

FLUTUAÇÃO DE PRESSÃO EM UM RESSALTO HIDRÁULICO

Marcelo Giulian Marques

Instituto de Pesquisas Hidráulicas – UFRGS – Caixa Postal 15029
91501-970 Porto Alegre, RS

Jean Drapeau

840 Ch. Du Pont Tache Nord # 16
G8B 5B8 Alma, Québec, Canadá

Jean-Louis Verrette

Département de Génie Civil – Faculté des Sciences et Génie – Université Laval
G1K 7P4 Sainte-Foy, Québec, Canada

RESUMO

O ressalto hidráulico, que se observa em uma bacia de dissipação, é um fenômeno fortemente turbulento que provoca grandes flutuações de pressão agindo sobre o fundo. Estas flutuações podem levar à destruição do dissipador de energia por diferentes mecanismos, tais como: fadiga, subpressão e cavitação. Para avaliar e estudar estas flutuações foram medidas as pressões em um ressalto hidráulico a jusante de um vertedor para uma faixa de números de Froude compreendida entre 4,5 e 10,0. Este trabalho apresenta e compara alguns dos resultados obtidos e propõem algumas relações para exprimir a posição de máxima flutuação de pressão, de descolamento do escoamento, do rolo e do fim da dissipação de energia bem como as distribuições longitudinais da pressão média, do valor médio de flutuação de pressão e dos coeficientes de assimetria e curtose.

INTRODUÇÃO

O ressalto hidráulico é a forma mais tradicional de dissipação de energia, existindo um consenso geral quanto às suas características de funcionamento, mas existe, ainda, muito a se dizer sobre o seu comportamento interno. O ressalto hidráulico é um fenômeno altamente turbulento que gera flutuações de pressão sobre o fundo da bacia, que podem levar à destruição do dissipador de energia por diferentes mecanismos, tais como: fadiga, subpressão e cavitação.

As técnicas atuais de medidas permitem obter com precisão as variações de pressões do escoamento. A maior parte dos estudos existentes foi realizada para números de Froude (Fr) situados entre 4,5 e 10,0.

A formação de um ressalto hidráulico a jusante de um vertedouro, pela classificação de Peterka (1957), é denominada de bacia tipo I (Figura 1). Este tipo de dissipador consiste simplesmente de um fundo plano a jusante de um vertedor sobre o qual se permite a formação de um ressalto hidráulico para dissipar energia.

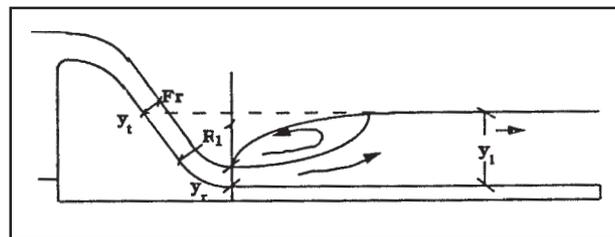


Figura 1. Bacia tipo I.

A posição onde se produz a maior flutuação de pressão pode ser determinada pela Equação (1), conforme apresentado por Marques et al. (1994).

$$X_{C_{p\max}} = 2y_r(Fr - 1) \quad (1)$$

No trabalho de Marques et al. (1996) foi sugerida a utilização de um parâmetro de distância longitudinal para agrupar os diferentes pontos de medida de flutuação de pressão de forma a obter uma faixa uniforme de pontos, independente do número de

Froude. Apresentaram também, neste trabalho, a estimativa do percentual da perda de carga interna do ressalto hidráulico em função da posição ao longo do escoamento, onde se pode constatar que no término do rolo do ressalto 95% da energia já foi dissipada.

O MODELO E OS EQUIPAMENTOS

No desenvolvimento deste trabalho, foi utilizado um canal com 600 mm de largura onde foi instalado um vertedor Creager com altura de 720 mm. Estas dimensões atendem às recomendações de Lopardo et al. (1982, 1984, 1987a,b), Lopardo (1993) e Endres (1991) segundo os quais é preferível operar com números de Reynolds superiores a 50 000 ou 100 000 (conforme o pesquisador) e uma profundidade do escoamento na entrada do ressalto superior a 30 mm.

As medidas de pressão foram obtidas através de transdutores de pressão da marca Omega modelo PX800-005GV, instalados externamente ao canal, nivelados com o fundo da bacia. As 22 tomadas, colocadas no fundo do canal, estavam ligadas aos transdutores de pressão por um tubo de 500 mm de comprimento e de 6,4 mm de diâmetro interno, conforme recomendações de Akbari et al. (1982), Lopardo (1987) e Lopardo e Henning (1985). A aquisição dos dados foi feita com uma frequência de 50 Hz durante 200 s respeitando as recomendações de Akbari et al. (1982), Fiorotto e Rinaldo (1982), Lopardo (1987), Lopardo e Henning (1985), Toso (1986) e Toso e Bowers (1989) que recomendam:

- frequência ≥ 50 Hz;
- tempo de aquisição ≥ 60 s.

Para cada tomada de pressão foram feitas três séries de medidas, tendo-se observado que a variação dos resultados estatísticos para uma mesma tomada e escoamento não apresentavam variações significativas, mostrando o comportamento estacionário e ergódico do fenômeno.

METODOLOGIA

O início do ressalto hidráulico foi posicionado de maneira a coincidir com o ponto de tangência entre raio de concordância do vertedouro e o fundo do canal, estando os números de Froude referenciados a esta posição. Para cada amostra foi analisada a distribuição longitudinal dos parâmetros estatísticos pressão média, desvio padrão, coeficiente de assimetria e de curtose. Os valores da profundidade conjugada lenta do escoamento (y_l) foram fixados para a posição onde os valores dos parâmetros estatísticos entre uma tomada e outra eram praticamente constantes. Os valores de y_l são um pouco inferiores aos valores obtidos pela equação de Bélanger, o que parece razoável, uma vez que este último não levou em conta as perdas de carga por fricção em seu estudo. Entretanto y_l apresenta-se dentro dos valores sugeridos por Hager et al. (1989) e Zhuo-Yi (1991) conforme pode ser visto na Figura 2.

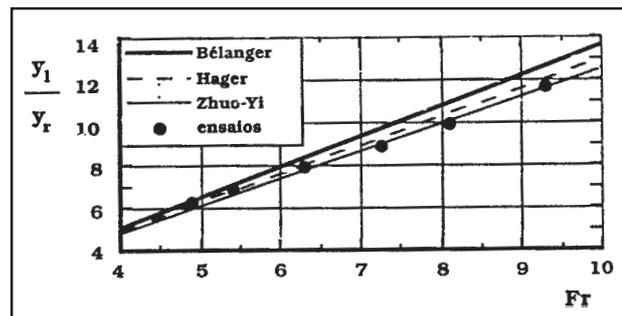


Figura 2. Alturas conjugadas sugeridas por diferentes pesquisadores.

Todos os ensaios foram fotografados e registrados em vídeo cassete. A Tabela 1, a seguir, apresenta as características dos ensaios e a Figura 3 ilustra a definição dos parâmetros,

PRESSÃO MÉDIA

Marques et al. (1996) sugerem que se utilize para representar a distribuição da pressão média a relação abaixo:

$$\frac{P_x - y_r}{y_l - y_r} = f\left(\frac{x}{y_l - y_r}\right) \quad (2)$$

onde P_x = pressão média na posição x em metros de coluna de água; x = distância a partir do início do ressalto onde foi feita a medida de flutuação de pressão.

Tabela 1. Características dos ensaios.

Q (l/s)	y_r (mm)	v_r (m/s)	y_l (mm)	Fr	Re (x 1000)
163	68	4,00	426	4,9	272
127	54	3,92	373	5,4	212
87	38	3,83	301	6,3	146
63	28	3,76	247	7,2	102
48	22	3,72	218	8,1	82
35	16	3,67	186	9,3	59

onde Q = vazão ensaiada (valor medido); y_r = altura conjugada rápida (valor medido); v_r = velocidade média na entrada do ressalto; y_l = altura conjugada lenta (valor medido); Fr = número de Froude na entrada do

$$\text{ressalto} \Rightarrow Fr = \frac{v_r}{\sqrt{y_r g}}$$

Re = número de Reynolds na entrada do resalto $\Rightarrow Re = \frac{v_r y_r}{\nu}$

g = aceleração da gravidade; ν = viscosidade do fluido.

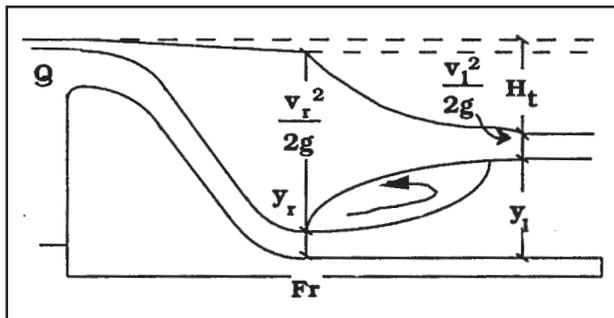


Figura 3. Bacia tipo I - Descrição dos parâmetros.

As curvas obtidas para a pressão média (Figura 4) apresentam o mesmo desenvolvimento e após o início do resalto há um aumento linear da pressão até a posição $x = 4,0(y_l - y_r)$. A partir desta posição há uma mudança de declividade até a posição $x = 8,5(y_l - y_r)$ onde os valores de pressão tornam-se praticamente constantes.

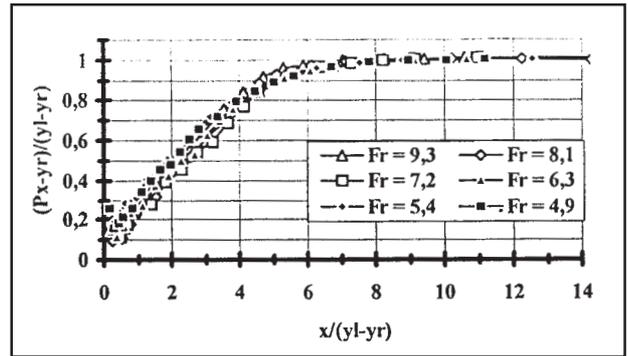


Figura 4. Pressão média em função da posição no resalto hidráulico.

FLUTUAÇÃO DE PRESSÃO

A Figura 5 apresenta os resultados obtidos para a flutuação de pressão. A utilização do parâmetro da relação abaixo permite agrupar os resultados em aproximadamente uma única curva.

$$F_x = \frac{\sigma_x}{H_t} \frac{y_l}{y_r} = f\left(\frac{x}{y_l - y_r}\right) \quad (3)$$

onde $\frac{\sigma_x}{H_t}$ representa a perda de carga pontual;

$\frac{y_l}{y_r}$ representa a influência do número de Froude do escoamento; σ_x = valor médio da flutuação de pressão (desvio padrão da amostra); H_t = perda de carga total; e y_l e y_r = alturas conjugadas.

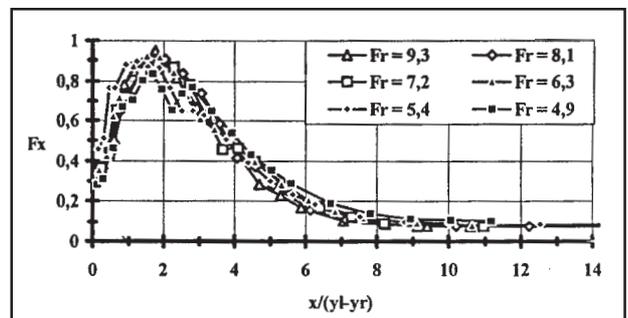


Figura 5. Flutuação de pressão em função da posição.

Na Figura 5 pode-se observar que o valor de F_x aumenta até um valor próximo de 0,90 para a posição $x = 1,75(y_1 - y_r)$, para depois diminuir rapidamente até a distância $x = 6,0(y_1 - y_r)$. A partir desta posição observa-se uma mudança de inclinação até a distância $x = 8,5(y_1 - y_r)$ passando o valor de F_x a assumir um valor constante e próximo de 0,08.

COEFICIENTE DE ASSIMETRIA

A análise do coeficiente de assimetria (A_d) da função de densidade de probabilidade das amostras de cada tomada de pressão pode informar sobre as zonas de separação do escoamento macro-turbulento.

A função de densidade de probabilidade torna-se assimétrica quando os valores extremos influenciam a média. Assim um coeficiente de assimetria positivo, indica a presença, na amostra, de valores de pressão muito mais altos que a maioria dos outros, o que desloca a função de densidade para a direita, aumentando assim o valor da média. Inversamente, um coeficiente de assimetria negativo provém da presença de valores de pressão muito menores que a maioria dos outros, e que vem a deslocar assim a função de densidade para a esquerda, diminuindo o valor da média.

O gráfico da distribuição longitudinal do coeficiente de assimetria para as seis condições ensaiadas em função da distância longitudinal (Figura 6), permite observar que os pontos se agrupam em torno de uma curva média.

No início do ressalto, na zona onde o escoamento sofre ainda influência da força centrífuga devido à presença do raio de concordância, as medidas de pressão apresentam valores extremos bem mais elevados que os valores médios de um escoamento uniforme. A este efeito somam-se as flutuações de pressão que são provenientes do rolo localizado sobre o escoamento. No início desta região o coeficiente de assimetria é elevado, em torno de 1,75. O efeito do raio de concordância se

dilui muito rapidamente, logo que o escoamento se estabiliza sobre o fundo horizontal em torno da posição correspondente a $x = 1,0(y_1 - y_r)$, chegando até um valor de 1,0 para o coeficiente de assimetria. Observa-se, após a posição $x = 1,0(y_1 - y_r)$ uma diminuição brusca do coeficiente de assimetria restando somente a influência do rolo sobre o escoamento. Nesta situação é normal que o coeficiente de assimetria diminua, mas mais lentamente do que no caso precedente, porque a dissipação de energia no ressalto provoca uma transformação de energia cinética em energia potencial. Esta transformação força o escoamento a se separar do fundo e a se dirigir para a superfície, aumentando a energia potencial. A separação do escoamento produz, então, valores de pressão mais fracos. As duas tendências se opõem e, à medida que o escoamento avança, a segunda prevalece sobre a primeira impondo valores extremos menores. O coeficiente de assimetria passa, então, de um valor positivo para um valor negativo (ver Figura 6), passando pelo zero ($A_d = 0$) na posição $x = 4,0(y_1 - y_r)$. Esta posição é o local onde as duas tendências estão em equilíbrio. Através da análise de fotografias e de registros em vídeo dos ensaios pode-se situar esta posição como o local onde a velocidade começa a apresentar uma componente vertical para cima. O local onde o coeficiente de assimetria assume um valor mínimo ($A_d = -0,6$) corresponde à posição $x = 6,0(y_1 - y_r)$, sendo a posição do fim do rolo, onde o escoamento apresenta as componentes verticais mais importantes. Nesta posição as pressões baixas, produzidas pelo deslocamento do escoamento são preponderantes sobre as pressões extremas positivas, geradas pelas flutuações de pressão do rolo. Em seguida o escoamento torna-se paralelo ao fundo e os valores do coeficiente de pressão aumentam para chegar a valores próximo de zero (0), no entorno da posição $x = 8,5(y_1 - y_r)$. Após esta posição, os valores se mantêm levemente superiores a zero (0), indicando que a influência do ressalto hidráulico não mais se manifesta no escoamento.

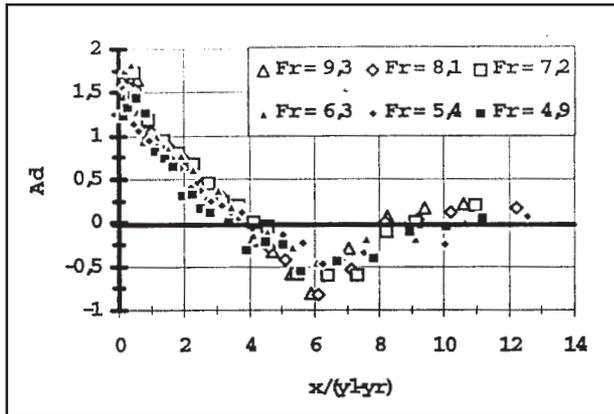


Figura 6. Coeficiente de assimetria em função da posição longitudinal no ressalto hidráulico.

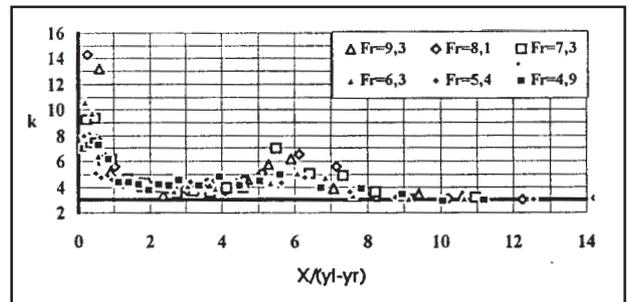


Figura 7. Coeficiente de curtose em função da posição longitudinal no ressalto hidráulico.

COEFICIENTE DE CURTOSE

De uma maneira análoga ao desvio padrão da amostra o coeficiente de curtose (k) é uma medida da concentração dos dados em relação a média. Um valor de k menor que 3 indica uma distribuição mais concentrada.

A análise da distribuição do coeficiente de curtose (Figura 7) em um ressalto hidráulico confirmam os resultados da análise da distribuição de flutuação de pressão. Observa-se que:

- para o intervalo $0 \leq x/(y_1 - y_r) \leq 1,0$ o coeficiente de curtose apresenta valores muito dispersos e superiores a 4. Esta região corresponde a uma zona do escoamento com grande instabilidade;
- para o intervalo $1,0 \leq x/(y_1 - y_r) \leq 4,0$ os valores ficam próximos a 4. Esta zona corresponde a região onde o escoamento apresenta uma alta velocidade junto ao fundo;
- para o intervalo $4,0 \leq x/(y_1 - y_r) \leq 6,0$ o coeficiente de curtose apresenta uma maior dispersão e seu valor aumenta até aproximadamente 6. Nesta região o escoamento descola do fundo e tende a encontrar a altura total do escoamento (fim do rolo);
- após o término do rolo, a distribuição do coeficiente de curtose ainda apresenta uma dispersão considerável e seu valor diminui gradualmente até 3

PONTOS CARACTERÍSTICOS DO RESSALTO

Pela análise da distribuição longitudinal da pressão média, da flutuação de pressão, do coeficiente de assimetria, do coeficiente de curtose, das fotografias dos ensaios e registros em vídeo é possível associar certos pontos característicos ao ressalto, conforme mostrado na Tabela 2.

Tabela 2. Pontos característicos do ressalto.

posição	equação
maior flutuação de pressão	$L_{Cp\text{máx}} = 1,75(y_1 - y_r)$,
deslocamento do escoamento	$L_d = 4,0(y_1 - y_r)$
fim do rolo	$L_r = 6,0(y_1 - y_r)$
fim da dissipação	$L_n = 8,5(y_1 - y_r)$.

DETERMINAÇÃO DOS ESFORÇOS HIDRODINÂMICOS

A análise da distribuição longitudinal das pressões extremas (P) observadas no ressalto foi efetuada utilizando-se uma relação entre as pressões medidas e as alturas conjugadas e a sua posição relativa no ressalto, como pode ser visto a seguir:

$$\frac{P - y_r}{y_l - y_r} = f\left(\frac{x}{(y_l - y_r)}\right) \quad (4)$$

Pela análise da Figura 8 observa-se que as pressões extremas (máxima e mínima medidas) apresentam uma maior dispersão que a média. Este fato já era esperado porque as pressões máximas e mínimas medidas não necessariamente são as pressões extremas que podem ocorrer, uma vez que se trabalha com uma amostra representativa do fenômeno. Entretanto pode-se observar que há uma tendência de ocorrerem valores negativos para a região compreendida entre o início do ressalto e $3,0(y_l - y_r)$.

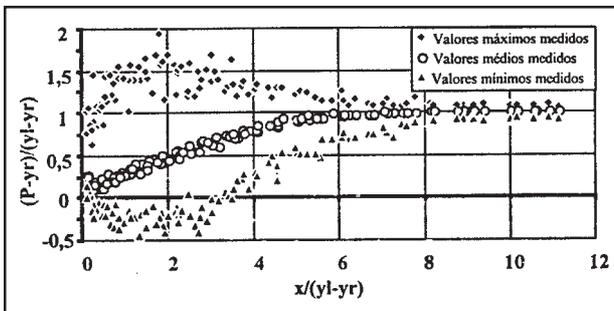


Figura 8. Valores extremos medidos ao longo do ressalto.

Como a flutuação de pressão em um ressalto hidráulico, na forma como considerada neste trabalho, pode ser considerada um fenômeno ergódico, é possível estimar os esforços com uma certa probabilidade ($P_{x\%}$) a partir do conhecimento da pressão média (P_x) e do desvio padrão (σ_x) da amostra naquela tomada a partir da Equação (5).

$$P_{x\%} = P_x - n\sigma_x \quad (5)$$

O valor do coeficiente n é função da lei de distribuição estatística (normal, Pearson III, etc.) que a amostra parece seguir. Se a amostra segue uma distribuição normal (Gaussiana), o coeficiente de assimetria deverá ser igual a zero e o coeficiente de curtose igual a 3,0. Pela análise das Figuras 6

e 7 observa-se que a distribuição ao longo do ressalto não segue uma distribuição normal. A Tabela 3 resume os valores encontrados.

Tabela 3. Resumo dos valores dos coeficientes de assimetria e de curtose ao longo do ressalto.

$\frac{x}{(y_l - y_r)}$	Ad	k
0	$\geq 1,5$	$\geq 7,0$
1,75	$\cong 0,75$	$\cong 4,0$
4,0	$\cong 0$	$\cong 4,0$
6,0	$\cong -0,6$	$\cong 6,0$
8,5	$\cong 0$	$\cong 3,0$

Em complementação a este trabalho, estão sendo elaborados estudos para determinação das distribuições de probabilidade que melhor se adaptam aos dados medidos, para que se possa determinar quais as pressões extremas que ocorrem no ressalto hidráulico.

CONCLUSÃO

As principais conclusões obtidas pela análise estatística da flutuação de pressão pontual em um ressalto hidráulico livre, a jusante de um vertedouro podem ser resumidas como segue:

- i. As pressões médias aumentam do início para o fim do ressalto gradualmente (Figura 4). A partir da posição $L_n = 8,5(y_l - y_r)$ termina a influência do ressalto;
- ii. A flutuação de pressão apresenta um comportamento típico para a distribuição do valor da flutuação de pressão (Figura 5), que aumenta até um máximo em torno da posição $L_{Cpmax} = 1,75(y_l - y_r)$ para depois diminuir;
- iii. O coeficiente de assimetria (Ad) permite determinar algumas posições características do ressalto (Figura 6), tais como o descolamento do escoamento na posição $L_d = 4,0(y_l - y_r)$, o fim do rolo na posição $L_r = 6,0(y_l - y_r)$;

- e fim da dissipação de energia na posição $L_n = 8,5(y_l - yr)$;
- iv. O coeficiente de curtose (k) confirma algumas das informações obtidas através das análises das distribuições longitudinais do desvio padrão e do coeficiente de assimetria; e
 - v. A utilização dos novos gráficos de pressão média e flutuação de pressão permitiram estimar os valores extremos suscetíveis de ocorrer no fundo de uma bacia de dissipação por ressalto hidráulico livre, e de avaliar as possibilidades de fadiga e de cavitação da estrutura.

REFERÊNCIA

- AKBARI, M. E., MITTAL, M. K. ET PANDE, P. K. (1982). Pressure fluctuations on the floor of free and forced hydraulic jumps. *Proc., International conference on the hydraulic modelling of civil engineering structures*, Coventry, England. BHRA Fluid Engineering. pp.: 87-96, Paper C1.
- ENDRES, L.A.M. (1990), *Contribuição ao desenvolvimento de um sistema para aquisição e tratamento de dados de pressões instantâneas em laboratório*. Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH). Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Brasil.
- FIOROTTO, V. ET RINALDO, A. (1992). "Turbulent pressure fluctuations under hydraulic jumps." *Journal of hydraulic research*, IAHR, Vol.: 30, No.: 4, pp.:499-520.
- HAGER, W. H., BREMEN, R. AND KAWAGOSHI, N. [1990]. "Classical Hydraulic Jump: Length of Roller." *Journal of hydraulic research*, Vol.:28, No.:5, pp.:591-608.
- LOPARDO, R. A. (1993). *Stilling basin pressure fluctuations*. 18 p. comunicação pessoal.
- LOPARDO, R. A. (1987). "Notas sobre fluctuaciones macroturbulentas de presión, medición, análisis y aplicación al resalto hidráulico." *Revista latino americana de hidráulica*, No.: 2, pp.: 109-154.
- LOPARDO, R. A., DE LIO, J. C. ET HENNING, R. E. (1987). "Modelling techniques for preventing cavitation in structures submerged in hydraulic jumps." *Proc., AIRH Congress IAHR*, Lausanne Switzerland. pp.: 177-182.
- LOPARDO, R. A., DE LIO, J. C. ET VERNET, G. F. (1982). "Physical modelling on cavitation tendency for macroturbulence of hydraulic jump." *Proc., International conference on the hydraulic modelling of civil engineering structures*, Coventry, England. BHRA Fluid engineering. pp.: 109-121, Paper C3.
- LOPARDO, R. A., DE LIO, J. C. ET VERNET, G. F. (1984). "Model-prototype comparison on pressure fluctuations in hydraulic jump energy dissipators." *Proc., Symposium on scale effects in modelling hydraulic structures*, Esslinger, Studgard: H. Kobus. pp.: 1-5.
- LOPARDO, R. A. ET HENNING, R. E. (1985). "Experimental advances on pressure fluctuations beneath hydraulic jumps." *Proc., 21st IAHR Congress*, Melbourne, Australia. pp.: 634-638.
- LOPARDO, R. A., VERNET, G. F. ET CHIVIDINI, M. F. (1985). "Modelling the behaviour of high head hydraulic jump energy dissipators under flood conditions." *Proc., 2nd International Conference on the Hydraulic of Floods & Flood Control*, Cambridge, England. BHRA, The fluid engineering center. pp.: 313-323, Paper G1.
- MARQUES, M. G., DRAPEAU, J. AND VERRETTE, J. L. (1994). Análise da flutuação de pressão provocada pela formação de um ressalto hidráulico a jusante de vertedouros. *Proc., X Seminário Curso do Centro Inter americano de Estudos Avançados dos Recursos de Água*, Salvador – Bahia – Brasil. Universidade Católica do Salvador. pp.: 129-149.
- MARQUES, M. G., DRAPEAU, J. AND VERRETTE, J. L. (1996). Análise da flutuação de pressão provocada pela formação de um ressalto hidráulico a jusante de vertedouro. *In: XVII Congresso Latino Americano de Hidráulica*, Guayaquil – Equador 21-25 de Outubro
- PETERKA, A. J. [1957]. *Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators*. Washington, U.S. Govt. Print. Off. 222 p.
- TOSO, J. W. (1986). "The magnitude and extent of extreme pressure fluctuations in the hydraulic jump." PhD thesis, Minnesota University, Minnesota.
- TOSO, J. W. ET BOWERS, C. E. (1988). "Extreme pressure in hydraulic jump stilling basins." *Journal of hydraulic engineering*, ASCE, Vol.: 114, No.: 8, pp.: 829-843.
- U.S.B.R. [1987]. *Design of Small Dams* U.S.Govt. Print. Off, Denver.
- ZHUO-YI, D. [1991]. "Studies on the Two Dimensional Free Hydraulic Jump Taking Account of Turbulence Intensity and Other Factors." *Journal of Hydrodynamics*, Vol.: B, No.: 2. pp.: 71-74.

Pressure Fluctuation Coefficient in a Hydraulic Jump

ABSTRACT

The hydraulic jump occurring in a stilling basin is a highly turbulent phenomenon exciting wide pressure fluctuations on the bed. These fluctuations can lead to destruction of the stilling basin through differing mechanisms: material failure and cavitation. To evaluate and study such fluctuations, pressure was measured under a hydraulic jump downstream of a spillway for Froude numbers between 4.5 and 10.0. This paper presents and compares the results obtained and proposes relations expressing the positions of maximum pressure fluctuations, of flow separation from the bed, of the roller and of the end energy dissipation, as well as longitudinal distribution of mean pressure, mean value of pressure fluctuation, and coefficients of asymmetry and kurtosis.