

Análise do Campo de Pressões em Ressalto Hidráulico Submerso a Jusante de uma Comporta

Edgar Fernando Trierweiler Neto, Marcelo Giulian Marques

Instituto de Pesquisas Hidráulicas – UFRGS

mmarques@iph.ufrgs.br

Recebido: 15/08/07 – revisado: 12/03/08 – aceito: 14/08/08

RESUMO

O ressalto hidráulico é amplamente utilizado na dissipação de energia a jusante de obras hidráulicas. Este processo de dissipação é associado à flutuação de velocidades, níveis e pressões. O entendimento do ressalto hidráulico como forma de dissipação de energia tem assumido papel importante devido aos danos causados às estruturas de dissipação de energia ao longo dos anos em função de problemas atribuídos à fadiga, cavitação e ressonância. A caracterização do campo de pressões junto ao fundo de bacias de dissipação é de interesse prático para os projetistas de obras hidráulicas que buscam um dimensionamento eficiente e econômico. Existe ampla bibliografia que contempla a situação de ressalto hidráulico livre, entretanto, para a situação de desenvolvimento mais comum em bacias de dissipação, ou seja, a do ressalto submerso, a bibliografia se mostra mais escassa. Este trabalho tem como objetivo analisar o campo de pressões em ressalto hidráulico submerso a jusante de uma comporta com o intuito de contribuir para o conhecimento do processo de dissipação de energia e possibilitar a otimização de estruturas de dissipação de energia. Através das metodologias de adimensionalização utilizadas, foi possível avaliar e quantificar os efeitos atribuídos à submersão sobre a distribuição longitudinal da pressão média, do desvio padrão, dos coeficientes de assimetria e de curtose e sobre as funções de densidade espectral das flutuações de pressão.

Palavras-chave: ressalto hidráulico submerso, flutuação de pressões, dissipação de energia.

INTRODUÇÃO

O ressalto hidráulico é um dos fenômenos mais interessantes no campo da engenharia hidráulica. Trata-se de uma transição do escoamento supercrítico para o escoamento subcrítico em canais abertos. Essa transição é acompanhada por um incremento rápido da altura de lâmina de água, com a formação de turbilhonamento que incorpora ar atmosférico. O ressalto hidráulico é uma das formas mais usuais de dissipação de energia do escoamento em canais, e a ocorrência das flutuações de pressões macroturbulentas é uma das principais características que influenciam a dissipação de energia em seu interior.

Por se tratar de um escoamento à superfície livre, governado principalmente por esforços de origem gravitacional, as características do ressalto hidráulico são condicionadas ao número de Froude:

$$Fr = V/c \quad (1)$$

V = velocidade média do escoamento;

c = celeridade da onda de gravidade.

Ao longo das estruturas de dissipação de energia, o ressalto hidráulico pode se desenvolver de forma livre ou afogada (submersa), apresentando características distintas quanto à distribuição longitudinal da flutuação de pressão.

Apesar da grande quantidade de trabalhos escritos sobre o ressalto hidráulico e de existir um consenso sobre as suas características externas, as características internas ainda não são totalmente conhecidas, podendo variar em função das condições de contorno:

- a) ressalto hidráulico a jusante de comporta;
- b) ressalto hidráulico a jusante de vertedouro;
- c) grau de submersão;
- d) geometria da bacia de dissipação.

A diferença entre o ressalto a jusante de uma comporta e a jusante de um vertedouro está na condição de desenvolvimento da camada limite a montante do ressalto, propiciando características turbulentas distintas, Resch e Leutheusser (1974) apud Hager (1992).

A situação crítica em relação aos esforços sobre a bacia de dissipação é a do ressalto hidráulico se desenvolvendo de forma livre. No entanto, é mais usual o seu desenvolvimento afogado (submerso). Existe ampla bibliografia que contempla a situação de ressalto hidráulico livre, entretanto, para a situação de ressalto submergido, esta se mostra mais escassa. Desta maneira torna-se interessante avaliar o seu comportamento em função dessa condição de contorno.

A busca do entendimento do ressalto hidráulico como forma de dissipação de energia tem assumido um papel importante devido aos danos causados em estruturas de dissipação relatados ao longo dos anos, ocasionados pelos efeitos macroturbulentos do escoamento. Este fato tem levado os pesquisadores a tentar desvendar o mecanismo externo e interno do ressalto hidráulico associado à dissipação de energia, de maneira a orientar o dimensionamento de estruturas de dissipação. Este trabalho apresenta a análise do campo de pressões em ressalto hidráulico submergido a jusante de uma comporta, com o intuito de contribuir para o conhecimento do processo de dissipação de energia e possibilitar a otimização de estruturas de dissipação de energia.

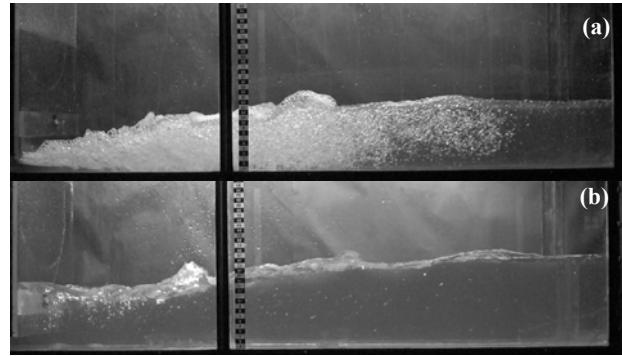


Figura 1 – (a) Ressalto Hidráulico Livre; (b) Ressalto Hidráulico submergido.

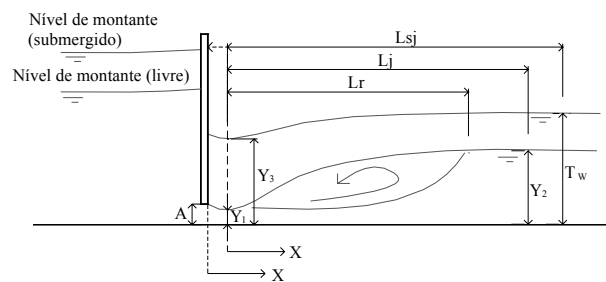


Figura 2 – Representação esquemática do ressalto hidráulico a jusante de comporta.

Os parâmetros hidráulicos do ressalto, apresentados na Figura 2, são a seguir definidos:

- A = abertura da comporta;
- Y_1 = altura conjugada rápida;
- Y_2 = altura conjugada lenta;
- Y_3 = lâmina mínima entre a comporta e o final do ressalto hidráulico;
- T_w = nível d'água a jusante do ressalto hidráulico;
- X = posição de início do ressalto hidráulico (para o ressalto hidráulico livre considera-se a seção referente à altura conjugada Y_1 , para o ressalto submergido considera-se a posição da face de jusante da comporta);
- L_j = comprimento do ressalto hidráulico livre;
- L_{sj} = comprimento do ressalto submergido;
- L_r = comprimento do rolo.

Além do número de Froude (Fr_1), um adimensional que caracteriza o ressalto submergido é o fator ou coeficiente de submergência (S), definido de maneiras distintas, dependendo do autor.

$$\text{Marques et al (1999): } S = \frac{T_w}{Y_2} \quad (2)$$

$$\text{Rajaratnam (1965): } S^* = \frac{T_w - Y_2}{Y_2} \quad (3)$$

Segundo Lopardo et al (2004a) e Lopardo et al (2004b), no caso do ressalto hidráulico submerso, a variável macroscópica mais controversa em relação ao desenho de bacias de dissipação é o seu comprimento (L_{sj}), que depende do critério que definem as seções de início e final do ressalto. Macroscopicamente é possível considerar o comprimento do ressalto hidráulico submerso como a distância entre a seção da “vena contracta” a jusante da comporta e a seção onde a superfície livre pode ser considerada horizontal, Lopardo et al (2004a) e (2004b). Entretanto, essa definição do comprimento do ressalto submerso não cobre todo o fenômeno macroturbulento, podendo ser adotada como uma primeira e boa aproximação, compatível com uma consideração do escoamento em termos médios.

Os próprios autores sugerem uma metodologia para a determinação do comprimento de um ressalto submerso, propondo definir um “comprimento de turbulência”, o qual caracteriza-se como a distância ao longo do ressalto na qual a flutuação de pressão passa a corresponder à flutuação de um escoamento a superfície livre, considerando um coeficiente de flutuação de pressão (C_p) igual a 0,02.

$$C_p = \frac{\sigma}{\frac{V^2}{2g}} \quad (4)$$

σ = desvio padrão da amostra de pressão;
 V = velocidade média do escoamento;
 g = aceleração gravitacional.

As comparações entre os comprimentos de ressaltos submersos através da análise macroscópica e o comprimento calculado a partir da análise da flutuação de pressão indicam que o comprimento do ressalto hidráulico aumenta em função da submergência, e que a análise macroscópica leva à determinação de comprimento de ressaltos maiores, tendo as duas metodologia apresentado diferenças crescentes em função do aumento da submergência.

Lopardo et al (2004b) estudaram a flutuação em ressalto hidráulico submerso formado a jusante de uma comporta para números de Froude entre 3 e 6, e fatores de submergência (S) entre 1,1 e 2,1. Os autores avaliaram o comportamento do coeficiente de flutuação de pressão (C_p) em função do número de Froude incidente e do fator de submergência (S), a distribuição longitudinal do coeficiente de assimetria e as semi-amplitudes extremas de pressão $P < 0,1\%$ e $P < 99,9\%$. As conclusões indicam, para um fator de submergência constante, que o coeficiente de flutuação de pressão (C_p) aumenta com a diminuição do valor do Froude incidente para a região de montante do ressalto ($X/Y_1 < 10$). Entretanto, na região de jusante do ressalto ($X/Y_1 > 30$), verifica-se o comportamento inverso, um aumento do valor de C_p em função do número de Froude. Para avaliar a influência do fator de submergência, os autores apresentaram o comportamento do coeficiente de flutuação de pressão para um número de Froude do escoamento constante e verificaram que o fator de submergência aumenta a intensidade da flutuação de pressão junto ao piso da bacia de dissipação para $X/Y_1 > 12$. Os valores encontrados para o ressalto hidráulico livre apresentam uma diferença de 50% em relação à flutuação de pressão verificada para $S = 2,1$.

Lopardo et al (2004b) acreditam que os ressaltos submersos apresentam maior intensidade turbulenta que os ressaltos livres.

Long et al (1990) mediram velocidades em ressalto hidráulico submerso a jusante de comporta utilizando anemometria a laser (Laser Doppler Anemometri – LDA) e concluíram que o ressalto hidráulico submerso apresenta um campo de velocidades fortemente tridimensional. Os autores verificaram uma diminuição de descarga junto ao centro do canal, onde as velocidades são cerca de 30% a 50% inferiores às velocidades máximas verificadas próximo às paredes laterais. Esse comportamento pode ser atribuído à existência de um par de vórtices de eixo vertical, formados a jusante da comporta, que geram fluxo no sentido contrário ao do escoamento principal junto ao eixo longitudinal do canal.

Lopardo et al (2004b) afirmam que tal aspecto contribui para o aumento da intensidade macroturbulenta e, conseqüentemente, da flutuação de pressão em ressaltos submersos. Segundo os autores, a avaliação do coeficiente de assimetria demonstrou que o ressalto hidráulico submerso apresenta uma distribuição que pode ser considerada mais próxima de uma distribuição Gaussiana em comparação à verificada para o ressalto

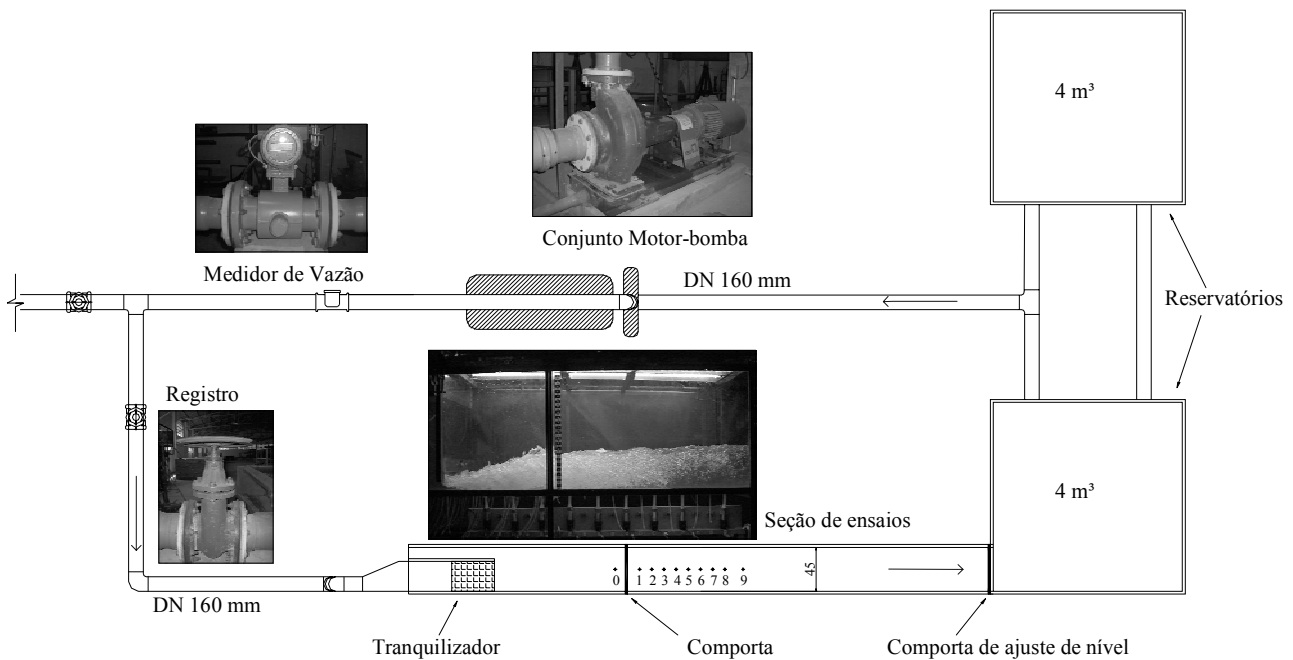


Figura 3 - Representação esquemática do canal de ensaios e do sistema de alimentação.

to livre. O aumento da submergência tende a manter constante o valor do coeficiente de assimetria.

MATERIAIS E MÉTODOS

Instalação Experimental

O estudo experimental desenvolveu-se em um canal suspenso com paredes de vidro possuindo 0,45 m de largura e 0,55 m de profundidade. O canal possui aproximadamente 4 m de comprimento e fundo horizontal. Os ressalto hidráulicos foram formados a jusante de uma comporta plana de acrílico com abertura vertical e escoamento pela parte inferior. A comporta possuía 10 mm de espessura e ponta terminal em aresta viva retangular. O canal, imediatamente a jusante da comporta, possui fundo em acrílico, possibilitando a instalação de tomadas de pressão. Foram instalados transdutores de pressão ao longo do eixo longitudinal.

O sistema de alimentação do canal é composto por dois reservatórios metálicos com volume de, aproximadamente, 8 m³, de onde a água é recalçada por um conjunto moto-bomba através de tubulações de PVC. A Figura 3 apresenta um

esquema em planta do canal de ensaios e do sistema alimentador.

Realizou-se a medição de vazão através de um medidor eletromagnético de vazão instalado na tubulação de recalque. O medidor de vazão possui erro de 0,23% do fundo de escala.

O conjunto motor bomba é controlado através de um inversor de frequência, onde se pode especificar a rotação do motor de acordo com a vazão necessária.

Os níveis de jusante eram controlados por uma comporta plana do tipo gaveta com altura regulável. Após o final do canal, o escoamento retorna aos reservatórios.

Os transdutores de pressão utilizados são da marca Hytronic, modelo TM25, com faixa de trabalho de 2 psi (1,40 m.c.a), e com erro na medida de 3,5 mm de coluna de água (0,25% do fundo de escala). Foram utilizados 5 transdutores com faixa entre -1,0 a 1,0 psi (-0,70 m.c.a a 0,70 m.c.a) nas tomadas de pressão 1 a 4 e na posição 9, e 5 transdutores de -0,5 a 1,5 psi (-0,35 m.c.a a 0,70 m.c.a) nas tomadas 0 e 5 a 8. A Figura 4 e a Figura 5 apresentam o posicionamento dos transdutores ao longo do canal. A primeira tomada foi posicionada a 12,5 cm da comporta. Essa distância foi mantida constante entre tomadas consecutivas, exceto entre as duas últimas tomadas de pressão, onde a distância era de

18,75 cm. Os transdutores foram instalados o mais próximo possível do contorno do fundo do canal ao longo do eixo longitudinal, utilizando-se um conduto flexível de nylon entre a tomada de pressão e o sensor, com diâmetro interno de 2 mm e comprimento de 2 cm. O transdutor localizado na posição zero foi utilizado para medir a carga hidráulica a montante da comporta.

Todos os transdutores foram submetidos a um processo de calibração estática, relacionando medições de tensão a medições de pressão em coluna d'água (P/γ).

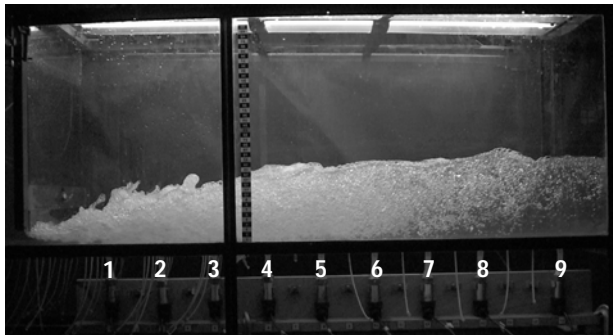


Figura 4 – Posicionamento das tomadas de pressão junto ao fundo do canal (vista lateral).

A placa de aquisição de dados utilizada é da marca LYNX, modelo CAD12/32 possui uma resolução de 12 bits e 32 canais de entrada, ligada a um micro computador. Utilizou-se uma frequência de aquisição de dados de 100 Hz, com duração das amostras de 15 minutos.

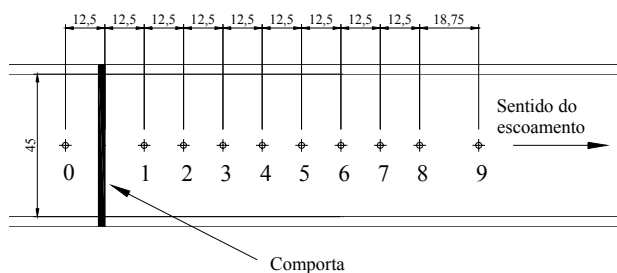


Figura 5 – Posicionamento esquemático das tomadas de pressão junto ao fundo do canal (planta).

METODOLOGIA

Para a avaliação do efeito da submergência sobre o campo de pressões foi realizada uma série

de ensaios para quatro valores do número de Froude com diferentes condições de submergência (S). Limitou-se como valor máximo $S = 1,40$, de acordo com as características da instalação experimental.

Para comparar os resultados com os de outros pesquisadores utilizou-se a metodologia de adimensionalização proposta por Marques et al (1997), aplicando os seguintes parâmetros hidráulicos e geométricos:

Y_1 = altura conjugada rápida;

Y_2 = altura conjugada lenta;

H_t = perda de energia no ressalto hidráulico dada pela diferença entre energias de jusante e montante;

X = distância em relação ao início do ressalto.

No caso da pressão média e desvio padrão, Marques et al (1997) propuseram as seguintes expressões:

$$\text{Pressão média } (P_x): \quad \frac{P_x - Y_1}{(Y_2 - Y_1)} = f\left(\frac{X}{Y_2 - Y_1}\right) \quad (5)$$

$$\text{Desvio padrão } (\sigma_x): \quad \frac{\sigma_x \cdot Y_2}{H_t \cdot Y_1} = f\left(\frac{X}{Y_2 - Y_1}\right) \quad (6)$$

A perda de carga na comporta não foi considerada. A determinação da energia foi feita para as seções a montante da comporta e a jusante do ressalto hidráulico, visto que não é possível quantificar a energia do escoamento na seção de montante do ressalto submergido. Essa situação leva a valores de H_t um pouco superiores aos reais, em torno de 10% a 20% para as condições de ressalto hidráulico livre estudadas. A expressão a seguir representa a perda de carga no ressalto hidráulico:

$$H_t = \left(N_m + \frac{V_m^2}{2g} \right) - \left(N_j + \frac{V_j^2}{2g} \right) \quad (7)$$

onde:

N_m = nível a montante da comporta ou carga hidráulica;

V_m = velocidade do escoamento a montante da comporta;

V_j = velocidade do escoamento na seção de jusante do ressalto hidráulico;

N_j = nível de jusante.

Tabela 1 – Condições de ensaio para o estudo da influência do fator de submergência.

Vazão (m³/s)	Froude	Reynolds	S	Abertura da Comporta (cm)	Y ₁ (cm)*	T _w (cm)**
0,020	3,97	4,4.10 ⁴	1,00	3,50	2,34	11,70
			1,11			12,95
			1,19			13,91
			1,28			15,03
			1,38			16,80
0,024	4,55	5,3.10 ⁴	1,00		14,10	
			1,10		15,30	
			1,19		16,80	
			1,31		18,30	
			1,40		19,60	
0,028	5,01	6,2.10 ⁴	1,00		2,51	16,51
			1,00			16,51
			1,09			18,03
			1,19			19,66
0,020	5,88	4,5.10 ⁴	1,00		2,50	1,81
			1,09	15,13		
			1,18	16,36		
			1,27	17,57		

Observações: *As alturas conjugadas rápidas (Y₁) correspondem à altura conjugada medida para o ressalto hidráulico livre; ** T_w corresponde à altura conjugada lenta (Y₂) do ressalto hidráulico no caso de S = 1,0 (ressalto hidráulico livre); *** As alturas conjugadas e T_w foram medidos através da utilização de ponta limimétrica.

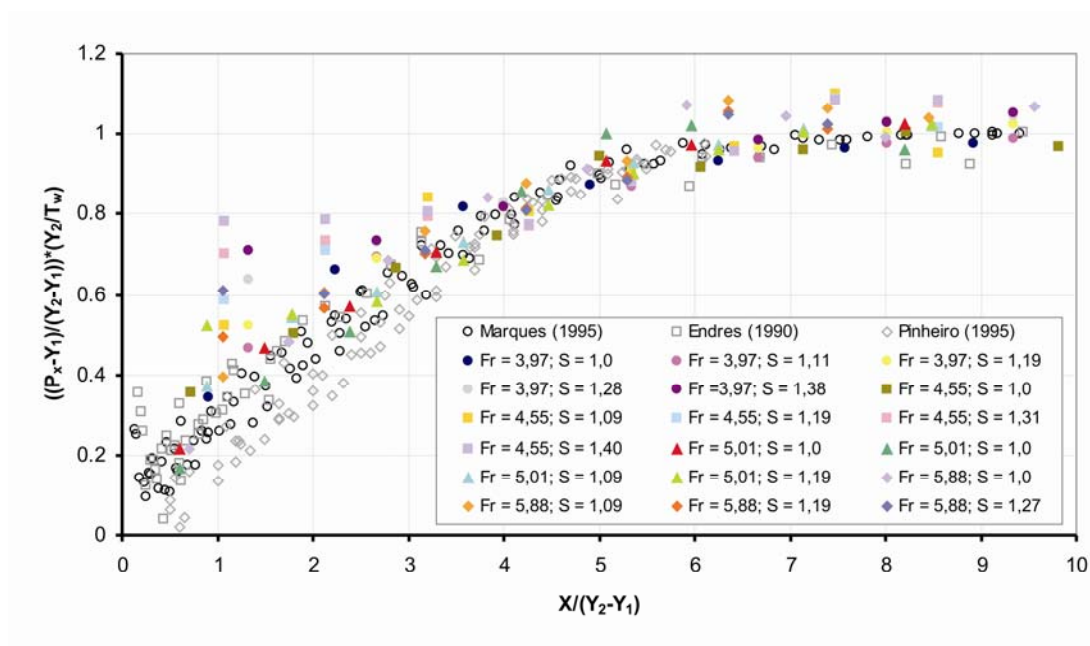


Figura 6 - Pressões médias adimensionalizadas com a inclusão do fator de submergência (S), comparação entre o presente estudo (indicados através do número de Froude e submergência) e resultados de outros autores.

Além da metodologia de adimensionalização descrita, foi realizada a análise em função do coeficiente de flutuação de pressão (C_p).

Na adimensionalização dos resultados provenientes de ressalto hidráulico submergido serão utilizados os fatores de submergência (S), seguindo recomendação de Marques et al (1999), onde a inclusão de um fator de submergência adimensional ($S = T_w/Y_2$) nas equações (5) e (6) permite maior uniformização dos dados, agrupando os resultados de ressalto hidráulico livre e submergido. A Tabela 1 apresenta as condições de ensaio.

RESULTADOS

Pressão Média

As pressões médias calculadas para todas as situações estudadas são apresentadas na Figura 6, adimensionalizadas conforme o proposto por Marques et al (1999). Os resultados do presente estudo são comparados com os resultados obtidos por Endres (1990), Pinheiro (1995) e Marques (1995) em ressaltos hidráulicos livres formados a jusante de vertedouros. Analisando a pressão média para todas as submergências estudadas, verifica-se que a partir da posição adimensionalizada $X/(Y_2 - Y_1) = 8$, os valores de pressão apresentam a tendência de se manterem constantes, evidenciando o final do ressalto hidráulico. Essa afirmação está de acordo com o verificado por Teixeira (2003) e Marques et al (1997).

Tabela 2– Pressão adimensional no trecho de montante dos ressaltos submergidos.

Fator de submergência (S)	Pressão adimensional no trecho de montante (Ψ_C)
1,10	0,35
1,20	0,53
1,30	0,64
1,40	0,73

Verifica-se para as posições mais a montante do ressalto, especialmente antes da posição adimensionalizada $X/(Y_2 - Y_1) = 4$, que os valores de pressão média adimensionalizada para os ressaltos submergidos são superiores aos encontrados para o ressalto hidráulico livre, e tendem a apresentar valores de pressão constantes nas proximidades da comporta

de acordo com a submergência. A mudança de forma do ressalto devido ao aumento do nível de jusante justifica esse comportamento.

Buscou-se caracterizar esses valores constantes de pressão de acordo com o grau de submergência. A Tabela 2 apresenta esses valores em termos médios.

Flutuação de Pressão (desvio padrão)

A Figura 7 apresenta a flutuação de pressão adimensionalizada considerando o fator de submergência do ressalto hidráulico. Os dados referentes aos ressaltos submergidos se distribuem, conforme o verificado para os ressaltos livres na região mais a jusante, evidenciando valores praticamente constantes após a posição $X/(Y_2 - Y_1) = 8$, indicando o final do ressalto hidráulico. Na parte de montante do ressalto hidráulico, junto à posição de maior flutuação, os valores verificados para o ressalto submergido são inferiores aos do ressalto livre. Essa diferença aparentemente aumenta à medida que o fator de submergência (S) cresce. Nota-se, para as submergências iguais a $S = 1,30$ e $1,40$, que os valores de desvio padrão tendem a ser iguais junto às posições de maior flutuação de pressão.

Quando o desvio padrão da amostra de pressão é adimensionalizado na forma do coeficiente de flutuação de pressão (C_p), pode-se verificar, para um número de Froude constante (Figura 8), que a submergência eleva os valores de flutuação de pressão para posições a jusante de $X/Y_1 = 15$, e conforme verificado por Lopardo et al (2004b), acarreta também um aumento de comprimento do ressalto. A região a montante ($X/Y_1 < 10$) não apresenta um comportamento característico. Entretanto, pode-se afirmar que o ressalto hidráulico submergido apresenta valores maiores do coeficiente de flutuação de pressão.

Quando mantido o fator de submergência (S) constante, pode-se avaliar o efeito do número de Froude sobre a flutuação de pressão em um ressalto hidráulico a jusante de uma comporta, Figura 9.

Nota-se claramente que à medida que se aumenta o número de Froude, os valores do coeficiente de flutuação de pressão tornam-se mais elevados para posições do ressalto hidráulico maiores que $X/Y_1 = 30$, equivalente a $X/(Y_2 - Y_1) = 5,40$. Segundo Lopardo et al (2004b), o comportamento para a região de montante do ressalto, $X/Y_1 < 10$ ou $X/(Y_2 - Y_1) = 1,75$, deveria ser o inverso, mostrando o coeficiente de flutuação de pressão crescendo com a diminuição do valor do número de Froude de in-

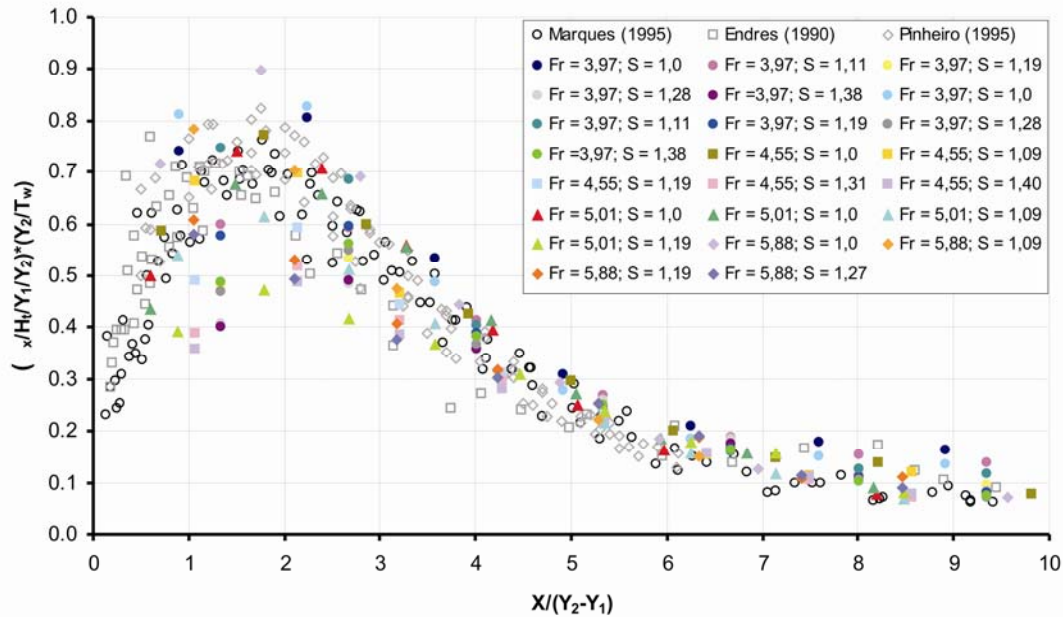


Figura 7 - Desvio padrão das amostras adimensionalizados com a inclusão do fator de submergência (S), comparação entre o presente estudo (indicados através do número de Froude e submergência) e resultados de outros autores.

gresso; entretanto, não se pode verificar esse comportamento para todos os graus de submergência.

Analisando-se o caráter prático dessas afirmações, pode-se dizer que o afogamento de uma bacia de dissipação acarretaria o aumento do coeficiente de flutuação de pressão junto ao fundo, em posições mais a jusante, entretanto, não afetaria da mesma forma a região de montante do ressalto. O aumento do número de Froude produziria flutuações de pressão maiores junto ao final da bacia de dissipação.

A inclusão do fator de submergência, seguindo a adimensionalização proposta por Marques et al (1999), não permite que as observações apresentadas anteriormente para o coeficiente de flutuação de pressão sejam verificadas. Entretanto, tal adimensionalização possibilita o agrupamento de dados, permitindo ajustar expressões algébricas aos dados experimentais. Trierweiler (2006) utilizou essa metodologia de adimensionalização para implementar um modelo de previsão de valores extremos de pressão associados a diferentes probabilidades de ocorrência e graus de submergência.

A Figura 10 apresenta a comparação dos resultados desse estudo com os dados apresentados por Lopardo et al (2004a) e Lopardo et al (2004b).

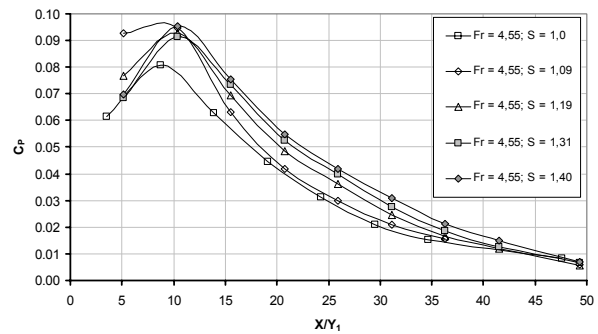


Figura 8 - Valores do coeficiente de flutuação de pressão para diversas submergências e $Fr_1 = 4,55$.

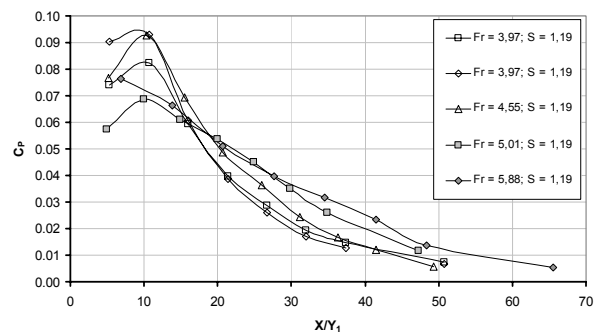


Figura 9 - Valores do coeficiente de flutuação de pressão para diversos números de Froude com submergência $S = 1,19$.

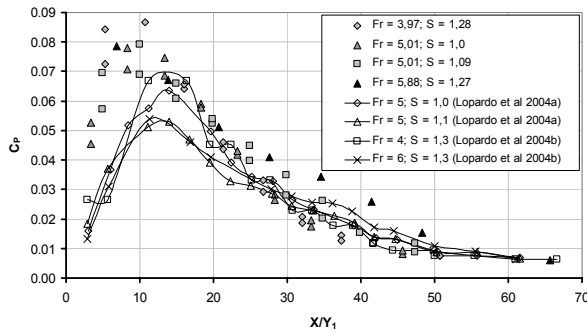


Figura 10 - Comparação do coeficiente de flutuação de pressão (C_p) com os dados apresentados por Lopardo et al (2004a) e Lopardo et al (2004b).

Coefficiente de Assimetria

Lopardo (1986) comenta que a análise do coeficiente de assimetria (A_d) da função de densidade de probabilidade das amostras das tomadas de pressão pode informar sobre zonas de separação do escoamento. Um coeficiente de assimetria positivo indica a existência, na amostra, de uma maior concentração de valores muito superiores à média, deslocando a função de densidade de probabilidade para valores superiores à média. Da mesma maneira, um valor de assimetria negativo indica a existência de valores muito inferiores aos demais, deslocando a função de densidade de probabilidade para valores inferiores à média. O valor de assimetria igual a zero pode caracterizar uma distribuição normal. Valores negativos de assimetria em amostras de pressão estão associados, normalmente, a regiões de descolamento do escoamento do fundo do canal e ocorrência de pressões negativas significativas, deslocando a função de densidade de probabilidade para a esquerda. A equação a seguir apresenta o coeficiente de assimetria.

$$A_d = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (P_i - P_x)^3}{n \cdot \sigma_x^3} \quad (8)$$

Para verificar o comportamento do coeficiente de assimetria para diferentes fatores de submergência. Apresenta-se o comportamento desse parâmetro ao longo do ressalto hidráulico da mesma forma como representado para o desvio padrão da amostra. A Figura 11 apresenta a distribuição do coeficiente de assimetria ao longo do ressalto hi-

dráulico para todas as condições de ensaio. Verifica-se que o comportamento do coeficiente de assimetria para o ressalto hidráulico a jusante de uma comporta com diferentes submergências apresenta uma distribuição semelhante à verificada para o ressalto livre a jusante de vertedouros. Analisando a Figura 11, aparentemente os valores verificados para os ressaltos submergidos variam menos em torno do valor nulo, se comparados com os dados de ressalto hidráulico livre.

Lopardo et al (2004b) verificaram que os ressaltos hidráulicos submergidos apresentam uma distribuição aparentemente mais próxima da gaussiana que os ressaltos hidráulicos livres, e comentam que o aumento da submergência tende a manter o coeficiente de assimetria mais constante. Para avaliar essas afirmações, é interessante verificar o comportamento do coeficiente de assimetria para diferentes fatores de submergência, mantendo-se o número de Froude constante (Figura 12).

Nota-se, avaliando a Figura 12, que junto ao início do ressalto, $X/(Y_2 - Y_1) < 2.0$, para os fatores de submergência $S = 1,2$ a $S = 1,4$, o coeficiente de assimetria assume valores inferiores aos verificados para o ressalto hidráulico livre e para o ressalto com submergência $S = 1,1$. Esse fato evidenciaria uma menor influência dos valores superiores à média sobre a função de densidade de probabilidade da amostra, se comparada com as situações menos afogadas. Como as submergências mais elevadas apresentam valores mais próximos de zero, suas distribuições podem ser consideradas mais próximas à gaussiana se comparadas com a do ressalto livre, confirmando o que foi afirmado por Lopardo et al (2004b). Entretanto, junto ao final do ressalto para posições $X/(Y_2 - Y_1) > 6,0$, esse comportamento parece se inverter, tendo as assimetrias atribuídas às menores submergências valores mais próximos do valor nulo. O comportamento descrito foi verificado para praticamente todos os números de Froude analisados.

Lopardo et al (2004b) afirmaram que as distribuições de pressões de ressaltos hidráulicos submergidos apresentam um comportamento mais parecido com uma distribuição normal, que as referentes a ressaltos hidráulicos livres. No entanto, sua análise se estendeu até $X/(Y_2 - Y_1) = 6,0$, final do ressalto hidráulico segundo Smetana (1934), e final do rolo segundo Marques et al (1997) e Teixeira (2003).

Quanto à avaliação referente à influência do número de Froude, isto é, mantendo-se submergência constante, não se verificou um comportamento distinto, como pode ser analisado na Figura 13.

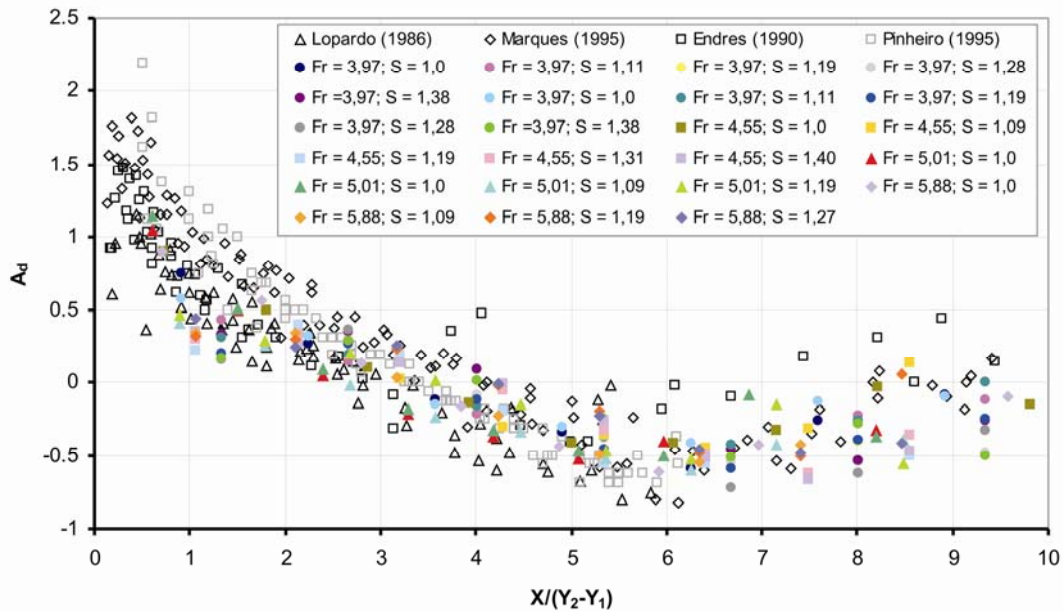


Figura 11 – Distribuição longitudinal do coeficiente de assimetria, comparação entre o presente estudo (indicados através do número de Froude e submergência) e resultados de outros autores.

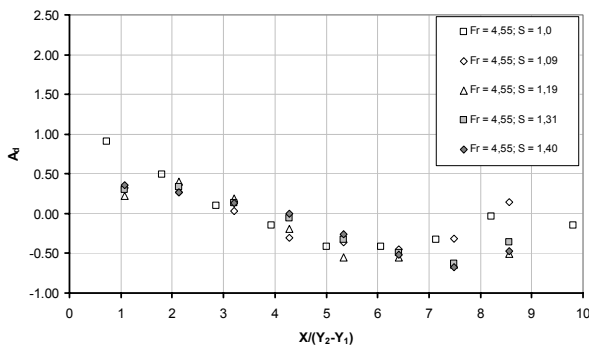


Figura 12 – Distribuição longitudinal do coeficiente de assimetria para diferentes níveis de submergência, $Fr_1 = 4,55$.

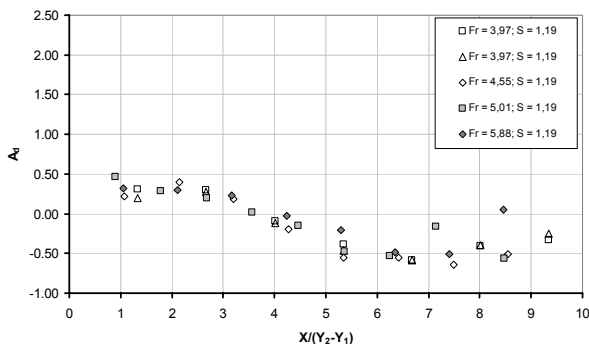


Figura 13 – Distribuição longitudinal do coeficiente de assimetria para diferentes números de Froude e fator de submergência $S = 1,19$.

Coefficiente de Curtose

O coeficiente de curtose (k) é uma medida de dispersão que caracteriza o "achatamento" da curva da função de distribuição de probabilidade. Valores inferiores a 3 indicam distribuições mais afuniladas (mais altas) e concentradas em torno do valor médio, quando comparadas com a distribuição normal. Em oposição, valores superiores a três indicam que a função de distribuição de dados é mais achatada e estão menos concentrados em relação à média em comparação com uma distribuição do tipo normal. A expressão a seguir apresenta o coeficiente de curtose.

$$k = \frac{\sum_{i=1}^{1=n} (P_i - P_X)^4}{n \cdot \sigma_X^4} \quad (9)$$

A Figura 14 apresenta a distribuição do coeficiente de curtose para os ensaios realizados comparados com resultados para ressalto hidráulico livres a jusante do vertedouro.

Ao analisar a Figura 14 pode-se verificar que os resultados experimentais desse estudo se encontram coerentes com o comportamento verificado por outros autores.

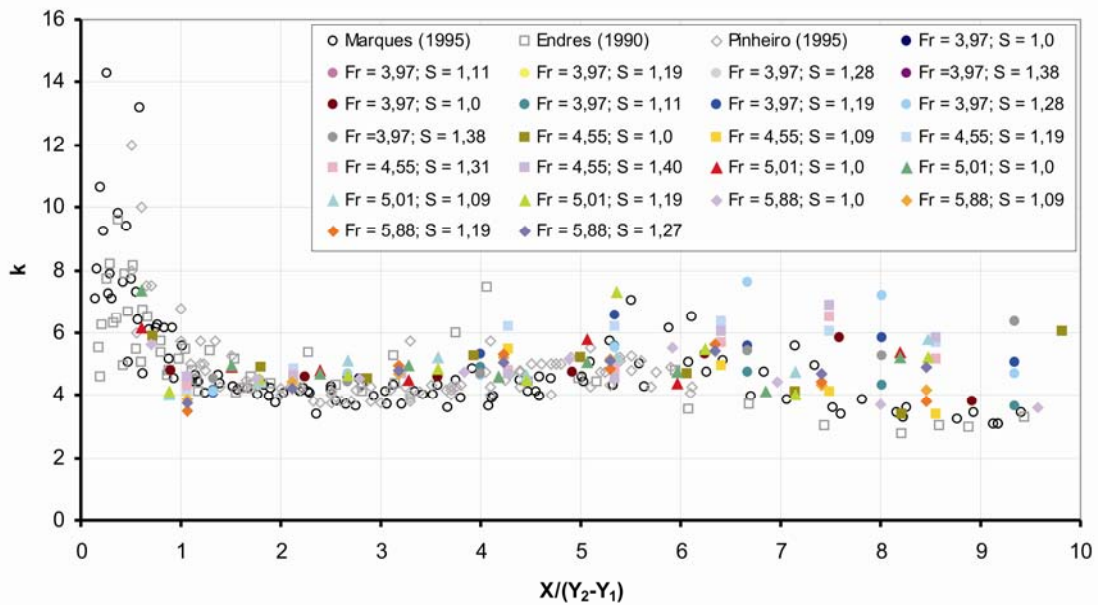


Figura 14 – Distribuição longitudinal do coeficiente de curtose, comparação entre o presente estudo (indicados através do número de Froude e submergência) e resultados de outros autores.

Entretanto, o ressalto hidráulico submergi-do apresenta valores de curtose um pouco superiores aos ressaltos livres para a região após o final do rolo, $X/(Y_2 - Y_1) = 6,0$, podendo assim apresentar uma distribuição de probabilidades um pouco distinta, com dados menos concentrados em torno da média. A Figura 15 ilustra a distribuição do coeficiente de curtose para diferentes submergências para o número de Froude (Fr_1) igual a 4,55, onde pode ser verificada a influência devido à submergência descrita anteriormente.

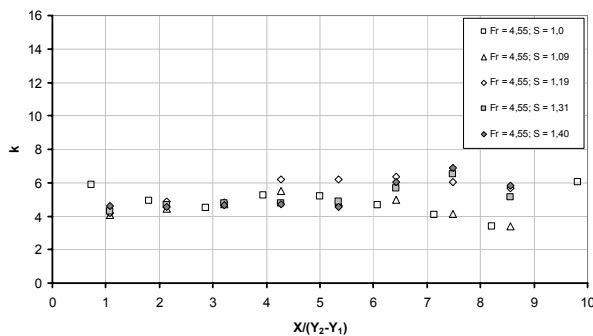


Figura 15 – Distribuição longitudinal do coeficiente de curtose para diferentes níveis de submergência, $Fr_1 = 4,55$.

Aparentemente a distribuição longitudinal do coeficiente de curtose não apresenta tendências em função do número de Froude incidente (Fr_1) para submergências constantes, Figura 16.

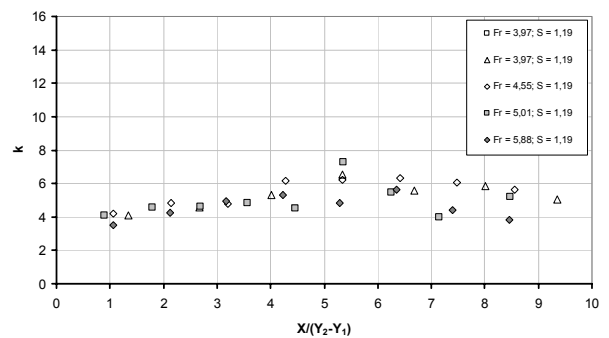


Figura 16 – Distribuição longitudinal do coeficiente de curtose para diferentes números de Froude e fator de submergência $S = 1,19$.

Espectro de energia das flutuações de pressão

A partir dos ensaios realizados, com o auxílio do aplicativo Matlab, utilizando técnicas apropriadas para transformadas de Fourier, foram determinadas as funções de densidade espectral das flutuações de pressão.

Verificou-se que o aumento da submergência não afeta a distribuição de energia ao longo do domínio das frequências. Independentemente do nível de submergência, os picos dos espectros posicionam-se praticamente sobre as mesmas frequências. Diferenças são observadas junto às tomadas mais a montante (início do ressalto).

Notou-se a tendência de diminuição das frequências de pico à medida que se afasta do início do ressalto, comportamento já verificado em referências da bibliografia, podendo-se citar como exemplo o trabalho de Pinto et al (1998).

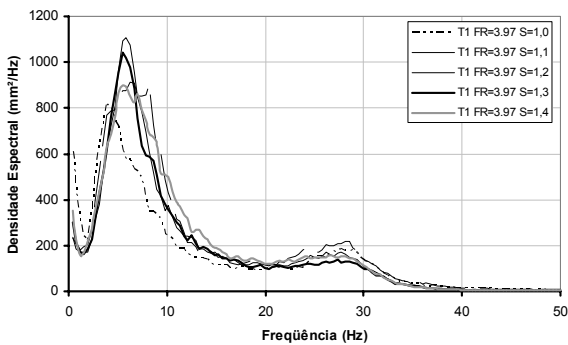


Figura 17 – Função de densidade espectral das flutuações de pressão da primeira tomada de pressão (transdutor T₁), $X/(Y_2-Y_1)=0,91$ para o ressalto hidráulico livre, e $X/(Y_2-Y_1)=1,33$ para os ressaltos submersos, $Fr_1 = 3,97$.

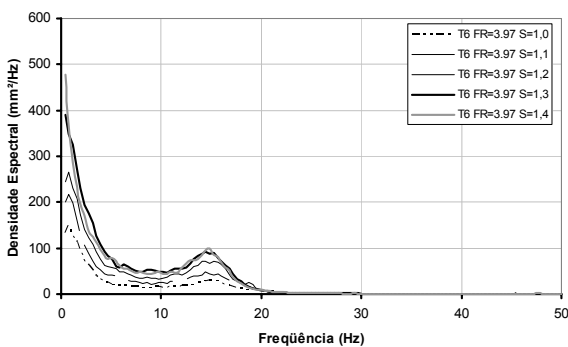


Figura 18 - Função de densidade espectral das flutuações de pressão da quinta tomada de pressão (transdutor T₆), $X/(Y_2-Y_1)=6,25$ para o ressalto hidráulico livre, e $X/(Y_2-Y_1)=6,68$ para os ressaltos submersos, $Fr_1 = 3,97$.

A Figura 17 e a Figura 18 apresentam a função de densidade espectral para duas posições distintas no ressalto hidráulico. Verifica-se que a energia do escoamento se concentra de forma distinta. Na Figura 17 os valores máximos do espectro de energia estão próximos a frequência de 6 Hz para os

ressaltos submersos, e 4 Hz para o ressalto hidráulico livre. Já para a Figura 18, que representa posições logo após o final do rolo, os valores dos picos de energia posicionam-se praticamente sobre o eixo das ordenadas.

Verifica-se, pela análise das Figuras anteriores, que os ressaltos submersos apresentam valores de energia superiores ao ressalto livre. Esse comportamento pode estar associado à formação de um par de vórtices a jusante da comporta, verificado por Long et al (1990) e citado por Lopardo et al (2004b), e também ao próprio afogamento do ressalto.

CONCLUSÕES

A influência do efeito da submergência sobre o campo de pressões é muito importante, uma vez que a maioria dos dissipadores de energia e descargas de fundo funcionam afogados (submerso).

Através dos resultados apresentados, considerando as condições ensaiadas, provou-se que a utilização do fator de submergência (S) para a adimensionalização dos valores de pressão média e desvio padrão possibilita um melhor agrupamento dos dados, o que pode permitir a utilização de expressões com o intuito de caracterizar seu comportamento. Neste caso, dependendo da metodologia de adimensionalização utilizada, diferentes conclusões podem ser feitas. No caso da adimensionalização da flutuação de pressão através do coeficiente de flutuação de pressão (C_p), foi possível verificar o comportamento da variável em função do grau de submergência e do número de Froude, sendo confirmadas as afirmações feitas por Lopardo et al (2004b),

Através das comparações dos resultados entre o ressalto hidráulico livre e o ressalto submerso, verificou-se que estes apresentam distribuições do coeficiente de assimetria e curtose levemente distintas, mostrando-se que até a região do rolo, $X/(Y_2-Y_1) = 6$, os ressaltos submersos apresentam uma distribuição aparentemente mais próxima da distribuição normal.

Através das metodologias de adimensionalização propostas por Marques et al (1997) e (1999) para o ressalto hidráulico, foi possível avaliar e quantificar as diferenças atribuídas à submergência para os parâmetros pressão média e desvio padrão. Esta avaliação caracteriza-se como um primeiro passo para uma possível implementação de uma meto-

dologia de previsão de pressões para o ressalto hidráulico submerso.

No que diz respeito à densidade auto-espectral das amostras de pressão, verificou-se que o aumento da submersão não afeta consideravelmente a distribuição de energia ao longo do domínio das frequências, independentemente do nível de submersão. No entanto, os ressaltos submersos aparentam apresentar valores de energia superiores ao ressalto livre. Esse comportamento pode estar associado à formação de vórtices a jusante da comporta e ao afogamento do ressalto.

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 de FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A. Os autores também agradecem à CAPES.

REFERÊNCIAS

- ENDRES, L.A.M. *Contribuição ao Desenvolvimento de um Sistema para Aquisição e Tratamento de Dados de Pressões Instantâneas em Laboratório*. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 104 p., 1990.
- HAGER, W.H. *Energy dissipators and hydraulic jump*. Water Science and Technology Library, Kluwer Academic Publishers, 1992, 289 p.
- LONG, D., STEFFLER, P. M. e RAJARATNAM, N. *LDA study of flow structure in submerged hydraulic jump*. Journal of Hydraulic Research. vol. 28, n. 4, p. 437-459, 1990.
- LOPARDO, R. A. *Apunte sobre fluctuaciones macroturbulentas de presión, medición, análisis y aplicación al resalto hidráulico*. In: Apostila do Curso de Turbulência, Cavitação e Aeração de Fenômenos Hidráulicos. São Paulo, 45 p., 1986.
- LOPARDO, R. A., FATTOR, C. A., CASADO, J. M., LOPARDO, M. C. *Uma aproximación por turbulencia remanente de la longitud del resalto sumergido*. In: XXI Congresso Latino-americano de Hidráulica, 9 p., 2004a.
- LOPARDO, R. A., FATTOR, C. A., LOPARDO, M. C., CASADO, J. M. *Instantaneous pressure field on a submerged jump stilling basins*. Hydraulics of Dams and River Structures, editado por Farhad Yazdandoost & Jalal Attari, A. A. Balkema Publishers, London U.K. ISBN 90 5809 673, Part I, p. 133 – 138, 2004b.
- MARQUES, M. G. *Nouvelle Approche Pour le Dimensionnement des Dissipateurs à Auge*. Tese (Doutorado) - Faculte des sciences et génie de la Université Laval, Québec, Canadá, 221 p., 1995.
- MARQUES, M. G., DRAPEAU, J. e VERRETTE, J. L. *Flutuação de pressão em um ressalto hidráulico*. In: XVII Congresso Latino Americano de Hidráulica, Guayaquil, Equador, 1997.
- MARQUES, M. G., ALMEIDA, F. M. e ENDRES, L. A. M. *Adimensionalização de pressões médias em bacias de dissipação por ressalto hidráulico*. In: XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 1999.
- PINHEIRO, A. A. N. *Ações Hidrodinâmicas em Soleiras de Bacia de Dissipação de Energia por Ressalto Hidráulico*. Tese (Doutorado) – Universidade Técnica de Lisboa. 353 p. 1995.
- PINTO, L. C. S., VASCONSELOS, J. E. e SEYSSEL, R. L. *Análise Experimental da flutuação de pressão na base de um ressalto hidráulico livre e afogado*. In: XIII Congresso Latinoamericano de Hidráulica, Havana, Cuba, 13p, 1998.
- RAJARATNAM, N. *Submerged hydraulic jump*. Journal of Hydraulic Division. vol. 91, n. 4, p. 71-96, 1965.
- RESCH, F.J. e LEUTHEUSSER, H. J. *Bubbly two-phase flow in hydraulic jump*. Journal of Hydraulics Division, vol 100, n. HY1, p.137-149., 1974 apud HAGER, W.H. *Energy dissipators and hydraulic jump*, Water Science and Technology Library, Kluwer Academic Publishers, 1992, 289 p.
- SMETANA, J. *Experimental study of the submerged or expanded hydraulic jump*. Traduzido do russo por A. D. Kalal, Bureau of Reclamation, 1934.
- TEIXEIRA, E. D. *Previsão dos valores de pressão junto ao fundo em bacias de dissipação por ressalto hidráulico*. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 116 p., 2003.
- TRIERWEILER, E. F. N. *Avaliação do campo de pressões em ressalto hidráulico formado a jusante de uma comporta com diferentes graus de submersão*. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 194 p., 2006.

WU, S., RAJARATNAM, N. Free jumps, submerged jumps and wall jets. *Journal of Hydraulic Research* vol. 33, n 2, p.197 – 212, 1995.

Analysis of the Pressure Field in a Submerged Hydraulic Jump Downstream From a Sluice Gate

ABSTRACT

The hydraulic jump is widely used in energy dissipation downstream from hydraulic works. It is a dissipation process associated with velocity, water level and pressure fluctuations. Due to the damage caused to energy dissipation structures over the years by problems related to stress, cavitation and resonance, it is now important to understand the role of the hydraulic jump as a form of dissipation. The characterization of the pressure fields in the bottom of stilling basins is of practical use to the designers of hydraulic works seeking more efficient and economical sizing.

There is a large bibliography on free hydraulic jumps, however, little has been written about the most common situation in stilling basins, the submerged hydraulic jump. This article analyses the pressure field in a submerged hydraulic jump downstream from a sluice gate in order to help understand the energy dissipation process and the design optimization of stilling basins.

Through the use of non-dimensional parameters it was possible to evaluate and quantify the effects attributed to the submergence on the longitudinal distribution of average pressure, standard deviation, skewness and kurtosis coefficients and on the power spectra of the pressure fluctuation.

Key-words: submerged hydraulic jump, pressure fluctuations, energy dissipation.