ADIMENSIONALIZAÇÃO DE PRESSÕES MÉDIAS EM BACIAS DE DISSIPAÇÃO POR RESSALTO HIDRÁULICO

Marcelo Giulian Marques [1],Fatima M. Almeida[2] e Luiz Augusto Magalhães Endres[3]

Resumo – O conhecimento do processo de dissipação de energia passa, obrigatoriamente, pela determinação das características da distribuição longitudinal de pressão média no escoamento e variação de sua amplitude. Este trabalho relata parte dos estudos que estão sendo desenvolvidos no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS, na área de análise de macroturbulência em estruturas de dissipação de energia, através do estudo de variação instantânea das propriedades dos escoamentos (velocidade, pressão e nível). Mais especificamente, o trabalho sugere uma adimensionalização das pressões médias em função das características hidráulicas do escoamento e compara os resultados obtidos com medições efetuadas em estruturas de dissipação montadas em laboratórios e executadas em protótipo, mostrando que esta adimensionalização pode ser adotada para uma previsão preliminar das pressões médias em sistemas reais.

Abstract – Knowledge of the dissipation process necessarily requires determination of the characteristics of the longitudinal distribution of average flow pressure and its variation in amplitude. This paper reports some work being developed at Instituto de Pesquisas Hidráulicas of the Universidade Federal do Rio Grande do Sul in the field of analysis of macroturbulence in energy dissipating structures, through study of the instantaneous variation of flow properties (velocity, pressure and water level). More specifically, this work suggests a nondimensionalization of the average pressure as function of the hydraulic characteristics of the flow. Comparison between results obtained with measurements made on laboratory and prototype dissipating structures, shows that this nondimensionalization can be used in preliminary forecasts of average pressure in real systems.

Palavras-Chave - bacias de dissipação, pressões, medições em protótipo

[1] Instituto de Pesquisas Hidráulicas / UFRGS, Av. Bento Gonçalves 9500, Porto Alegre/RS, Caixa Postal 15029, CEP 91501 – 970 (051) 316-6310, marques@if.ufrgs.br.

[2] Laboratório de Hidráulica Experimental – LAHE / FURNAS Centrais Elétricas, est. Pau da Fome 839. Jacarepaguá, Rio de Janeiro / RJ, (021) 446-9417, fatimama@furnas.com.br.

[3] Instituto de Pesquisas Hidráulicas / UFRGS, Av. Bento Gonçalves 9500, Porto Alegre / RS, Caixa Postal 15029, CEP 91501 – 970 (051) 316-6669, endres@if.ufrgs.br.

INTRODUÇÃO

O engenheiro projetista de estruturas hidráulicas tem grande interesse em resultados do tratamento de dados obtidos em protótipos e em análises da qualidade das previsões que seriam obtidas a partir de estudos em modelos reduzidos. É importante, também, a verificação da possibilidade de aplicação dos resultados de modelos de outras estruturas dissipadoras a projetos preliminares de novos dissipadores reais.

A análise dos dados obtidos em diferentes geometrias de dissipadores, com a mesma forma de dissipação e condições de contorno, permite avaliar a influência dos parâmetros geométricos e hidráulicos no fenômeno da dissipação de energia. Entretanto, para assim proceder, é necessário que sejam identificados parâmetros adimensionais que representem estas condições de maneira uniforme.

A previsão da distribuição longitudinal das pressões médias que podem ocorrer no interior de um dissipador de energia por ressalto hidráulico é um primeiro passo para a previsão das pressões extremas ali verificadas. A determinação destes valores é de grande importância para o engenheiro hidráulico encarregado de projetos, além de permitir um melhor conhecimento do processo de dissipação no interior do ressalto. A maior parte das análises de dados encontradas na literatura corrente diz respeito a características das flutuações de pressão isoladamente e, ainda, obtidas em instalações de laboratório. Apesar do grande interesse envolvido nestas determinações, para a previsão de esforços extremos são necessárias informações, também, sobre as pressões médias ocorridas, normalmente mais raras nas publicações, principalmente considerando determinações efetuadas em protótipos.

Este trabalho relata o estudo que está sendo desenvolvido no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, na área de análise da macroturbulência do escoamento em estruturas de dissipação de energia, através do estudo de variação instantânea das propriedades dos escoamentos (velocidades, pressões e níveis).

O objetivo deste trabalho é, portanto, sugerir um método de apresentação dos valores da distribuição longitudinal da pressão média no fundo de bacias de dissipação por ressalto hidráulico visando possibilitar as estimativas dessa grandeza em sistemas reais.

METODOLOGIA

A metodologia empregada para a uniformização da apresentação adimensional de dados representativos de pressões médias partiu da reunião de medições de pressões no fundo de dissipadores de energia por ressalto, de diferentes fontes, de maneira a possibilitar uma análise conjunta destes dados em função das suas caraterísticas geométricas e hidráulicas.

Para a elaboração deste trabalho foram utilizados os dados obtidos nas seguintes medições:

- bacia de dissipação a jusante de vertedouro instalada em um canal com 0,72 m de largura por 15 m de comprimento, construído no Laboratório de Hidráulica do IPH/UFRGS, ensaiado em 1990, descrito em detalhes em Endres (1990). Foram coletadas amostras de pressão com uma freqüência de 100 Hz durante 100 s, em 11 tomadas de pressão instaladas na parte plana do fundo da bacia, para cinco situações de escoamento, caracterizadas pelo número de Froude variando entre 4,3 e 8,6. Transdutores de pressão foram ligados às tomadas de pressão através de mangueiras plásticas com 2,00 m de comprimento;
- bacia de dissipação a jusante de vertedouro instalada em um canal com 0,60 m de largura por 12 m de comprimento, construído no Laboratoire d´Hidraulique du Departement de Génie Civil de l`Université Laval - Quebéc - Canadá, ensaiado em 1994, descrito com detalhes em Marques et al (1997). Foram coletadas amostras de pressão com uma freqüência de 50 Hz durante 200 s em 22 tomadas, para seis situações de escoamentos com números de Froude variando entre 4,2 e 9,3. Os transdutores de pressão foram ligados às tomadas por mangueiras com 0,55 m de comprimento; e
- sistema dissipador de energia da Usina de Porto Colômbia pertencente a Furnas Centrais Elétricas. As medições em protótipo foram realizadas em 1996, em processo descrito pela Comissão de Hidráulica e Mecânica dos Fluidos da ABRH (1997) e Ortiz et al (1998). Foram coletadas amostras de pressão com uma freqüência de 100 Hz durante um período variável entre 30 minutos e 45 minutos, em 7 tomadas de pressão, sendo 3 na concordância do perfil do vertedouro e 4 na parte plana do fundo da bacia. Os transdutores de pressão foram instalados faceados junto ao fundo da bacia. Para evitar problemas de estabilização no regime de escoamento o presente trabalho selecionou 15 minutos das amostras totais, de onde foram desprezados os minutos iniciais (10 minutos ou mais) e os últimos 5 minutos.

As geometrias dos canais em perfis longitudinais aparecem na Figura 1, com a representação das posições das tomadas de pressão utilizadas. Deve ser salientado que para a Usina de Porto Colômbia as dimensões são as do protótipo e, para as estruturas referidas em Endres (1990) e Marques et al. (1997) as dimensões são as de laboratório. As principais diferenças entre os modelos e o protótipo dizem respeito à conformação do fundo dos canais a jusante dos ressaltos, à existência de dispositivos auxiliares no protótipo, tais como comportas setor, inexistentes nas estruturas de laboratório e à instalação de tomadas de pressão ainda no trecho em curva do rápido do vertedouro enquanto, nas estruturas de laboratório, as tomadas aparecem somente no trecho do fundo plano.

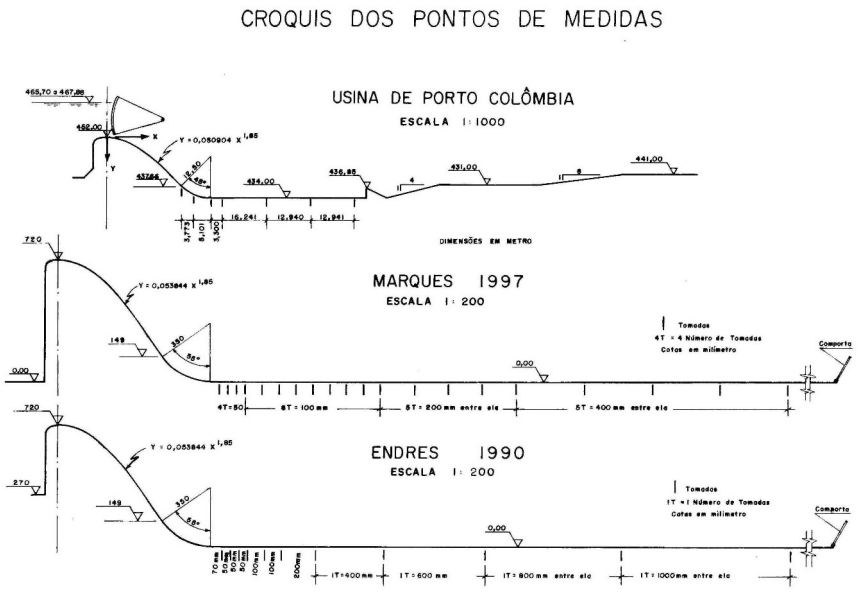


Figura 1 - Perfis longitudinais dos canais e posição das tomadas de pressão (as escalas são do desenho original).

Para a apresentação das condições hidráulicas dos experimentos foram feitas algumas adaptações nos valores originalmente publicados visando padronizar o método de obtenção. Do trabalho de Endres (1990) foram reavaliados os parâmetros em função dos encontrados por Marques et al (1997), uma vez que as duas estruturas eram bastante semelhantes e o primeiro adotou, para o cálculo da altura conjugada rápida, valores obtidos analiticamente, enquanto o segundo efetuou medições de velocidade e altura da lâmina de água na entrada do ressalto. As alturas conjugadas lentas foram obtidas, nos dois modelos, a partir de valores medidos. Nestes dois trabalhos os ensaios foram sempre efetuados com submergência (S) igual a 1, ou seja, altura de água sobre o fundo da bacia a jusante do ressalto (T_w) igual à altura lenta (y_l).

Para a Usina de Porto Colômbia, devido à dificuldade de medição das alturas conjugadas rápidas (y_r) e velocidades na entrada do ressalto (V_r), foram utilizadas expressões analíticas nesta determinação, uma vez que era possível controlar nível do reservatório (N_r), abertura da comporta (a), vazão vertida (Q) e nível a jusante (N_j). Pela análise das condições hidráulicas observou-se que o ressalto, para todas as vazões ensaiadas, eram afogados, ou seja, submergência maior do que 1. Este fato indicava que o ressalto hidráulico começava antes do ponto de tangência entre o raio de concordância e o fundo da bacia.

As condições hidráulicas a que estiveram submetidas as três estruturas são as apresentadas nas Tabelas 1 e 2:

Tabela 1 – Condições hidráulicas das medições em Endres (1990) e Marques et al (1997)

Endres (1990)				Marques et al (1997)			
Fr*	V_r*(m/s)	y_r*(mm)	y_1 (mm)	Fr	V_r(m/s)	y_r(mm)	y_1(mm)
4,2	3,94	88	486	4,9	4,00	68	426
4,7	3,89	70	433	5,4	3,92	54	373
5,3	3,84	53	379	6,3	3,83	38	301
6,3	3,78	36	309	7,3	3,76	28	246
8,6	3,68	18	216	8,1	3,72	22	218

* Valores reavaliados em função das medições de Marques et al. (1997).

Tabela 2 – Condições hidráulicas das medições efetuadas na Usina de Porto Colômbia em 1996

Fr	Q(m^3/s)	N_r(m)	a(m)	V_r(m/s)	y_r(m)	y_1(m)	T_w(m)	Dx(m)
8,7	500	465,78 a 465,76	0,39	16,61	0,19	3,13	10,11	-14,39
6,8	1000	465,79	0,72	17,75	0,35	4,54	10,00	-13,59
5,4	2000	465,77 a 465,70	1,33	19,17	0,64	6,61	10,60	-12,60
4,7	3000	465,88 a 465,83	2,02	20,09	0,92	8,24	10,80	-11,34
4,3	4000	465,77 a 465,70	2,75	20,63	1,19	9,58	11,35	-10,67

Dx = distância desde o ponto de tangência entre o raio de concordância e o fundo da bacia até o início do ressalto (valores negativos indicam que o ressalto começa antes do ponto de tangência).

A determinação de parâmetros para a representação das pressões médias em forma adimensional foi feita na seguinte forma:

a) x = distância da tomada de pressão em relação ao início do ressalto;

b) y_r = profundidade conjugada rápida do ressalto:

b.1) em Marques et al (1997), é o valor determinado através de medição da altura de água e de velocidade na posição da tomada 1;

b.2) em Endres (1990), é o valor reavaliado em função das medições de Marques et al. (1997), pois as duas estruturas de laboratório apresentam a mesma geometria de vertedouro e dimensões; e

b.3) na Usina de Porto Colômbia, são os valores calculados com base na energia a jusante das comportas (H_e), onde:

$$V_r = \sqrt{2g\,H_e} \quad (1)$$

$$y_r = \frac{Q}{B\,V_r} \qquad (2)$$

sendo B a largura da bacia de dissipação = 163 m;

c) y_l = profundidade conjugada lenta do ressalto:

c.1) em Endres (1990) e Marques et al. (1997), é o valor da pressão, em altura de coluna de água, na tomada que não mais apresentava variação significativa na flutuação de pressão; e

c.2) na Usina de Porto Colômbia, é o valor obtido com o emprego da expressão de Bélanger;

d) Dx = posição do início do ressalto, a partir do ponto de tangência entre a curva de concordância e o fundo da bacia de dissipação:

d.1) em Endres (1990) e Marques et al (1997), como o ressalto é livre (não afogado), o início do ressalto foi considerado no ponto de tangência entre o raio de concordância e o fundo do canal;

d.2) na Usina de Porto Colômbia, é o valor calculado com a metodologia proposta por Sinniger e Hager (1988), para o cálculo do início do ressalto afogado tipo B (nomenclatura utilizada pelos autores citados);

e) P= pressão média, em metros de coluna de água, na tomada de pressão, obtida através de amostras coletadas para cada tomada;

f) $\frac{P - y_r}{y_l - y_r}$ = adimensionalização da pressão média;

g) T_W = nível de água a jusante do ressalto;

h) $S = \frac{T_W}{yl}$ = fator de submergência; e

i) $F = \frac{V}{\sqrt{g\,y_r}}$ = número de Froude do escoamento com velocidade V e profundidade y_r.

RESULTADOS

O conjunto de todos os dados de pressões médias obtidas nos modelos e no protótipo está apresentado na Figura 2, adimensionalizado segundo o método descrito em Marques et al. (1997) que emprega as profundidades conjugadas. Observa-se que os resultados do protótipo estão significativamente afastados dos resultados das estruturas de laboratório que, praticamente, coincidem entre si. Este afastamento das curvas do protótipo pode ser

compreendido se considerarmos as diferentes situações de níveis de água no interior da bacia de dissipação no caso desses ressaltos. Apesar deste afastamento entre as curvas é possível identificar características comuns no que diz respeito ao padrão de crescimento, no início do ressalto, com a influência provável da curvatura do vertedouro nas primeiras tomadas de pressão, e a tendência da curva para uma linha horizontal, com o desenvolvimento do escoamento para jusante.

Visando maior uniformização na apresentação de resultados de pressões médias, no fundo de bacias de dissipação por ressalto hidráulico, está sendo, aqui, proposta a utilização de um fator adimensional de submergência do ressalto, conforme definido anteriormente, o que torna os dados apresentados na Figura 2 visivelmente mais próximos, conforme pode ser visto na Figura 3.

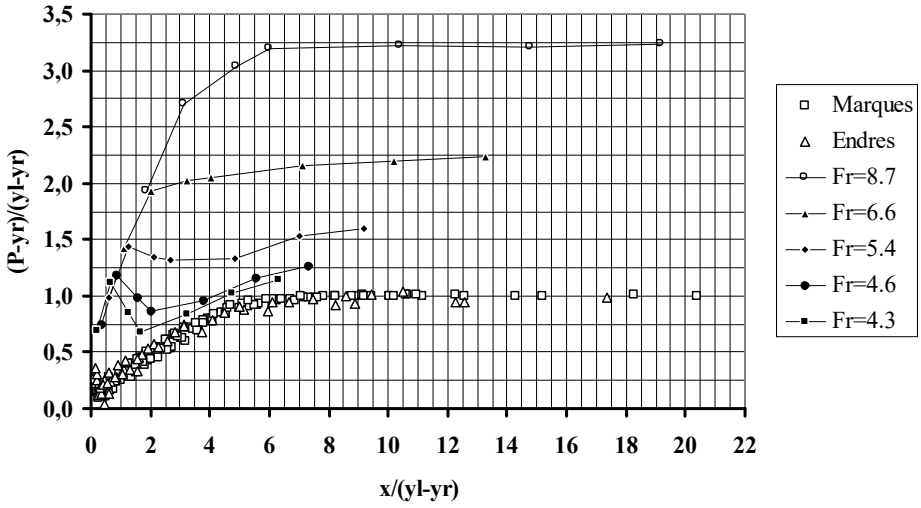


Figura 2 - Pressões médias, adimensionalizadas, obtidas nos modelos e no protótipo.

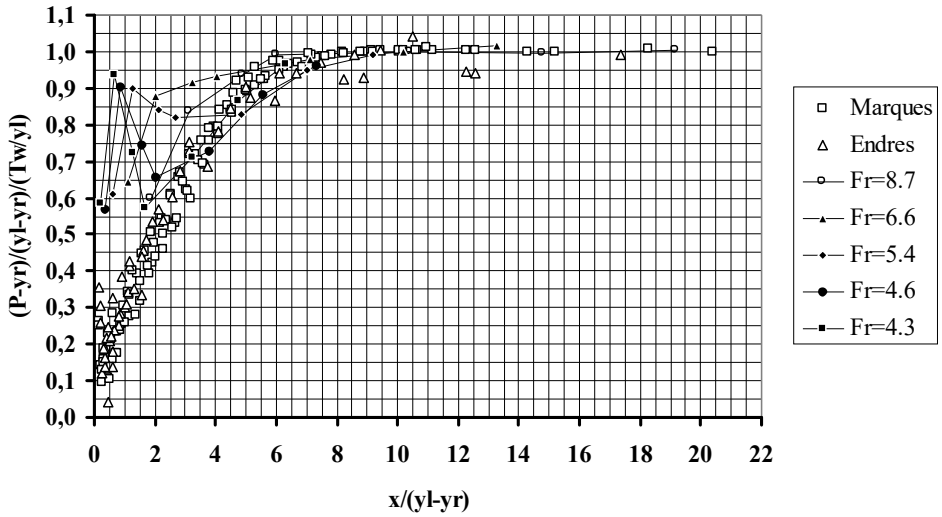


Figura 3 - Pressões médias adimensionalizadas, obtidas nos modelos e no protótipo, uniformizadas pelo fator de submergência $S = T_W/y_1$.

Excetuando as medições nas primeiras tomadas de pressão e, principalmente, para as situações com os menores números de Froude, os demais resultados aparecem bem agrupados o que leva à busca por uma curva de ajuste aos dados. Essa busca foi conduzida com tentativas de diferentes ajustes, analíticos e visuais, aos dados das pressões adimensionalizadas medidas em Marques et al (1997), na forma apresentada na Figura 4.

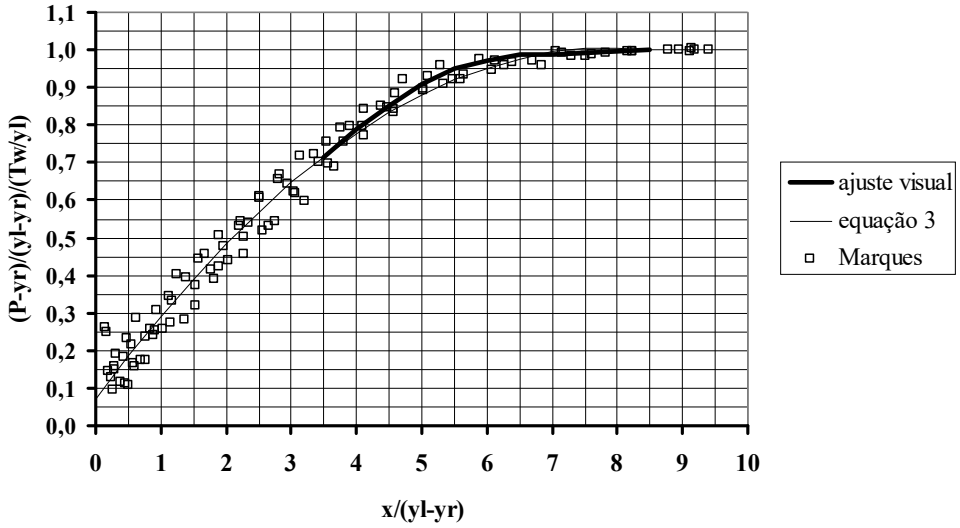


Figura - 4: Ajustes analítico e visual aos dados de Marques et al. (1997).

O melhor resultado obtido é o visual, que alcança o valor máximo (teórico) para a pressão adimensionalizada (igual a 1) na posição adimensional equivalente a 8,5. Dentre as tentativas analíticas de ajuste, via método de mínimos quadrados, a melhor solução, que não conduziu a um elevado número de coeficientes, foi a de um polinômio do 2º grau (equação 3), cujo gráfico é, também, apresentado na Figura 4, em conjunto com os dados utilizados no ajuste.

$$\frac{(P - y_r)}{(y_l - y_r)} \frac{y_l}{T_w} = -0{,}015 \left(\frac{x}{(y_l - y_r)} \right)^2 + 0{,}237 \frac{x}{(y_l - y_r)} + 0{,}070 \qquad (3)$$

O ajuste deste polinômio considerou os valores de Marques et al (1997) excluindo os resultados das tomadas a jusante da posição adimensional 9, apresentando um coeficiente de correlação (R^2) igual a 0,98.

Devido à grande diferença nos valores de pressões adimensionais obtidas no protótipo, nas primeiras tomadas, instaladas ainda no trecho em curva do vertedouro (ver Figuras 1 e 3), foram excluídos os resultados destas tomadas para a apresentação da Figura 5, a seguir, feita em conjunto com os demais resultados e com os ajustes, o que resume o resultado final do trabalho.

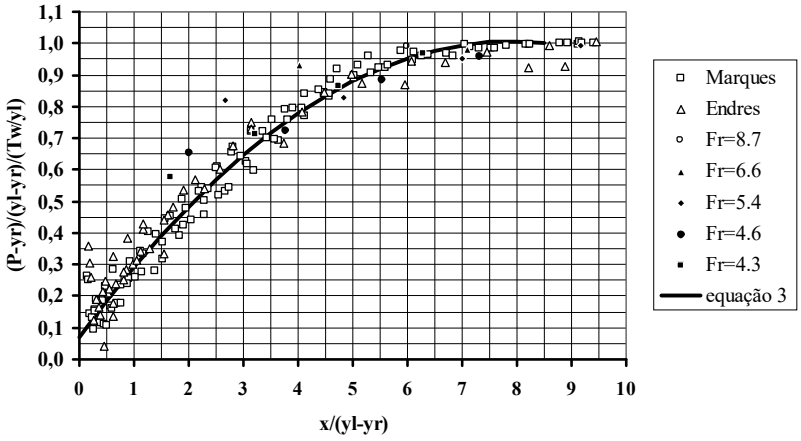


Figura 5 - Resultados do ajuste e comparação das medições para a região de validade das tomadas de pressão (excluindo as tomadas localizadas no trecho em curva).

CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS FINAIS

O trabalho aqui apresentado sugere um método de uniformização dos dados de pressões médias, medidas ao longo do perfil longitudinal do fundo de bacias de dissipação por ressalto hidráulico. Com os resultados satisfatórios obtidos, fica facilitado o trabalho de estimar valores para pressões em sistemas reais e fica estabelecido o ponto de partida da pesquisa, atualmente desenvolvida no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS, no sentido de avaliar valores extremos em estruturas hidráulicas desse tipo. O desenvolvimento foi baseado em resultados obtidos de canais com bacias de dissipação de fundo plano, em laboratório, e da bacia de dissipação da Usina de Porto Colômbia, medidos no protótipo.

Com base nos resultados apresentados, é possível concluir os seguintes pontos:

1. A geometria do fundo do canal, a jusante da formação do ressalto, não parece influenciar os valores adimensionais da pressão média quando é utilizado o fator de submergência. Esta afirmação está baseada na verificação de que, apesar da diferença nas formas dos perfis dos canais dos modelos comparados ao do protótipo (Figura 1), o aspecto dos gráficos apresentados (Figura 3), na região a jusante do ressalto, não possui diferenças significativas;
2. Os dados de protótipo concordam com as previsões do ajuste baseado em dados de modelo (Figura 5), na região de medição de pressões e de validade do método, embora as estruturas possuam diferenças expressivas em suas geometrias e, inclusive, no que diz respeito a existência de acessórios (comporta).
3. A inclusão de dados de pressões no fundo de bacias de dissipação por ressalto hidráulico de outras fontes, sejam provenientes de protótipo ou de modelo, seja para a situação de ressalto livre ou afogado, foi possível com o emprego do fator de submergência $S = T_W/y_1$, capaz de uniformizar a apresentação, mesmo para uma larga faixa de valores do número de Froude (entre 4 e 10 nos modelos e entre 4,3 e 8,5 no protótipo). Medições dessa natureza em outros canais e, principalmente, em protótipos, seriam de extrema importância para a verificação da qualidade das uniformizações; e
4. Abordagem semelhante à aqui aplicada está sendo estendida aos parâmetros estatísticos representativos das características do escoamento, obtidos a partir de medições de pressão instantânea, tais como coeficientes de flutuação de pressão e coeficientes de assimetria e curtose.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FURNAS Centrais Elétricas pela cedência dos dados da Usina de Porto Colômbia e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS) pelo apoio durante a execução deste trabalho.

BIBLIOGRAFIA

ABRH - Comissão de Hidráulica e Mecânica dos Fluidos. (1997). *Estudo de flutuação de pressão em bacia de dissipação - caso: Usina Porto Colômbia*. (Relato do trabalho da subcomissão "Desenvolvimento de Pesquisa" - nov. 1997, ABRH / FURNAS.)

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, p112, IPH / UFRGS, Porto Alegre.

MARQUES, M. G., DRAPEAU, J., VERRETTE, J-L,. (1997). Flutuação de pressão em um ressalto hidráulico, *Revista Brasileira de Engenharia*, v2, p45-52.

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. *Anais*: 1ª Escola de Primavera - Transição e Turbulência, ABCM, v1, p293- 313.

SINNIGER, R. O., HAGER, W. H. (1989). *Constructions Hydrauliques* - Traité de Génie Civil de l'Ecole Polytecnique Fédérale de Lausanne – Presses Polytechiques Romandes, Lausanne, p439.