

UTILIZAÇÃO DE FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS PARA ESTUDO SUSTENTÁVEL DO COMPORTAMENTO DE RESSALTO HIDRÁULICO

Flávia Aparecida Reitz Cardoso – reitz@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Mestrado em Inovações Tecnológicas
Via Rosalina Maria dos Santos, 1233
87301-899 – Campo Mourão – Paraná

Viviane Okita – okitaviviane@gmail.com
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento de Engenharia Civil
Via Rosalina Maria dos Santos, 1233
87301-899 – Campo Mourão – Paraná

Renan Felicissimo Marangoni – renanfmarangoni@gmail.com
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Mestrado em Inovações Tecnológicas
Via Rosalina Maria dos Santos, 1233
87301-899 – Campo Mourão – Paraná

Eudes José Arantes – eudesarantes@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Mestrado em Inovações Tecnológicas
Via Rosalina Maria dos Santos, 1233
87301-899 – Campo Mourão – Paraná

Resumo: *Devido ao crescimento exponencial da utilização de tecnologias, várias análises no campo da Engenharia e da Matemática foram facilitadas. É nesse campo de análise que entra a Modelagem Matemática, para fazer com que resultados sejam processados e analisados com muito mais precisão e mais rapidamente. Este trabalho apresenta uma união entre o estudo do ressalto hidráulico, um fenômeno da engenharia hidráulica, com a matemática computacional. Através do programa Ansys CFX, foi feita a modelagem computacional e as simulações. Os dados de escoamento obtidos da simulação foram comparados com dados calculados em um experimento realizado no laboratório da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, na cidade de Campo Mourão, Paraná. Foram feitas análises a cada 20 centímetros no comprimento do canal, totalizando os seus 300cm. Os dados retirados experimentalmente, altura da lâmina de água, a inclinação do canal e a velocidade, foram utilizados posteriormente para o cálculo da vazão, que por sua vez foi usada para o cálculo do escoamento. O escoamento calculado foi comparado com os dados obtidos da simulação. Foi possível concluir que os valores ensaiados foram muito próximos aos valores obtidos via simulação computacional. Sendo assim, é possível utilizar essa ferramenta computacional de maneira eficaz, diminuindo o tempo de estudos experimentais, bem como os gastos, contribuindo desta forma para uma engenharia sustentável.*

Palavras-chave: *Escoamento, ressalto hidráulico, engenharia sustentável.*

1 INTRODUÇÃO

Recentemente, com o desenvolvimento de recursos computacionais, modelos numéricos para a predição de ressaltos hidráulicos têm atraído vários pesquisadores (AMANTE; MARQUES, 2005). Tradicionalmente, a modelagem experimental é utilizada para simular os escoamentos, porém requer ajustes devido à escala, calibração de alguns parâmetros e um grande número de experimentos. Desse modo, a modelagem computacional oferece simplificação e redução de tempo e custo consideráveis (NETO; MENEZES; TAVARES, 2012).

O ressalto hidráulico ou salto hidráulico é o fenômeno que ocorre na transição de um escoamento torrencial ou supercrítico para um escoamento fluvial ou subcrítico. O escoamento é caracterizado por uma elevação brusca no nível d'água, sobre uma distância curta, acompanhada de uma instabilidade na superfície com ondulações e entrada de ar do ambiente e por uma consequente perda de energia em forma de grande turbulência (PORTO, 1998).

Uma das soluções mais adotadas no meio técnico como forma de dissipar a energia do escoamento a jusante de barragens são as “bacias de dissipação de energia por ressalto hidráulico (PRÁ, 2011). Além das características internas do escoamento, pode-se mencionar a grande variedade de geometrias de estruturas vertedouras somada à infinidade de condições de contorno do escoamento como variáveis adicionais do problema (ALVES, 2008).

Esta pesquisa teve por objetivo estudar as características básicas de um ressalto hidráulico, realizar a medição das alturas referentes ao ressalto hidráulico e a partir dos dados obtidos fazer a geometria em um programa de simulação computacional, a partir das condições de contorno simular e analisar os perfis de velocidade e pressão de modo que seja feita a caracterização do escoamento. Por fim, comparar os dados obtidos experimentalmente com os dados obtidos computacionalmente. O canal analisado no experimento, está na cidade de Campo Mourão (PR), no campus da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

2 METODOLOGIA

Esse trabalho teve como objetivo avaliar o tempo de escoamento sobre o vertedouro de um ressalto hidráulico por meio de uma simulação computacional em um programa de fluidodinâmica computacional, para posteriormente caracterizar esse escoamento segundo resultados experimentais. O canal analisado possui 20 centímetros de base, 40 centímetros de altura e 300 centímetros de comprimento. A partir da altura e do comprimento do canal foi possível calcular a inclinação do canal, de 5%.

Para o início do experimento, o canal, em sua extensão, foi dividido em partes iguais de 20 centímetros, com a ajuda de um paquímetro foram feitas as respectivas leituras da altura da lâmina de água. À medida que o ressalto se formou, a divisão de 20 centímetros foi para 5 centímetros, de maneira que o resultado na simulação fosse o mais próximo do ensaiado.

O vertedor utilizado é um vertedor de paredes delgadas, servem para medir a vazão em cursos dá água naturais ou em canais construídos. Para a formação do ressalto hidráulico, foi posicionado o vertedor no orifício de saída de água. Isso acarretará numa sobre-elevação brusca da superfície líquida. Esse fenômeno nada mais é do que a transição de um escoamento supercrítico para um escoamento subcrítico.

Para a medição da velocidade foi utilizado o equipamento Dynasonics (MODEL UFX). Sabendo o diâmetro do tubo que corre a água, foi possível calcular a área. Com os dois parâmetros estabelecidos, velocidade e área, foi possível o calculo da vazão do canal.

A simulação do canal foi feita no programa *ANSYS 14.5*. Cada altura medida foi utilizada para a simulação numérica do escoamento. Para a construção da geometria e da malha do canal, foi usado o programa *ANSYS ICEM CFD*. A geometria 3D foi aplicada juntamente com todas as características necessárias para um melhor resultado, de forma que posteriormente essa geometria foi aplicada ao programa *ANSYS FLUENT CFD* para as simulações.

A malha da geometria foi elaborada com elementos hexaédricos contendo 286.550 nós e 268.032 elementos. Pela característica do modelo enquanto escoamento ser turbulento e por haver uma diminuição da geometria de saída em relação do corpo do ressalto, foi necessário um refino da malha próximo a saída do vertedouro.

Para a definição das condições de contorno, que são os valores que caracterizam especificamente o problema, foram pré definidas as condições de entrada da água e a altura inicial de acordo com cada uma das medições, a inclinação de 5% do canal e as componentes da gravidade considerando a inclinação.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para início do experimento, o canal foi dividido em 21 partes, em cada uma dessas partes, uma altura foi medida com o auxílio de um paquímetro, as alturas medidas podem ser observadas na tabela 1. O canal utilizado para o experimento está na figura 1.

Tabela 1 - Alturas medidas do canal

20 cm	$y_1 = 13,95$ cm
40 cm	$y_2 = 13,09$ cm
60cm	$y_3 = 13,19$ cm
80 cm	$y_4 = 11,91$ cm
100 cm	$y_5 = 10,81$ cm
120 cm	$y_6 = 8,97$ cm
125 cm	$y_7 = 8,00$ cm
130 cm	$y_8 = 7,79$ cm
135 cm	$y_9 = 6,64$ cm
140 cm	$y_{10} = 5,91$ cm
145 cm	$y_{11} = 3,81$ cm
150 cm	$y_{12} = 2,91$ cm
155 cm	$y_{13} = 2,75$ cm
160 cm	$y_{14} = 2,61$ cm
180 cm	$y_{15} = 2,66$ cm
200 cm	$y_{16} = 3,13$ cm
220 cm	$y_{17} = 3,12$ cm
240 cm	$y_{18} = 3,02$ cm
260 cm	$y_{19} = 4,38$ cm
280 cm	$y_{20}(\text{meio}) = 3,57$ cm $y_{20}(\text{borda}) = 4,02$ cm
300 cm	$y_{21}(\text{meio}) = 6,51$ cm $y_{21}(\text{borda}) = 7,35$ cm

Fonte: Modelo experimental.

Figura 1 - Canal utilizado para experimento



Para o cálculo das velocidades, foi utilizado os valores do diâmetro, da área e da velocidade inicial já calculadas e a vazão, conforme a tabela 2:

Tabela 2 - Valores utilizados para cálculo

diâmetro	0,0432 m
área	0,001465741 m ²
velocidade inicial	4,8 m/s
vazão	0,007035558 m ³ /s

Fonte: Modelo experimental.

Tabela 3 - Comparação das velocidades experimental e velocidade numérica

Alturas (m)	Velocidade experimental (m/s)	Velocidade numérica (m/s)
0,1395	0,2522	0,2375
0,1309	0,2687	0,2356
0,1319	0,2667	0,2843
0,1191	0,2954	0,2745
0,1081	0,3254	0,3367
0,0897	0,3922	0,4056
0,0800	0,4397	0,4189
0,0779	0,4516	0,4466
0,0664	0,5298	0,5434
0,0591	0,5952	0,6012
0,0381	0,9233	0,9756
0,0291	1,2089	1,2189
0,0275	1,2792	1,2856
0,0261	1,3478	1,3978

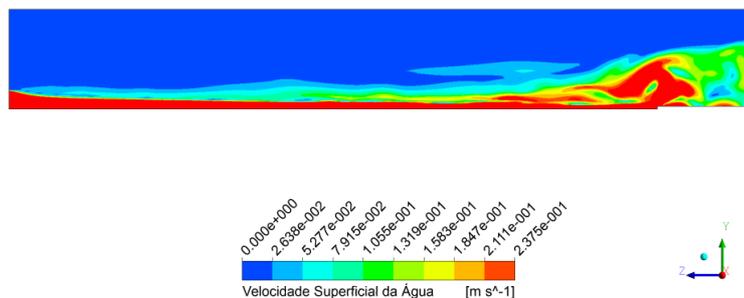
0,0266	1,3225	1,3566
0,0313	1,1239	1,1056
0,0312	1,1275	1,1295
0,0302	1,1648	1,1701
0,0438	0,8032	0,8367
0,0402	0,8751	0,8678
0,0735	0,4786	0,4899

Fonte: Modelo experimental.

Para cada altura, foi feita uma simulação no CFX com as condições propostas anteriormente. Cada simulação foi convergida em aproximadamente 12.300 iterações, durante cerca de 160 horas. Esses resultados foram obtidos e comparados com os dados experimentais.

Nas simulações, uma primeira verificação foi que os campos de velocidades formavam recirculações próximas ao vertedouro, como era esperado. Esses pequenos vórtices formaram-se sob a superfície livre na região do ressalto e a região a jusante do ressalto permaneceu aproximadamente uniforme e lisa, caracterizando ser um ressalto hidráulico fraco, principalmente pelo número de Freud estar concentrado entre 0,5 e 1,3, ou seja, $0,5 < Fr < 1,3$ e passar do estado supercrítico para subcrítico. Isso pode ser analisado na figura 2, correspondente a altura $y_1 = 0,1395$.

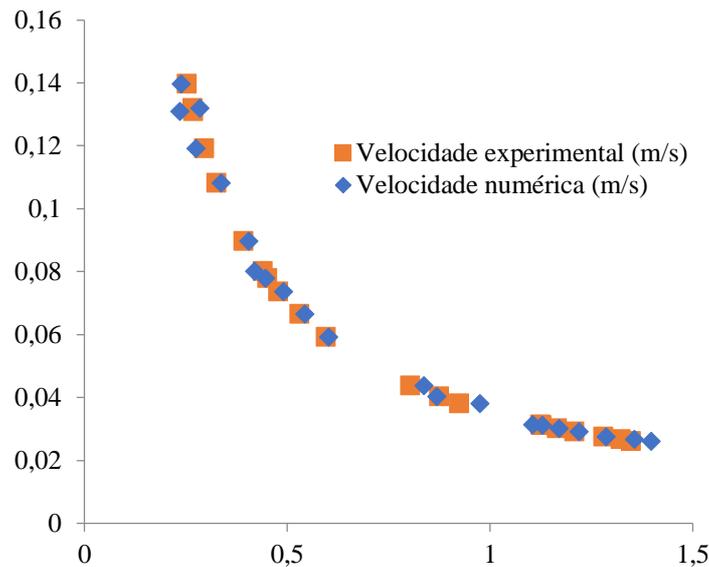
Figura 2 - Vórtice formado na superfície correspondente a altura $y_1 = 0,1395$



Pelos resultados obtidos é possível verificar que os perfis de velocidades experimentais e numéricos comparam-se favoravelmente, e que na região próxima à superfície livre há uma pequena redução nos valores das velocidades tomados experimentalmente. Segundo Arantes (2007), “estes erros podem ocorrer devido às interferências da presença de ar próximo a superfície livre ou devido à forma invasiva desta metodologia que pode inserir possíveis erros sistemáticos”.

Um gráfico foi gerado para melhor observação da comparação estabelecida entre a velocidade experimental e a velocidade numérica.

Figura 3 - Gráfico comparativo das velocidades experimental e numérica



Também foi possível verificar que, quanto maior a altura (y_1) do vertedouro, menor é a velocidade superficial da água. Da mesma forma, quanto menor a altura (y_{14}) do vertedouro maior é a velocidade superficial da água. Isso acontece porque a altura e a velocidade são grandezas inversamente proporcionais. Esse relacionamento entre velocidade e altura também foi percebido por Alves (2008) e Souza (2011).

Pelo fato do laboratório onde foi realizado não ter um aparelho chamado piezômetro, que serve para a medição da pressão, não foi possível obter os valores experimentais. Porém, houve uma grande proximidade em relação à velocidade superficial, é possível concluir que haverá uma grande proximidade em relação a pressão.

Tabela 4 - Pressões numéricas retiradas do programa de simulação

Alturas (m)	Pressão (Pa)
0,1395	6.136
0,1309	6.108
0,1319	6.109
0,1191	6.101
0,1081	6.073
0,0897	5.889
0,0800	5.858
0,0779	5.809
0,0664	5.678
0,0591	5.467
0,0381	4.238
0,0291	4.356
0,0275	4.126
0,0261	3.994
0,0266	3.999

0,0313	4.423
0,0312	4.449
0,0302	4.367
0,0438	4.934
0,0402	4.877
0,0735	5.798

De acordo com os valores obtidos é possível verificar que, a cada aumento do nível de água em função da altura, há um aumento na pressão, deixando evidente que a maior altura proporcionou maior pressão e, conseqüentemente, menor velocidade superficial da água. Abaixo figuras que ilustram o comportamento da pressão na altura $y_1 = 0,1395$ m e para a altura $y_{14} = 0,0261$ m.

Figura 4 - Pressão da água para a altura $y_1 = 0,1395$ m

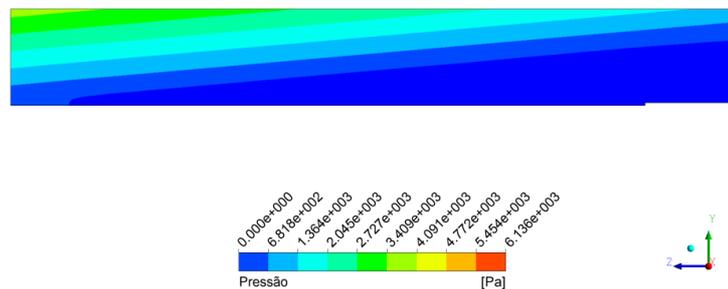
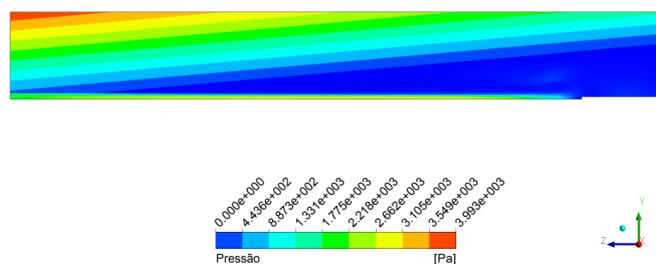


Figura 5 - Pressão da água para a altura $y_{14} = 0,0261$ m



A comparação dos resultados experimentais com os valores obtidos permite concluir que os ressaltos hidráulicos formados são, efetivamente, ressaltos fracos. Dessa forma, a utilização da fluidodinâmica computacional se mostrou muito eficaz para quantificação dos fenômenos existentes nos escoamentos com vertedouros e poderá ser utilizada em projetos de obras hidráulicas de forma a caracterizar o escoamento e otimizar características necessárias para a condição de projeto e ou do planejamento do ensaio em modelo reduzido.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo principal desse trabalho foi concluído com êxito. A comparação dos resultados experimentais com os resultados de simulação se mostraram muito fiéis. Mesmo apesar de que em alguns momentos, as velocidades foram menores que as calculadas, porém isso se explica pelo fato de que há uma certa dificuldade de determinar essas velocidades quando essas estão próximas à superfície livre.

Portanto, é interessante utilizar as simulações computacionais como ferramenta para diminuir o tempo, bem como os gastos gerados em um experimento. Este trabalho conclui que é favorável utilizar essa ferramenta, principalmente se tiver uma abordagem de otimização conjunta. Sendo assim, os estudos da fluidodinâmica do escoamento ajudam a explicar as tendências experimentais sobre a influência das condições no ressalto hidráulico favorecendo a sustentabilidade, uma vez que os gastos podem ser evitados ou minimizados computacionalmente.

Agradecimentos

Deixo expressos meus sinceros agradecimentos ao Cnpq pelo financiamento de meu projeto de pesquisa.

REFERÊNCIAS

ALVES, Alexandre Augusto Mees. **Caracterização das solicitações Hidrodinâmicas em bacias de dissipação por ressalto hidráulico com baixo número de Froude**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008.

AMANTE, Renata Cavalcante Rodrigues; AMORIM, José Carlos Cesar; MARQUES, Marcelo Giulian. **Utilização de modelos numérico e experimental para simulação de escoamentos em bacias de dissipação por ressalto hidráulico**. Comitê Brasileiro de Barragens, 2005.

ARANTES, Eudes José. **Caracterização do escoamento sobre vertedouros em degraus via CFD**. Tese (Doutorado) Escola de Engenharia de São Carlos, 2007.

NETO, Otacilio Correia Lima; MENEZES, Osmar Luiz Moreira Pereira Fonseca; TAVARES, Paulo Roberto Lacerda. **Modelagens experimental, teórica e computacional de escoamento gradualmente variado em canal retangular**. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Ceará, 2012.

PORTO, Rodrigo de M. **Hidráulica básica**. 4. ed. São Carlos: EESC-USP, 2006.

PRÁ, Maurício Dai. **Uma abordagem para determinação das pressões junto ao fundo de dissipadores de energia por ressalto hidráulico**. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.

SOUZA, Pedro Mark Baron Marinho. **Estudo da dissipação de energia por ressalto hidráulico a jusante de descarregadores não convencionais**. Dissertação (Mestrado). Universidade do Porto, 2011.

USE OF COMPUTER TOOLS FOR SUSTAINABLE STUDY OF HYDRAULIC JUMP

Abstract: *Due to the exponential growth of the use of technologies, several analyzes in the field of Engineering and Mathematics were facilitated. It is in this field of analysis that Mathematical Modeling comes in, so that results are processed and analyzed much more accurately and more quickly. This work presents a union between the study of the hydraulic rebound, a phenomenon of hydraulic engineering, with computational mathematics. Through the Ansys CFX program, computational modeling and simulations were done. The flow data obtained from the simulation were compared with data calculated in an experiment carried out at the laboratory of the Federal Technological University of Paraná, in the city of Campo Mourão, Paraná. Analyzes were made every 20 centimeters in the canal length, totaling its 300 cm. The experimental data, height of the water slide, slope of the channel and velocity were used later to calculate the flow, which in turn was used to calculate the flow. The calculated flow was compared with the data obtained from the simulation. It was possible to conclude that the values tested were very close to the values obtained through computational simulation. Thus, it is possible to use this computational tool in an efficient way, reducing the time of experimental studies as well as the expenses, thus contributing to sustainable engineering.*

Key-words: *Flow, hydraulic jump, sustainable engineering.*