

Estimativa da Distribuição dos Esforços Hidráulicos sobre Lajes de Bacias de Dissipação

M. G. Marques, A. A. A. Mees, E. D. Teixeira, G. R. Finger, L. A. M. Endres, E. F. N. Trierweiler, M. Dai Prá, A. V. B. Canellas

Resumo - As bacias de dissipação estão sujeitas à ocorrência de elevados gradientes de pressão e de velocidade, em seu interior, durante a operação das mesmas. A intensidade dos esforços resultantes e a sua distribuição espacial são de interesse para o dimensionamento das lajes do piso de maneira a obter estruturas seguras. Portanto, é essencial para o dimensionamento de obras seguras na fase de projeto o conhecimento de métodos de previsão da distribuição destes esforços. O P&D “Análise da Macroturbulência em Dissipadores por Ressalto Hidráulico” desenvolveu um método de previsão baseado em medições feitas em protótipo (UHE Porto Colômbia) e em modelos reduzidos nas escalas 1:100; 1:85 (simplificado), 1:50 e 1:32. Identificou, também, quais as limitações desta previsão em relação às condições de contorno e da escala do modelo reduzido. Este trabalho faz parte de um projeto de P&D realizado em parceria entre Furnas Centrais Elétricas S. A. e o Instituto de Pesquisas Hidráulicas – UFRGS, denominado “Análise da Macroturbulência em Dissipadores por Ressalto Hidráulico”.

Palavras-chave - bacia de dissipação, ressalto hidráulico, flutuação de pressão, pressões extremas.

I. INTRODUÇÃO

O presente estudo faz parte do projeto de Pesquisa e Desenvolvimento intitulado “Análise da Macroturbulência em Dissipadores por Ressalto Hidráulico”, inscrito na ANEEL sob o código 0394-092/2003 para o ciclo 2002-2003 (projeto bianual) e desenvolvido pela parceria entre o Laboratório de Hidráulica Experimental e Recursos Hídricos (LAHE) de Furnas Centrais Elétricas S.A. e o Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

O conhecimento das flutuações de pressão e, mais especificamente, dos valores extremos de pressão que podem ocorrer no interior do ressalto hidráulico são de grande interesse no projeto de estruturas de dissipação de energia. O conhecimento da distribuição longitudinal das pressões médias e seus valores extremos permite uma melhor compreensão do processo de dissipação de energia e do escoamento no interior do ressalto, além de permitir que

se determine condições críticas que possam vir a danificar a obra durante a sua vida útil, ocasionando em redução da geração durante a fase de reparo nos dissipadores de energia.

A maior parte dos estudos realizados trata apenas das características das flutuações de pressões analisadas em relação a valores médios, como em , , , , entre outros, sendo raros os estudos de valores extremos, ou mesmo, determinando para estes as probabilidades de ocorrência, como em , , e , entre outros.

Problemas tais como a cavitação e a sobrelevação das lajes de fundo observados nas estruturas de dissipação de energia por ressalto hidráulico são atribuídos à ocorrência de pressões extremas mínimas. Em função disto torna-se importante conhecer estes valores para que as obras possam ser dimensionadas com segurança.

Tradicionalmente os estudos de bacias de dissipação são realizados utilizando-se modelos reduzidos que são, em um sentido mais amplo, reproduções em menor escala de estruturas reais, nas quais as observações realizadas devem refletir as condições que ocorrem em escala real ou exibir direta similaridade com o problema de engenharia hidráulica. A correspondência entre modelo e protótipo implica em respeitar similaridades geométrica, cinemática e dinâmica. O tempo necessário para a construção e realização de ensaios nesses modelos reduzidos é fator limitante na busca da otimização de projetos e na verificação de todas as condições de operação das estruturas, o que torna essencial a utilização de critérios e metodologias de previsão que possam fornecer valores próximos aos que realmente ocorrerão para que a estrutura a ser testada em laboratório esteja muito perto da solução final.

Os estudos hidráulicos de dissipadores em modelo reduzido aplicam o princípio de semelhança física de Froude, uma vez que os escoamentos, neste caso, são governados, principalmente, por esforços de origem gravitacional e onde a viscosidade tem importância secundária, portanto apresentam uma semelhança incompleta ou relaxada.

A comparação entre modelos e protótipos como realizada nesta pesquisa permite a avaliação de possíveis distorções atribuídas a efeitos de escala o que é de fundamental importância, para o trabalho rotineiro de transpor os resultados de modelo para o protótipo. Apesar do grande interesse envolvido nestas determinações, medições efetuadas em protótipos são raras na literatura, devendo aqui ser destacado o pioneiro trabalho desenvolvido em .

Com esse intuito, o presente trabalho tem como objetivo apresentar uma metodologia para estimar a distribuição dos valores de pressão e as flutuações que podem ocorrer junto ao fundo da bacia de dissipação por ressalto hidráulico. Os

¹ Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL e consta dos Anais do V Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (V CITENEL), realizado em Belém/PA, no período de 22 a 24 de junho de 2009.

²M. G. Marques, A. A. A. Mees, E. D. Teixeira, G. R. Finger, L. A. M. Endres são pesquisadores do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH/UFRGS) (email: mmarques@iph.ufrgs.br, alexandre@mees@gmail.com.br, engeder@terra.com.br, guilherme_finger@hotmail.com, endres@ufrgs.br).

³E.F.N.Trierweiler, M. Dai Prá e A.V.B.Canellas trabalham no Laboratório de Hidráulica Experimental de Furnas Centrais Elétricas (e-mails: edtrier@gmail.com, mdaipra@gmail.com, alba@furnas.com.br).

resultados foram baseados em medições em modelo reduzido na escala 1:100 (Figura 1), escala 1:50 (Figura 2) e escala 1:32 (Figura 3). Também foi utilizado um modelo reduzido simplificado na escala 1:85, no qual não foram representadas as condições topobatimétricas de montante e jusante (Figura 4). Estes modelos foram implantados no Laboratório de Hidráulica Experimental e Recursos Hídricos (LAHE) de Furnas Centrais Elétricas (exceto aquele na escala 1:85) e as medições foram comparadas com os dados de protótipo que foram medidos na bacia de dissipação de energia por ressalto hidráulico da Usina Hidrelétrica de Porto Colômbia, localizada entre Minas Gerais e São Paulo (Figura 5).



Figura 1 – Ressonho hidráulico no modelo reduzido (escala 1:100).

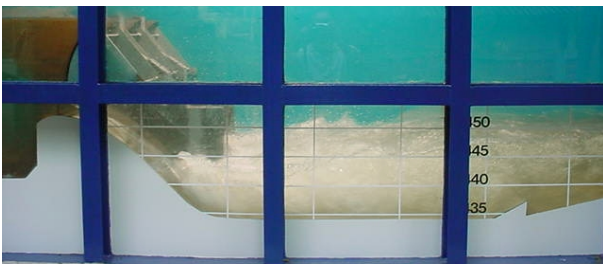


Figura 2 – Ressonho hidráulico no modelo reduzido (escala 1:50).

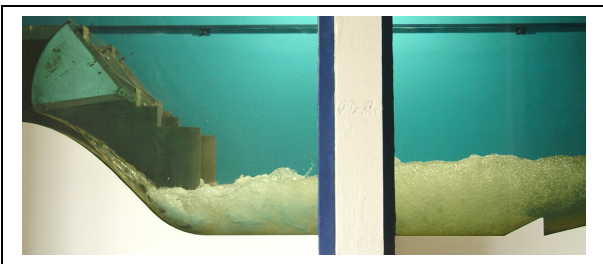


Figura 3 – Ressonho hidráulico no modelo reduzido (escala 1:32).

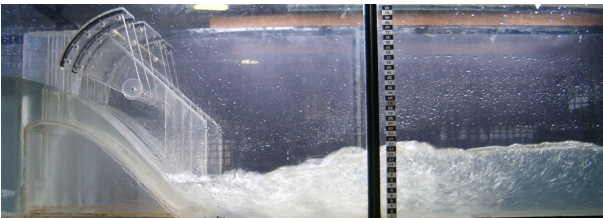


Figura 4 – Ressonho hidráulico no modelo reduzido simplificado (escala 1:85).

II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A maior parte dos trabalhos existentes sobre o assunto aborda o estudo de coeficientes de flutuação de pressão (C_p) para o ressalto hidráulico livre (como em [1], [2], [3] e [4]), sendo

raros os estudos para ressalto afogado do tipo B, conforme [5]. Apenas alguns autores apresentam os valores de pressões com certa probabilidade de ocorrência, podendo-se citar [6] e [7].



Figura 5 - Ressonho hidráulico formado no Protótipo da UHE de Porto Colômbia (vazão de 4000 m³/s).

Segundo [8] as pressões junto ao fundo, ao longo do ressalto hidráulico, são inferiores à correspondente profundidade média do escoamento, podendo ocorrer pressão negativa no fundo do canal ao longo do ressalto hidráulico.

Conforme estudos de [9] e [10] as distribuições de pressões junto ao fundo no interior do ressalto hidráulico não podem ser descritas por uma lei que segue a distribuição normal. Esta afirmação baseia-se em que as distribuições dos coeficientes de assimetria e curtose, verificados ao longo do ressalto, diferem dos valores 0 e 3, respectivamente, atribuídos a uma distribuição normal. Entretanto, segundo [11] nota-se que após o fim da influência do ressalto tais valores são observados.

A Figura 6 apresenta os principais parâmetros considerados na análise dimensional do ressalto hidráulico.

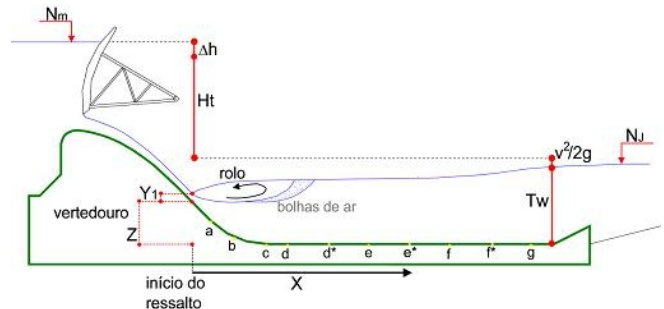


Figura 6 – Parâmetros hidráulicos e geométricos considerados na análise dimensional do ressalto afogado.

As equações (1) a (4) apresentadas por [12] propõem relações adimensionais para representar a pressão média e a flutuação de pressão em uma bacia de dissipação.

$$\psi = \frac{(P_x - Y_l)}{(Y_2 - Y_l)} \cdot \frac{l}{S} \quad (1)$$

$$S = \frac{T_w}{Y_2} \quad (2)$$

onde, Ψ é a pressão média da amostra adimensionalizada, P_x é a pressão média na posição X (m.c.a), Y_1 e Y_2 são as alturas conjugadas do ressalto hidráulico (m), S é o grau de submersão e T_w é a altura de água a jusante (m).

$$\Omega = \frac{\sigma_x}{H_t} \cdot \frac{Y_2}{Y_1} \cdot \left(\frac{I}{S} \right) \quad (3)$$

onde, Ω é a flutuação de pressão da amostra adimensionalizada, σ_x é a flutuação da pressão média (desvio padrão) na posição X e H_t é a perda de energia no ressalto hidráulico.

A referência [1], com base na adimensionalização proposta por [2], sugere que as pressões com diferentes probabilidades de ocorrência junto ao fundo de bacias de dissipação para o ressalto hidráulico livre podem ser estimadas por (4):

$$P_{X\%} = P_X \pm N_{X\%} \cdot \sigma_X \quad (4)$$

onde, $P_{X\%}$ é a pressão com probabilidade de ser inferior ou igual para uma certa posição X (m.c.a.) e $N_{X\%}$ é o coeficiente de distribuição estatística de uma determinada probabilidade para uma certa posição X.

A equação (5) apresenta o ajuste sugerido por [3] para a distribuição longitudinal da pressão média adimensionalizada com base nos dados de [4].

$$\Psi = -0,015 \cdot \Gamma^2 + 0,237 \cdot \Gamma + 0,07 \quad (5)$$

válida para o intervalo o intervalo $0 \leq \Gamma \leq 8,0$, sendo Γ é a posição relativa do início do ressalto, dado por (6).

$$\Gamma = \frac{X}{Y_2 - Y_1} \quad (6)$$

As equações (7) e (8) representam os ajustes propostos por [5] para o desvio padrão adimensionalizado (Ω).

$$\Omega = -0,159 \cdot \Gamma^2 + 0,573 \cdot \Gamma + 0,19 \quad (7)$$

válida para o intervalo $0 \leq \Gamma \leq 2,4$.

$$\Omega = 0,017 \cdot \Gamma^2 - 0,281 \cdot \Gamma + 1,229 \quad (8)$$

válida para o intervalo $2,4 \leq \Gamma \leq 8,25$.

O coeficiente N_X , conforme mostrado por [6] para o ressalto livre para probabilidades entre 1% e 99% de serem iguais ou inferiores varia com a posição relativa no interior do ressalto e pode ser calculado para o ressalto livre através de (9).

$$N_X = a \cdot \Gamma^2 + b \cdot \Gamma + c \quad (9)$$

onde, a, b e c são os coeficientes dependentes da probabilidade de interesse.

Para o trecho plano na bacia de dissipação quando o ressalto hidráulico está afogado, o coeficiente N_X para a probabilidade de 1% de ser inferior é praticamente constante é igual a -2,3 [7]. Estes valores foram obtidos a partir de ensaios em laboratório. Entretanto, [8] sugere que seja adotado, como esforço mínimo, aqueles valores de pressão obtidos em modelos com probabilidade de 0,1%. Essa sugestão foi feita levando-se em conta possíveis efeitos de escala.

III. METODOLOGIA

A. Distribuição longitudinal das pressões mínimas

Baseado nas medições de laboratório e de campo procurou-se analisar o comportamento de diferentes escoamentos, analisando-se a distribuição longitudinal das pressões extremas adimensionalizadas conforme sugerido por [9] e apresentado em (10).

$$\Psi = \left(\frac{P_x - Y_I}{Y_2 - Y_I} \right) \cdot \frac{I}{S} \quad (10)$$

onde, Ψ é a pressão com probabilidade de ser inferior ou igual para uma certa posição X adimensionalizada e P_x é a pressão com probabilidade de ser inferior ou igual a um certo valor na posição X.

Para os dados de modelo, considerou-se que a pressão mínima equivale à pressão com 0,1% de probabilidade conforme sugerido por [10]. Para os valores de protótipo analisaram-se as probabilidades de 0,1% e 1%, conforme salientado por [11] e [12], que indicam existir um efeito de escala na transposição dos valores de modelo para protótipo. Os valores obtidos em modelo são superiores aos que realmente ocorrem no protótipo, fato que se deve, provavelmente, ao efeito da aeração que é menor no modelo.

Para cada escoamento nas estruturas de laboratório foi analisadas a forma da distribuição longitudinal das pressões, procurando-se definir pontos característicos em função das condições de contorno do escoamento (vazão, número de Froude, submergência, etc.), e uma metodologia de previsão baseada nos critérios sugeridos por [13] e [14]. Posteriormente foi efetuada uma comparação com valores obtidos em protótipo.

Para a determinação da posição de início do ressalto hidráulico afogado no protótipo, em função da impossibilidade de determinar este ponto quando dos vertimentos, foi utilizada (11), obtida a partir de ensaios realizados na estrutura de laboratório (escala 1:50) da UHE Porto Colômbia, instalado no LAHE/FURNAS (Figura 2).

$$\frac{Z}{h_c} = 1,007 \cdot [Fr \cdot (S - I)]^{0,611} \quad (11)$$

onde, Z é a altura onde ocorre o início do ressalto hidráulico afogado junto ao perfil do vertedouro, em relação ao nível da cota da bacia de dissipação (Figura 6), h_c é a altura crítica do escoamento e Fr é o número de Froude no ponto do início do ressalto, na altura Z.

B. Distribuição das forças sobre lajes de bacias de dissipação em função da posição e tamanho

A força instantânea sobre uma laje de bacia de dissipação pode ser determinada pela avaliação das pressões instantâneas que ocorrem em pontos isolados da mesma [15]. Assumindo-se que a distância entre os pontos de pressão medidos não é demasiadamente grande (em relação às dimensões características do escoamento), a interpolação desses valores e a integração sobre a área poderão resultar em uma aproximação suficientemente precisa da força total. Essa metodologia, embora gere valores aproximados, é de maior praticidade e menor custo do que a realização de ensaios de modelos com elementos (lajes) móveis, como o usado por [16]. Os dados de pressão instantânea foram obtidos em um modelo reduzido simplificado que representa, em

escala 1:85, 2 vãos do vertedouro da UHE Porto Colômbia. Os vãos do vertedouro do modelo estão dispostos de modo a haver um vão central inteiramente representado e dois 'meio-vãos' nas laterais do canal, sendo que o protótipo possui 9 vãos.

As tomadas de pressão foram posicionadas em oito linhas transversais e três linhas longitudinais, a partir do eixo de transição do trecho curvo do paramento e do trecho plano do fundo da bacia, como apresenta a figura 6. Os espaçamentos usados entre as tomadas de pressão foram de 6 cm na direção longitudinal e 5 cm na direção transversal. As tomadas de pressão possuíam 2 mm de diâmetro e nelas foram instalados os transdutores de pressão, sendo que esses foram instalados o mais próximo possível do fundo do canal (junto à face inferior do fundo).

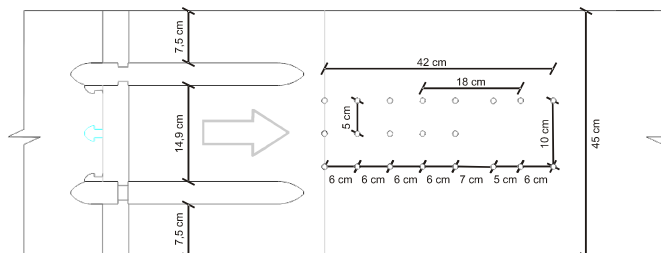


Figura 7 – Disposição em planta das tomadas de pressão.

Através da aquisição de dados de pressão em cada uma dessas tomadas foi possível representar o campo de forças agindo sobre certa área. Foi possível então a análise das forças atuantes sobre diversas áreas, com comprimentos e posições de centro diferentes. Isso permitiu avaliar a variação da força total atuante sobre regiões (que representam as lajes de bacia de dissipação) em função da posição de início, comprimento e centro de tais áreas.

Os dados de pressão média foram obtidos através da medição com piezômetros, e os dados de flutuação de pressão, através de transdutores de pressão. Os dados de flutuação de pressão foram adquiridos com uma frequência de 200 Hz e durante 7,5 minutos.

IV. ORIGEM DOS DADOS

A. Os Dados de Protótipo

No período de 17 a 23 de maio de 1996, através de uma proposição e iniciativa da Comissão de Hidráulica do CBDB (Comitê Brasileiro de Barragens) com o suporte e apoio de infra-estrutura, técnico e financeiro de Furnas Centrais Elétricas S.A., foram realizadas medições de pressões instantâneas na UHE Porto Colômbia (Figura 5). Além do LAHE/FURNAS, participaram da definição dos pontos de medição, da especificação da instrumentação e da coleta de dados com sistemas próprios mais duas instituições: a Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica (FCTH) e o Centro de Hidráulica Prof. Parigot de Souza (CEHPAR). Todos esses processos estão descritos em , e .

As medições de pressão foram efetuadas para as vazões de 500 m³/s, 1000 m³/s, 2000 m³/s, 3000 m³/s e 4000 m³/s. Foram feitas medições simultâneas nas tomadas apresentadas na Figura 6 (“a”, “b”, “c”, “d”, “e”, “f” e “g”). A Tabela I apresenta as condições de contorno quando das medições.

B. Dados de laboratório

Os dados de laboratório foram obtidos a partir das medições de pressão e de suas flutuações, junto ao fundo da bacia de dissipação, nos mesmos locais medidos no protótipo e nos modelos nas escalas 1:100, 1:50 e 1:32 instalados no LAHE (Figura 1 à Figura 3). Nesta estrutura foram colocadas, a mais que no protótipo, as tomadas “d*”, “e*” e “f*” (Figura 6). No total foram efetuadas medições em 20 ensaios com diferentes condições de contorno do escoamento (Tabela II): vazões equivalentes às do protótipo (1000 m³/s a 8000 m³/s), número de Froude na entrada do ressalto (Fr) variando entre 3 e 11 e submergência (S) variando entre 1,4 e 3,4, sendo que quatro condições ensaiadas em modelo são equivalentes às ensaiadas em protótipo.

Tabela I - Parâmetros do escoamento para as medições realizadas na UHE Porto Colômbia.

Q(m ³ /s)	1000	2000	3000	4000
Y ₁ (m)	0,32	0,61	0,89	1,18
Y ₂ *(m)	4,04	5,76	7,08	8,15
T _w (m)	10,42	10,72	11,17	11,76
S	2,58	1,86	1,58	1,44

* calculado pela equação de Bélanger.

Tabela II - Características dos ensaios realizados nos modelos de laboratório.

Q*(m ³ /s)	q*(m ² /s)	Fr	T _w /Y ₂
1000	7,39	10,5	2,12
1000	7,44	10,0	2,43
1000	7,45	8,4	3,40
2000	14,81	7,3	1,76
2000	14,78	6,9	1,92
2000	14,78	6,5	2,11
2000	14,78	5,6	2,91
3000	22,22	5,9	1,61
3000	22,26	5,6	1,70
3000	22,19	5,0	2,12
3000	22,26	4,6	2,41
4000	29,64	5,1	1,51
4000	29,68	4,9	1,55
4000	29,72	4,7	1,66
4000	29,78	4,1	2,10
6000	44,41	4,1	1,43
6000	44,50	3,4	1,70
6000	44,59	3,4	1,77
8000	59,25	3,5	1,42
8000	59,30	3,0	1,63

* vazões equivalentes ao protótipo da UHE Porto Colômbia.

V. ANÁLISES EFETUADAS

A. Pressões Mínimas

Em função das características ergódicas do fenômeno e baseado nas recomendações de , que sugere que se utilize a probabilidade de 0,1% das pressões a serem inferiores ou iguais a este valor como pressões mínimas características do protótipo, foi efetuada uma análise da distribuição destas pressões adimensionalizadas ($\Psi_{0,1\%}$).

Da Figura 8 à Figura 13 estão apresentadas a comparação entre as distribuições longitudinais do coeficiente de pressão com probabilidade de ocorrência de 0,1 % ($\Psi_{0,1\%}$)

observadas na bacia de dissipação na estrutura de laboratório, para as 6 vazões e as 20 submergências ensaiadas no modelo na escala 1:50, agrupadas em curvas de mesma vazão.

As medições feitas no trecho curvo (a, b e c) estão apresentadas nas figuras com símbolos vazados.

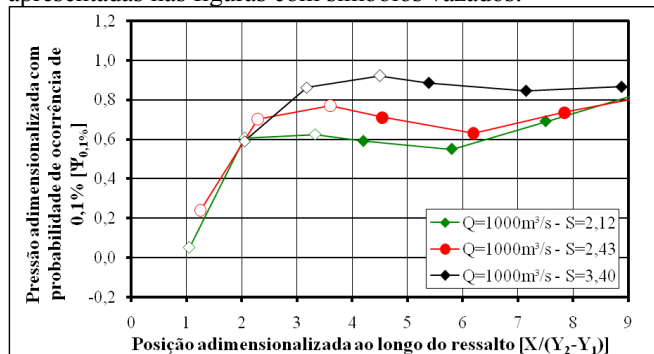


Figura 8 – Distribuições longitudinais de $\Psi_{0,1\%}$ para a vazão equivalente a $1000 \text{ m}^3/\text{s}$, para diferentes submergências (S).

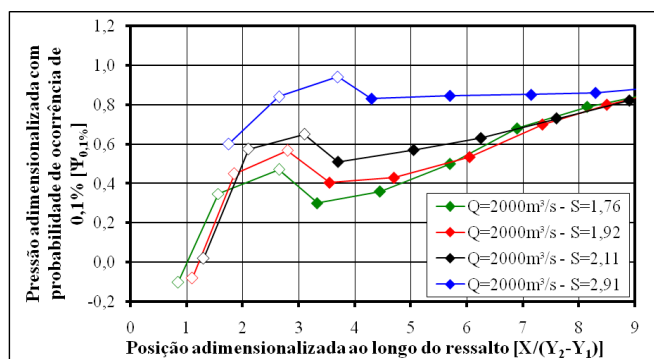


Figura 9 - Distribuições longitudinais de $\Psi_{0,1\%}$ para a vazão equivalente a $2000 \text{ m}^3/\text{s}$, para diferentes submergências (S).

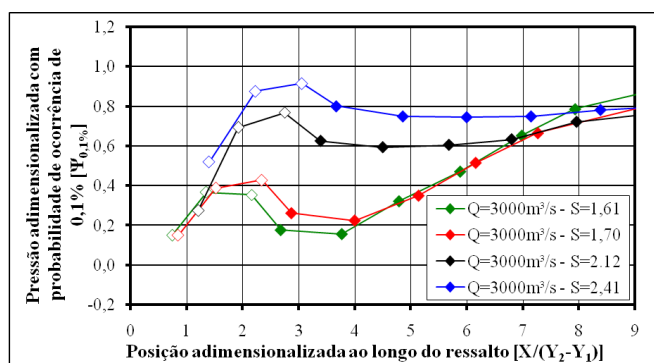


Figura 10 – Distribuições longitudinais de $\Psi_{0,1\%}$ para a vazão equivalente a $3000 \text{ m}^3/\text{s}$, para diferentes submergências (S).

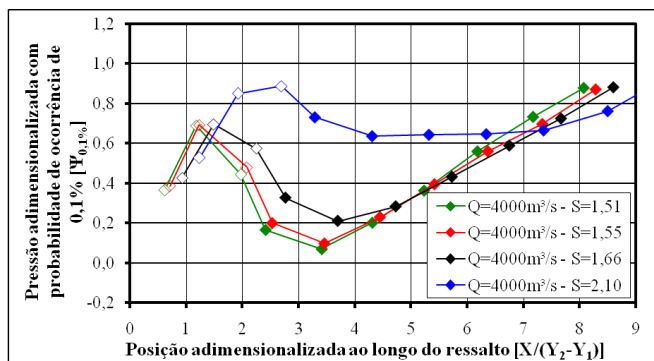


Figura 11 – Distribuições longitudinais de $\Psi_{0,1\%}$ para a vazão equivalente a $4000 \text{ m}^3/\text{s}$, para diferentes submergências (S).

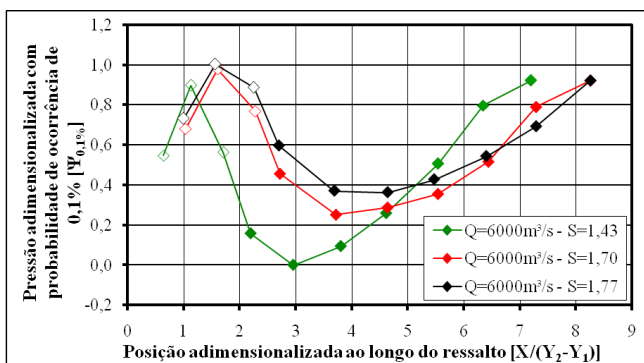


Figura 12 – Distribuições longitudinais de $\Psi_{0,1\%}$ para a vazão equivalente a $6000 \text{ m}^3/\text{s}$, para diferentes submergências (S).

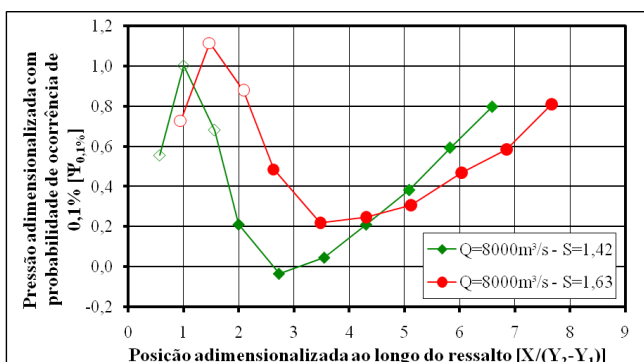


Figura 13 – Distribuições longitudinais de $\Psi_{0,1\%}$ para a vazão equivalente a $8000 \text{ m}^3/\text{s}$, para diferentes submergências (S).

Da Figura 14 à Figura 17 os mesmos dados são reagrupados, segundo submergências semelhantes.

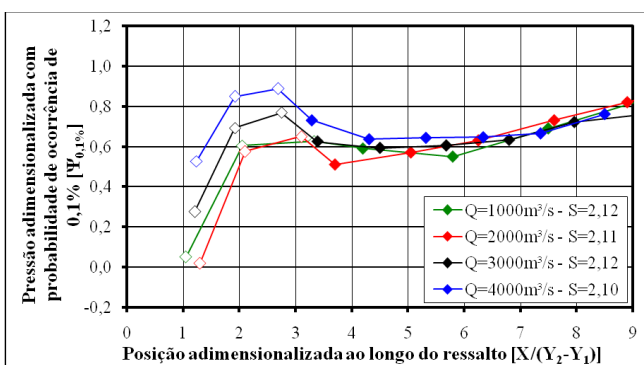


Figura 14 – Distribuições longitudinais de $\Psi_{0,1\%}$ para submergências (S) semelhantes em torno de 2,10.

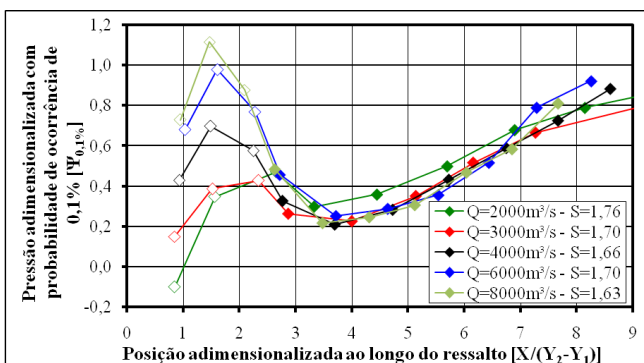


Figura 15 – Distribuições longitudinais de $\Psi_{0,1\%}$ para submergências (S) semelhantes em torno de 1,70.

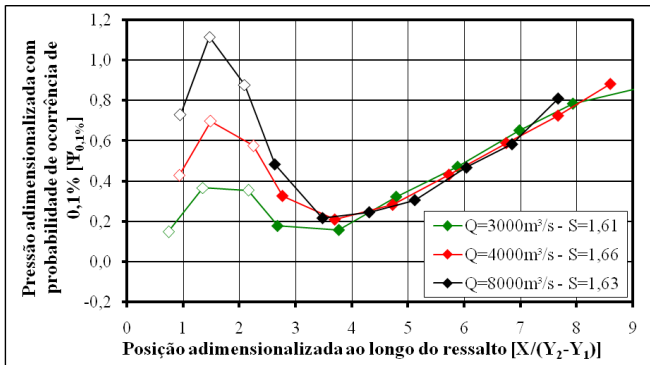


Figura 16 – Distribuições longitudinais de $\Psi_{0,1\%}$ para submergências (S) semelhantes em torno de 1,60.

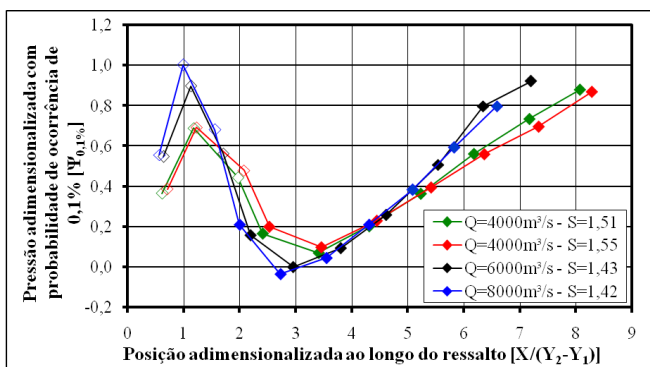


Figura 17 – Distribuições longitudinais de $\Psi_{0,1\%}$ para submergências (S) semelhantes em torno de 1,45.

Avaliando os gráficos apresentados, pode-se observar que:

a) as tomadas “a”, “b” e “c”, situadas na curva com símbolos vazados (\diamond), apresentam um comportamento distinto do trecho plano;

b) no trecho curvo o valor mínimo de $\Psi_{0,1\%}$ ($\Psi_{0,1\%min}$) situa-se sempre na primeira tomada da curva (“a”). O valor de $\Psi_{0,1\%}$ varia com a submergência (S) e com a vazão ou número de Froude. Para submergências (S) menores que 1,60, o mínimo situa-se no trecho plano. Para submergência entre 1,60 e 1,70 os valores de $\Psi_{0,1\%min}$ são semelhantes tanto no início do trecho curvo como no trecho plano. Para submergências superiores a 1,70, $\Psi_{0,1\%min}$ situa-se no início da curva de concordância do vertedouro com a parte plana da bacia;

c) no trecho plano, o valor de $\Psi_{0,1\%min}$ situa-se entre as tomadas “d” e “d*”. Pode-se observar que ele aumenta com a submergência (S) ou com a diminuição da vazão;

d) para os valores de submergências (S) semelhantes, observa-se que no trecho plano $\Psi_{0,1\%}$ apresenta valores semelhantes, enquanto que no trecho curvo o valor de $\Psi_{0,1\%}$ aumenta com a vazão ou número de Froude;

e) a posição adimensional (Γ_{min}) onde ocorre o valor $\Psi_{0,1\%min}$ desloca-se para jusante com o aumento da submergência (S) ou a diminuição da vazão;

f) o valor de $\Psi_{0,1\%min}$ neste ponto aumenta com a diminuição da vazão ou com o aumento da submergência (S); e;

g) o valor de $\Psi_{0,1\%}$ aumenta gradualmente da posição Γ_{min} (posição longitudinal $\Psi_{0,1\%min}$) até a posição $\Gamma = 8$.

Em função do exposto, verificou-se que a pressão mínima ($\Psi_{0,1\%min}$) pode ocorrer tanto no início da curva de concordância do vertedouro com a laje de fundo da bacia como na parte plana da estrutura, dependendo das características do escoamento, sendo o grau de submergência (S) o fator com maior influência. O valor de ($\Psi_{0,1\%min}$) pode ser estimado conforme apresentado na Figura 18 e por (11) e (12).

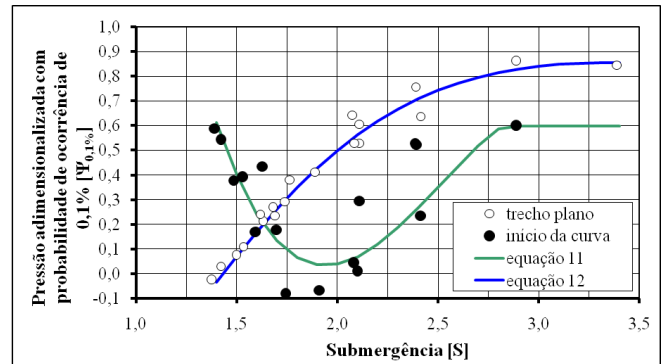


Figura 18 – Valores de $\Psi_{0,1\%min}$ no início da curva de concordância do perfil do vertedouro com o fundo da laje da bacia e no trecho plano da bacia em função da submergência (S).

i) Se $S \geq 1,70$, $\Psi_{0,1\%min}$ ocorre no início do trecho curvo da concordância entre o perfil do vertedouro e a laje fundo da bacia de dissipação e pode ser estimado por (11) (figura 15).

$$\Psi_{0,1\%min} = 12.14 - 15.79 \cdot S + 6.63 \cdot S^2 - 0.88 \cdot S^3 \quad (11)$$

válida para $S \geq 1,70$.

ii) Se $1,60 < S < 1,70$, o valor no início da curva e valor mínimo no trecho plano é praticamente idêntico.

iii) Se $1,60 \leq S$ o valor mínimo ocorre no trecho plano da bacia de dissipação. Neste caso, $\Psi_{0,1\%min}$ pode ser estimado por (12) e a posição onde ocorre (Γ_{min}) pode ser determinada por (13) conforme Figura 19.

$$\Psi_{0,1\%min} = (-1.16 + 0.81 \cdot S) / (1 - 0.46S + 0.21 \cdot S^2) \quad (12)$$

$$\Gamma_{min} = 1.40 + 4.60 \cdot \ln(S) \quad (13)$$

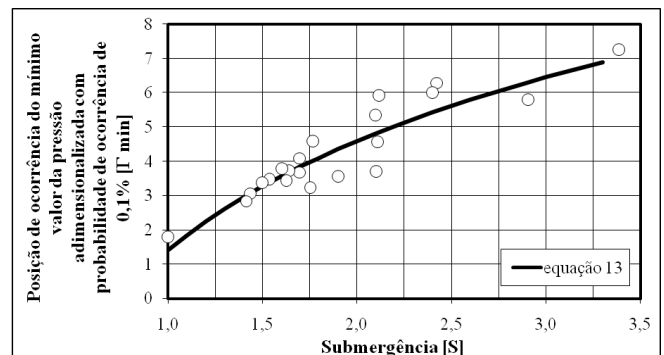


Figura 19 – Posição onde ocorre o valor mínimo $\Psi_{0,1\%min}$ na laje de fundo da bacia de dissipação em função da submergência.

Nas referências e foram desenvolvidas equações para estimar a distribuição longitudinal das pressões médias, suas flutuações e pressões com diferentes probabilidades.

VI. COMPARAÇÃO COM PROTÓTIPO

A partir de (11) e (12) foi possível estimar qual seria a pressão mínima que ocorreria para as condições de quando foram feitas as medições na UHE Porto Colômbia, segundo condições de operação apresentadas na Tabela I. A Tabela III e a Tabela IV apresentam os valores com probabilidade de 0,1% e 1% medidos no protótipo, comparadas com os valores estimados para as pressões mínimas nos modelos para estas situações. Observa-se que os valores são da mesma ordem de grandeza e que, geralmente, estão a favor da segurança, ou seja, são inferiores aos medidos e, quando não o são, a diferença máxima encontrada foi de 1 m.c.a.

Tabela III – Comparação entre valores previstos e medidos no início da curva de concordância com a bacia de dissipação

Q (m³/s)	1000	2000	3000	4000
y ₁ (m)	0,32	0,61	0,89	1,18
y ₂ ** (m)	4,04	5,76	7,08	8,15
S	2,58	1,86	1,58	1,44
Valor medido de P _{0,1%} no início da curva (m.c.a.)	3,66	4,34	4,77	5,45
Valor medido de P _{1%} no início da curva (m.c.a.)	4,52	4,95	5,21	5,84
Estimativa de pressão mínima	4,61	1,20	3,70	6,49
Diferença P _{0,1%} (m.c.a.)	-0,70	3,30	1,22	0,98
Diferença P _{1%} (m.c.a.)	0,16	3,91	1,66	0,59

Tabela IV - Comparação entre valores previstos e medidos no trecho plano da bacia de dissipação

Q (m³/s)	1000	2000	3000	4000
y ₁ (m)	0,32	0,61	0,89	1,18
y ₂ ** (m)	4,04	5,76	7,08	8,15
S	2,58	1,86	1,58	1,44
Valor medido de P _{0,1%} no início da curva (m.c.a.)	7,65	4,41	2,31	1,26
Valor medido de P _{1%} no início da curva (m.c.a.)	7,37	6,01	3,38	2,62
Estimativa de pressão mínima	7,69	4,42	2,36	1,26
Diferença P _{0,1%} (m.c.a.)	-0,04	-0,01	-0,05	0,00
Diferença P _{1%} (m.c.a.)	-0,32	1,59	1,02	1,36

B.

C. Distribuição das forças sobre lajes de bacias de dissipação em função da posição e tamanho

A força média sob o ressalto hidráulico pode ser representada como a integração da pressão média em certa área. Assumindo que não existem variações transversais ao escoamento na pressão média, pode-se estimar que a força média por unidade de área é a integral da equação de ajuste para a pressão média adimensional, dividida pelo comprimento. Assim, conforme , o carregamento médio adimensional (\bar{C}), pode ser equacionado por (14) a (17).

$$\bar{C} = \frac{1}{L_B^*} \int_{X_i^*}^{X_i^* + L_B^*} (a \cdot \Gamma + b \cdot \Gamma) d\Gamma \quad (14)$$

$$\bar{C} = a \cdot \chi_1 + b \cdot \chi_2, \quad (15)$$

$$\chi_1 = X_{cg}^* \quad (16)$$

$$\chi_2 = X_i^{*2} + X_i^* \cdot L_B^* + \left(\frac{L_B^*}{3}\right)^2 \quad (17)$$

onde, L_B^* é o comprimento adimensional da laje, Γ é a posição adimensional do centro de gravidade da laje.

A partir dos dados obtidos no modelo simplificado na escala 1:85, observou-se um erro máximo de 10% quando (15) é utilizada para determinar a força média por unidade de área sob um ressalto hidráulico, assumindo áreas fora da posição de influência de sobrepensões devido à mudança de direção do escoamento.

Para a representação adimensional das flutuações de força sob o ressalto hidráulico, podemos utilizar a forma de adimensionalização proposta por , incluindo um coeficiente que leva em consideração a largura e comprimento da área estudada, conforme (18) a (21).

$$C' = \left(\frac{C_f}{Ht} \cdot \frac{y_2}{y_1} \cdot \frac{1}{S} \right)^\beta \quad (18)$$

onde C_f é a flutuação do carregamento (desvio padrão), β é o coeficiente de dimensão da laje dado por (19)

$$\beta = 1 + L_B^* \cdot \beta_1 + W_B^* \cdot \beta_2 \quad (19)$$

onde β_1 e β_2 são, respectivamente, os coeficientes de flutuação quanto ao comprimento e largura da laje, L_B^* é o comprimento adimensional da laje dado por (20) e W_B^* é a largura adimensional da laje dada por (21)

$$L_B^* = \frac{L_B}{(y_2 - N_1)} \cdot \frac{1}{\sqrt{S}} \quad (20)$$

$$W_B^* = \frac{W_B}{(y_2 - N_1)} \cdot \frac{1}{\sqrt{S}} \quad (21)$$

Os valores propostos para o coeficiente β_1 são decrescentes com comprimento adimensional. Os valores propostos para o coeficiente β_2 são constantes, provavelmente devido à pequena faixa de larguras que pôde ser avaliada. A Figura 20 mostra o resultado da

adimensionalização proposta para um comprimento de laje adimensional menor que 1.

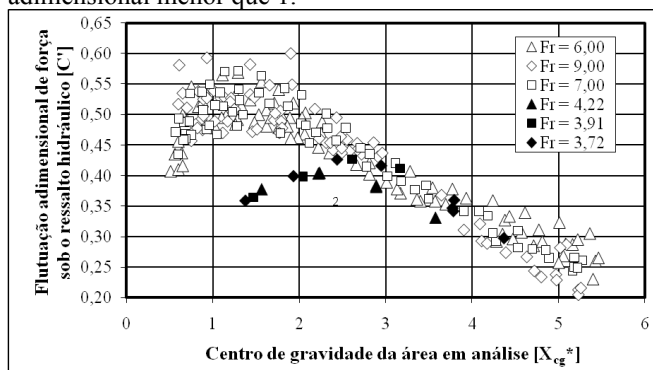


Figura 20 – Flutuação de força sobre áreas com diferentes centros de gravidade (X_{cg}).

VII. CONCLUSÕES

Os resultados deste estudo mostram que é possível dispor de metodologias de previsão de pressões mínimas extremas baseadas em estudos de laboratório apesar da existência de efeitos de escala.

Esta metodologia pode ser aplicada tanto na fase de projeto ou em barragens já existentes que possuam dissipadores por ressalto hidráulico, permitindo que se prevejam as condições críticas do escoamento e se adote soluções eficientes que venham a reduzir os riscos de problemas durante a vida útil da obra, que possam vir a exigir a redução da geração quando da manutenção do dissipador por problemas de pressão.

Os resultados aqui apresentados são um pequeno resumo das análises efetuadas pela equipe de trabalho. Para uma visão mais geral dos estudos feitos e da aplicação dos resultados sugere-se a consulta aos trabalhos , , e . Utilizando-se técnicas de adimensionalização e análise estatística, novas conclusões deverão ser agregadas e relacionadas à influência da submergência na distribuição de pressões extremas mínimas e máximas, bem como aos efeitos de escala existentes em função da aeração do escoamento.

VIII. AGRADECIMENTOS

Ao corpo técnico do Laboratório de Hidráulica Experimental de Furnas Centrais Elétricas S.A. por disponibilizar os dados de pressão “instantânea” obtidos no sistema dissipador de energia da Usina Hidrelétrica de Porto Colômbia e dos modelos reduzidos. Agradecimento especial aos engenheiros Erton Carvalho, Fátima Moraes de Almeida, Marcos da Rocha Botelho e Igor Afonso Frago.

IX. REFERÊNCIAS

[1] M. G. Marques, J. Drapeau, J. L. Verrette, “Análise da flutuação de pressão provocada pela formação de um ressalto hidráulico a jusante de vertedouro”. In: *Congresso Latino-americano de Hidráulica*, 17., Guayaquil, 1996.

[2] A. A. N Pinheiro, “Ações hidrodinâmicas em soleiras de bacia de dissipação de energia por ressalto hidráulico”, Tese de Doutorado, Universidade Técnica de Lisboa, 1995.

[3] J. W. Toso, C. E. Bowers, “Extreme pressure fluctuations in hydraulic jump stilling basins”, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 114, no 8, 1988.

[4] L. A. M. Endres, “Contribuição ao Desenvolvimento de um Sistema para Aquisição e Tratamento de Dados de Pressões Instantâneas em Laboratório”, Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1990.

[5] M. G. Marques, E. D. Teixeira, S. M. Cerezer, A. A. A. Mees, C. Palauro, L. A. M. Endres, R. P. Feraudy Filho, M. Dai Prá, A. V. B. Canellas, “Estimativa dos Valores Extremos de Pressão em Bacias de Dissipação por Ressalto Hidráulico”, *III CITENEL*, Florianópolis, 2005.

[6] E. D. Teixeira, E. F. N. Trierweiler, L. A. M. Endres, M. G. Marques, “Determinação do coeficiente estatístico de distribuição de probabilidade para valores extremos de pressões no ressalto hidráulico”. In: *Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, 15, Curitiba, 2003.

[7] E. F. N. Trierweiler, “Avaliação do campo de pressões em ressalto hidráulico formado à jusante de uma comporta com diferentes graus de submergência”, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

[8] J. P. Ortiz, F. M. Almeida, E. Carvalho, R. D. Borsari, “Medições em protótipo de flutuações de pressão na bacia de dissipação da Usina de Porto Colômbia”. In: *Escola de Primavera em Transição e Turbulência, I.*, Rio de Janeiro, 1998.

[9] ABRH/FURNAS. “Relato do Trabalho da Subcomissão Desenvolvimento de Pesquisa – Estudo de Flutuação de Pressão em Bacia de Dissipação – Caso da Usina de Porto Colômbia”, Rio de Janeiro, 64 p., 1997.

[10] S. Narasimhan, V. P. Bhargava, “Pressure Fluctuations in Submerged Jump”, *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, vol. 102, n. HY3, pp. 339-350, 1976.

[11] N. Narayanam, “Pressure Fluctuations Beneath Submerged Jump”. *Journal of the Hydraulic Division*, vol. 104, n. HY9, pp. 1331-1342, 1978.

[12] R. A. Lopardo, “Apunte sobre fluctuaciones macroturbulentas de presión, medición, análisis y aplicación al resalto hidráulico”. São Paulo: Escola Politécnica. 44 p. 1986.

[13] W. H. Hager, “Ressaut hydraulique du type b dans un canal à forte pente”. *Journal of Hydraulic Research, Delft*, v. 26, n. 5, p. 539-558, 1988.

[14] R. A. Lopardo, C. A. Fattor, M. C. Lopardo, J. M. Casado, “Instantaneous Pressure Fields on submerged jump stilling basin”, *Hydraulics of Dams and River Structures*, 2004.

[15] R. A. Lopardo, M. F. Chividini, D. A. Berrilio, “Effects of Hydraulic Jump Inflow Condition on the Decay of Turbulence in Stilling Basins”. In: *International symposium on new technology in model testing in hydraulic research*, Índia, p. 111-114, 1987.

[16] E. D. Teixeira, “Previsão dos valores de pressão junto ao fundo em bacias de dissipação por ressalto hidráulico”. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

[17] M. G. Marques, E. D. Teixeira, C. B. Martinez, J. F. Gomes, L. A. M. Endres, “Análise de Macroturbulência em Estruturas de Dissipação de Energia Através do Estudo de Variação de Pressões e Níveis”. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 9, n. 1, p. 127-153, 2004.

[18] R. A. Wiest, M. G. Marques, E. D. Teixeira, E. F. N. Trierweiler, A. A. A. Mees, M. Dai Prá, L. A. M. Endres, A. V. B. Canellas, R. P. Feraudy Filho, “Influência da submergência na determinação do coeficiente estatístico de distribuição de probabilidade para pressões extremas em bacias de dissipação por ressalto hidráulico”. In: *Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, 16., João Pessoa, 2005.

[19] FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS. “Usina Hidrelétrica de Porto Colômbia. Estudos hidráulicos em modelo reduzido – modelo de conjunto – escala 1:100 – memória conceitual do modelo”. Rio de Janeiro. 16 p. 1996.

[20] INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. Brazilian Committee on Dams (Org.). Large Brazilian spillways: overview of

- Brazilian practice and experience in designing and building spillways for large dams. Rio de Janeiro. 2002.
- [21] E. D. Teixeira, "Efeito de escala na previsão dos valores extremos de pressão junto ao fundo em bacias de dissipação por ressalto hidráulico", Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.
- [22] R. A. Wiest "Avaliação do Campo de Pressões Em Ressonância Hidráulica Formado a Jusante de um Vertedouro com Diferentes Graus de Submersão", Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.
- [23] A. A. A. Mees, "Caracterização dos Esforços Hidrodinâmicos em Dissipadores por Ressonância Hidráulica com Baixo Número de Froude", Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.
- [24] M. G. Marques, F. M. Almeida, L. A. M. Endres, "Adimensionalização de Pressões Médias em Bacias de Dissipação por Ressonância Hidráulica", *XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, 1999.
- [25]
- [26] V. Fiorotto, P. Salandin, "Design of Anchored Slabs in Spillway Stilling Basins" *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 126, 7, 2000.
- [27] A. Bellin, V. Fiorotto "Direct dynamic force measurement on slabs of spillway stilling basins", *Journal of Hydraulic Engineering*, 121, 1995.