

Avaliação das Flutuações de Pressão em Ressalto Hidráulico pela Dissociação de Esforços

Evaluation of Pressure Fluctuation in Hydraulic Jump by Dissociation of Hydraulic Forces

Mauricio Dai Prá¹, Priscila dos Santos Priebe², Eder Daniel Teixeira³ e Marcelo Julian Marques⁴

^{1,2} Centro de Desenvolvimento Tecnológico da Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS, Brasil

mdaipra@gmail.com; priscilaspriebe@gmail.com

^{3,4} Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil

eder.teixeira@ufrgs.br, mmarques@iph.ufrgs.br

Recebido: 02/09/15 - Revisado: 20/10/15 - Aceito: 10/11/15

RESUMO

O ressalto hidráulico é um fenômeno muito utilizado para dissipar energia a jusante de estruturas hidráulicas em virtude das suas características bifásicas e macroturbulentas, associadas a intensas flutuações de pressão, velocidade e nível. Estas variações bruscas de flutuação de pressão podem causar danos nas bacias de dissipaçāo por ressalto hidráulico, tais como: erosão decorrente de cavitação, sobrelevação das lajes de fundo. Portanto o conhecimento do comportamento das flutuações de pressões ao longo do ressalto hidráulico é fundamental para a busca de soluções seguras e econômicas. Este trabalho tem por objetivo identificar e prever as características das flutuações de pressões junto ao fundo de uma bacia de dissipaçāo, a partir de uma abordagem que considera o ressalto hidráulico como uma composição de efeitos hidráulicos identificados individualmente com distintas condições de escoamento. Para isso, foi realizado o monitoramento e análise das distribuições de pressão em termos médios, suas flutuações e seu valores extremos junto aos contornos sólidos. A abordagem se mostrou eficaz para a compreensão do fenômeno permitindo a estimativa de valores para as diferentes condições de contorno.

Palavras Chave: Estruturas hidráulicas. Flutuação de pressão. Dissipadores de energia.

ABSTRACT

Hydraulic jump is a phenomenon largely used to dissipate energy downstream of hydraulic structures due to their biphasic and macroturbulent characteristics, associated with intense pressure, velocity and level fluctuations. These sudden pressure variations can cause damage to stilling basins, such as: cavitation erosion and superelevation of the floor slabs. Therefore, it is essential to know the behavior of pressure fluctuations along the hydraulic jump to look for safe and economic solutions. This work aims to identify and predict the characteristics of pressure fluctuations, at the bottom of the stilling basin, considering the hydraulic jump as a sum of hydraulic effects individually identified with distinct flow conditions. To do so, the pressure distribution was monitored and analyzed on average terms, and its fluctuations and extreme values along the solid outlines. The approach proved effective for the comprehension of the phenomena allowing the estimation of values for different outline conditions.

Keywords: Hydraulic structures. Pressure fluctuation. Energy dissipators.

INTRODUÇÃO

O ressalto hidráulico é um dos fenômenos mais interessantes e fascinantes da engenharia hidráulica. Esse fenômeno apresenta características bifásicas e macroturbulentas, por isso, é largamente utilizado para dissipar energia, especialmente a jusante de obras hidráulicas tipo descarregadores de superfície ou de fundo.

No que tange às aplicações relacionadas à dissipação de energia, as intensas flutuações de pressão e velocidades junto ao fundo, a incorporação de ar e a oscilação desordenada dos níveis d'água fazem com que se desenvolva turbulência de grande escala no escoamento.

As bruscas flutuações de velocidade, pressão e nível e a incorporação de ar fazem parte do processo de dissipação de energia, e, portanto, estão relacionados a problemas de fadiga, vibração, cavitação ou subpressão junto à estrutura de concreto. Isso faz com que o conhecimento da dinâmica conjunta das referidas variáveis se torne imprescindível na busca de soluções de engenharia seguras e econômicas.

Este trabalho apresenta parte dos resultados e discussões contidas em Dai Prá (2011), que trata das flutuações de pressão atuantes em bacias de dissipação pela dissociação dos esforços hidráulicos produzidos pelo ressalto hidráulico clássico, pelo afogamento do ressalto, pelo escoamento livre sobre a bacia de dissipação e pelos efeitos produzidos pela curva de concordância vertical entre a calha do vertedouro e o dissipador de energia.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O conhecimento das flutuações de pressão no ressalto hidráulico, mesmo quando auferidas em laboratório, fornece informações importantes para o projeto de estruturas hidráulicas, bem como auxilia na compreensão do processo de dissipação de energia ao longo da estrutura.

As flutuações de pressão verificadas no ressalto, por serem ocasionadas por um escoamento macroturbulento, podem ser abordadas analiticamente, admitindo-as como resultado de um processo estocástico, estacionário e ergódigo (TENNEKES; LUMLEY, 1972). A natureza aleatória das flutuações faz com que os estudos a seu respeito sejam conduzidos a partir da análise estatística espectral e probabilística das amostras coletadas em laboratório (ou mesmo em protótipo), como sendo a forma analítica mais adequada de representação das pressões do ressalto hidráulico.

Vasiliev e Burkreyev (1967) abordam as características estatísticas das flutuações de pressão na região do ressalto hidráulico através da obtenção de correlações espaço-tempo ao longo do ressalto, assim como estudos acerca da distribuição de frequências a partir de um estudo experimental. Khader e Elango (1974) efetuaram análises estatísticas nas medições de pressão no ressalto hidráulico avaliando a parcela flutuante a partir do coeficiente de pressão (C_p).

Lopardo e Solari (1980), bem como Akbari et al. (1982), avaliaram as flutuações de pressão em ressalto hidráulico formado a jusante de comporta descarregadora de fundo também

a partir deste coeficiente de pressão (C_p), no qual os autores constatam o comportamento decrescente dos coeficientes de pressão com o aumento do número de Froude.

Lopardo (1986) apresenta estudo experimental visando identificar a influência das condições de entrada no ressalto sobre as flutuações de pressão. Dentre outras conclusões, os autores destacam:

i) O comportamento dos coeficientes de pressão difere nas condições a jusante de vertedouro e a jusante de comporta, a partir da detecção de valores máximos para distintos números de Froude em cada situação.

ii) O comportamento do coeficiente de assimetria indicou que no ressalto a jusante de vertedouros, o descolamento do fluxo com relação ao fundo ocorre antes do que num ressalto formado a jusante de uma comporta.

iii) Os autores verificaram que a estrutura macroturbulenta varia de acordo com as condições de entrada do escoamento no ressalto.

Toso e Bowers (1988) mostraram que dependendo das condições de entrada do escoamento no ressalto hidráulico, tanto as flutuações quanto os valores extremos sofrem alterações. Além disso, confirmam que a distribuição de probabilidades das flutuações de pressão difere da lei normal, conforme afirmado por outros autores. Pinto et al. (1988), analisando as flutuações de pressão em ressaltos hidráulicos livres e afogados a jusante de vertedouros, observam, dentre outras questões, que as frequências de pico associadas às flutuações de pressão decrescem com o aumento do afogamento.

Fiorotto e Rinaldo (1992) conduziram experimentos para avaliar o comportamento do piso na presença de pulsões de pressão e na quantificação do desenvolvimento e propagação das pressões na face inferior das lajes, enfatizando suas avaliações na distribuição espacial de flutuações, culminando com o estabelecimento de critérios de projeto para as dimensões das lajes de fundo, a partir das forças de arrancamento determinadas.

Marques et al. (1996) comentam que as distribuições de pressão junto ao fundo do ressalto hidráulico não podem ser descritas por uma lei que segue uma distribuição normal, tendo em vista que os valores dos coeficientes de assimetria e curtose encontrados nas amostras de pressões são distintos daqueles esperados em uma lei gaussiana. Os mesmos autores sugerem a adoção de novas relações adimensionais para caracterização das pressões médias (Equação 1) e flutuantes (Equação 2) como forma de uniformizar os resultados experimentais de diferentes estudos.

$$\frac{P_X/\gamma - Y_1}{Y_2 - Y_1} = f_1 \left(\frac{X}{Y_2 - Y_1} \right) \quad (1)$$

$$\left(\frac{\sigma_X/\gamma}{Ht} \right) \left(\frac{Y_2}{Y_1} \right) = f_2 \left(\frac{X}{Y_2 - Y_1} \right) \quad (2)$$

Em que:

Y_1 e Y_2 = alturas conjugadas rápida e lenta do ressalto hidráulico, respectivamente.

P_X/γ = carga de pressão média verificada em um ponto distante X unidades do início do ressalto hidráulico,

σ_x/γ = desvio padrão da amostra de cargas de pressões em um ponto de coordenada X a jusante do início do ressalto,

Ht = perda de carga total ao longo do ressalto hidráulico, e

f_1 e f_2 = funções de ajuste.

Os dados de pressão obtidos por Marques (1995), Endres (1990) e Pinheiro (1995) estão adimensionalizados a partir da proposta de Marques et al. (1996) quanto aos seus valores médios e flutuantes (Figura 1).

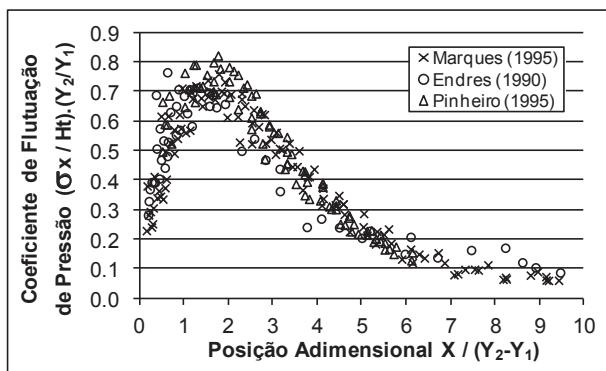


Figura 1 - Flutuações de pressão adimensionalizadas segundo Marques et al. (1996)

Considerando que a flutuação de pressão em um ressalto hidráulico seja um fenômeno estacionário e ergódigo, Marques et al. (1996) afirmam que se pode estimar os esforços com certa probabilidade de ocorrência ($P_{X\%}$) a partir do conhecimento da pressão média (P_x) e da flutuação de pressão – desvio padrão (σ_x), sendo esta ponderada por um coeficiente

$$P_{X\%} = P_x \pm N \cdot \sigma_x \quad (3)$$

adimensional (N), de acordo com a Equação 3.

Segundo Ortiz et al. (1998), o ressalto hidráulico é um fenômeno caracterizado por baixas frequências e grandes amplitudes de flutuação de pressão. O autor salienta que a medição em protótipo ao longo da bacia permite a avaliação criteriosa dos momentos estatísticos, das funções de autocorrelação, das correlações cruzadas, dos espectros de potência e dos espectros cruzados entre os valores de pressão obtidos. Essas informações permitem acompanhar o desenvolvimento do rolo na bacia, o comportamento dos picos, a duração e o tamanho das maiores escalas de turbilhões e a possível distribuição de probabilidade de pressões flutuantes.

Marques et al. (1999), visando uniformizar dados de ressaltos hidráulicos tipos A (ressalto clássico) e B (ressalto afogado), sejam eles oriundos de modelos físicos ou de protótipos, propõem a utilização do fator de submergência (S) (Equação 4) nas adimensionalizações das pressões médias e flutuantes, partindo da consideração de que a geometria de fundo do canal a jusante da formação do ressalto não altera significativamente os adimensionais da flutuação de pressão. Então a Equação 1, é reescrita, conforme Equação 5, e a Equação 2 assume a forma da Equação 6.

$$S = \frac{T_w}{Y_2} \quad (4)$$

$$\Psi = \left(\frac{P_x/\gamma - Y_1}{Y_2 - Y_1} \right) \left(\frac{Y_2}{T_w} \right) \quad (5)$$

$$\Omega = \left(\frac{\sigma_x/\gamma}{Ht} \right) \left(\frac{Y_2}{Y_1} \right) \left(\frac{Y_2}{T_w} \right) \quad (6)$$

$$\Gamma = \left(\frac{X}{Y_2 - Y_1} \right) \quad (7)$$

Onde:

T_w = altura d'água na saída do ressalto hidráulico submerso.

Armênio et al. (2000) comentam que as flutuações de pressão podem ser responsáveis pela desestabilização dos blocos da laje, ocasionando colapso dos mesmos. Do ponto de vista estrutural da bacia de dissipação, os autores afirmam:

- i) que a pulsação de pressão pode danificar as juntas entre as lajes provocando a propagação de valores extremos de pressão para a face inferior;
- ii) que a diferença instantânea entre a pressão total atuando superior e inferiormente à laje pode ocasionar, eventualmente, uma força total de sustentação que exceda o peso da laje, e
- iii) que a estrutura espacial instantânea das flutuações de pressão representa um importante papel na magnitude das forças de sustentação em toda a estrutura.

Teixeira (2003) apresenta ajuste matemático para os dados experimentais de pressões médias e flutuantes coletadas por diversos autores em ressalto hidráulico a jusante de vertedouros, seguindo a proposta de Marques et al. (1999).

Teixeira (2008) conduz trabalho analítico acerca dos efeitos de escala verificados sobre as características internas de ressaltos hidráulicos tipo B a partir da utilização de resultados experimentais de 4 estruturas com escalas distintas do sistema de dissipação de energia da UHE Porto Colômbia: protótipo, 1:100, 1:50 e 1:32. Dentre as diversas conclusões do autor, destaca-se que as flutuações de pressão no protótipo e nos modelos apresentam um mesmo padrão de desenvolvimento ao longo do ressalto hidráulico no trecho plano da bacia de dissipação, podendo considerar que não existe efeito de escala significativo na flutuação de pressão, o que indica que o processo de dissipação de energia ocorre de maneira idêntica em protótipo e modelos.

MATERIAIS E MÉTODOS

Instalação Experimental

Os trabalhos experimentais foram desenvolvidos no Laboratório de Hidráulica Experimental e Recursos Hídricos da

Eletrobrás-Furnas (LAHE/FURNAS), situado em Jacarepaguá, no Rio de Janeiro/RJ.

O ponto de partida desta investigação experimental foi um modelo físico bidimensional em escala geométrica na razão de 1:32 da estrutura de descarga e dissipação de energia da UHE Porto Colômbia. Esse modelo foi modificado a partir da retirada dos pilares que individualizavam os vãos das comportas, que por sua vez foram também retiradas, restando um perfil vertente livre com toda a largura do canal de ensaios.

A Tabela 1 apresenta o resumo das características do canal de ensaios e do modelo físico utilizado neste estudo.

Medição das Flutuações de Pressão

As flutuações de pressão foram obtidas experimentalmente, visando, inicialmente, validar as características internas (junto ao fundo) do ressalto hidráulico e posteriormente individualizar os esforços de pressão induzidos pelas diferentes

condicionantes hidráulicas avaliadas neste trabalho. Essas variáveis também foram utilizadas para verificação da posição do fim do rolo e da influência do ressalto hidráulico, seguindo a proposta de Marques et al. (1996), que associa a estas seções transversais características, padrões de comportamento das pressões atuantes junto ao fundo da estrutura.

As pressões flutuantes e extremas foram tomadas nas 14 primeiras posições (P1 a P14), tendo em vista a disponibilidade de instrumentação do LAHE/FURNAS para a condução deste estudo (Figura 2). As amostras de pressão adquiridas experimentalmente foram coletadas com transdutores de pressão operando à taxa de 500 Hz com 10 minutos de duração e de forma simultânea para as 14 tomadas de pressão. Os dados de pressões flutuantes e extremas foram adquiridos a partir do sistema utilizado pelo LAHE/FURNAS, que consiste, fundamentalmente, em um conjunto composto por um computador de padrões industriais e um sistema de aquisição de dados externo ao computador.

Tabela 1 – Resumo das características do modelo físico

Característica	Dimensão
Volume da cuba de tranquilização (m ³)	15
Comprimento total da bacia de dissipação (m)	12
Comprimento da zona de medição na bacia de dissipação (m)	3,250
Largura do canal de aproximação e da bacia de dissipação (m)	1,150
Desnível entre a soleira do vertedouro e a bacia de dissipação (m)	0,563
Desnível entre a soleira do vertedouro e o piso do canal de aproximação (m)	0,375
Equação do perfil vertente tipo Scimemi (m)	$Y = -0,9686 \cdot X^{1,85}$
Raio da curva de concordância vertical (m)	0,390
Concordância entre o perfil vertente e plano horizontal da bacia de dissipação (graus)	45°

Quadro 1 - Condições de ensaio impostas no modelo físico

Vazão Unitária (m ³ /s/m)	Fr ₁	S	Vazão Unitária (m ³ /s/m)	Fr ₁	S	Vazão Unitária (m ³ /s/m)	Fr ₁	S
0,043	9,26	1,00	0,062	7,53	1,00	0,087	6,90	1,00
	7,56	1,09		7,20	1,09		5,71	1,09
	7,79	1,15		6,43	1,19		5,09	1,17
	6,73	1,26		5,43	1,31		4,87	1,30
	6,21	1,35		5,53	1,44		4,33	1,42
	6,00	1,56		4,75	1,62			
	5,14	1,73						
Vazão Unitária (m ³ /s/m)	Fr ₁	S	Vazão Unitária (m ³ /s/m)	Fr ₁	S	Vazão Unitária (m ³ /s/m)	Fr ₁	S
0,130	5,74	1,00	0,174	4,97	1,00	0,217	4,38	1,00
	4,91	1,09		4,34	1,09		3,72	1,12
	4,42	1,17		3,95	1,18		3,45	1,18
	3,91	1,31		3,41	1,32			
	3,52	1,41						

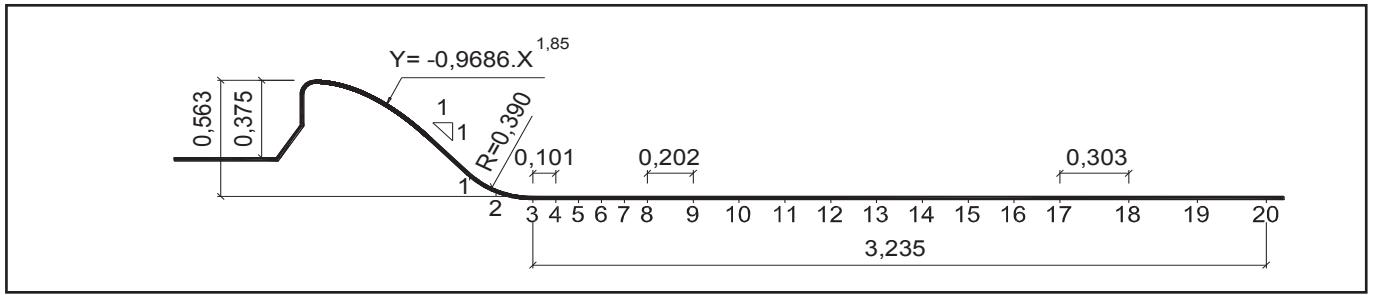


Figura 2 - Posição das tomadas de pressão ao longo da bacia de dissipação

As condições de ensaio impostas ao longo dos experimentos tiveram como objetivo fundamental a coleta de dados médios (pressões e níveis da superfície livre da água), flutuantes e extremos (pressões) para distintas condições hidráulicas, conforme Quadro 1.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados relativos às flutuações de pressão (σ_x) obtidas neste estudo, para as condições de ressalto hidráulico livre, foram comparados com os resultados experimentais de Marques (1995), Endres (1990) e Pinheiro (1995), conforme Figura 3.

A alteração na tendência verificada na região de maior dispersão, em torno da posição adimensionalizada 2, se deve, possivelmente, pela medição da altura conjugada rápida do ressalto hidráulico. Especialmente para elevados números de Froude, a lâmina d'água assume valores bastante reduzidos e qualquer pequena diferença quando da medição da altura conjugada rápida (Y_1), efetuada com uma ponta limimétrica, representa um valor significativo no parâmetro adimensional da flutuação de pressão.

Os reflexos decorrentes de alguma pequena diferença na medição de Y_1 também se manifestam sobre o parâmetro adimensional da posição ao longo do ressalto hidráulico, o que pode explicar a defasagem dos dados experimentais deste estudo frente aos resultados dos demais autores.

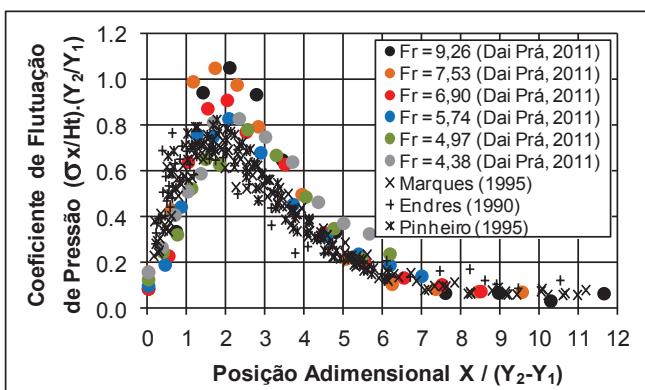


Figura 3 - Flutuações de pressão adimensionais do ressalto hidráulico livre

Avaliam-se também as flutuações de pressão obtidas neste estudo frente aos dados de diferentes autores (Figura 4)

obtidos em ressaltos hidráulicos tipo A, tanto a jusante de comportas como a jusante de vertedouros, a partir do coeficiente de pressão (C_p) apresentado na Equação 8.

$$C_p = \left(\frac{\sigma_x/\gamma}{V_1^2/2g} \right) \quad (8)$$

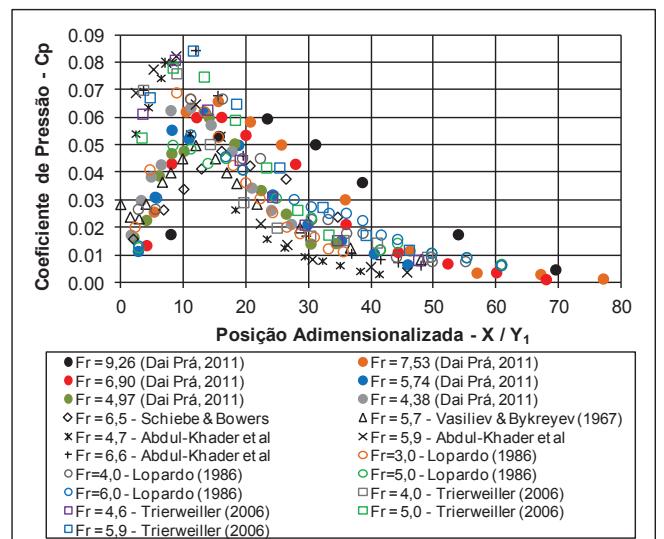


Figura 4 - Análise comparativa do coeficiente de pressão

Apesar da dispersão verificada na Figura 4, percebe-se que os dados deste trabalho seguem a tendência geral identificada pelos demais autores utilizados nessa análise comparativa. A exceção pode ser feita por conta dos coeficientes de pressão para números de Froude maiores do que 7,5, que se por um lado se distanciam da tendência geral, por outro não podem ser comparados diretamente pela inexistência de dados experimentais com números de Froude desta magnitude.

Observa-se, ainda, a grande dispersão verificada entre as posições adimensionalizadas 0 e 20, justamente onde estão identificados os máximos coeficientes de pressão.

A partir deste ponto, são apresentadas as características flutuantes das pressões atuantes junto ao piso de uma bacia de dissipação. Tal análise foi conduzida por uma abordagem que considera o ressalto hidráulico como uma sobreposição de efeitos hidráulicos avaliados individualmente a partir de distintas condições de escoamento.

Avaliação das Flutuações de Pressão na Condição de Escoamento sem a Formação do Ressalto Hidráulico

No que tange à avaliação das flutuações de pressão, tanto ao longo da curva de concordância quanto ao longo da bacia de dissipação, cabe salientar, inicialmente, que as amplitudes médias das flutuações de pressão verificadas experimentalmente apresentaram valores bastante diminutos, da mesma ordem de grandeza da incerteza de medição dos transdutores de pressão utilizados neste estudo, com exceção dos resultados experimentais verificados no centro da curva de concordância, que assumem valores superiores.

Procede-se, então, a referida avaliação a partir da adimensionalização das flutuações de pressão de forma semelhante àquela apresentada por LinFu e Jie (1985) quando da análise das pressões médias. Salienta-se, contudo, que nesta análise as flutuações estão sendo avaliadas de forma global, não conduzindo nenhum tipo de separação de efeitos como aqueles realizados na avaliação das pressões médias, quando as parcelas hidrostática e devida à força centrífuga foram consideradas separadamente.

A Equação 9 representa a razão entre a flutuação de pressão no ponto em análise e a energia disponível a montante.

$$C_{\sigma} = \frac{\sigma/\gamma}{H - Y} \quad (9)$$

Onde:

C_{σ} = coeficiente de flutuação de pressão na curva de concordância vertical,

σ/γ = amplitude média da flutuação de carga de pressão no ponto em análise,

H = diferença de cota entre o nível do reservatório e a cota da estrutura de descarga no ponto considerado, e

Y = profundidade do escoamento no ponto considerado.

A partir disso, os coeficientes de flutuação de pressão (C_{σ}) são correlacionados pelo coeficiente de máxima flutuação de pressão identificada na curva de concordância ($C_{\sigma M}$).

Aqui, cabe ressaltar que as máximas flutuações de pressão foram identificadas no ponto central da curva, não concordando com as afirmações de LinFu e Jie (1985), que registram as flutuações máximas no ponto de tangência entre

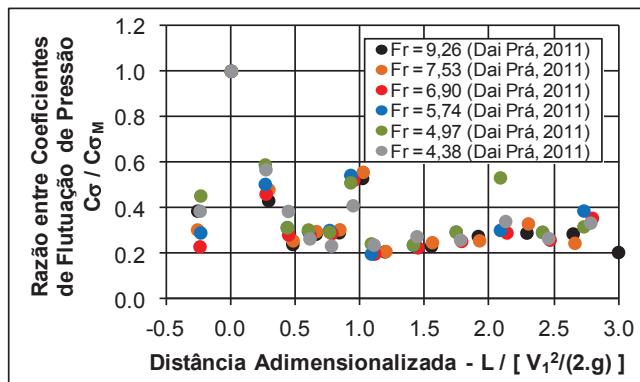


Figura 5 - Comprimento da influência da curva de concordância nas flutuações de pressão

a curva de concordância e a bacia de dissipação. Neste estudo as flutuações de pressão registradas no ponto de tangência representam, em termos médios absolutos, metade daquelas flutuações identificadas no ponto central da curva.

A Figura 5 apresenta, então, a razão entre os coeficientes de flutuação de pressão avaliados ao longo do comprimento longitudinal (L), tendo como posição inicial o centro da curva de concordância vertical, adimensionalizado pela carga cinética do escoamento imediatamente no início da bacia de dissipação.

Pela análise da Figura 5, observa-se um crescimento até o ponto central da curva de concordância a partir do qual a sua influência passa a decrescer até a posição adimensional 0,5. A partir desse ponto, as flutuações de pressão identificadas junto ao fundo estabilizam-se em torno do valor correspondente a 30% das flutuações máximas verificadas no centro da curva de concordância.

A avaliação individualizada do comportamento das flutuações de pressão nas três tomadas de pressão localizadas na curva vertical fica comprometida, especialmente nas seções tangentes, tendo em vista que os valores detectados (da ordem de 1 a 3 mmH₂O) encontram-se dentro da faixa de erro dos transdutores de pressão utilizados nas medições experimentais.

Por outro lado, as flutuações de pressão no ponto central da curva de concordância vertical, e, portanto, as máximas flutuações de pressão, ainda que de pequeno valor absoluto (da ordem de 6mmH₂O), mostraram relação bastante consistente na comparação com a energia cinética do escoamento na saída da curva de concordância.

Na Figura 6 estão apresentados os coeficientes de pressão máxima (Equação 10) detectados experimentalmente.

$$C_{Pmáx} = \frac{\sigma_{Cmáx}/\gamma}{V_1^2/2g} \quad (10)$$

Onde:

$C_{Pmáx}$ = coeficiente de pressão máxima,

$\sigma_{Cmáx}$ = amplitude máxima da flutuação de pressão, e

V_1 = velocidade na seção terminal da curva de concordância vertical.

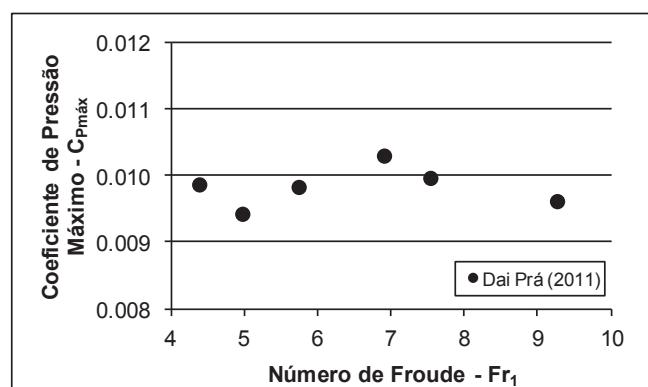


Figura 6 - Flutuação de pressão no ponto central da curva de concordância

Pela avaliação da Figura 6, percebe-se que o máximo coeficiente de pressão verificado no ponto central da curva de

concordância é da ordem de 1% da energia cinética na seção terminal da curva, conforme Equação 11, quando $\epsilon = 0,01$.

$$\frac{\sigma_{Cmáx}}{\gamma} = \epsilon \frac{V_1^2}{2g} \quad (11)$$

Segundo LinFu e Jie (1985), $\epsilon < 0,10$ para as flutuações máximas de pressão que são verificadas na tangente de jusante de curvas de concordância vertais. Os mesmos autores afirmam que em paredes lisas e sem descolamento de fluxo, as flutuações de pressão são da ordem de 5% da energia cinética ($\epsilon = 0,05$) do escoamento.

Observa-se, com isso, que as máximas flutuações de pressão verificadas neste estudo (no ponto central da curva), são coerentes com aquelas apresentadas pelos referidos autores por serem inferiores a 10% da energia cinética, entretanto apresentam valores bastante inferiores àqueles previstos por LinFu e Jie (1985), da ordem de 5% no extremo de jusante da curva.

Cabe salientar, por fim, que as flutuações de pressão detectadas neste estudo no extremo de jusante da curva de concordância vertical apresentaram valores em média equivalentes à 0,5% da energia cinética do escoamento.

Com a realização da análise da região de influência da curva de concordância vertical sobre as pressões médias e flutuantes ao longo da bacia de dissipação, conclui-se a primeira etapa, dentre as quatro que este estudo se propõe a investigar individualmente, visando à descrição dos efeitos de pressão devidas ao ressalto hidráulico afogado (tipo B) sobre uma bacia de dissipação.

Com a identificação do final da influência da curva vertical de concordância entre o perfil vertente e a bacia de dissipação, obtém-se um trecho no qual se admite que as flutuações de pressão assumem comportamento semelhante àquele verificado no escoamento em regime rápido.

Conduziu-se, então, a avaliação das flutuações de pressão ao longo do escoamento, novamente de acordo com os adimensionais propostos por Marques et al. (1996), com os mesmos objetivos de uniformizar a apresentação dos dados, especialmente no eixo das abscissas, visando, posteriormente, a sua aplicação imediata no método da superposição de efeitos proposta neste estudo.

Para tanto, na elaboração da Figura 7, foram utilizados os valores experimentais de perda de carga no ressalto hidráulico tipo A (H_t) e as alturas conjugadas (Y_2 e Y_1). Salienta-se que no escoamento livre tais características têm relevância pouco significativa, contudo ainda assim trata-se de um esforço que pode ser dissociado dos demais a serem apresentados no decorrer deste trabalho.

A partir da análise da Figura 7, admite-se que o comportamento das flutuações de pressão possa ser representado pela Equação 12. Assume-se, ainda, que tal comportamento pode ser extrapolado para montante, na região de influência da curva vertical, onde não é possível adquirir experimentalmente valores livres desta influência.

$$\left(\frac{\sigma_x/\gamma}{H_t}\right)\left(\frac{Y_2}{Y_1}\right) = 0,0038\left(\frac{X}{Y_2 - Y_1}\right) + 0,0233 \quad (11)$$

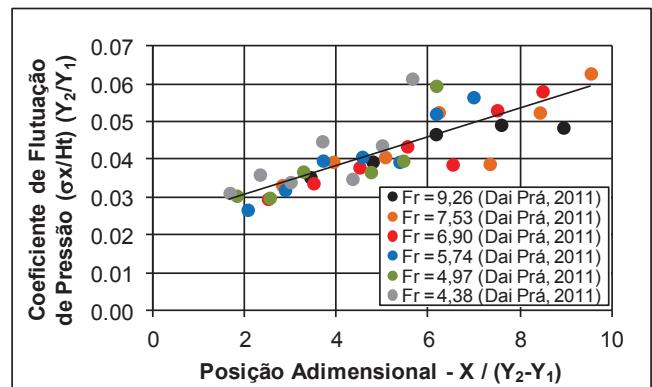


Figura 7 - Comportamento das flutuações de pressão identificadas ao longo da bacia de dissipação, longe da região de influência da curva de concordância vertical

Conduzindo, agora, a avaliação da amplitude média das flutuações de pressão ao longo da bacia de dissipação sobre a qual ocorre escoamento em regime rápido (a jusante da região de influência da curva de concordância), identifica-se pela Figura 8 a tendência crescente no comportamento do coeficiente de pressão tradicional (C_p) com a magnitude dos mesmos, não ultrapassando a 0,5% ($\epsilon=0,005$) da energia cinética do escoamento imediatamente a jusante da curva de concordância vertical, para os pontos de medição deste estudo.

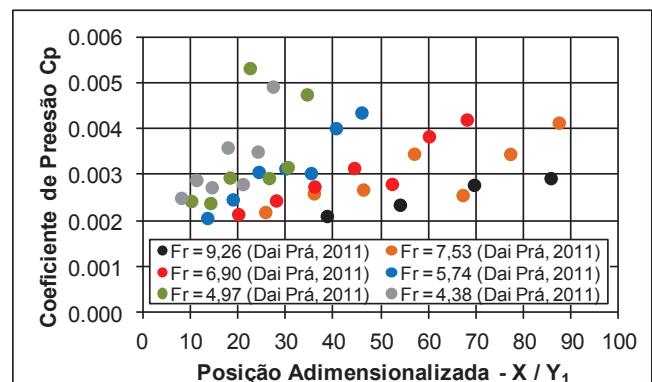


Figura 8 - Comportamento dos coeficientes de pressão (C_p) identificados ao longo da bacia de dissipação, longe da região de influência da curva de concordância vertical

Verifica-se que para escoamentos com menor número de Froude, as flutuações de pressão junto ao piso da bacia de dissipação tendem a crescer mais acentuadamente do que em escoamentos com maior número de Froude. Isso pode ser atribuído ao efeito da propagação das flutuações de pressão para posições mais a jusante, especialmente em escoamentos com maior velocidade média, e, portanto, maior instabilidade junto ao contorno sólido.

Avaliação das Flutuações de Pressão na Condição de Formação do Ressalto Hidráulico Livre

As flutuações de pressão foram adimensionalizadas a partir da proposta de Marques et al. (1996), considerando, contudo, a diferença entre as flutuações de pressão no ressalto hidráulico livre e as flutuações de pressão detectadas no escoamento livre.

Objetiva-se, com isso, avaliar isoladamente as flutuações induzidas junto ao fundo da bacia de dissipação exclusivamente como efeito macroturbulento do ressalto hidráulico tipo A.

Na consideração adimensional, conforme Equação 13, a presença dos efeitos da curva de concordância vertical nas flutuações de pressão já estão consideradas quando da utilização dos valores obtidos a partir do escoamento livre (σ_{XL}).

$$\Omega_R = \left(\frac{\sigma_X/\gamma - \sigma_{XL}/\gamma}{Ht} \right) \left(\frac{Y_2}{Y_1} \right) \quad (13)$$

onde:

σ_X = flutuação de pressão junto ao fundo da bacia de dissipação devida ao ressalto hidráulico tipo A,

σ_{XL} = flutuação de pressão junto ao fundo da bacia de dissipação devida ao escoamento livre, incluídos os efeitos da curva de concordância vertical, e

Apresenta-se, então, a Figura 9, na qual podem ser identificados os esforços devidos às flutuações de pressão originadas pelos efeitos macroturbulentos do ressalto hidráulico tipo A.

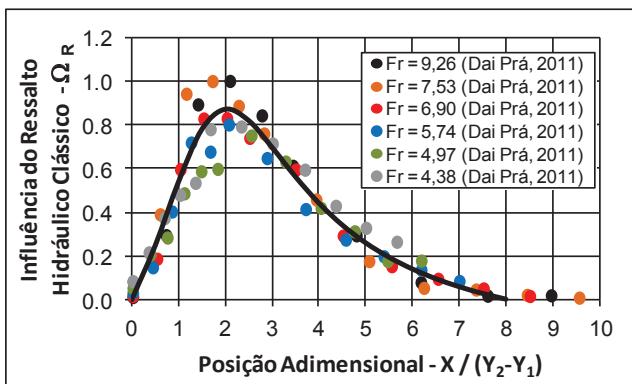


Figura 9 - Influência da macroturbulência do ressalto hidráulico sobre as flutuações de pressão

Pela análise da Figura 9, percebe-se o rápido crescimento das flutuações de pressão induzidas no fundo da bacia de dissipação pela macroturbulência do ressalto hidráulico, a partir do valor zero, uma vez que as flutuações induzidas pela curva de concordância vertical estão descontadas no parâmetro (Ω_R). Esse rápido crescimento atinge valores máximos entre as posições adimensionalizadas 1 e 2, confirmando o comportamento identificado por Marques et al. (1996) quando da sua afirmação de que as máximas flutuações de pressão estavam situadas próximas à posição adimensional 1,75.

A partir da posição de máximas flutuações de pressão, a decomposição de esforços mostra uma clara tendência de decaimento até a completa dissipação ao longo do ressalto hidráulico, na posição adimensional igual a 8, quando as flutuações de pressão devidas exclusivamente aos efeitos macroturbulentos do ressalto hidráulico não se fazem mais presentes.

Na comparação da Figura 9 com a Figura 3, as diferenças são pouco perceptíveis, dadas as diminutas magnitudes das flutuações de pressão. Observa-se, contudo, alguma melhora na

avaliação das máximas flutuações de pressão, ainda que nessa região a dispersão se mantenha elevada, e que os resultados experimentais detectados neste estudo tenham se mostrado superiores àqueles detectados por outros autores.

Efeitos do Afogamento do Ressalto Hidráulico sobre as Flutuações de Pressão

O comportamento das flutuações de pressão induzidas pelo afogamento do ressalto hidráulico foi avaliado conforme a proposta de Marques et al. (1996), associando essas flutuações ao total de energia dissipada no ressalto hidráulico.

Uma vez que este trabalho vem conduzindo a dissociação dos efeitos, será considerada, agora, a diferença entre as flutuações de pressão identificadas experimentalmente entre os ressaltos hidráulicos tipos A e B.

O adimensional apresentado na (Ω_A) tem estreita semelhança com aquele adotado (Equação 14). A diferença substancial é que aqui, onde o interesse reside no afogamento do ressalto, propõe-se a utilização do nível d'água a jusante do mesmo (T_w), ao passo que quando o interesse reside na avaliação do ressalto hidráulico tipo A o parâmetro adotado corresponde à altura conjugada lenta (Y_2), que nada mais é que o nível d'água a jusante do ressalto não afogado.

$$\Omega_A = \left(\frac{\sigma_{XA}/\gamma - \sigma_X/\gamma}{Ht} \right) \left(\frac{T_w}{Y_1} \right) \quad (14)$$

onde:

σ_{XA} = flutuação de pressão junto ao fundo da bacia de dissipação devida ao ressalto hidráulico tipo B.

σ_X = flutuação de pressão junto ao fundo da bacia de dissipação devida ao ressalto hidráulico tipo A.

Ht = dissipação total de energia ao longo do ressalto hidráulico tipo A.

A Figura 10 apresenta os resultados experimentais deste estudo a partir da proposta adimensional apresentada.

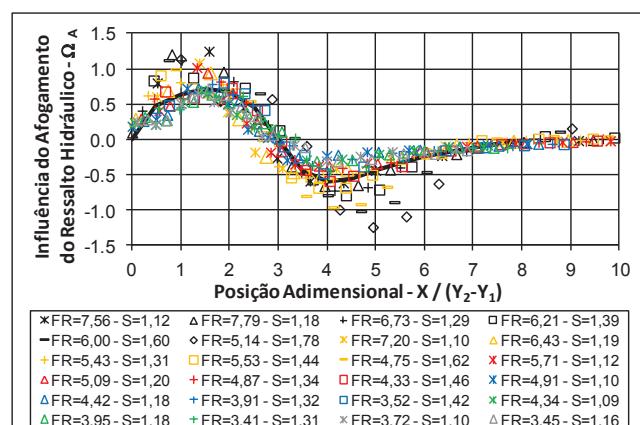


Figura 10 - Influência do afogamento do ressalto hidráulico sobre as flutuações de pressão

O afogamento do ressalto provoca, inicialmente, um acréscimo nas flutuações de pressão, atingindo o valor máximo entre as posições adimensionalizadas $\Gamma = 1$ e $\Gamma = 2$. Tal comportamento vem ao encontro do que se verifica no ressalto hidráulico tipo A quando da avaliação das pressões flutuantes.

Após esse valor máximo, o afogamento passa a ter sua influência reduzida, mas ainda no sentido de ampliar as flutuações de pressão até a posição adimensional $\Gamma = 3,0$, onde o comportamento dos ressaltos tipos A e B são idênticos. A partir desse ponto, o afogamento atua como agente redutor das flutuações presentes no ressalto tipo A, aumentando gradativamente a atenuação até o máximo identificado entre as posições adimensionais $\Gamma = 4$ e $\Gamma = 5$.

A partir desse ponto as flutuações tendem ao comportamento semelhante ao ressalto tipo A, culminando com o final da influência do afogamento na posição adimensional $\Gamma = 8$, onde cessa a transição do regime, conforme pode também ser constatado pela análise da Figura 3.

A Equação 15 ($R^2=0,8035$) representa o ajuste matemático dos dados experimentais apresentados na Figura 10, reforçando a ideia de que esse ajuste serve como indicativo do comportamento médio das flutuações de pressão atribuídas exclusivamente ao afogamento do ressalto hidráulico.

$$\Omega_A = \left(\frac{2,002 \cdot \Gamma - 0,908 \cdot \Gamma^2 + 0,080 \cdot \Gamma^3}{1 + 1,866 \cdot \Gamma - 1,228 \cdot \Gamma^2 + 0,211 \cdot \Gamma^3} \right) \quad (15)$$

Pela análise da Figura 10 pode-se perceber que para situações com maior afogamento (S) os resultados experimentais tendem a se afastar da Equação 15, principalmente nas posições de máxima e mínima influência do afogamento do ressalto hidráulico.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo deste trabalho é avaliar as pressões médias, flutuantes e extremas atuando junto ao piso de bacias de dissipação por ressalto hidráulico, a partir de uma abordagem que considera o ressalto hidráulico como uma composição de efeitos hidráulicos identificados individualmente tendo por base distintas condições de escoamento.

Efeitos da Curva de Concordância Vertical

Verificou-se que a influência da curva de concordância vertical entre o perfil vertente e a bacia de dissipação, tanto para as pressões médias quanto para as flutuações de pressão, cessam na mesma posição.

As flutuações máximas de pressão foram identificadas no centro da curva de concordância vertical, e assumem valores da ordem de 1% da energia cinética do escoamento no ponto de tangência terminal da curva.

Efeitos do Escoamento Livre sobre a Bacia de Dissipação

As flutuações de pressão induzidas pelo escoamento em regime rápido apresentaram-se bastante diminutas, não excedendo a 0,5% da energia cinética do escoamento no ponto de tangência terminal da curva, contudo apresentando crescimento de montante para jusante.

Efeitos do Ressalto Hidráulico Livre (Tipo A)

As flutuações de pressão atribuídas à transição de regime foram avaliadas pela diferença entre os valores flutuantes verificados no ressalto livre e aqueles verificados no escoamento livre sobre a curva de concordância e bacia de dissipação. A adimensionalização desta diferença pela dissipação total de energia ao longo do ressalto hidráulico, aplicando a abordagem de Marques et. al. (1996) aos efeitos dissociados, mostrou melhor agrupamento dos resultados experimentais, especialmente nas seções iniciais do ressalto hidráulico.

Confirma-se que as máximas flutuações de pressão, ainda que dispersas, ocorrem, em média, na posição adimensional $\Gamma = 1,75$, quando as mesmas passam a decrescer em direção ao final da transição do regime.

O ajuste polinomial proposto representa apenas uma estimativa média do comportamento longitudinal das flutuações de pressão, devendo ser utilizado com critério tendo em vista a dispersão dos resultados experimentais aqui apresentados.

Efeitos do Afogamento do Ressalto Hidráulico

Quanto às flutuações de pressão, o afogamento apresentou máxima influência na região onde se identificou, também, a máxima flutuação de pressão do ressalto hidráulico livre. A partir desse ponto a influência passa a diminuir até a posição adimensional $\Gamma = 3$, quando passa a amortecer as flutuações verificadas no ressalto hidráulico livre. A influência do afogamento segue amortecendo as flutuações até o final do ressalto hidráulico, atingindo o máximo amortecimento na posição adimensional $\Gamma = 4$.

AGRADECIMENTOS

À Eletrobrás-Furnas a partir do projeto de Pesquisa e Desenvolvimento “Análise da Macroturbulência em Dissipadores de Energia por Ressalto Hidráulico”, inserido no programa de P&D ANEEL.

REFERÊNCIAS

ARMÉNIO, V.; TOSCANO, P; FIOROTTO, V. On the effects of a negative step in pressure fluctuations at the bottom of a hydraulic jump. *Journal of Hydraulic Research*, v. 38, n. 5, p. 359-368, Sept. 2000

Akbari, M. E.; Mittal, M. K.; Pande, P. K. Pressure fluctuations on the floor of free and forced hydraulic jumps. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE HYDRAULIC MODELLING OF CIVIL ENGINEERING STRUCTURES, 1982, Coventry, England. *Proceedings...* Coventry, 1982. C1, p. 87-96.

DAI PRÁ, M. *Uma abordagem para determinação das pressões junto ao fundo de dissipadores de energia por ressalto hidráulico.* 2011. 207 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Instituto de Pesquisas Hidráulica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

ENDRES, L. A. M. *Contribuição ao Desenvolvimento de um Sistema para Aquisição e Tratamento de Dados de Pressões Instantâneas em Laboratório.* 1990. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos) - Instituto de Pesquisas Hidráulica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1990.

FIOROTTO, V.; RINALDO, A. Fluctuating uplift and linings design in spillway stilling basins. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 118, n. 4, p. 578-596, apr. 1992.

KhADER, M. H. A.; ELANGO, K. Turbulent pressure field beneath a hydraulic jump. *Journal of Hydraulic Research*, v. 12, n. 4, p. 469-489, oct. 1974.

LINFU, Z.; JIE, X. *Estudo das Características Hidráulicas e de Cavitação de Curvas Verticais em Canais considerando o escoamento bidimensional.* Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1985. 22 p., il. (ICT Informação Técnica Hidráulica Tradução 803). Tradução de: J. A. Pinto de Campos do original chinês.

LOPARDO, R. A.; SOLARI, H. G. Flutuaciones de presión en la base de resalto libre. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, 9, 1980, Mérida. *Memorias...* Mérida: IAHR, 1980. p. 69-78.

LOPARDO, R. A. Notas sobre fluctuaciones macroturbulentas de presión, medición, análisis y aplicación al resalto hidráulico. In: *Revista Latinoamericana de Hidráulica.* São Paulo: Escola Politécnica. 44p.

MARQUES, M. G. *Nouvelle approche pour le Dimensionnement des Dissipateurs à Auge.* 1995. 221 f. Tese (Doutorado em Département de Génie Civil) - Faculte de Sciences et Genie de la Université Laval, Canadá, 1995.

MARQUES, M. G., DRAPEAU, J. e.; VERRETTE, J. L. Flutuação de pressão em um ressalto hidráulico. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, 17, Guayaquil. *Memórias...* Guayaquil: IAHR, 1996. p. 1-11.

MARQUES, M. G.; ALMEIDA, F. M.; ENDRES, L. A. M. Adimensionalização de pressões médias em bacias de dissipação por ressalto hidráulico. In: SIMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 13, Belo Horizonte. *Anais...* Belo

Horizonte: ABRH, 1999. CD-ROM.

ORTIZ, J. P.; ALMEIDA, F. M.; CARVALHO, E.; BORSARI, R. D. Mediçãoes em protótipo de flutuações de pressão na bacia de dissipação da usina de Porto Colômbia. In: ESCOLA PRIMAVERA TRANSIÇÃO E TURBULÊNCIA, 1, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: ABCM, 1998. V. 1, p. 293-320.

PINHEIRO, A. A. N. *Ações hidrodinâmicas em soleiras de bacia de dissipação de energia por ressalto.* 1995. 362 f. Ph. D. tesis (Doutoramento em Engenharia Civil) - Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 1995.

PINTO, L. C. S.; VASCONCELLOS, J. E.; SEYSEL, R. L. Análise experimental da flutuação de pressão na base de um ressalto livre e afogado. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, 13, Habana. *Memorias...* Havana: IAHR, 1988. v. 2, p. 182-194.

TENNEKES, H.; LUMLEY, J. L. *A First Course in Turbulence.* London: The MIT Press, 1972.

TOSO, J. E.; BOWERS, E. C. Extreme pressure in hydraulic jump stilling basins. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 114, n. 8, p. 829-843, Aug. 1988.

TEIXEIRA, E. D. *Previsão dos valores de pressão junto ao fundo em bacias de dissipação por ressalto hidráulico.* 2003. 116 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

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

VASILIEV, O. F.; BURKREYEV, V. I. Statistical characteristics of pressure fluctuations in the region of hydraulic jump. In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR HYDRAULIC RESEARCH, 12, Fort Collins. *Proceedings...* Fort Collins: IAHR, 1967. v. 2, p. 1-8

Contribuições dos autores:

Mauricio Dai Prá: Coleta, organização e análise dos dados; interpretação dos resultados; fechamento do texto.

Priscila dos Santos Priebe: Análise dos dados; interpretação dos resultados; redação, organização e fechamento do texto.

Eder Daniel Teixeira: Interpretação dos resultado; fechamento do texto.

Marcelo Julian Marques: Interpretação dos resultados; fechamento do texto.