

## Avaliação das Pressões Médias ao Longo do Ressalto Hidráulico Afogado a partir da Sobreposição de Efeitos Hidráulicos

**BRUNA MOREIRA SELL<sup>1</sup>**; **JOÃO PEDRO DE MORAES DA SILVEIRA<sup>2</sup>**; **JOANA SOUZA DE GUSMÃO<sup>3</sup>**; **PRISCILA PRIEBE DOS SANTOS<sup>4</sup>**; **MAURICIO DAI PRÁ<sup>5</sup>**

<sup>1</sup> Universidade Federal de Pelotas – [brunamoreirasell@hotmail.com](mailto:brunamoreirasell@hotmail.com)

<sup>2</sup> Universidade Federal de Pelotas – [jpdrslvr@gmail.com](mailto:jpdrslvr@gmail.com)

<sup>3</sup> Universidade Federal de Pelotas - [joana.de.gusmao@hotmail.com](mailto:joana.de.gusmao@hotmail.com)

<sup>4</sup> Universidade Federal de Pelotas – [priscilaspriebe@gmail.com](mailto:priscilaspriebe@gmail.com)

<sup>5</sup> Universidade Federal de Pelotas – [mdaipra@gmail.com](mailto:mdaipra@gmail.com)

### 1. INTRODUÇÃO

De acordo com PORTO (1998), o ressalto hidráulico é um fenômeno bruscamente variado, responsável pela transição de escoamentos do regime supercrítico ou torrencial para escoamentos em regime subcrítico ou fluvial. O escoamento é caracterizado por altas velocidades, acentuada elevação no nível d'água em uma curta distância, elevada turbulência com incorporação de entrada de ar do ambiente e grande perda de carga.

O dimensionamento do ressalto hidráulico é largamente utilizado quando se objetiva dissipar energia do escoamento em canais, especialmente a jusante de obras hidráulicas. O entendimento do ressalto hidráulico como forma de dissipação de energia tem assumido papel importante devido aos danos causados às estruturas de dissipação de energia ao longo dos anos (TRIERWEILER NETO, 2008). É de suma importância para os projetistas, quando se objetiva o dimensionamento eficiente e econômico, o conhecimento das pressões médias que o ressalto hidráulico aplica no fundo das bacias de dissipação.

Embora haja diversos estudos quanto à caracterização do ressalto livre (clássico), o estudo do ressalto afogado ainda se mostra bastante escasso. Com isso, o presente trabalho objetiva avaliar as pressões médias geradas em ressalto afogado, a partir da investigação experimental em modelo físico, baseado em dados de trabalhos anteriores, do ressalto hidráulico formado em uma bacia de dissipação plana horizontal, avaliando o mesmo como um somatório dos efeitos hidrodinâmicos ocasionados pelas distintas condições de escoamentos.

### 2. METODOLOGIA

O presente trabalho foi realizado com dados experimentais do trabalho de DAI PRA (2011) coletados em modelo físico localizado no Laboratório de Hidráulica Experimental e Recursos Hídricos da Eletrobrás Furnas. Para a execução deste trabalho os dados experimentais característicos do ressalto hidráulico extraídos foram de grande valia para se atingir o objetivo do mesmo. Como ponto inicial do trabalho definiu-se: vazão específica ( $q$ ), profundidade de escoamento ( $Y$ ), altura conjugada rápida ( $Y_1$ ), altura conjugada lenta ( $Y_2$ ), altura d'água na saída do ressalto hidráulico afogado ( $Y'_2$ ), peso específico da água ( $\gamma$ ), distância horizontal tomada a partir do início do ressalto hidráulico ( $X$ ) e número de Froude ( $Fr$ ).

A partir dos dados fornecidos, analisou-se os diferentes efeitos que influenciam nas pressões médias ocorrentes no ressalto afogado. Foram

analisados os efeitos do escoamento livre sobre a bacia, do ressalto clássico e do ressalto afogado. Por fim, comparou-se o efeito total calculado (somatório de todos os três efeitos) com os resultados experimentais.

A determinação das pressões médias geradas a partir do efeito do escoamento livre sobre a bacia de dissipação se vale da relação entre as alturas conjugada rápida ( $Y_1$ ) e lenta ( $Y_2$ ), assim como a distância ( $X$ ), analisada no modelo físico. Deste modo, as pressões médias geradas em cada ponto, em virtude do efeito do escoamento livre sobre a bacia puderam ser inferidas através da Equação 1, proposta por DAI PRÁ (2011).

$$y = (0,0028 \cdot X) + y_1$$

Equação 1

Visando-se estimar o efeito das pressões médias geradas a partir do ressalto clássico foi empregada a Equação 2 (DAI PRÁ, 2011) relacionando, assim como o efeito do escoamento livre sobre a bacia, as alturas conjugada rápida ( $Y_1$ ) e lenta ( $Y_2$ ), assim como a distância ( $X$ ) analisada no modelo físico.

$$\Psi_R = \left[ \operatorname{sen} \left( \frac{2\pi \cdot \left( \frac{X}{y_2 - y_1} \right)}{30,688} + 12,566 \right) \right] \cdot \left( \frac{1}{y_2 - y_1} \right)$$

Equação 2

Para determinar as pressões médias geradas no ressalto afogado adotou-se a Equação 3, onde primeiramente foi necessário determinar o fator de proporcionalidade ( $K_A$ ) através da Equação 4 (DAI PRÁ, 2011), que é função do fator de submergência ( $S$ ) do ressalto hidráulico (Equação 5), que é a razão entre a altura d'água na saída do ressalto hidráulico afogado ( $Y'_2$ ) e a altura conjugada lenta ( $Y_2$ ).

$$\Psi_{A.} = \left[ \frac{0,361 \cdot \left( \frac{X}{y_2 - y_1} \right)}{1 + 0,314 \cdot \left( \frac{X}{y_2 - y_1} \right)^2} \right] \cdot \left( \frac{1}{K_A} \right) \cdot \left( \frac{1}{y_2 - y_1} \right)$$

Equação 3

$$K_A = \left( \frac{1}{S-1} \right)^{0,5} \cdot \left( \frac{1}{S+1} \right)^2$$

Equação 4

$$S = \frac{Y'_2}{Y_2}$$

Equação 5

Como o ressalto afogado ocorre em uma posição ( $X$ ) anterior ao ressalto clássico e ao efeito do escoamento livre sobre a bacia, para que ambos os efeitos tenham mesmo ponto inicial, foi necessário realizar uma correção. Para tanto, usou-se a Equação 6 (DAI PRÁ, 2011), a qual relaciona o fator de submergência ( $S_R$ ), e através da Equação 7 encontrou-se o valor do adimensional de posição ( $\Gamma_i$ ), e por fim conduziu-se a adimensionalização das posições de início do ressalto hidráulico ( $P_i$ ), através da Equação 8.

$$S_R = \frac{Y'_2 - Y_2}{Y_1}$$

Equação 6

$$\Gamma_i = \sqrt[2,7035]{\frac{S_R}{0,5442}}$$

Equação 7

$$P_i = \frac{\Gamma_i}{y_2 - y_1}$$

Equação 8

Após o cálculo das pressões médias de todos os efeitos, comparou-se o efeito total calculado com o efeito medido experimentalmente.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com a estimativa das pressões médias calculadas a partir de cada efeito no escoamento, geraram-se planilhas e gráficos, dos quais permitem melhor interpretar os efeitos. A Figura 1 ilustra os três efeitos: escoamento livre sobre a bacia, ressalto clássico e ressalto afogado.

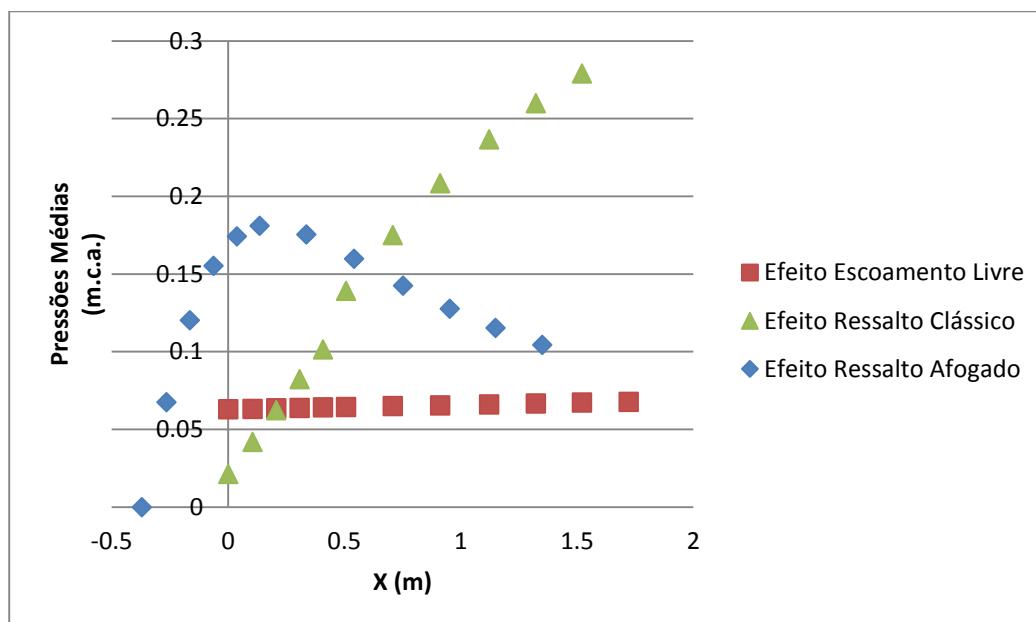


Figura 1 – Dissociação e sobreposição e efeitos de pressões médias. O valor X = 0 indica o início do trecho plano da bacia de dissipação.

Através da leitura da Figura 1, percebe-se que o efeito do escoamento livre é praticamente constante ao longo da bacia de dissipação, havendo poucas oscilações nas pressões médias ao longo da distância horizontal.

Nota-se que o efeito do ressalto hidráulico clássico se apresenta crescente em direção ao final do ressalto hidráulico, para as posições mais a jusante do início do ressalto.

Constata-se também que, o efeito do ressalto afogado cresce até um valor máximo e depois decresce, onde encerra este efeito ao fim do ressalto, tendendo a aproximar-se do efeito de escoamento livre após o fim do ressalto, logo que encontrar-se em regime uniforme.

A Figura 2 apresenta a comparação entre os resultados obtidos experimentalmente (dados medidos) e os resultados estimados (dados calculados) de acordo com a metodologia apresentada.

Pela análise da Figura 2, percebe-se que tanto os valores medidos quanto os calculados apresentam comportamento crescente em direção ao final do ressalto hidráulico. A diferença apresentada na comparação destes métodos é de aproximadamente de 0,05 m.c.a.

É possível notar, contudo, que há diferenças entre as pressões médias calculadas e as medidas. Esta diferença pode estar associada a possíveis erros, como a imprecisão nas medições experimentais, tendo em vista a instabilidade e

característica turbulenta e agitada do ressalto hidráulico, e na dispersão natural dos dados que deram origem às equações apresentadas na metodologia. Outra limitação do estudo, e possível causa destas diferenças é o fato de que este trabalho não considerou o efeito da curva de concordância vertical, já analisada por outros autores, como efeito existente.

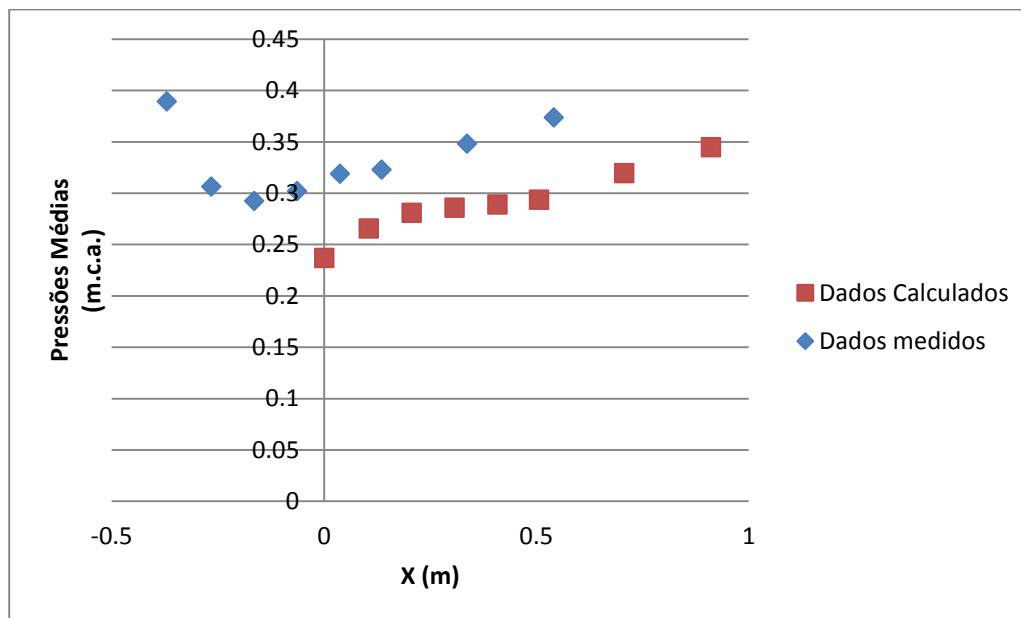


Figura 2 - Comparação entre as pressões médias estimadas e obtidas experimentalmente

#### 4. CONCLUSÕES

O ressalto hidráulico é um fenômeno altamente agressivo e instável, o que traz dificuldades em seu estudo. No entanto, mesmo com as dificuldades impostas, a comparação entre os resultados teóricos e experimentais tendem a apresentar comportamento semelhante.

Em trabalho posterior, será adicionado o efeito da curva de concordância vertical para verificação do quanto próximo os resultados se apresentarão. Serão testados escoamentos com outros graus de submersão e outras vazões, a fim de verificar a aplicabilidade do método proposto por DAÍ PRÁ (2011). Da mesma forma, serão testados dados de outros modelos físicos.

#### 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

PORTO, R. M. **Hidráulica Básica**. São Carlos: EESC/USP, 1998.

TRIERWEILER NETO, E.F.; MARQUES, M.G. Análise do Campo de Pressões em Ressalto Hidráulico Submerso a Jusante de uma Comporta. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Local de Edição, v.13, n.14, p. 55 - 68, 2008.

DAI PRÁ, M. **Uma Abordagem para Determinação das Pressões Junto ao Fundo de um Dissipador de Energia por Ressalto Hidráulico**. 2011. 208f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Programa de Pós Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.