

PARALELO ENTRE O COEFICIENTE DE AERAÇÃO E A FLUTUAÇÃO DE PRESSÃO NO RESSALTO HIDRÁULICO: UM ESTUDO TEÓRICO - EXPERIMENTAL

Marcelo Giulian Marques¹, Mauricio Dai Prá², Alexandre Augusto Mees Alves³ & Alba Valéria Brandão Canellas⁴

RESUMO --- Para o conhecimento do processo de dissipação de energia no interior do ressalto hidráulico se faz necessário o conhecimento de suas características internas e externas, tanto de flutuação como de aeração. A análise dos processos de aeração vem tomando uma importância maior no estudo do ressalto hidráulico, tanto para se poder entender como se processa a dissipação de energia, mas também para conhecer como ocorre a incorporação de ar e qual a melhoria na qualidade da água. No presente trabalho é feita uma comparação entre os diferentes resultados de coeficientes de aeração e dos valores de flutuação de pressão visando ajudar a entender esse processo.

ABSTRACT --- To better understand the energy dissipation process in the hydraulic jump it is necessary to know its internal and external characteristics, both of pressure fluctuations and aeration. The analysis of the aeration processes is becoming more important in studying the hydraulic jump, not only to understand the energy dissipation process but to know how the entrapment of air occurs and the associated improvement in water quality. In this present work a comparison is made among different results of coefficients of aeration and pressure fluctuations aiming to an enhanced comprehension of the phenomena.

Palavras-chave: Ressalto Hidráulico, aeração, flutuação de pressão.

1) Professor do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul Av. Bento Gonçalves 9500, Porto Alegre, RS, Caixa Postal 15029. E-mail: mmarques@iph.ufrgs.br.

2) Doutorando do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Av. Bento Gonçalves 9500, Porto Alegre, RS, Caixa Postal 15029. E-mail: mdaipra@gmail.com.

3) Mestrando do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Av. Bento Gonçalves 9500, Porto Alegre, RS, Caixa Postal 15029. E-mail: alexandreemes@gmail.com.

4) Eng. Civil do Laboratório de Hidráulica Experimental e Recursos Hídricos de Furnas Centrais Elétricas S.A. Estrada do Pau da Fome, 839, Rio de Janeiro, RJ. E-mail: alba@furnas.com.br.

1 – INTRODUÇÃO

O ressalto hidráulico é um fenômeno bruscamente variado, produzido toda vez que um escoamento a superfície livre passa de um regime supercrítico a subcrítico. Esta passagem é caracterizada pela formação de um rolo que incorpora ar atmosférico (escoamento bifásico), além de uma rápida elevação da altura de lâmina de água com propagação de ondas para jusante associada a uma grande turbulência, que provoca uma forte dissipação de energia. Essa agitação diminui significativamente após o fim do rolo e retorna ao regime normal do escoamento após o fim da zona de subida de bolhas de ar (Figura 1).

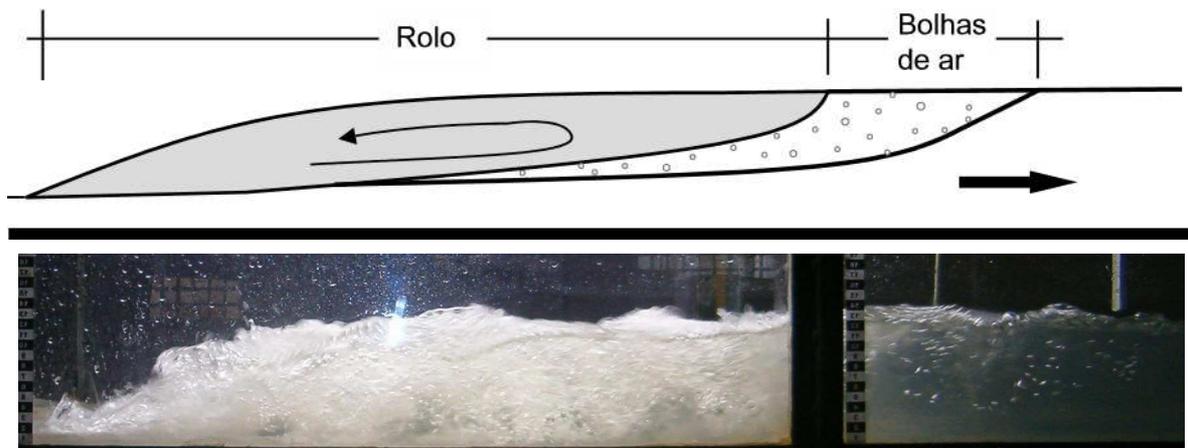


Figura 1 – Desenho esquemático e foto de um ressalto hidráulico.

O ressalto é um dos fenômenos hidráulicos mais estudados, sendo que uma das primeiras descrições foi feita por Leonardo da Vinci, no Século XVI (O'Malley, 1969). Entretanto, somente no início do século XIX foram apresentados os primeiros trabalhos teóricos e experimentais realizados por Bidone (1820) e por Belanger (1828) *apud* Hager (1992), que fizeram a primeira abordagem analítica para determinação da relação das alturas conjugadas (equação 1) através da equação de conservação de quantidade de movimento.

$$\frac{Y_2}{Y_1} = \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1 \right] \quad (1)$$

onde:

Y_1 = altura conjugada rápida (na seção de entrada do ressalto),

Y_2 = altura conjugada lenta (na seção de saída do ressalto),

Fr_1 = número de Froude na seção de entrada do ressalto hidráulico, e

$$Fr_1 = \frac{v_1}{\sqrt{gY_1}} \quad (2)$$

onde:

v_1 = velocidade na seção de entrada do ressalto hidráulico,

g = aceleração da gravidade.

Desde então, diversos pesquisadores têm estudado experimental e analiticamente o ressalto hidráulico com a finalidade de compreender e interpretar as suas características oscilatórias e definir padrões médios e instantâneos do comportamento da superfície livre, dos valores de pressões e de velocidades, dos níveis de aeração, entre outras investigações.

Esses estudos tiveram seu início na primeira metade do século XX (Bakhmeteff e Matzke, 1936), sendo intensificados a partir de 1960, podendo-se citar: Elder (1961), Toso (1986), Lopardo (1986), Pinheiro (1995), Gomes (2000), Teixeira (2003), Chanson (2006), Trierweiler (2006), entre outros. Marques *et al.* (1997), a partir da análise de dados experimentais, definiram 5 pontos de interesse no interior do ressalto: início de ressalto; ponto de máxima flutuação $\approx 1,8(Y_2 - Y_1)$; ponto de descolamento $\approx 4,0(Y_2 - Y_1)$; final do rolo $\approx 6,0(Y_2 - Y_1)$ e final da influência do ressalto $\approx 8,0(Y_2 - Y_1)$.

2 – A AERAÇÃO NO RESSALTO HIDRÁULICO

Os efeitos da entrada de ar no ressalto hidráulico são raramente descritos e medidos e quando são, geralmente conduzem investigações em termos de demanda de ar. Historicamente podem-se citar os seguintes trabalhos:

- Rajaratnam (1962) mostra dados experimentais onde a concentração de ar (C_a) cresce rapidamente no início do ressalto para depois decrescer em direção ao fim do mesmo (Figura 2). A partir desses dados foi determinada a equação 3 para avaliar a concentração de ar ao longo do ressalto e para o comprimento da aeração (L_a) em função do Número de Froude (Fr_1) na entrada (Figura 3 e equação 7). O autor salienta que o comprimento da aeração é maior que o comprimento do ressalto (L_j) definido por Peterka (1958).

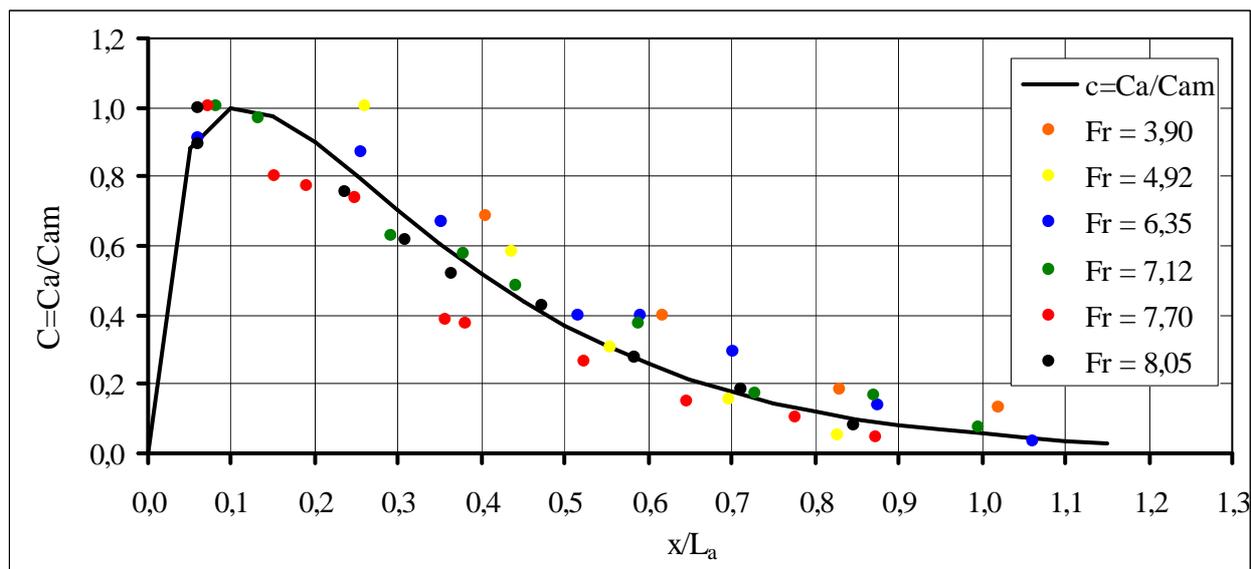


Figura 2 – Distribuição da concentração de ar ao longo do ressalto (Fonte: Rajaratnam, 1962)

$$\frac{C_a}{C_{am}} = \sqrt{9X_a e^{(1-9X_a)}} \quad (3)$$

onde:

C_a = concentração de ar em um ponto ao longo do ressalto, definida pela equação 4,

C_{am} = concentração máxima de ar ao longo do ressalto, dada pela equação 5,

X_a = posição de aeração relativa ao início do ressalto, dada pela equação 6.

$$C_a = \left(\frac{V_a}{V_a + V_w} \right) \quad (4)$$

onde:

V_a = volume de ar,

V_w = volume de água.

$$C_{am} = 0,0255(Fr_1 - 1,5) \quad (5)$$

$$X_a = \left(\frac{x}{L_a} \right) \quad (6)$$

onde:

x = distância em relação ao início do ressalto,

L_a = comprimento da aeração, dado pela equação 7.

$$\frac{L_a}{Y_2} = 3,5\sqrt{(Fr_1 - 1,5)} \quad (7)$$

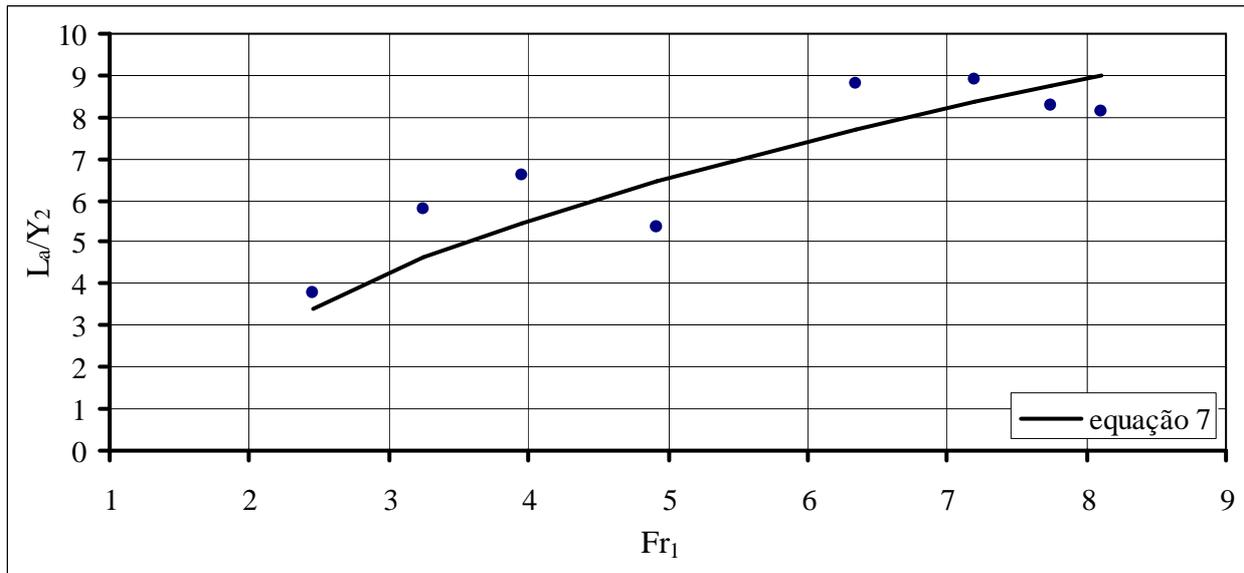


Figura 3 – Comprimento de aeração em função do número de Froude na entrada do ressalto.
(Fonte: Rajaratnam, 1962)

- Rajaratnam (1967) apresentou a equação 8 para a capacidade máxima de "bombeamento" de ar (β).

$$\beta = 0,018(Fr_1 - 1)^{1,245} \quad (8)$$

onde:

β = capacidade máxima de "bombeamento" de ar, definida como:

$$\beta = \frac{q_a}{q_w} = \frac{C_a}{(1 - C_a)} \quad (9)$$

onde:

q_a = vazão específica de ar,

q_w = vazão específica de água.

- Resch e Leutheusser (1972) mostraram que o processo de entrada de ar e a dissipação de energia são fortemente afetados pelas condições de entrada.
- Hoyt e Sellin (1989) sugerem que o ressalto hidráulico é um exemplo extremo de um escoamento de camada de mistura com o fluido mais pesado e rápido em baixo (água), e o mais leve e lento acima (ar). Através de formulações de camada de mistura, procuram

estimar a entrada de ar no ressalto hidráulico. Comparando com Resch e Leutheusser (1974), chegaram à conclusão de que o volume de ar no rolo, para número de Froude 2,85, é aproximadamente 3% do volume de água. Ainda segundo os autores, as velocidades da água e das bolhas de ar no interior do ressalto não são idênticas.

- Yed (1991) *apud* Hornung *et al.* (1995) descreve a geração da vorticidade em função da interferência viscosa na interface dos dois fluidos (água e ar) e a variação de densidade ao longo do ressalto, sendo este último o fator dominante.
- Marques *et al.* (1997) definem que o final da região de bolhas (L_a) coincide com o final da influência do ressalto – $L_n = 8(Y_2 - Y_1)$.
- Mossa e Tolve (1998) determinaram que a região de maior concentração de ar está situada entre 20 a 30 % do comprimento do ressalto.
- Chanson e Brattberg (2000) apresentaram a distribuição vertical da concentração de ar.
- Marques *et al.* (2004) apresentam uma aproximação analítica para avaliar a variação da aeração no interior do ressalto hidráulico e em função do número de Froude e chegam a conclusões similares a Rajaratnam (1967) quanto à capacidade máxima de "bombeamento" de ar (B).
- Boller (2006) apresenta as concentrações de ar para Froude de 4,2 em função da posição relativa ao comprimento do ressalto (L_j), e divide o ressalto em 3 regiões: região de aeração ($0 \leq x/L_j \leq 0,08$ ou $0 \leq x/L_a \leq 0,06$), região estável ($0,08 \leq x/L_j \leq 0,70$ ou $0,06 \leq x/L_a \leq 0,52$), e região de desaeração ($0,70 \leq x/L_j \leq 1,33$ ou $0,52 \leq x/L_j \leq 1,00$). A Figura 4 apresenta os resultados dos coeficientes de aeração encontrados por Boller (2006), mas em função da distância de aeração (L_a).

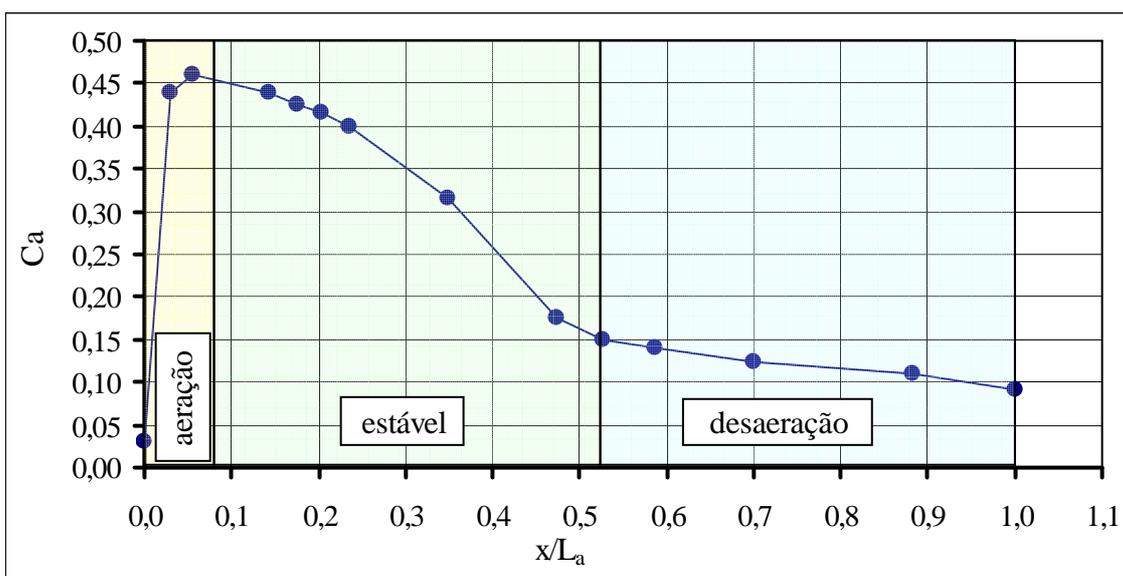


Figura 4 – Distribuição da concentração de ar ao longo do ressalto hidráulico para $Fr_1 = 4,2$.
(Fonte: Boller, 2006)

- Chanson (2006) definiu que o aprisionamento de ar e os mecanismos de quebra de bolhas são dominados pela tensão superficial implicando semelhança por número de Weber, e mostrou que existem efeitos de escala, contribuindo para uma aeração menor da região do rolo. Estes efeitos podem afetar a dissipação de energia, tendo esta uma relação inversamente proporcional à aeração do escoamento.

3 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

A Figura 5 apresenta a comparação dos resultados obtidos por Rajaratnam (1962) e Boller (2006), considerando-se a relação de C_a/C_{am} em função das posições adimensionalizadas x/L_a . Considerou-se, conforme sugerido por Marques *et al.* (1997), que a zona de final das bolhas (L_a) ocorre na posição $8(Y_2-Y_1)$. Pela análise da Figura 5 observa-se que os resultados de Boller (2006) encontram-se coerentes com os resultados de Rajaratnam (1962).

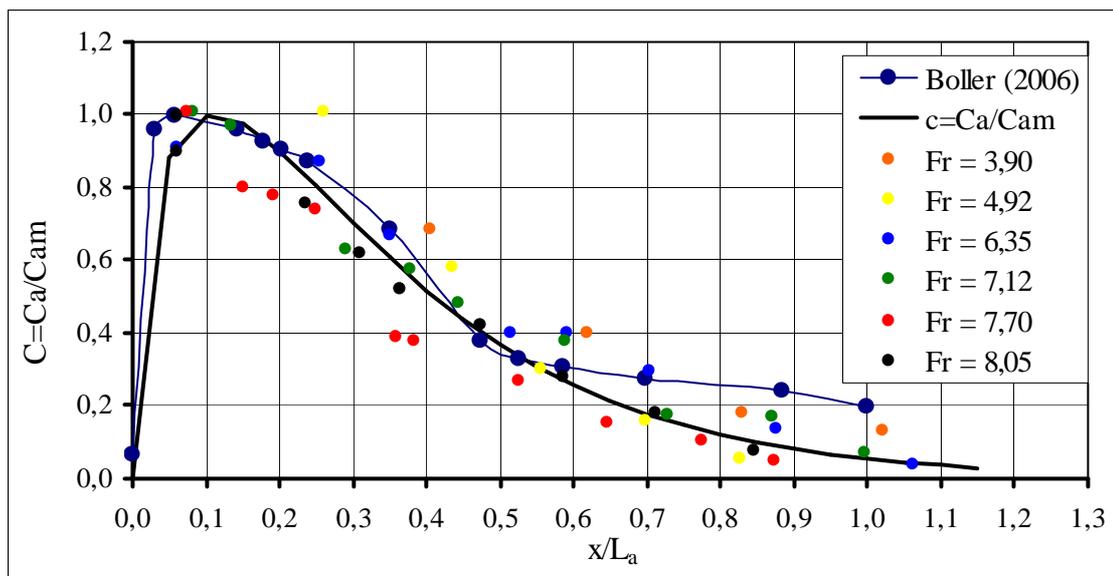


Figura 5 – Comparação dos resultados de Rajaratnam (1992) e Boller (2006).

Utilizando-se os resultados obtidos por Trierweiler (2006) (ressalto hidráulico a jusante de comporta), as pressões médias (P) e suas flutuações (σ), e adimensionalizando-as pelo parâmetro σ/P , pode-se observar que a equação 10 pode representar a variação do coeficiente de variação (σ/P) em função o comprimento de aeração adimensionalizado (x/L_a) conforme pode ser visto na Figura 6.

$$\frac{(\sigma_x/P_x)}{(\sigma/P)_{\max}} = \frac{0,847 - 0,265 \frac{x}{L_a}}{1 - 2,865 \frac{x}{L_a} + 10,687 \left(\frac{x}{L_a}\right)^2} \quad (10)$$

onde:

σ_x = flutuação de pressão num ponto x ao longo do ressalto (dado em m.c.a.),

P_x = pressão média num ponto x ao longo do ressalto (dado em m.c.a.).

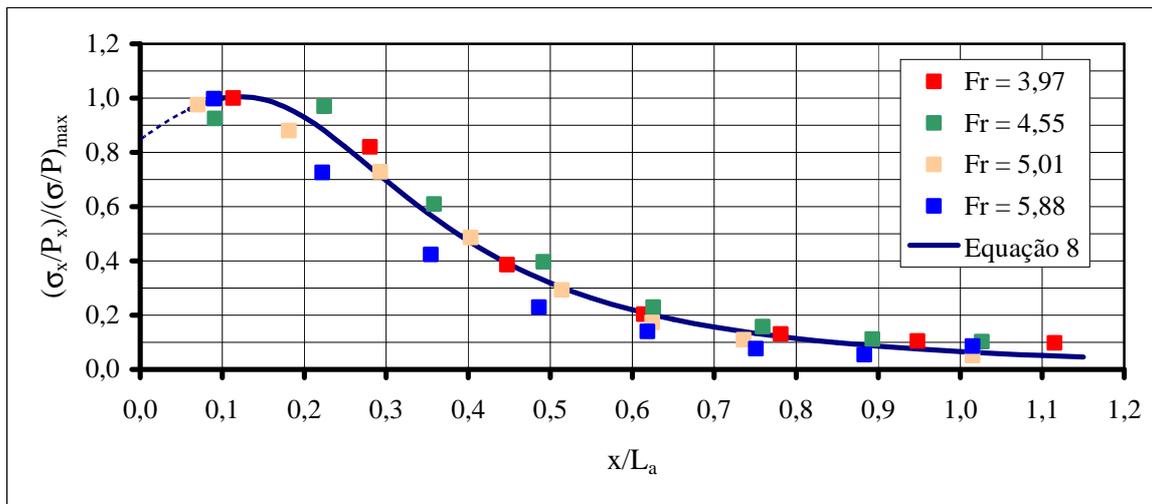


Figura 6 – Distribuição dos valores obtidos por Trierweiler (2006).

Os valores da flutuação de pressão (σ) encontrados por Trierweiler (2006) podem ser adimensionalizados pela equação 11 e estão apresentados na Figura 7.

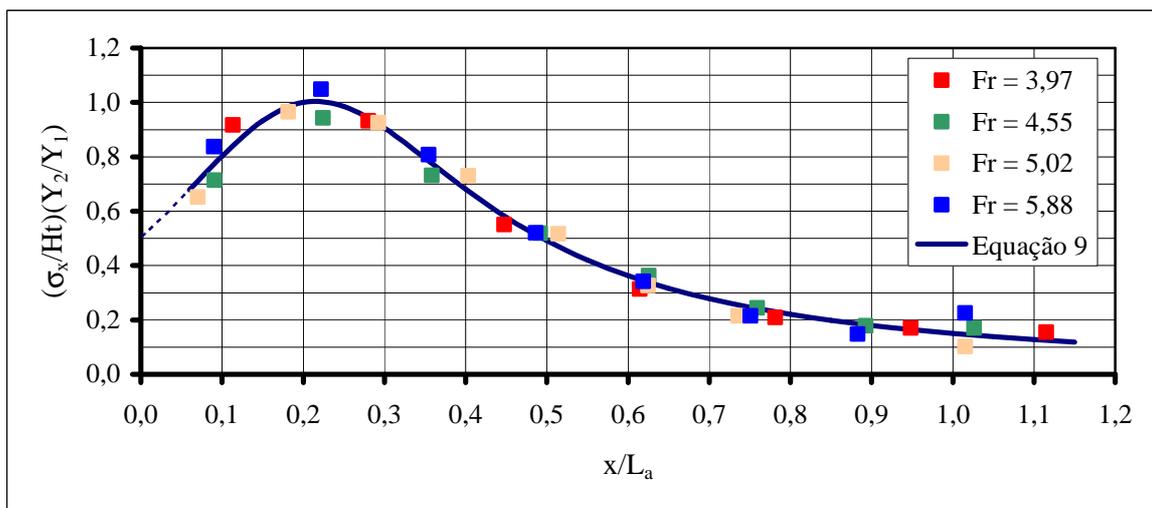


Figura 7 – Distribuição dos valores obtidos por Trierweiler (2006) para as flutuações de pressão.

$$\frac{\sigma_x Y_1}{H_t Y_2} = \frac{0,504 + 0,660 \frac{x}{L_a}}{1 - 3,965 \frac{x}{L_a} + 10,711 \left(\frac{x}{L_a} \right)^2} \quad (11)$$

onde:

H_t = perda de carga total no ressalto,

Comparando-se os resultados medidos pelos diferentes pesquisadores, conclui-se que:

- o ponto de maior concentração de ar situa-se entre $0,08 \leq x/L_a \leq 0,2$ ou $0 \leq x/(Y_2-Y_1) \leq 1,8$
- o ponto de máximo (σ/P) é entorno de $0,08 \leq x/L_a \leq 0,2$ X/L_a ou $0 \leq x/(Y_2-Y_1) \leq 1,8$
- o ponto de maior flutuação situa-se em torno de $0,10 \leq x/L_a \leq 0,30$ ou $0,8 \leq x/(Y_2-Y_1) \leq 2,4$

A região de aeração, segundo Boller (2006), situa-se no início do ressalto até o ponto de maior concentração de ar, portanto pode-se concluir que esta região equivale à região de máxima flutuação, para a faixa de números de Froude analisados. Já na região estável, definida entre $0,08 \leq x/L_j \leq 0,70$ ou $0,06 \leq x/L_a \leq 0,52$, considerando-se $L_a = 8(Y_2-Y_1)$, implica que o término da mesma seria coincidente com o ponto de descolamento do escoamento ($L_d = 4(Y_2-Y_1)$). O término da desaeração seria na posição coincidente com o final da influência do ressalto, definida por Teixeira (2003), ou seja, $L_a = L_j = 8(Y_2-Y_1)$.

4 – CONCLUSÃO

A análise dos processos de aeração vem tomando uma importância maior no estudo do ressalto hidráulico, não só para entender o processo da dissipação de energia, mas também para conhecer como ocorre a incorporação de ar e qual a melhoria na qualidade da água. Ainda há muito a ser pesquisado no quesito de como se dá a aeração. Entretanto, a análise das flutuações de pressão pode ajudar a entender esse processo, mostrando pontos de interesse tais como os definidos anteriormente.

5 – AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Furnas Centrais Elétricas S.A. pelo apoio dado à pesquisa e ao Eng. Edgar Fernando Trierweiler Neto por disponibilizar os seus dados.

6 – BIBLIOGRAFIA

- BAKHMETEFF, B. A. e MATZKE, A. E. (1936). *The hydraulic jump in terms of dynamic similarity*. Transactions, ASCE, vol. 101, 1936, pp.630-680.
- BIDONE, G. (1820). *Expériences sur le Remou et sur la Propagation des Ondes*. Memorie della Reale Accademia delle Scienze di Torino, 25 (1820), 21–112.
- BOLLER, F. (2006). *Experimental Investigation of Air Circulation Patterns in Classical Hydraulic Jumps* In: International Junior Researcher and Engineer Workshop on Hydraulic Structures, 2006, J. Matos and H. Chanson(Eds), Report CH61/06, Div. of Civil Eng., The University of Queensland, Brisbane, Australia - ISBN 1864998687
- CHANSON, H.; BRATTBERG, T. (2000). "Experimental Study of the Air-Water Shear Flow in a Hydraulic Jump." Intl Journal of Multiphase Flow, Vol. 26, No. 4, pp. 583-607 (ISSN 0301-9322).
- CHANSON, H. (2006). "Air Bubble Entrainment in Hydraulic Jumps. Similitude And Scale Effects" Report ch57/05 Department of Civil Engineering The University of Queensland
- ELDER, R.A. (1961). *Model-prototype Turbulence Scaling*. In: International Association for Hydraulic Research Convention, 9, 1961, Dubrovnik. [Proceedings]. Dubrovnik: Proleter. p. 24-31.
- GOMES, J. F. (2000). *Visualização de escoamento macro turbulento – Ressalto Hidráulico a jusante de uma comporta* - Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- HAGER, W.H. (1992). "Energy dissipators and hydraulic jump". Kluwer Academic Publishers. 289 p.
- HORNUNG, H. G.; WILLERT, C.; TURNER, S. (1995). *The flow field downstream of a hydraulic jump*. Journal Fluid Mechanics, V.287, p.299-316.
- HOYT, J. T.; SELLIN R. H. J. (1989). *Hydraulic jump as mixing layer*. Journal Hydraulic Engineering, V.115, N.12, p.1607-1614.
- LOPARDO, R. A. (1986) "Apunte sobre fluctuaciones macroturbulentas de presión, medición, análisis y aplicación al resalto hidráulico". São Paulo: Escola Politécnica. 44 p.
- MARQUES M. G.; TEIXEIRA, E. D.; GOMES, J. F.; ENDRES L. A. M. (2004) *Determinação Analítica Da Linha de Separação de Escoamentos para o Ressalto Hidráulico* In: XXI Congresso Latinoamericano de Hidráulica São Pedro, Estado de São Paulo, Brasil, Outubro, 2004
- MARQUES, M. G., DRAPEAU, J., VERRETTE, J. L. (1997). *Flutuação de pressão em um resalto hidráulico*. Revista Brasileira de Engenharia, v2, p45-52.
- MOSSA, M.; TOLVE, U. (1998). Flow visualization in bubbly two-phase hydraulic jump. Transactions of ASME, V.120, No.3, p.332-346.
- O'MALLEY, C. D. (1969). "Leonard's Legacy". Berkeley and Los Angeles University of California Press.
- PETERKA, A J. (1958) "Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators", US Department Interior, Bureau of Reclamation, Engineering Monograph 25, Denver.
- PINHEIRO, A. A. N. (1995). "Acções hidrodinâmicas em soleiras de bacias de dissipação de energia por resalto". Tese de Doutorado em Engenharia Civil pela Universidade Técnica de Lisboa.
- RAJARATNAM, N. (1962). *An Experimental Study of Air Entrainment Characteristics of the*

Hydraulic Jump. Journal of Instn. Eng. India, Vol. 42, No. 7, March, pp. 247-273.

RAJARATNAM, N. (1967). “*Hydraulic Jump. Advances in Hydroscience*”, Vol. 4, ed. V.T. Chow. Academic Press, New York.

RESCH, F. J.; LEUTHEUSSER, H. J. (1972). *Le Ressaut Hydraulique: mesure de Turbulence dans la Région Diphasique*. La Houille Blanche, No. 4, pp. 279-293 (in French).

RESH, F.J.; LEUTHEUSSER, H. (1974). *Bubbly two-phase flow in hydraulic jump*. J. Hydraulics Division, V. 100, no. HY1, p.137-149.

TEIXEIRA, E. D. (2003). “*Previsão dos valores de pressão junto ao fundo em bacias de dissipação por ressalto hidráulico*”. 113 f. Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do rio Grande do Sul, Porto Alegre.

TOSO, J. W. (1986). “*The magnitude and extent of extreme pressure fluctuations in the hydraulic jump*”. 163 p. Tese de Doutorado - Minnesota University.

TRIERWEILER, E. F. N. (2006). “*Avaliação do campo de pressões em ressalto hidráulico formado à jusante de uma comporta com diferentes graus de submergência*.” 174 f. Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do rio Grande do Sul, Porto Alegre.