH<sub>2</sub>O A incerteza

na medição dos instrumentos era da ordem de 0,25% do fundo de escala, que corresponde a  $\pm 0,125mH_2O$ .

**Tabela 1 - Condições hidráulicas da campanha de medições realizada na UHE Porto Colômbia.**

| Q (m <sup>3</sup> /s) | q (m <sup>2</sup> /s) | Fr <sub>1</sub> | N <sub>m</sub> (m) | N <sub>j</sub> (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 |

N<sub>m</sub> = nível d'água de montante;

N<sub>j</sub> = nível d'água de jusante;

S = grau de submergência proposto por Marques *et al.*, (1999), razão entre a lâmina d'água a jusante do ressalto e a altura conjugada lenta ( $T_w/h_2$ ).

### Os modelos físicos reduzidos

Foram feitas coletas de amostras de pressões em três escalas distintas: 1:100; 1:50 e 1:32. As tomadas de pressão analisadas foram colocadas nas mesmas posições instaladas no protótipo (Figura 2).

As amostras foram coletadas com frequência de 100Hz e 500Hz, durante 15 minutos. Os transdutores tinham faixa de trabalho de 0,5 a 1,0mH<sub>2</sub>O, e a precisão era de 0,1%, ou seja  $\pm 0,0015mH_2O$  no modelo, equivalente a:

- $\pm 0,048mH_2O$  no protótipo o modelo 1:32 (Figura 3b).
- $\pm 0,075mH_2O$  no protótipo para o modelo 1:50 (Figura 3c).
- $\pm 0,15mH_2O$  no protótipo no para o modelo 1:100 (Figura 3d).

Os ensaios realizados contemplaram as vazões equivalentes a 1000, 2000, 3000, 4000, 6000 e 8000m<sup>3</sup>/s, relativas ao protótipo. Para os estudos de verificação do efeito de escala na pressão média, foram utilizados apenas os valores de pressão referentes às condições de protótipo para as vazões de 1000, 2000, 3000 e 4000m<sup>3</sup>/s (Tabela 1).

Na Tabela 2 estão apresentadas, de forma resumida, as principais características geométricas do protótipo e dos modelos físicos reduzidos nas diferentes escalas.

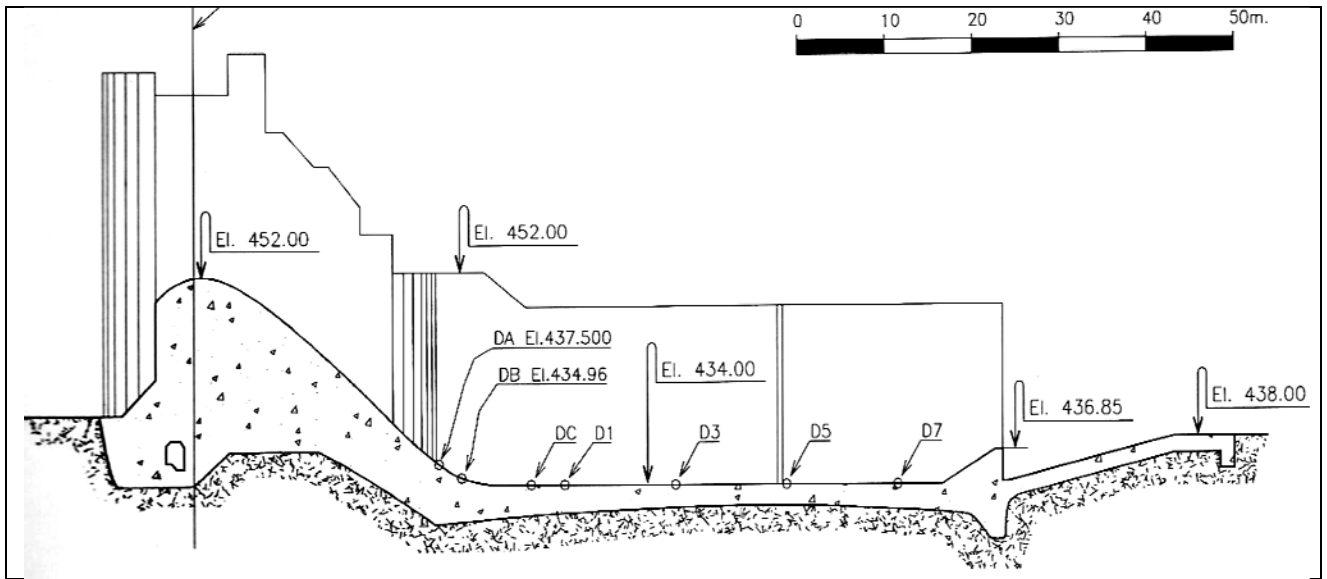
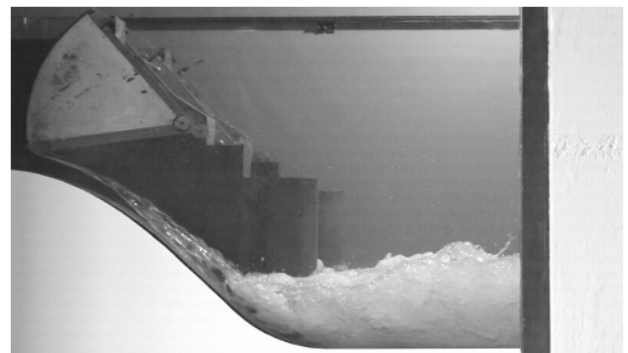


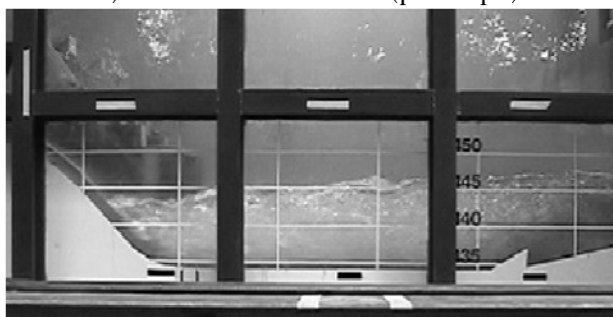
Figura 2 – Posição dos transdutores de pressão na bacia de dissipação da UHE Porto Colômbia. ICOLD/CBDB (2002)



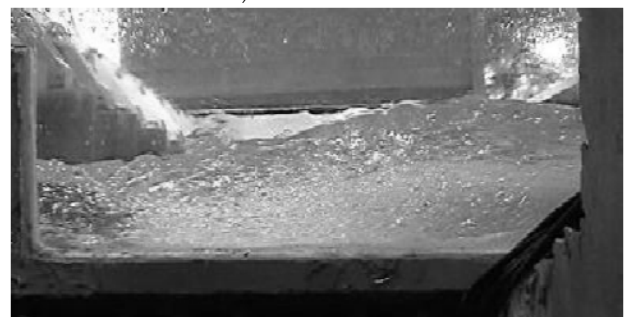
a) UHE Porto Colômbia (protótipo)



b) Modelo 1:32



c) Modelo 1:50



d) Modelo 1:100

Figura 3 – Comparação visual do escoamento entre o protótipo da UHE Porto Colômbia e os modelos reduzidos em diferentes escalas ( $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

**Tabela 2 - Resumo comparativo das características geométricas da estrutura do protótipo e dos modelos físicos reduzidos.**

| Características geométricas             | Prot. | Modelos físicos reduzidos |           |           |
|---|-------|---------------------------|-----------|-----------|
|   |       | Esc. 1:100                | Esc. 1:50 | Esc. 1:32 |
| Altura do paramento (m)                 | 18    | 0,18                      | 0,360     | 0,563     |
| Número de vãos                          | 09    | 09                        | 03        | 1+2x0,5   |
| Largura dos vãos (m)                    | 15    | 0,15                      | 0,30      | 0,47      |
| Raio entre o trecho curvo e a bacia (m) | 12,5  | 0,125                     | 0,250     | 0,391     |
| Largura da bacia (m)                    | 163   | 1,63                      | 1,000     | 1,150     |
| Extensão 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     |

## ANÁLISE DA PRESSÃO MÉDIA

A análise dos efeitos de escala e de laboratório nos valores médios de pressão partiu da comparação dos resultados obtidos em modelos reduzidos, em diferentes escalas, com as medições efetuadas no protótipo. Esta metodologia seguiu as diretrizes apresentadas na tese de doutorado de Teixeira (2008). O principal objetivo foi 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.

As amostras de dados de pressões analisadas foram adquiridas com frequência de 100Hz e com duração de 15 minutos.

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.

As pressões médias foram adimensionalizadas a partir das equações 1 e 2, conforme sugestões de Marques *et al.* (1999). A partir dessas relações, foram comparadas as distribuições longitudinais das pressões médias adimensionais ( $\Psi$ ) ocorridas no protótipo da UHE Porto Colômbia e nos modelos reduzidos nas escalas 1:100, 1:50 e 1:32.

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

$$\Gamma = \frac{X}{h_2 - h_1} \quad (2)$$

Sendo:

$\Psi$  = pressão média adimensionalizada;

$P_x$  = 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;

S = grau de submergência;

$\Gamma$  = posição adimensionalizada em relação ao início do ressalto;

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

Na Figura 4 está apresentada a distribuição longitudinal do coeficiente de pressão média ( $\Psi$ ) em função da posição adimensionalizada relativa ao início do ressalto hidráulico ( $\Gamma$ ), para as vazões equivalentes a 1000, 2000, 3000 e 4000m<sup>3</sup>/s, na UHE Porto Colômbia e nos modelos reduzidos nas diferentes escalas. Também podem ser visualizados na Figura 4 os valores obtidos por Rodrigues (2002). Cabe ressaltar que neste último trabalho os valores de pressão média foram obtidos em um modelo físico tridimensional da UHE Porto Colômbia, na escala 1:100. Visando comparação com os dados dos modelos bidimensionais, os valores de pressão obtidos por Rodrigues (2002) foram adimensionalizados a partir dos parâmetros (submergência e alturas de água  $h_1$  e  $h_2$ ) definidos para a estrutura do protótipo.

Constata-se que os valores da pressão média adimensionalizada ( $\Psi$ ) obtidos nos modelos reduzidos, no trecho plano, resultam 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 incorporação de ar no escoamento nos modelos se comparada ao protótipo. Já nas primeiras três tomadas de pressão (região denominada neste trabalho como trecho curvo), a diferença entre o protótipo e os modelos é maior, entretanto, os resultados entre os modelos possuem o mesmo desenvolvimento. Este padrão

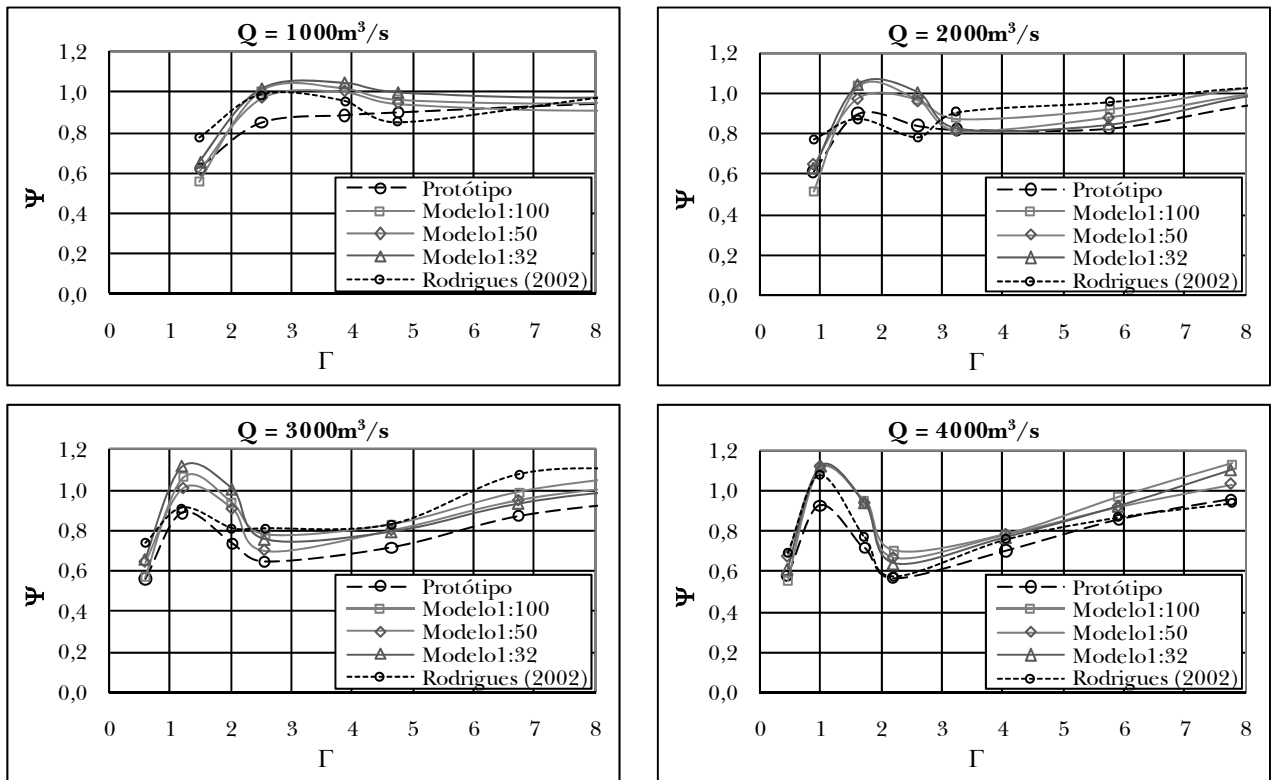


Figura 4 – Distribuições longitudinais do coeficiente de pressão média ( $\Psi$ ) observadas na bacia de dissipação da UHE Porto Colômbia, nos modelos nas escalas 1:32; 1:50 e 1:100 e obtidas por Rodrigues (2002). As tomadas de pressão situadas no trecho curvo são os primeiros três pontos de cada série.

pode ser explicado pelas escalas entre os modelos serem próximas entre si (por exemplo: a escala entre o modelo 1:100 e 1:50 é de 1:2).

Pela análise da Figura 4, 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 não há efeito da tridimensionalidade sobre os valores de pressão média.

Comparando-se os dados obtidos nos modelos (nas escalas 1:100, 1:50 e 1:32) e os resultados de Rodrigues (2002) com os valores de protótipo, observa-se que, após a curva de concordância, há um ponto onde ocorrem os menores valores de  $\Psi$  no trecho plano. Os valores de  $\Psi$  tendem a serem maiores à medida que a vazão diminui (por exemplo, considerando valores de protótipo,  $\Psi_{Q4000} = 0,57$  e  $\Psi_{Q1000} = 0,90$ ).

As pressões médias nos modelos são maiores que no protótipo. Isto provavelmente ocorre devido à aeração ser menor nos modelos se comparada com o protótipo. Além disso, entre os modelos, quanto menor a escala, menor é a incorporação de ar no escoamento. Sendo assim, tornou-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  $\lambda_{ar} \equiv \lambda^{1/2}$ . A partir dessas suposições apresentam-se na Tabela 3

possíveis relações entre as escalas de entrada de ar e as estruturas.

Com base nas informações apresentadas na Tabela 3, 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. Na comparação entre as escalas de modelo, a variação entre as duas hipóteses é menor, uma vez que a relação geométrica entre as escalas está bastante próxima.

**Tabela 3 – Possíveis relações entre as escalas de ar e as estruturas.**

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

- b) Uma maior entrada de ar deve resultar no aumento da linha de água, mas sem alterar a pressão, já que o volume de água presente sobre o ponto de medição é o mesmo. Nos modelos não foi possível constatar elevação do nível de água (no protótipo esta informação não foi coletada). Julga-se que isso se deve ao fato das escalas geométricas entre os modelos estarem muito próximas (1:1,56 a 1:3,13) e também pela dispersão natural da leitura da linha de água, por ser de difícil medição. Seriam necessárias medições no protótipo ou em modelos físicos em escalas maiores das abordadas no presente trabalho. A Figura 3 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, 1:50 e 1:32. Visualmente, parece não existir linearidade da aeração com a escala geométrica, por exemplo, a entrada de ar no mo-

delo 1:50 é superior ao dobro existente no modelo 1:100. Essas constatações preliminares devem ser confirmadas em um estudo específico sobre aeração em bacias de dissipação por ressalto hidráulico.

- 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) 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 à influência do raio de curvatura. Desta forma, quando se faz a transposição dos valores de pressão média obtidos nos modelos, obtêm-se resultados superiores ao medidos diretamente no protótipo. De forma geral, a análise realizada mostra a necessidade de estudos aprofundados com relação à influência da aeração no ressalto hidráulico.

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

De acordo com Teixeira (2008), qualquer análise que visa determinar os efeitos de escala nos valores de pressão obtidos através de ensaios realiza-

dos 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). A quantificação da soma desses efeitos é 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.

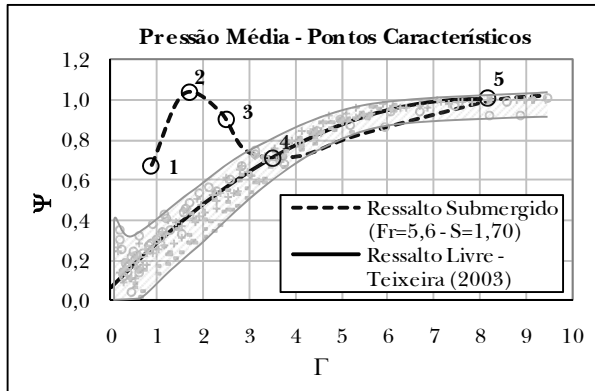


Figura 5 - Pontos característicos da distribuição longitudinal da pressão média para o ressalto submergido, conforme Wiest (2008).

Neste trabalho foi realizada uma análise da dispersão natural dos valores de pressão média baseada nos resultados obtidos por Wiest (2008) para o ressalto afogado (também chamado de submergido). O autor 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 submergência (cabe salientar que os dados utilizados pelo pesquisador correspondem à mesma campanha de ensaios utilizada no presente trabalho) e também com base em resultados de ressalto livre obtidos por diferentes pesquisadores, citados por Teixeira (2003). A metodologia de análise consistiu na determinação de pontos característicos do ressalto hidráulico submergido, a fim de possibilitar o traçado de ajustes que descrevessem da melhor forma possível o fenômeno e sua dependência com relação à variação da submergência. Foi possível identificar cinco pontos principais ao longo do ressalto (Figura 5), conforme é descrito a seguir:

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

A equação 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. As Tabelas 4 a 6 apresentam os coeficientes da equação 3 para cada uma das escalas de modelo e suas respectivas tomadas de pressão.

$$\Psi \cdot S = \frac{(a + b \cdot (S - 1/Fr_1))}{(1 + c \cdot (S - 1/Fr_1) + d \cdot (S - 1/Fr_1)^2)} \quad (3)$$

Tabela 4 – Coeficientes de ajuste para a distribuição da pressão média ao longo do trecho curvo. Wiest (2008)-modelo 1:100.

| Coeficientes | a      | b       | c       | d      |
|--------------|--------|---------|---------|--------|
| Posição      |        |         |         |        |
| Ponto 1      | 0,0925 | 0,4630  | 0,2473  | 0,0925 |
| Ponto 2      | 9,1349 | 38,0464 | 29,1054 | 9,1349 |
| Ponto 3      | 1,6469 | 20,8664 | 17,9295 | 1,6469 |

Tabela 5 – Coeficientes de ajuste para a distribuição da pressão média ao longo do trecho curvo. Wiest (2008)-modelo 1:50.

| Coeficientes | a      | b       | c       | d       |
|--------------|--------|---------|---------|---------|
| Posição      |        |         |         |         |
| Ponto 1      | 0,0014 | 15,0450 | 11,3630 | -1,4017 |
| Ponto 2      | 0,4629 | 27,5450 | 15,0440 | -6,7244 |
| Ponto 3      | 0,2470 | 22,1590 | 13,7090 | -1,6911 |

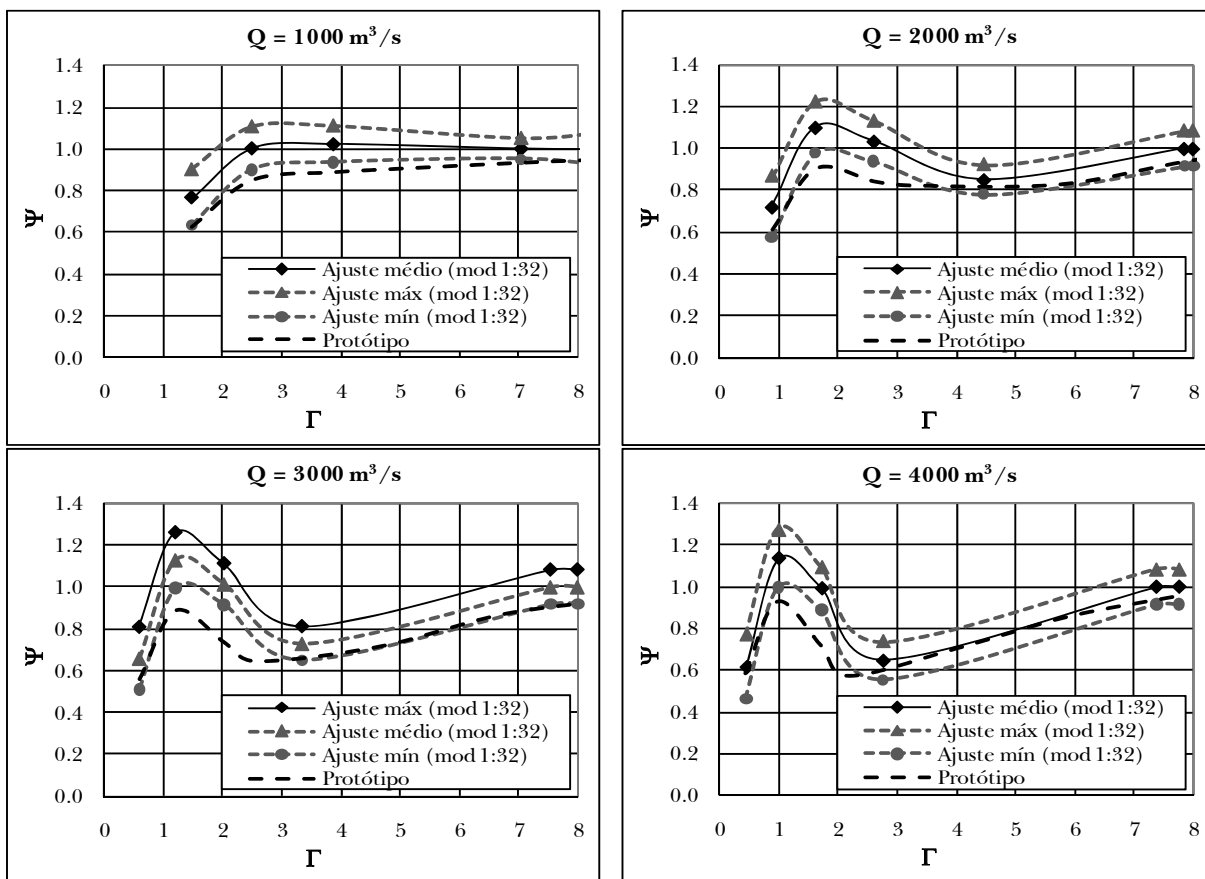


Figura 6 – Dispersão natural do coeficiente de pressão média ( $\Psi$ ) considerando as amostras obtidas no modelo 1:32 da UHE Porto Colômbia. As tomadas de pressão no trecho curvo são os primeiros três pontos de cada série.

Tabela 6 – Coeficientes de ajuste para a distribuição da pressão média ao longo do trecho curvo. Wiest (2008)-modelo 1:32.

| Coeficientes | a      | b       | c       | d       |
|--------------|--------|---------|---------|---------|
| Ponto 1      | 0,0032 | 11,4483 | 4,4338  | 8,3902  |
| Ponto 2      | 0,4631 | 36,2759 | 19,2217 | -5,6435 |
| Ponto 3      | 0,2469 | 29,2035 | 17,6385 | 0,3917  |

A partir dos ajustes médios estabelecidos para a pressão média, Tabela 7 e Tabela 8, considerando cada escala de modelo, foram definidas envolventórias superiores e inferiores com base na distribuição estatística de Student, com um nível de significância de 95%.

Tabela 7 – Ajustes da pressão média em função da submergência (S) do escoamento para o ponto d intersecção entre as curvas do ressalto submerso e ajuste do ressalto livre (ponto 4).

| Escala do modelo | Ajustes   |
|------------------|---|
| 1:100            | $\Psi \cdot S = \frac{-1,8735 + 2,0795 \cdot S}{1 + 0,1498 \cdot S - 0,0054 \cdot S^2}$   |
| 1:50             | $\Psi \cdot S = \frac{-1,3370 + 1,4990 \cdot S}{1 - 0,0812 \cdot S + 0,0345 \cdot S^2}$   |
| 1:32             | $\Psi \cdot S = \frac{-20,1155 + 21,5361 \cdot S}{1 + 8,1505 \cdot S - 1,1731 \cdot S^2}$ |

De acordo com os resultados apresentados na Figura 6, observa-se que a máxima dispersão é da



ordem de  $\cong 30\%$  e ocorre nas tomadas localizadas no trecho curvo do perfil do vertedouro, onde existe influência do raio de curvatura (nas escalas de modelo 1:50 e 1:100 a dispersão é da mesma ordem de grandeza). À medida que diminui a vazão, a dispersão nessas tomadas diminui. Foi possível notar também que os valores medidos no protótipo enquadram-se dentro das faixas de dispersão definidas, excetuando as tomadas situadas na curva (as maiores diferenças ocorrem nas vazões de  $3000\text{m}^3/\text{s}$  e  $4000\text{m}^3/\text{s}$ ).

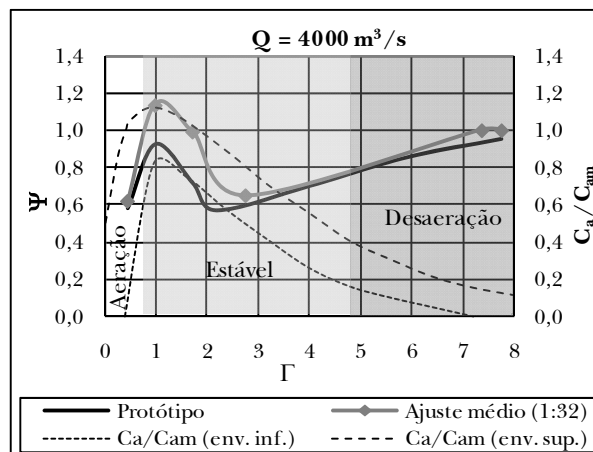
**Tabela 8 – Ajustes para determinação das posições relativas adimensionais ( $X_{adm}$ ) dos pontos 4 e 5 em função da submergência (S).**

| Escala do modelo | Ponto | Ajustes  |
|------------------|-------|--|
| 1:100            | 4     | $X_{adm} = 6,1767 \cdot \ln(S) + 0,9852$               |
|                  | 5     | $X_{adm} = 6,6347 \cdot S^{0,1594}$                    |
| 1:50             | 4     | $X_{adm} = 1,0686 \cdot S^2 + 7,0784 \cdot S - 5,3693$ |
|                  | 5     | $X_{adm} = 6,7473 \cdot S^{0,3453}$                    |
| 1:32             | 4     | $X_{adm} = -0,443 \cdot S^2 + 5,5298 \cdot S - 4,2903$ |
|                  | 5     | $X_{adm} = 6,7433 \cdot S^{0,2451}$                    |

De acordo com Wiest (2008), a submergência do escoamento afeta os resultados, e quanto menor o  $Fr_1$ , mais agitado é o escoamento (ou seja, maiores diferenças 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 3). A Figura 7 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 adimensionalizada ao longo do ressalto, definida por Rajaratnam (1962).

Verifica-se pela Figura 7 que a segunda e terceira tomadas ( $\Gamma \cong 0,45$  e  $\Gamma \cong 0,99$ ) estão sob influência da zona de aeração do escoamento, considerando a classificação proposta pelo autor, 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 valores dos  $\Psi$  determinados para o modelo 1:32 e o protótipo praticamente coincidem. Sendo assim, verificou-se que os ajustes para  $\Psi$ , e suas respectivas envoltórias, estão em acordo com a dispersão natural do fenômeno.



**Figura 7 – Comparação entre a concentração de ar (Rajaratnam, 1962), os ajustes determinados para a pressão média, modelo 1:32, e os valores medidos diretamente no protótipo ( $Q = 4000\text{m}^3/\text{s}$ ).**

Conforme os resultados apresentados na Figura 8, observa-se que, para algumas tomadas, os valores de pressão média nos modelos físicos situam-se fora das envoltórias definidas no presente estudo (determinadas com base nos dados do modelo 1:32, por apresentar a faixa de variação mais restritiva e por ser a estrutura mais próxima do protótipo em termos de dimensões), principalmente quando comparados com as pressões médias coletadas no protótipo da UHE Porto Colômbia. Além disso, constata-se 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 se situam fora da faixa de dispersão natural dos dados;
- é de conhecimento que em bacias de dissipação a jusante de vertedouros à medida que a vazão diminui a submergência aumenta. Nesta situação tem-se uma maior massa d'água nas tomadas de pressão situadas no trecho curvo, amenizando o efeito da entrada de ar nesta região.

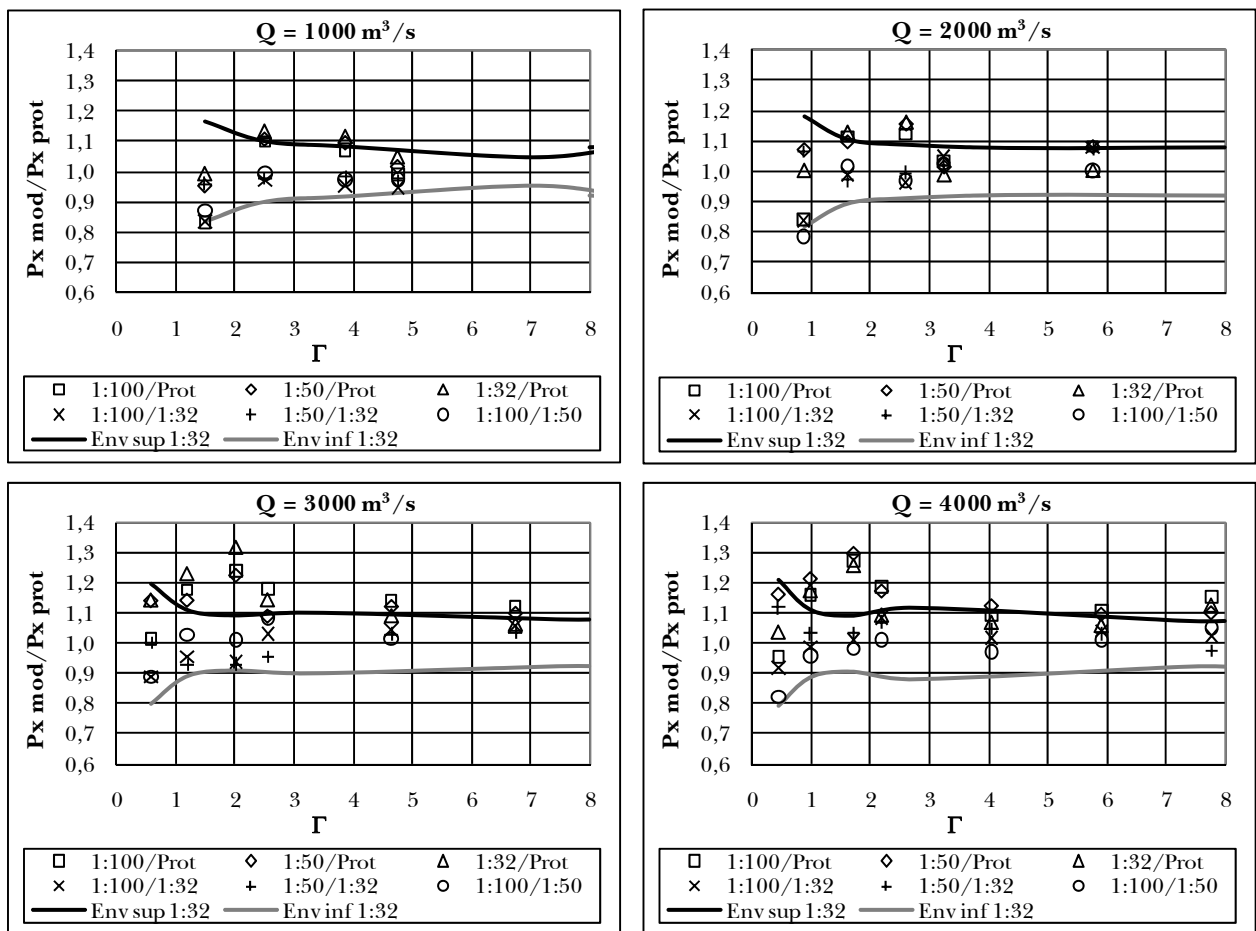


Figura 8 – Distribuição longitudinal das diferenças relativas da pressão média ( $\psi$ ), considerando as amostras obtidas nas diferentes escalas de modelo e no protótipo. As envoltórias foram definidas com base nos dados do modelo 1:32

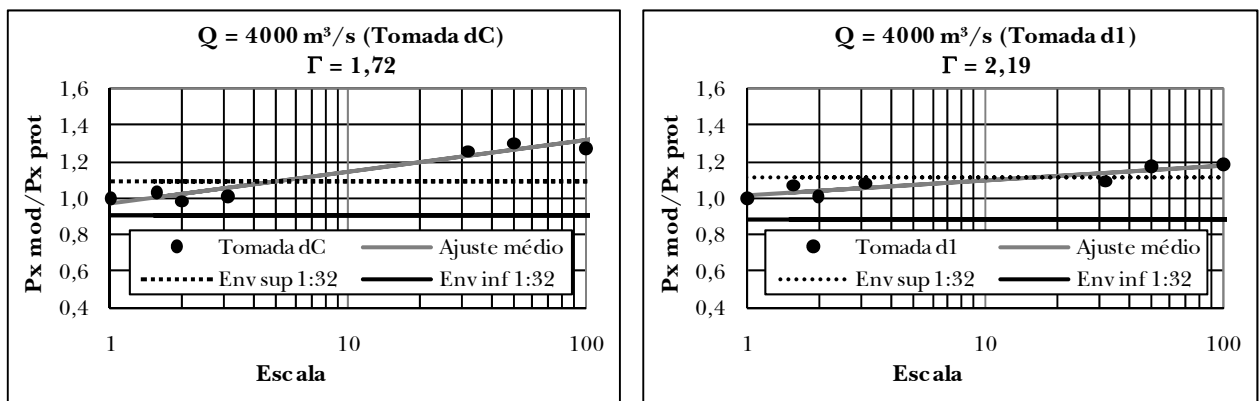


Figura 9 – Diferenças relativas da pressão média para todas as tomadas de pressão dC e d1 ( $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$ ), considerando as amostras obtidas nas diferentes escalas de modelo e no protótipo. As envoltórias foram definidas com base nos dados obtidos no modelo 1:32.

A partir da análise das diferenças relativas em função das escalas dos modelos, foi estudada separadamente a dispersão presente em cada uma das tomadas, para cada condição de escoamento. A Figura 9 apresenta a dispersão das tomadas dC e d1 para a vazão de 4000m<sup>3</sup>/s (situação de escoamento mais desfavorável). Os ajustes médios apresentados foram determinados apenas com o intuito de verificar tendências do comportamento das diferenças relativas em cada uma das tomadas como uma forma de “quantificar” os possíveis efeitos de escala nos valores de pressão média.

Observa-se pela Figura 9 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 sugerem a adoção de escalas 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 %.

A Tabela 9 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 9 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<sub>1</sub> 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 se situam no trecho curvo, ou ainda sob sua influência, e coincidem com as zonas de maior flutuação de pressão e entrada de ar no escoamento.

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 9). A Figura 10 apresenta o comportamento dos referidos valores em relação ao número de Froude na entrada (Fr<sub>1</sub>) e à submergência (S).

Nota-se pela Figura 10 que os menores Fr<sub>1</sub> 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 dizermos que para uma relação “Fr<sub>1</sub>.S” em torno de 10, o modelo físico para representar com exatidão os valores de pressão média no

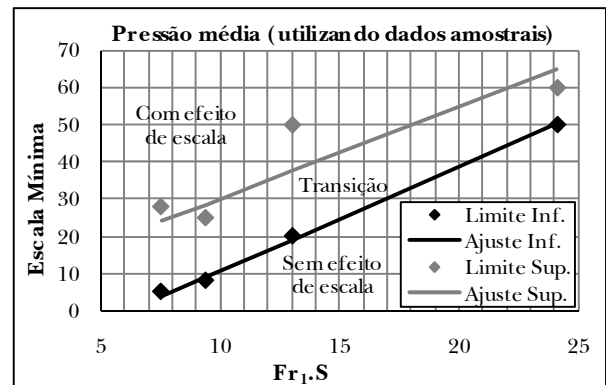
protótipo (sem efeitos de laboratório) deve ser na escala 1:10. No entanto, pode-se adotar modelos com escala até 1:30, dependendo das características do escoamento a serem avaliadas. Acima desse valor, possivelmente devam existir efeitos de escala nos valores médios de pressão.

**Tabela 9 – 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 <sub>1</sub> * | S*   | Q* (m <sup>3</sup> /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 neste trabalho.



**Figura 10 – 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).**

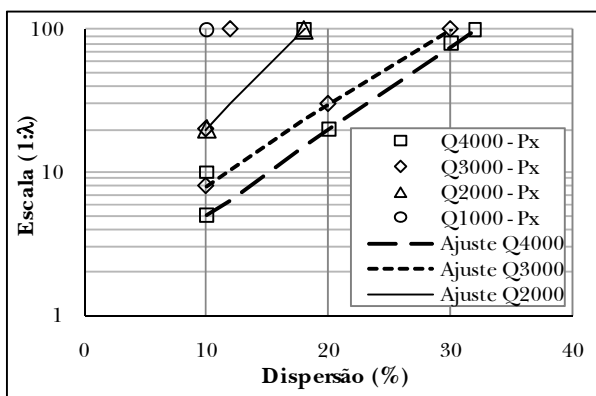
De acordo com a análise apresentada anteriormente, foi possível constatar os seguintes aspectos sobre o efeito de escala na pressão média:

- 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 e da posição do início do ressalto.

Pelos motivos citados, para reproduzir os valores medidos no protótipo da UHE Porto Colômbia, dentro de uma faixa de valores compatível com a dispersão natural do fenômeno, tornam-se necessários modelos com grandes dimensões.

Sendo assim, realizou-se uma avaliação das escalas a serem adotadas em modelos físicos na hipótese de diferenças relativas maiores que a dispersão natural. Com isto, aumentaremos a dispersão aceitável (definida a partir das diferenças relativas, como mostrado na Figura 11, por exemplo) em relação ao valor medido no protótipo, até que a mesma corresponda a modelos na escala 1:100. Cabe salientar que este estudo teve como base os valores obtidos nas tomadas dC e d1 (que representam as condições mais desfavoráveis) para todas as vazões ensaiadas, cujos resultados são apresentados na Figura 11.



**Figura 11 – 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).**

Observa-se pela Figura 11 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, conforme Figura 11. Uma dispersão de 25 % na tomada d1

representa uma diferença de, aproximadamente, 1,7mH<sub>2</sub>O em relação ao valor medido no protótipo (que foi de 6,91mH<sub>2</sub>O).

A Tabela 10 apresenta uma sugestão de escalas de modelo em função da dispersão, além de apresentar as diferenças absolutas máximas ( $\xi_{máx}$ ) para a tomada dC da vazão de 4000m<sup>3</sup>/s (que representa a situação mais desfavorável).

**Tabela 10 – 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  $Q = 4000\text{m}^3/\text{s}$ .

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.

## CONCLUSÕES

Comparando os valores de pressão média obtidos no presente trabalho (a partir de medições realizadas em modelos físicos bidimensionais) com os apresentados no trabalho de Rodrigues (2002), que contemplou um modelo tridimensional (de conjunto) da UHE Porto Colômbia, observa-se que ambos possuem um mesmo padrão de desenvolvimento. Desta maneira, conclui-se que não existe efeito significativo da tridimensionalidade sobre os valores de pressão média.

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 (inferior a 20 %, considerando o menor número de Froude ensaiado - que representa a pior situação), com a tendência das diferenças serem inversamente proporcionais à escala do modelo.

Aparentemente, as pressões médias nos modelos tendem a serem 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.

Neste trabalho foi realizada uma análise da dispersão natural dos valores de pressão média baseada na metodologia proposta por Wiest (2008), para ressalto submerso, com base nos resultados das medições no modelo 1:50 da UHE Porto Colômbia.

A partir dos resultados obtidos, sugere-se, para relações de  $F_r.S$  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.

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho faz parte do Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) intitulado “Análise da Macroturbulência em Dissipadores por Ressalto Hidráulico”, que contou com a parceria e o apoio financeiro da Eletrobrás-Furnas. Os autores também agradecem ao IPH/UFRGS, ao CNPq e a CAPES.

## REFERÊNCIAS

BOLLER 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.

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.

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*, ABRH. Anais. Belo Horizonte.

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. Veneza.

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.

RAJARATNAM, N. 1962. Experimental Study of Air Entrainment Characteristics of the Hydraulic Jump. *Jl of Inst. Eng, India*, Vol. 42, nº. 7.

RODRIGUES, R.C. 2002. Estudo numérico experimental de bacia de dissipação. 124 p. *Dissertação de Mestrado* - Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro.

TEIXEIRA, E.D. 2003. Previsão dos valores de pressão junto ao fundo em bacias de dissipação por ressalto hidráulico. 113 p. *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.

TEIXEIRA, E.D. 2008. Efeito de escala na previsão dos valores extremos de pressão junto ao fundo em bacias de dissipação por ressalto hidráulico. 293 p. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

WIEST, R.A. 2008. Avaliação do campo de pressões em ressalto hidráulico formado a jusante de um vertedouro com diferentes graus de submersão. 139 p. *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.

### **Scale Effect on Mean Pressure Values Near the Bottom of Stilling Basins by Submerged Hydraulic Jump**

#### **ABSTRACT**

*Hydraulic jumps are widely used as a form of energy dissipation downstream from hydraulic structures. Knowledge regarding average pressure values, pressure fluctuation and extreme values at the bottom of stilling basins is very important for designers seeking a more effi-*

*cient and economic sizing. This paper aims to present the scale and laboratory effects on the average pressure values from experimental data of three partial reduced physical models (geometric scale of 1:100, 1:50 and 1:32) and from measurements performed at UHE Porto Colombia (owned by Furnas Centrais Elétricas S.A.). Suggestions of minimal scales are presented to be used in reduced models for average pressure evaluation along hydraulic jump stilling basins.*

**Key words:** *hydraulic jump, scale effect, average pressure.*