

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

VIVIANE OKITA

**ESTUDO COMPARATIVO DO RESSALTO HIDRÁULICO
VIA FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CAMPO MOURÃO

2017

VIVIANE OKITA

**ESTUDO COMPARATIVO DO RESSALTO HIDRÁULICO
VIA FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado à Disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso Superior em Engenharia Civil do Departamento Acadêmico de Construção Civil - DACOC - da Universidade Tecnológica Federal do Paraná Câmpus Campo Mourão, para obtenção do título de bacharel em engenharia civil.

Orientadora: Professora Doutora Flávia Aparecida Reitz Cardoso.

Coorientador: Professor Doutor Eudes José Arantes.

CAMPO MOURÃO

2017



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Campo Mourão
Diretoria de Graduação e Educação Profissional
Departamento Acadêmico de Construção Civil
Coordenação de Engenharia Civil



TERMO DE APROVAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso

ESTUDO COMPARATIVO DO RESSALTO HIDRÁULICO VIA FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS

por
Viviane Okita

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 14:00 do dia 20 de junho de 2017 como requisito parcial para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL, pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Eudes José Arantes

(UTFPR)

Coorientador

Prof. MsC. Douglas Fukunaka Surco

(UTFPR)

Prof^a. Dr^a. Paula Cristina de Souza

(UTFPR)

Prof^a. Dr^a. Flávia Aparecida Reitz Cardoso

(UTFPR)

Orientadora

Responsável pelo TCC: **Prof. Me. Valdomiro Lubachevski Kurta**

Coordenador do Curso de Engenharia Civil:

Prof. Dr. Ronaldo Rigobello

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente à professora Flávia Aparecida Reitz Cardoso pela paciência, encorajamento, sugestões construtivas e ensinamentos em todas as etapas desse trabalho. Agradeço também ao meu coorientador pelo auxílio.

Toda minha gratidão e amor incondicional aos meus pais e a Deus por chegar onde cheguei. Todas as palavras de carinho e conforto fizeram toda essa caminhada ser mais tranquila. Um agradecimento especial as minhas madrinhas pelo apoio.

Impossível não agradecer meu melhor amigo e também namorado, Clodoaldo, por todo tempo e apoio com meu TCC. As idas às reuniões e a ajuda em todas as simulações. Sua colaboração (e paciência) foi imprescindível para o término desse trabalho, bem como a conclusão da faculdade.

Pelo companheirismo, ajuda e apoio agradeço às amigas Alessandra e Camila que, mesmo longe, estão sempre me ajudando. Brayan, Gui e Malandrin aqueles que fazem parte da segunda família. Jamy, Marcos, Dodô, Julia, Jean, Humberto, Darcinho e Aline, obrigada por estarem sempre presentes nos momentos mais complicados e nos mais gostosos também. Bia, Anry, Flávia, Dan e Kevin, que depois de anos de amizade continuemos crescendo e amadurecendo juntos sempre!

RESUMO

OKITA, Viviane. **Estudo Comparativo do Ressalto Hidráulico Via Ferramentas Computacionais**. 47 páginas. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2017.

O crescimento da utilização de ferramentas computacionais é visível atualmente, pois otimiza o tempo necessário e diminui os gastos, além possibilitar a análise de vários fatores, otimizando o resultado de uma só vez. Aliando esses conceitos com a Engenharia Hidráulica, esse trabalho propôs um estudo numérico comparativo em cima do ressalto hidráulico. Seu principal uso é como dissipador de energia, o qual costuma ser empregado para a proteção de estruturas hidráulicas. Ele promove uma absorção da energia de queda no local do impacto, denominado bacia de dissipação. Posteriormente, foi realizada uma experiência em um canal com a finalidade de obter os valores necessários para os cálculos dos parâmetros de comparação. Essa mesma experiência foi modelada e analisada no ANSYS CFX. Na simulação, a malha foi bem refinada, com o objetivo de obter resultados mais precisos. Por fim, os valores finais de velocidade e pressão foram analisados e comparados. Foi possível observar que a simulação retorna resultados muito próximos aos calculados experimentalmente.

Palavras-chave: Ressalto hidráulico, escoamento, ANSYS CFX.

ABSTRACT

OKITA, Viviane. **Comparative Study of a Hydraulic Jump Via Computing Tools**. 47 pages. Senior Thesis (Graduation), Federal Technological University of Parana. Campo Mourao, 2017.

Significant growth in the use of computational tools is visible in these days, because it optimizes time and decreases costs, and also works with the possibility of analysis of many factors, optimizing the results. Allying these concepts with the Hydraulic Engineering, this thesis presents a numerical comparative study of a hydraulic jump. Its main use is energy dissipation, which is usually applied in the protection of hydraulic structures. It promotes the absorption of the energy in the place of the impact, denominated stilling basins. Subsequently, an experience in an open channel was made, for the purpose of obtaining the values that are necessary for the calculation of the comparison parameters. The same experience was modelled and analysed in ANSYS CFX. In the simulation, the mesh was refined, in order to have more accurate results. Finally, the final results of velocity and pressure were analysed and compared. It was possible to observe that the simulation returns results that are very close to the ones that were experimentally calculated.

Key words: Hydraulic jump, flow, ANSYS CFX.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Canal utilizado para experimento..... | 20 |
| Figura 2 - Bomba utilizada no canal. | 21 |
| Figura 3 - Vertedor de paredes delgadas..... | 22 |
| Figura 4 - Ressalto hidráulico ocorrendo no canal. | 23 |
| Figura 5 - Geometria do ressalto hidráulico..... | 25 |
| Figura 6 - Malha do ressalto hidráulico. | 26 |
| Figura 7 - Malha do vertedouro. | 27 |
| Figura 8 - Recirculações observadas próximas ao vertedouro..... | 37 |
| Figura 9 - Velocidade superficial da água para a altura $y_1 = 0.1395$ m. | 38 |
| Figura 10 - Velocidade superficial da água para a altura $y_{14} = 0.0261$ m..... | 38 |
| Figura 11 - Comparação entre a velocidade experimental e a numérica. | 39 |
| Figura 12 - Pressão da água para a altura $y_1 = 0.1395$ m..... | 41 |
| Figura 13 - Pressão da água para a altura $y_{14} = 0.0261$ m..... | 41 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Alturas medidas do canal | 24 |
| Tabela 2 - Valores utilizados para o cálculo das velocidades | 35 |
| Tabela 3 - Velocidades experimentais e numéricas | 36 |
| Tabela 4 - Pressões numéricas..... | 40 |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 10 |
| 2 OBJETIVOS | 12 |
| 2.1 OBJETIVO GERAL..... | 12 |
| 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 12 |
| 3 JUSTIFICATIVA | 13 |
| 4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 15 |
| 4.1 ESCOAMENTO EM CANAIS ABERTOS..... | 15 |
| 4.2 RESSALTO HIDRÁULICO..... | 16 |
| 4.3 VERTEDORES..... | 17 |
| 4.4 MODELAGEM COMPUTACIONAL | 18 |
| 5 MATERIAIS E MÉTODOS..... | 20 |
| 5.1 COLETA DE DADOS NO CANAL PARA A FASE EXPERIMENTAL..... | 20 |
| 5.1.1 Vertedor de Paredes Delgadas..... | 21 |
| 5.1.2 A Formação do Ressalto Hidráulico | 22 |
| 5.1.3 Medição da Velocidade e o Cálculo da Vazão | 23 |
| 5.2 SIMULAÇÃO DO RESSALTO HIDRÁULICO | 24 |
| 5.2.1 Desenhando a Geometria e a Malha no ANSYS ICEM CFD | 25 |
| 5.2.2 Definindo as Condições de Simulação..... | 27 |
| 5.3 EQUAÇÕES EMPREGADAS NO ESCOAMENTO TURBULENTO..... | 28 |
| 5.3.1 Equações Características de Canais Retangulares | 28 |
| 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES | 35 |
| 7 CONCLUSÃO..... | 43 |
| 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 44 |

1 INTRODUÇÃO

A modelagem computacional é uma ferramenta que tem se destacado em diversas áreas, haja vista que se utiliza de resultados experimentais como instrumentos para análise de conceitos matemáticos básicos. Desses, comparações são realizadas como o intuito de validar os dados experimentais e propor melhorias nas condições utilizadas de modo a reduzir o tempo e o gasto experimental em diversos procedimentos (COSTA, 2009).

O advento do computador digital nos últimos 40 anos forneceu uma terceira alternativa para a análise do movimento dos fluidos: a simulação numérica. Essa área do conhecimento, que complementa as análises teóricas e as técnicas experimentais da mecânica dos fluidos, recebeu o nome de dinâmica de fluidos computacional (CFD). Apesar de uma área nova, a CFD está em pleno desenvolvimento e expansão, já sendo utilizada por pesquisadores nas áreas de , entre outras, medicina, meteorologia e engenharias civil e aeronáutica. A CFD complementa estudos em que análises ou testes em laboratórios não são suficientes, por razões de complexidade, custo e/ou tempo para possibilitar o entendimento adequado dos fenômenos físicos envolvidos (FORTUNA, 2000).

Baseado no crescente aumento da tecnologia, várias empresas criaram suas ferramentas como, por exemplo, o *software* ANSYS CFX e o *software* ANSYS FLUENT. Dentre as várias opções de aplicações, a qual o ANSYS CFX promete, estão o fluxo de partículas (multifásico), escoamentos (o qual será utilizado no presente trabalho) e otimização de máquinas (ANSYS, 2008).

Recentemente, com o desenvolvimento de recursos computacionais, modelos numéricos para predição de ressaltos hidráulicos têm atraído vários pesquisadores. A versatilidade de um modelo numérico, mesmo que ele não possa ser utilizado para a determinação final da melhor geometria, é valiosa como ferramenta para corrigir detalhes em função de seu custo reduzido, uma vez que pode ser utilizado em diversos projetos e modificações de geometria facilmente executadas em relação ao modelo físico (AMANTE et al., 2005).

É muito comum que o uso de métodos numéricos, a mecânica dos fluidos experimental e as análises teóricas se complementarem durante um projeto. Um exemplo dessa combinação pode ser visto durante o projeto do aeroporto de Kansai,

no Japão. Devido aos grandes espaços internos da estrutura, definidos no projeto, o desenho do sistema de ar condicionado foi realizado combinando simulações numéricas e testes experimentais. Os resultados das simulações numéricas foram usados para guiar os projetistas durante ensaios com um modelo reduzido, construído para complementar o estudo numérico. A comparação entre os dados numéricos e experimentais, apresentada em Yau & Whittle (1991), foi satisfatória. Outro exemplo pode ser encontrado em Rubin et al. (1977), em que o escoamento em dutos é analisado com o emprego de técnicas numéricas e analíticas, e os resultados são comparados com experimentos (FORTUNA, 2000).

Modelos físicos ou modelos reduzidos em escalas, aliados à modelagem computacional, são ferramentas usadas em diversos ramos das engenharias e em outros ramos para se projetar um protótipo, como por exemplo, um avião, um navio, uma plataforma de petróleo, um automóvel, bombas e turbinas hidráulicas ou uma usina hidrelétrica. Normalmente, este tipo de modelagem física é utilizado para complementar os cálculos dos modelos matemáticos durante um projeto grande e complexo. Assim, um modelo físico permite estudar, em escala reduzida ou aumentada, diversos fenômenos físicos (CORRÊA, 2011).

Essa pesquisa realizou um estudo comparativo entre uma análise experimental, teórica e modelada no CFD de um ressalto hidráulico, o qual foi causado por um vertedor de paredes delgadas. A análise experimental foi obtida por meio da coleta de dados seguida dos cálculos de velocidade. Foi retirada as medidas do canal usado para o experimento, o qual foi modelado exatamente igual no software ANSYS ICEM CFD. Posteriormente a simulação foi feita no ANSYS CFX. Os resultados obtidos nas simulações foram comparados com os resultados calculados.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o campo de escoamento sobre o vertedouro de um ressalto hidráulico por meio da simulação em um programa de fluidodinâmica computacional de modo a caracterizar esse escoamento segundo resultados experimentais.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudar as características básicas de um ressalto hidráulico, como perda de energia e altura do ressalto hidráulico.
- Realizar a medição das alturas referentes ao ressalto hidráulico e usar os dados obtidos para fazer a geometria em um programa de simulação computacional.
- Definir as condições de contorno.
- Analisar os perfis de pressão e velocidade.
- Realizar comparações dos dados obtidos experimentalmente e computacionalmente no que diz respeito ao comportamento do escoamento do ressalto hidráulico.

3 JUSTIFICATIVA

O salto ou ressalto hidráulico é uma sobre elevação brusca da superfície líquida. Corresponde à mudança de regime de uma profundidade menor que a crítica para outra maior que esta, em consequência do retardamento do escoamento em regime inferior. É um interessante fenômeno, o que frequentemente se observa no sopé das barragens, a jusante de comportas e nas vizinhanças de obstáculos submersos (PIZA, 2013).

Ele possui uma vasta gama de aplicações: em medidores de vazão do tipo calha, na melhoria da mistura de produtos químicos no tratamento de águas e esgotos, para intensificar a mistura de gases em processos químicos, na aeração de escoamentos poluídos com produtos biodegradáveis, entre outros. Seu principal uso é como dissipador de energia.

O dissipador de energia costuma ser empregado para a proteção de estruturas hidráulicas de aproveitamentos hidrelétricos. Ele promove uma absorção da energia de queda no local do impacto, denominado bacia de dissipação. Lencastre define dissipação de energia como uma transformação de parte da energia mecânica da água em energia de turbulência e, no final, em calor por efeito do atrito interno do escoamento e atrito deste com as fronteiras. A finalidade de um dissipador de energia é que ele não provoque danos em obras anexas ou erosões nos leitos a jusante (LENCASTRE, 1983).

Um dos problemas da hidráulica é a medição de vazão em condutos livres. Entre os medidores de vazão do tipo calha, um dos mais populares é o medidor Parshall, inventado por Ralph Leroy Parshall (1881-1960), que fez tudo baseado nos estudos de Venturini. Venturi foi um físico italiano responsável pela criação dos *tubos de Venturi*, usado para medir a velocidade do escoamento e a vazão de um líquido incompressível através da variação de pressão durante a passagem deste líquido por um tubo de seção mais larga e depois por outro de seção mais estreita. Hoje é frequentemente empregado como um efetivo misturador de soluções químicas nas estações de tratamentos de água. Nos misturadores hidráulicos é usado um ressalto hidráulico de grande turbulência pois, além de promover a mistura em tempo adequado, também é possível a medição da vazão. Ao provocar

esse ressaltado na saída da calha Parshall, ocorre a dispersão homogênea e rápida do coagulante.

O principal objetivo do CFD é reduzir o número de experimentos e explorar fenômenos que não poderiam ser estudados em laboratório de forma prática. Utilizando as técnicas do CFD, pode-se avaliar numericamente os diversos parâmetros relevantes ao problema. Esses, por sua vez, podem ser facilmente alterados até que o resultado da simulação atenda às exigências do projeto. Tudo isso de forma bem mais conveniente e a custos e tempos menores do que apenas utilizando técnicas experimentais e análises teóricas, combinadas com projeto inicial, ensaios e reprojetado (FORTUNA, 2000).

A fim de minimizar os custos e melhor dimensionar estas construções, normalmente, são elaborados modelos reduzidos que reproduzem, em menor escala, as obras em questão. Essa ferramenta de projeto possibilita o estudo das variáveis hidráulicas envolvidas, assim como o comportamento hidrodinâmico do escoamento, o transporte de sedimentos, a quantidade de material a ser utilizado ou mesmo as alterações ambientais geradas pelo escoamento a montante e a jusante destas estruturas (ABREU et al., 2011).

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 ESCOAMENTO EM CANAIS ABERTOS

O escoamento da água em um conduto pode ser tanto de canais abertos ou em canais fechados. Os dois são similares em muitos aspectos, mas se diferem em um aspecto importante. Canais abertos devem ter uma superfície livre e esta superfície livre está sujeita à pressão atmosférica. Em canais fechados não existe a pressão atmosférica agindo diretamente, apenas a pressão hidráulica. Canais abertos são encontrados em grande e pequena escala. Por exemplo, a altura do escoamento pode variar em centímetros no tratamento de plantas e mais de 10 metros em rios maiores. A principal velocidade do escoamento pode atingir menos de 0,01 m/s e, em águas tranquilas, atinge mais de 50m/s (CHOW, 1959).

Os escoamentos nos canais podem ter por parâmetros de variabilidade o espaço e o tempo, isto é, características hidráulicas como altura d'água, área molhada e raio hidráulico podem variar no espaço, de seção para seção, e no tempo. Tomando como critério comparativo o tempo, os escoamentos podem ser permanentes e não permanentes ou variáveis (PORTO, 2006).

A forma retangular geralmente é adotada nos canais de concreto e nos canais abertos em rocha. Tratando-se de seção retangular, a mais favorável é aquela para qual a base b é o dobro da altura h (NETTO,1998). Denominam-se condutos livres ou canais, os condutos onde o escoamento é caracterizado por apresentar uma superfície livre na qual reina a pressão atmosférica. Neste contexto, os cursos d'água naturais constituem o melhor exemplo de condutos livres. Além dos rios, funcionam como condutos livres os canais artificiais de irrigação e drenagem, os aquedutos abertos, e de um modo geral, as canalizações onde o líquido não preenche totalmente a seção do canal. Os escoamentos em condutos livres diferem dos que ocorrem em condutos forçados porque o gradiente de pressão não é relevante. Nesses condutos, os escoamentos são mais complexos e com resolução mais sofisticada, pois as variáveis são interdependentes com variação no tempo e espaço (EVANGELISTA, 2016).

4.2 RESSALTO HIDRÁULICO

O ressalto hidráulico é amplamente utilizado na dissipação de energia a jusante de obras hidráulicas. Este processo de dissipação é associado à flutuação de velocidades, níveis e pressões. O entendimento do ressalto hidráulico como forma de dissipação de energia tem assumido papel importante devido aos danos causados a estruturas de energia ao longo dos anos em função dos problemas atribuídos à fadiga, cavitação e ressonância (NETO; MARQUES, 2008).

O ressalto hidráulico pode apresentar-se em duas formas:

- a) o salto elevado, com um grande turbilhonamento, que faz certa porção do líquido rolar contra a corrente. Neste caso, o ar entranhado permite uma certa aeração do líquido.
- b) superfície agitada, porém sem remoinho e sem retorno do líquido. Essa segunda forma ocorre quando a profundidade inicial não se encontra muito abaixo do valor crítico (NETTO, 1998).

Meireles, Matos e Melo (2014) fizeram um estudo prático da aplicação do ressalto hidráulico para o cálculo de energia específica residual do escoamento em descarregadores de cheias em degraus. Os descarregadores de cheias em degraus provocam maior dissipação de energia do que os descarregadores com parâmetro convencional permitindo, em alguns casos, eliminar ou reduzir significativamente a dimensão da estrutura de dissipação de energia a jusante. Em diversos trabalhos de investigação desenvolvidos até o presente (DIEZ-CASCON et al. 1991; TOZZI, 1992, 1994; PEGRAM et al., 1999), a estimativa da energia específica residual tem sido efetuada com base na medição da altura do escoamento a jusante do ressalto hidráulico que se forma na bacia de dissipação de energia, junto do pé do descarregador, e na posterior aplicação da equação de conservação da quantidade de movimento para determinar a altura equivalente de água na seção imediatamente à montante do ressalto. Na aplicação da equação de conservação da quantidade de movimento, admite-se como válida a hipótese de que a distribuição de pressões na seção de montante do ressalto é hidrostática, o que constitui uma forma de simplificá-lo da realidade (MEIRELES et al., 2014).

Alguns problemas hidráulicos têm sido identificados ao longo dos anos e podem ser atribuídos a diversos fatores, como a utilização de critérios inadequados de dimensionamento e regimes de operação não previstos na fase de projeto. Lopardo et al. (2006) comentam que os problemas em obras hidráulicas só não ocorrem com maior intensidade devido à baixa frequência de operação dos sistemas descarregadores. Cabe então, ao engenheiro hidráulico, avaliar cuidadosamente as condições de funcionamento e os esforços ocasionados pelo escoamento junto à estrutura hidráulica bem como a jusante da mesma, visando obras tecnicamente viáveis, sempre com vistas à segurança (PRÁ, 2011).

4.3 VERTEDORES

Vertedor ou descarregador é o dispositivo utilizado para medir e/ou controlar a vazão em escoamento por um canal. Trata-se basicamente, de um orifício de grandes dimensões no qual foi suprimida a aresta do topo. Portanto, a parte superior da veia líquida, na passagem pela estrutura, se faz em contato com a pressão atmosférica. A presença do vertedor, que é essencialmente uma parede com abertura de determinada forma geométrica colocada, na maioria dos casos, perpendicularmente à corrente, eleva o nível d'água à sua montante até que esse nível atinja uma cota suficiente para produzir uma lâmina sobre o obstáculo, compatível com a vazão descarregada. A lâmina líquida, descarregada, adquirindo velocidade, provoca um processo de convergência vertical dos filetes, situando-se, portanto, abaixo da superfície livre da região não perturbada à montante (PORTO, 2006).

Nos projetos de vertedores-extravadores (ou simplesmente vertedores), usualmente, especificam-se cristas com acabamento em concreto alisado, cujas formas correspondem a resultados de estudos clássicos amplamente difundidos. A adoção de uma geometria hidrodinâmica implica promover, adequadamente, o assentamento da lâmina vertente sobre toda a soleira, evitando, assim, a ocorrência de pressões negativas importantes que podem desencadear um processo de cavitação na estrutura. Além de evitar que as pressões alcancem níveis indesejados, um perfil bem desenhado maximiza o coeficiente de descarga do vertedor, evita

descolamento e oscilação na veia vertente e o aparecimento de fortes turbulências (SIMÕES, 2008).

Uma das formas de dissipar parte da energia cinética é por meio da construção de degraus ao longo da calha do vertedouro, o que conduz a uma redução da energia específica residual na base do vertedouro. A dissipação de energia causada pelos degraus pode reduzir significativamente o tamanho e o custo da bacia de dissipação necessária na base do vertedouro, comparada com uma calha convencional (calha lisa). Apesar do conceito do vertedouro em degraus não ser recente, o crescimento do interesse em sua construção foi favorecido pelo uso da tecnologia do concreto compactado a rolo (CCR) na construção de barragens (ARANTES, 2007).

O desenvolvimento de transdutores e *softwares* para tratamento estatístico facilitou os estudos experimentais, possibilitando a medição e análise de flutuações de grandezas do escoamento turbulento. Diversos pesquisadores estudaram as flutuações de pressão na base dos ressaltos hidráulicos fazendo uso de análise de parâmetros estatísticos calculados a partir de dados instantâneos obtidos experimentalmente, relacionando estes parâmetros ao problema de projetos de vertedouros e bacias de dissipação (AMANTE et al., 2005).

4.4 MODELAGEM COMPUTACIONAL

Historicamente, a mecânica dos fluidos preocupou-se em estudar o comportamento do movimento dos fluidos de forma experimental muito antes do que de forma matemática. Isso explica o surgimento da hidráulica - que trata do movimento de líquidos em tubos, canais e outros dispositivos - antes da hidrodinâmica - que estabelece relações entre os movimentos dos fluidos e as forças que causam esse movimento. Com o advento do computador digital a partir dos anos de 1950, surgiu uma terceira alternativa: obter, pela solução numérica das equações de Navier-Stokes utilizando técnicas computacionais, o campo de velocidades que compõe o escoamento. Problemas reais de engenharia normalmente requerem o tratamento computacional pois, muitas vezes, essa é a forma mais prática, ou a única, de se obter os dados sobre o escoamento (FORTUNA, 2000).

Os métodos CFD foram inicialmente desenvolvidos na década de 1960 para resolver equações lineares e com interface bidimensional. No decorrer dos anos, a potência dos computadores possibilitou o desenvolvimento de métodos tridimensionais e posteriormente, na década de 1970, resolução de equações de comportamento não linear. Simulações com CFD eram restritas ao uso em marinha e aeronáutica, e apenas supercomputadores tinham capacidade de resolver o método de equações. Graças à evolução da informática e desenvolvimento de *softwares* com interfaces mais amigáveis, hoje a dinâmica computacional de fluidos é difundida em diversas outras áreas e recentemente também aplicados aos estudos em edificações (ANSYS, 2008).

Os estudos numéricos que tratam de processos de precipitação utilizando tecnologia supercrítica têm sido muito relatados na literatura com o intuito de prever variáveis de escoamento que experimentalmente são difíceis de serem obtidas. Os modelos matemáticos assim obtidos têm como função principal auxiliar a compreensão dos resultados experimentais, bem como avaliar processos e otimizar os desenhos dos equipamentos. Para Kompella *et al.* (2004), muitas das simulações são realizadas fazendo-se uso da fluidodinâmica computacional (CFD) com resultados satisfatórios no que trata dos processos de precipitação (CARDOSO, 2014).

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 COLETA DE DADOS NO CANAL PARA A FASE EXPERIMENTAL

O experimento com o canal retangular teve como objetivo obter valores para serem empregados em comparações numéricas como a determinação de perfis de velocidade, pressão e energia dissipada. O canal usado no experimento possui 20 centímetros de base, 40 centímetros de altura e 300 cm de comprimento, conforme a Figura 1. O canal apresenta uma inclinação de 5% (obtido pela relação entre a altura e o comprimento já inclinado). Realizou-se uma divisão do seu comprimento em partes de 20 centímetros em 20 centímetros e, com o auxílio de um paquímetro, mediu-se a altura da água. À medida que o ressalto foi se formando, a divisão de partes para a medição das alturas se alterou para 5 centímetros, no intuito de se obter um melhor resultado na simulação. O vertedouro utilizado para provocar o ressalto foi um vertedouro de paredes delgadas.

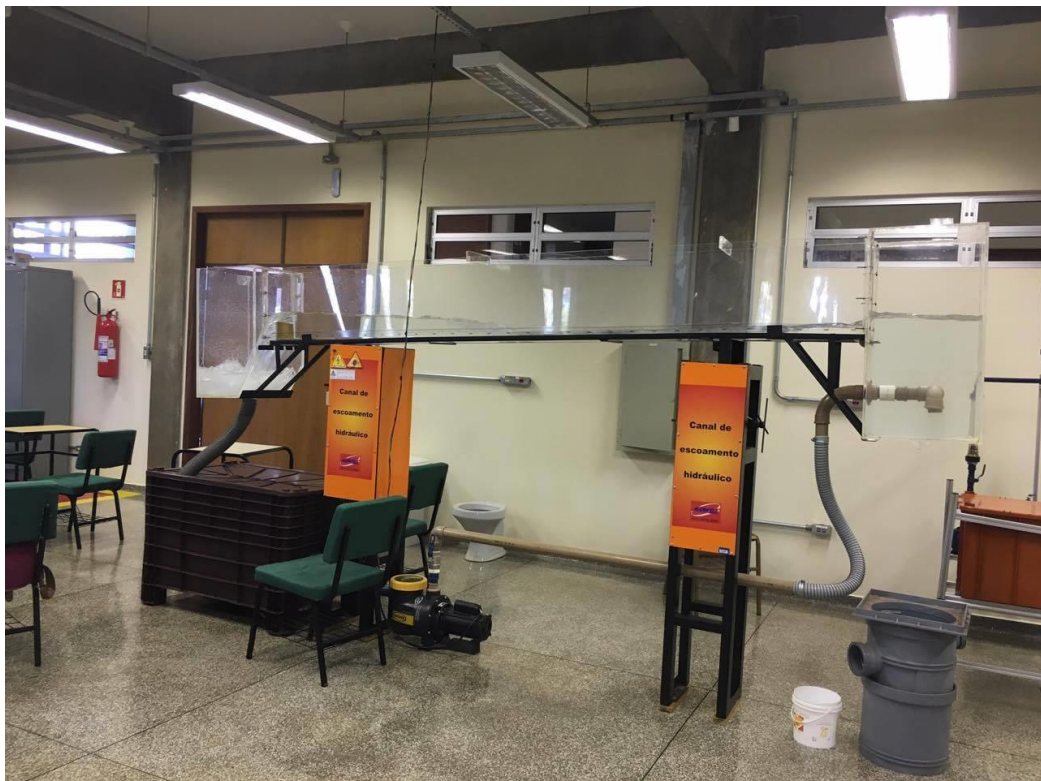


Figura 1 - Canal utilizado para experimento.



Figura 2 - Bomba utilizada no canal.

5.1.1 Vertedor de Paredes Delgadas

Os vertedores são instrumentos utilizados para medir a vazão em cursos da água naturais ou em canais construídos. Não há contrações laterais.



Figura 3 - Vertedor de paredes delgadas.

5.1.2 A Formação do Ressalto Hidráulico

O vertedor será colocado juntamente ao orifício de saída de água. Isso causará uma sobre-elevação brusca da superfície líquida, o que corresponde à mudança de regime de uma profundidade menor para outra maior, em consequência do retardamento do escoamento em regime inferior. Em outras palavras, é a transição de um escoamento supercrítico para um escoamento subcrítico.



Figura 4 - Ressalto hidráulico ocorrendo no canal.

5.1.3 Medição da Velocidade e o Cálculo da Vazão

Após as alturas retiradas conforme a divisão feita, foi utilizado um medidor de velocidade que capta a velocidade por ultrassom (Figura 5). Sabendo-se que o cano que interliga o canal tem um diâmetro interno (d_i), foi possível obter a vazão do conjunto pela equação:

$$Q = A \times v, \quad (1)$$

onde Q é a vazão em m^3/s , A é a área em mm^2 e v é a velocidade em m/s . A área será calculada pela Equação (2) dada:

$$A = \frac{\pi d^2}{4}. \quad (2)$$

Para a medição da velocidade foi utilizado o equipamento denominado Dynasonics (MODEL UFX). O medidor de fluxo ultra-sônico da Dynasonics UFX utiliza uma técnica avançada de medição ultra-sônica, fornecendo avaliações de velocidade de fluido precisas e não invasivas sem abrir o tubo. Utilizando dois

cristais piezoelétricos contidos em um transdutor, o medidor de fluxo ultra-sônico da Dynasonics UFX transmite energia ultra-sônica para a corrente de fluido e recebe descontinuidades de energia refletida (partículas em suspensão ou gases arrastados) dentro do líquido móvel. As transformações resultantes das reflexões de energia são processadas e convertidas em velocidade de fluido pelo sofisticado algoritmo de software do medidor de fluxo ultra-som da Dynasonics UFX. O processador também controla todas as operações do instrumento de seus circuitos de gerenciamento de bateria ultra eficientes para um programa de filtragem FIR (Finite Impulse Response) proprietário.n

5.2 SIMULAÇÃO DO RESSALTO HIDRÁULICO

Uma vez que os dados experimentais foram coletados e relacionados na Tabela 1, foi possível fazer a simulação computacional e obter comparações quanto ao experimental e os resultados gerados com a simulação. Para tanto, empregou-se o *software* ANSYS 14.5.

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 |

Cada uma dessas alturas foi utilizada para a simulação numérica do escoamento.

5.2.1 Desenhando a Geometria e a Malha no ANSYS ICEM CFD

Antes de fazer simulações foi necessária construção da geometria conforme as medidas do ressalto hidráulico utilizado no experimento (Figura 6). Para isso, empregou-se o programa ANSYS ICEM CFD. A geometria foi realizada em 3D juntamente com todas as características do canal, bem como a criação da malha e a superfície, para depois ser aplicada no ANSYS FLUENT CFD.

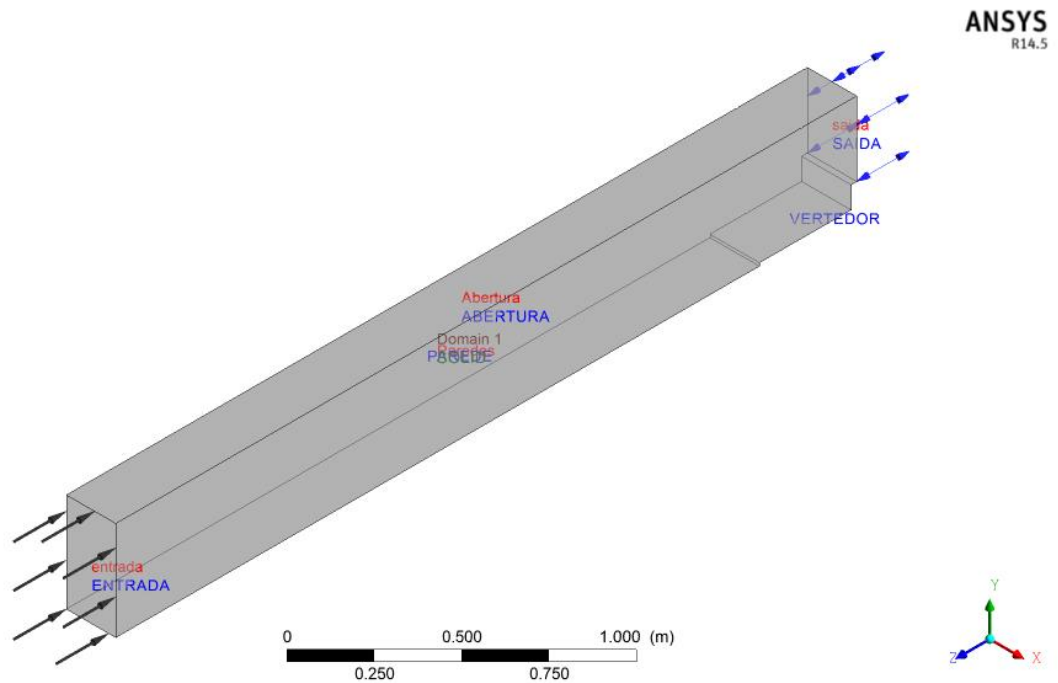


Figura 5 - Geometria do ressalto hidráulico.

A malha foi elaborada com elementos hexaédricos (Figura 7) contendo 286.550 nós e 268.032 elementos.

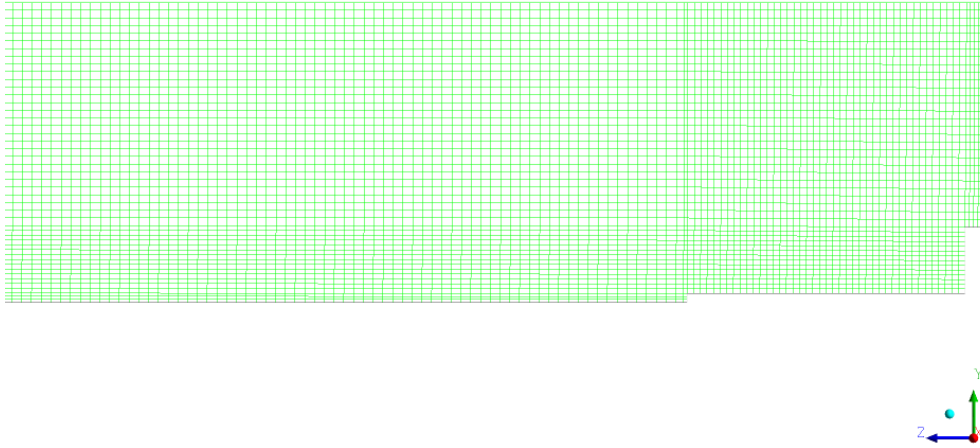


Figura 6 - Malha do ressalto hidráulico.

Houve um pequeno refino da malha próximo à saída e no vertedouro (Figura 8), principalmente pelo modelo do escoamento ser turbulento e havendo uma diminuição da geometria de saída em relação ao corpo do ressalto, além de haver diferenças na velocidade superficial da água ao longo de todo o ressalto hidráulico.

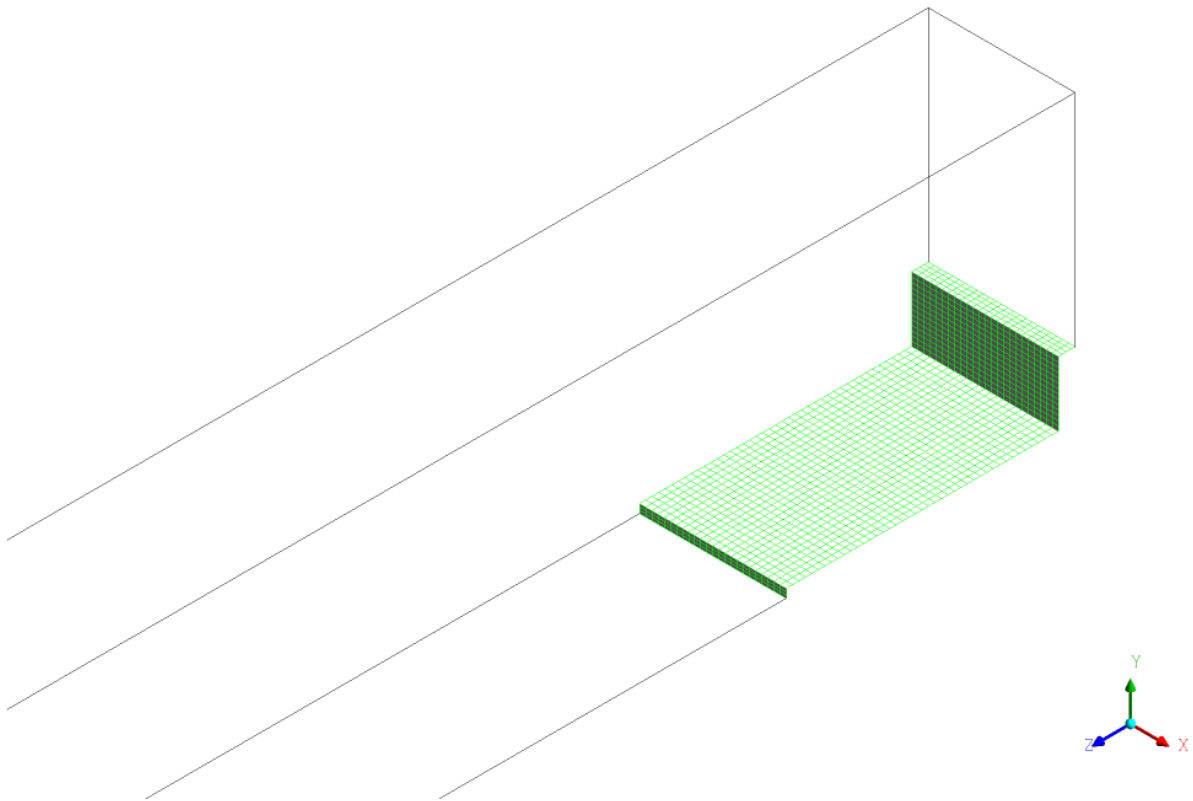


Figura 7 - Malha do vertedouro.

5.2.2 Definindo as Condições de Contorno

As condições de contorno são os valores que caracterizam especificamente um dado problema. Para o experimento em questão, foram pré-definidas as condições de velocidade de entrada da água e a altura inicial de acordo com cada uma das medições apresentadas na Tabela 1, a inclinação do canal (5%) e as componentes da gravidade consideradas segundo a inclinação do ressalto em relação à gravidade. A vazão mássica foi de 7.0350 kg/s, conforme Equação (1) e utilizou-se como materiais apenas ar e água em uma temperatura de 25°C.

5.2.3 Especificação do Modelo

O modelo escolhido foi o k -epsilon em função de ser o modelo de turbulência mais empregado para esse tipo de simulação numérica. É um modelo de duas equações, o que significa que inclui duas equações de transporte para representar as propriedades da turbulência da vazão. Isso permite o modelo de duas equações considerar o histórico de efeitos como, por exemplo, a convecção e a difusão da energia turbulenta.

A primeira variável transportada é a energia cinética, k . A segunda variável transportada é no caso da dissipação de turbulência, ε . Essa é a variável que determina a escala da turbulência, e a variável k determina a energia na turbulência (UNZUE, 2010). Maiores detalhes sobre o modelo podem ser encontrados em Cardoso (2014).

5.3 EQUAÇÕES EMPREGADAS NO ESCOAMENTO TURBULENTO

5.3.1 Equações Características de Canais Retangulares

Como problema importante no estudo do ressalto, apresenta-se aquele relativo ao relacionamento das alturas conjugadas, para uma dada geometria do canal e uma dada vazão. Por ser o escoamento bruscamente variado, acompanhado de uma brusca mudança na força hidrostática, seu estudo deverá ser feito a partir do teorema da quantidade de movimento, aplicado ao líquido confinado ao volume de controle limitado pelas seções nas quais ocorrem as alturas conjugadas.

Da estática dos fluidos, a força de pressão sobre uma área plana é dada por

$$F = \gamma \times \bar{y} \times A, \quad (3)$$

onde \bar{y} é a distância vertical desde a superfície livre até o centro de gravidade da seção molhada (PORTO, 2006). Portanto,

$$\frac{Q^2}{g \times A_1} + \bar{y}_1 \times A_1 = \frac{Q^2}{g \times A_2} + \bar{y} \times A_2 \quad (4)$$

Para uma seção retangular, ela pode ser reescrita como:

$$\frac{q^2}{g \times y_1} + \frac{y_1^2}{2} = \frac{q^2}{g \times y_2} + \frac{y_2^2}{2}, \quad (5)$$

$$y_1^2 + y_2^2 = \frac{2 \times q^2}{g} \times \left(\frac{1}{y_2} - \frac{1}{y_1} \right), \quad (6)$$

$$(y_1 - y_2) \times (y_1 + y_2) = \frac{2 \times q^2}{g} \times \left(\frac{y_1 - y_2}{y_2 \times y_1} \right), \quad (7)$$

como $y_2 \neq y_1$, tem-se:

$$y_1 + y_2 = \frac{2 \times q^2}{g} \times \frac{1}{y_2 \times y_1}, \quad (8)$$

$$y_2 \times y_1^2 + y_2^2 \times y_1 = \frac{2 \times q^2}{g}. \quad (9)$$

Dividindo por y_1^3 , fica:

$$\left(\frac{y_2}{y_1} \right)^2 + \frac{y_2}{y_1} = \frac{2 \times q^2}{q \times y_1^3}, \quad (10)$$

$$\left(\frac{y_2}{y_1} \right)^2 + \frac{y_2}{y_1} - 2 \times Fr_1^2 = 0. \quad (11)$$

Para que ocorra o ressalto, $\frac{y_2}{y_1} > 1$, portanto:

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + 8 \times Fr_1^2} - 1 \right] \quad (12)$$

A Equação (11) fornece a relação entre alturas conjugadas em função do número de Froude na seção de montante, em canais retangulares. O número de Froude desempenha um papel de extrema importância no estudo de canais porque a partir dele são definidos os regimes de escoamento:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \times H_m}}, \quad (13)$$

se $Fr < 1$, escoamento subcrítico ou fluvial;

se $Fr > 1$, escoamento supercrítico ou torrencial;

se $Fr = 1$, escoamento crítico.

O número de Froude é um adimensional que pode ser entendido como representando a razão entre a velocidade do escoamento e a velocidade de onda local da superfície. Assim, no ressalto, a velocidade diminui abruptamente de supercrítica (onde o número de Froude é superior à unidade, ou seja, a velocidade do escoamento é superior a de uma onda superficial) para subcrítica (onde o número de Froude é inferior à unidade, ou seja, a velocidade do escoamento é inferior a de uma onda superficial). Esta é uma visão cinemática do número de Froude, conveniente para o estudo de ressaltos e de vertedores. Vale mencionar que também se pode definir o número de Froude como a razão entre as forças de inércia e as forças gravitacionais, que confere a este parâmetro uma visão dinâmica (NÓBREGA, 2014).

Então, se a altura e a velocidade média do escoamento forem conhecidas em um dos lados do ressalto, os correspondentes valores do outro lado podem ser determinados pela Equação (11). É necessário que $y_2 > y_1$:

$$\frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + 8 \times Fr_1^2} - 1 \right] > 1, \text{ portanto, } \sqrt{1 + 8 \times Fr_1^2} > 3. \quad (14)$$

Logo, $1 + 8 \times Fr_1^2 > 9$, portanto, $Fr_1^2 > 1$, $Fr_1 > 1$.

Com isso, conclui-se que só haverá o ressalto se o escoamento à montante da singularidade for torrencial. É importante observar que esta condição não é necessária e suficiente, é só necessária, isto é, se o escoamento for torrencial e a singularidade produzir a altura requerida y_2 no regime fluvial, o ressalto se forma; se não, o escoamento continua torrencial, sem a formação do ressalto. Isto é válido qualquer que seja a forma da seção (PORTO, 2006).

Além dessas definições em relação às equações características de canais retangulares, também é necessário fazer um estudo peculiar do escoamento no ressalto hidráulico sobre vertedouro.

5.3.2 Equações de Transporte Governantes

Para descrever o escoamento do escoamento turbulento do ressalto hidráulico (sob as condições consideradas neste estudo), foi empregado o modelo de turbulência *k-epsilon*, cujo fluxo de mistura é regido por equações de conservação fundamentais para a massa, momento, espécies e energia (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). Os escoamentos turbulentos exigem um método de nivelamento apropriado e a média de Favre (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007), definida por $\tilde{\varphi}(x) = \frac{\overline{\rho\varphi(x)}}{\bar{\rho}}$, onde $\bar{\rho}$ representa a média de Reynolds temporal para a densidade, pondera que, observando também as propriedades das médias, a velocidade real pode ser considerada como a soma de um valor médio mais as flutuações, $\varphi = \tilde{\varphi} + \varphi' = \bar{\varphi} + \varphi'$, e as equações de conservação fundamentais são expressas para um volume de controle diferencial fixo no espaço tridimensional (CARDOSO, 2014).

Assim, a equação da continuidade em coordenadas cartesianas para um sistema com densidade variável em estado estacionário é dada por:

$$\partial_i \left(\bar{\rho} \tilde{u}_i \right) = 0, \quad (15)$$

onde \tilde{u}_i , com $i \in \{1, 2, 3\}$, representa as componentes médias do vetor velocidade $\bar{\mathbf{u}}$ as componentes do vetor posição, respectivamente.

Segundo Cardoso (2014), a equação do movimento tem de levar em conta que a densidade e viscosidade são variáveis. Esta equação pode ser simplificada com a aproximação da camada limite. Essa aproximação pode ser aplicada para os sistemas em que o movimento convectivo ocorre principalmente em uma única direção. Esse é o caso do fluxo do jato, em que a velocidade axial é algumas ordens de magnitude maior do que a velocidade radial. Sob essas condições, é possível negligenciar a segunda derivada no sentido do fluxo, contra as segundas derivadas perpendiculares à direção do fluxo. A equação do movimento na direção radial pode ser negligenciada. Assim, a equação de movimento na direção axial é:

$$\partial_i \left(\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j \right) = \partial_j \bar{P} + \partial_j \left(\tilde{\tau}_{ij} - \bar{\rho} u'_i u'_j \right), \quad (16)$$

onde $-\overline{\rho u_i' u_j'}$ representa o tensor de Reynolds, resolvido pelo modelo de

$$\text{turbulência } k\text{-epsilon a duas equações e } \tilde{\tau}_{ij} = \mu \left\{ 2 \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial \tilde{u}_k}{\partial x_k} \right\}.$$

Considerando a dissipação viscosa, as equações de energia (17) e de conservação de espécies (18) são dadas por:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\overline{\rho \tilde{u} \tilde{h}} \right) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{k_M + k_T}{C_p} + \overline{\rho u_j' \tilde{h}} \right) + \tilde{\tau}_{ij} \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} \quad (17)$$

e

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\overline{\rho \tilde{u}_j \tilde{y}_i} + \overline{\rho u_j' y_i'} \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\overline{\rho D_m} \frac{\partial y_i'}{\partial x_j} \right), \quad (18)$$

onde \tilde{h} é a entalpia, y_i a fração mássica do componente i e D_m o coeficiente de difusão molecular.

Com a consideração das médias, termos desconhecidos surgiram e então é necessário fechar o conjunto de Equações de (15) a (18) para se ter uma quantidade de equações igual ao número de variáveis desconhecidas.

Para a equação da quantidade de movimento (15) o termo desconhecido $\overline{\rho u_i' u_j'}$ é o tensor tensão de Reynolds e representa a transferência de quantidade de movimento devido às flutuações turbulentas. A hipótese de Boussinesq postula que esse transporte turbulento pode ser visto como um processo de difusão de quantidade de movimento e apresenta uma relação linear com a taxa de escoamento médio. A constante de proporcionalidade é denominada viscosidade turbulenta μ_T (ALMEIDA, 2013).

A base da aproximação de Boussinesq da viscosidade turbulenta é a semelhança com o tensor de Reynolds e a tensão que é gerada como um fluxo de momento pode ser descrita como sendo proporcional à deformação do escoamento médio, agindo de maneira análoga às tensões viscosas. A diferença real é que, a nível macroscópico, as flutuações turbulentas aparecem no lugar das flutuações moleculares e então, a forma generalizada proposta por Kolmogorov é:

$$\tau_{ij}^T = -\overline{\rho u_i' u_j'} = \overline{\rho u_i' u_j'} = 2\mu_T \tilde{\tau}_{ij} - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}. \quad (19)$$

Na Equação (19), k representa a energia cinética (por unidade de massa) das flutuações de velocidade, dada por:

$$k = \frac{1}{2} \left(\overline{u_x'^2} + \overline{u_y'^2} + \overline{u_z'^2} \right). \quad (20)$$

Com base na Equação (20), é possível avaliar a intensidade de turbulência, dada em (21):

$$I = \frac{k^{\frac{1}{2}}}{\|\mathbf{u}\|}. \quad (21)$$

Dessa forma, o termo de fechamento para a equação da conservação de espécie (18) é dado por $\tau_{ij}^T = -\overline{\rho u_i' u_j'} = \overline{\rho u_i' u_j'} = 2\mu_T \tilde{\tau}_{ij} - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}$.

As equações diferenciais de transporte do modelo de turbulência baseado na viscosidade turbulenta k - ϵ são dadas a duas equações. Uma equação semiempírica é dada para a energia cinética turbulenta, k , (Equação 22) e a outra para a taxa de dissipação da energia cinética turbulenta, ϵ , (Equação 23):

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho k \tilde{u}_j \right)}_I = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial}{\partial x_j} k \right]}_{II} + \underbrace{P_k}_{III} - \underbrace{\frac{\rho \epsilon}{N}}_{IV} \quad (22)$$

e

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho \epsilon \tilde{u}_j \right)}_I = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial}{\partial x_j} \epsilon \right]}_{II} + \underbrace{C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} P_k}_{III} - \underbrace{C_{\epsilon 2} \frac{\rho \epsilon^2}{k}}_{IV}, \quad (23)$$

em que ϵ é a dissipação por unidade de massa. Nas equações o termo I representa o transporte convectivo de k ou ϵ ; o termo II corresponde ao transporte por difusão; o termo III é a taxa de produção; e o termo IV a taxa de destruição. E P_k (Equação 24) é um termo de produção de turbulência devido a forças viscosas,

$$P_k = \mu_t \nabla \mathbf{u} : \left(\nabla \tilde{\mathbf{u}} + \nabla \tilde{\mathbf{u}}^T \right) - \frac{2}{3} \nabla \tilde{\mathbf{u}} \cdot \left(3\mu_T \cdot \tilde{\mathbf{u}} + \rho k \right), \quad (24)$$

onde $\tilde{\mathbf{u}}$ é o vetor velocidade média. As constantes empíricas do modelo são $C_\eta = 0.09$; $C_{\varepsilon_1} = 1.44$; $C_{\varepsilon_2} = 1.92$; $\sigma_k = 1$; $\sigma_\varepsilon = 1.3$. E a viscosidade turbulenta pode ser calculada com a equação $\mu_t = \frac{C_\eta \rho k^2}{\varepsilon}$.

Esse modelo a duas equações tem sido utilizado de forma representativa na descrição de escoamentos turbulentos em condições sub e supercríticas e a sua utilização torna possível a resolução do sistema de equações formado pelas equações da continuidade e da quantidade de movimento (CARDOSO, 2014).

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para dar início às simulações numéricas, a velocidade foi determinada por meio do ultrassom, conforme já detalhado anteriormente. A medida obtida foi de uma velocidade equivalente a 4.8 m/s. Segundo a Equação (14) e com a medida do diâmetro interno no tubo de 4.32 cm, foi possível calcular a vazão total do canal, e o resultado obtido foi de 0.007035558 m³/s, conforme Tabela 2. Para a utilização desse valor no *software*, foi necessário fazer a conversão para 7.0350 kg/s.

Tabela 2 - Valores utilizados para o cálculo das velocidades

| | |
|---------------------------|------------------------------|
| diâmetro | 0.0432 m |
| área | 0.001465741m ² |
| velocidade inicial | 4.8 m/s |
| vazão | 0.007035558 m/s ² |

Para cada altura medida experimentalmente uma velocidade foi calculada de acordo com a Equação (25)

$$v = \frac{Q}{A}, \quad (25)$$

conforme os resultados obtidos na Tabela 3:

Tabela 3 - Velocidades experimentais

| 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 |

Para cada altura, foi feita uma simulação no CFX de acordo com as condições e o modelo proposto anteriormente. Cada simulação foi convergida em aproximadamente 12300 iterações, durante cerca de 160 horas. Os resultados foram obtidos no pós-processamento e comparados com os dados experimentais. A Tabela 4 apresenta os resultados relativos às velocidades médias obtidas nas simulações numéricas.

Nas simulações, uma primeira verificação foi que os campos de velocidades formavam recirculações próximas ao vertedouro, como era esperado, conforme se verifica na Figura 9. 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 Froude estar concentrado entre 0.5 e 1.3, ou seja, $0.5 < Fr < 1.3$ e passar do estado supercrítico para subcrítico.

Segundo Alves (2008), o número de Froude obtido em seu trabalho foi semelhante e esse tipo de ressalto pode ser mesmo considerado fraco. Desta forma, a perda de energia no ressalto, em seus ensaios, foi relativamente reduzida.

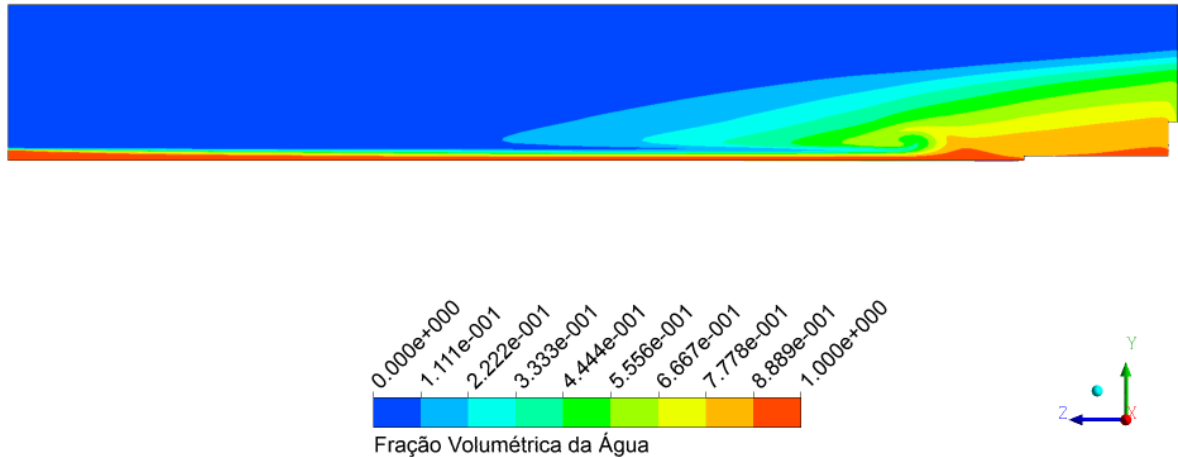


Figura 8 - Recirculações observadas próximas ao vertedouro.

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 (2009), existem dificuldades na determinação da velocidade experimental próxima à superfície livre, "[...] e 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" (ARANTES, 2009, p. 73). Apesar das equações governantes empregadas serem fisicamente robustas, pode eventualmente haver uma subestimação das velocidades próximas à superfície por meio dos termos modelados.

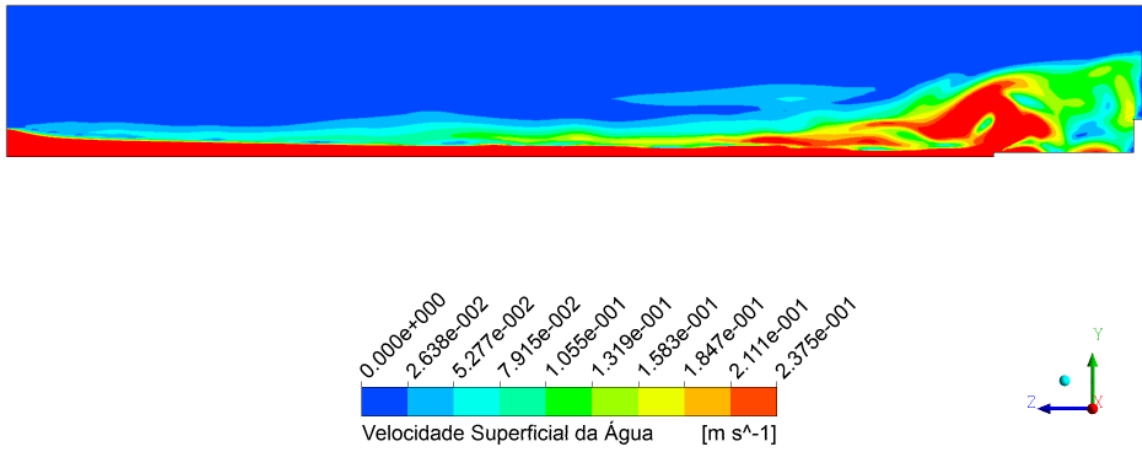


Figura 9 - Velocidade superficial da água para a altura $y_1 = 0.1395$ m.

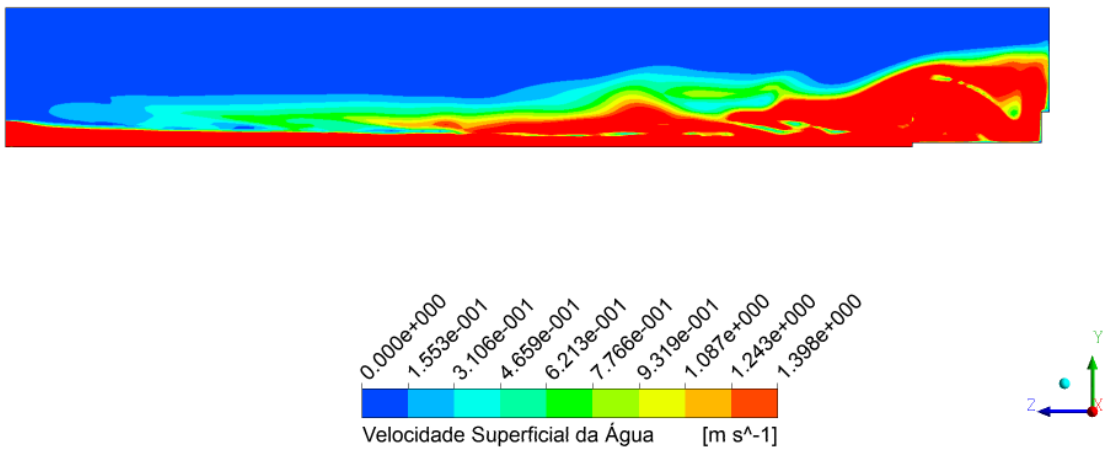


Figura 10 - Velocidade superficial da água para a altura $y_{14} = 0.0261$ m.

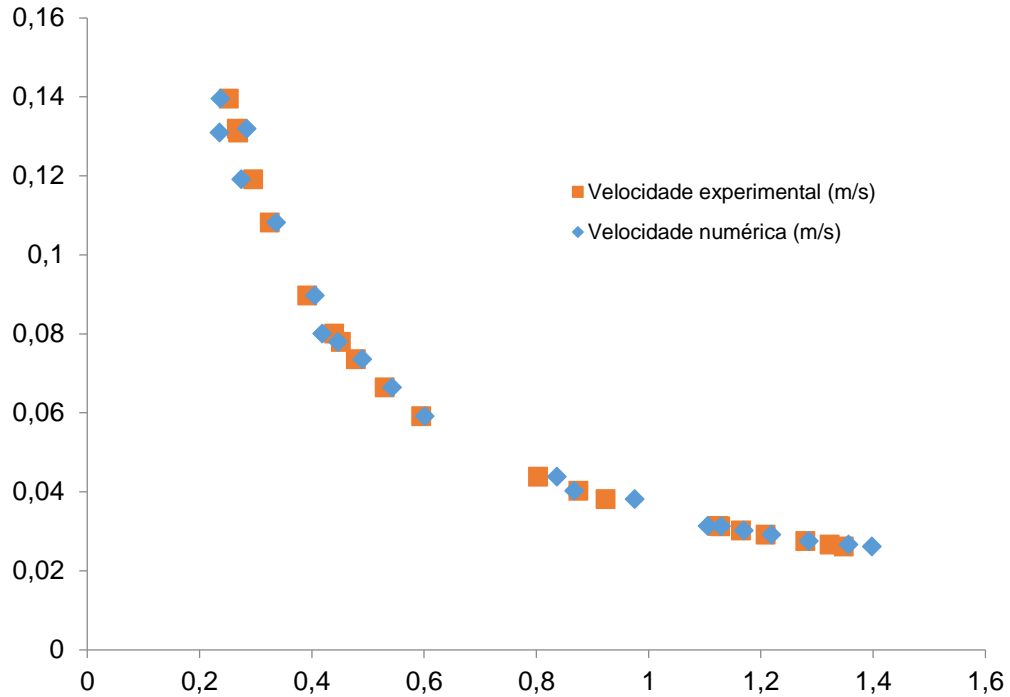


Figura 11 - Comparação entre a velocidade experimental e a numérica.

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. As Figuras 10 e 11 apresentam esses perfis de velocidade e sua relação com a altura, corroborados pela Figura 12, onde se percebe a grande proximidade nos resultados experimentais e numéricos. Esse relacionamento entre velocidade e altura também foi percebido por Alves (2008) e Souza (2011).

Com relação à pressão sofrida pelo movimento da água, não se tem os valores experimentais e função do laboratório não disponibilizar o aparelho piezômetro, mas como houve uma grande proximidade em relação à velocidade superficial, também podemos concluir que haverá uma grande proximidade com relação à pressão, conforme valores apresentados na Tabela 5.

Tabela 4 - Pressões numéricas

| Alturas (m) | Pressão (Pa) |
|-------------|--------------|
| 0.1395 | 6136 |
| 0.1309 | 6108 |
| 0.1319 | 6109 |
| 0.1191 | 6101 |
| 0.1081 | 6073 |
| 0.0897 | 5889 |
| 0.0800 | 5858 |
| 0.0779 | 5809 |
| 0.0664 | 5678 |
| 0.0591 | 5467 |
| 0.0381 | 4238 |
| 0.0291 | 4356 |
| 0.0275 | 4126 |
| 0.0261 | 3994 |
| 0.0266 | 3999 |
| 0.0313 | 4423 |
| 0.0312 | 4449 |
| 0.0302 | 4367 |
| 0.0438 | 4934 |
| 0.0402 | 4877 |
| 0.0735 | 5798 |

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 (Figuras 13 e 14). Da mesma forma, a menor altura gerou maior velocidade superficial da água e menor pressão, também identificado por Souza (2011) e Alves (2008).

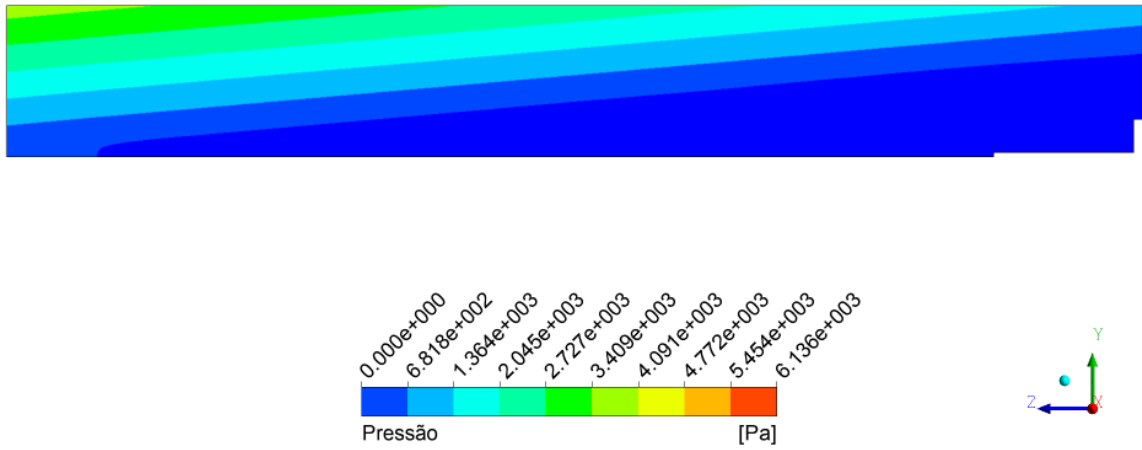


Figura 12 - Pressão da água para a altura $y_1 = 0.1395$ m

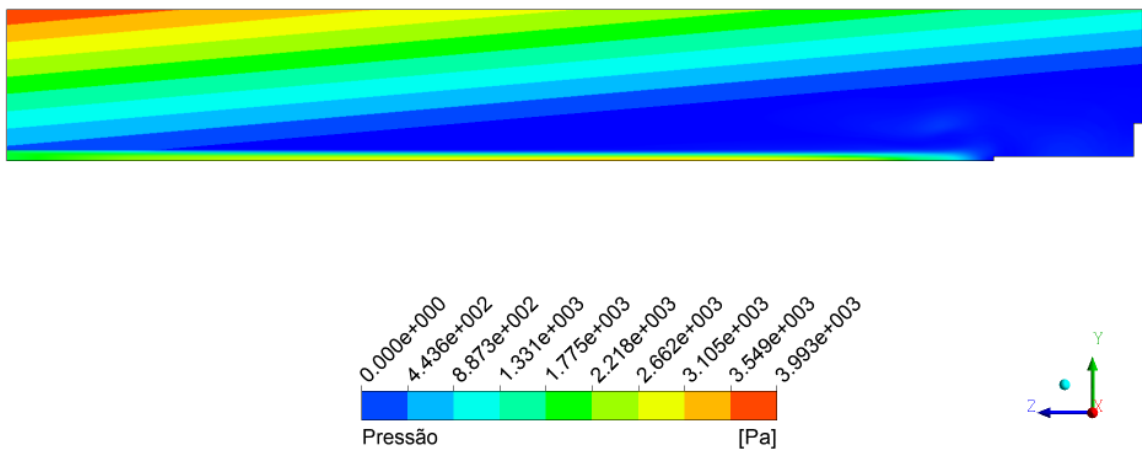


Figura 13 - Pressão da água para a altura $y_{14} = 0.0261$ m.

Para a energia dissipada, percebeu-se que, após o escoamento atingir seu estado subcrítico, houve uma redução significativa em relação ao vertedouro. Essa consideração pôde ser corroborada por Arantes (2009) quando citou em sua tese de doutorado que Houston (1987) realizou estudos em modelos reduzidos de Upper Stillwater Dam, cujos modelos foram construídos em duas escalas diferentes, um deles com canal estreito, em escala 1:15 e outro com canal largo, na escala 1:50.

Seus principais resultados foram semelhantes aos obtidos por Sorensen (1985), ou seja: para vazões pequenas, da ordem de até $3 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, a energia dissipada ao longo da calha era da ordem de até 95% da energia total, decrescendo com a vazão, atingindo valores da ordem de 60% para vazões da ordem de $10 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$. Para a maior altura medida no vertedouro, y_1 , a perda da energia dissipada foi de cerca de 0.415 na razão $\Delta y/y_1$ e para a menor altura no vertedouro, y_{14} , a perda da energia ficou em 0.990 na razão $\Delta y/y_{14}$. Resultados parecidos também foram relatados por Souza (2011) e Alves (2008), Teixeira (2003) e Quevedo (2008).

A comparação dos resultados experimentais com os valores obtidos permite concluir que os ressaltos hidráulicos formados são, efetivamente, ressaltos fracos. Dessa forma, podemos concluir que 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.

7 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos pela simulação feita numericamente se mostraram favoráveis ao calculado em relação aos resultados obtidos experimentalmente, apesar de que em alguns momentos foi possível observar o fato de que as velocidades foram menores do que as calculadas. Isso se explica, normalmente, pelo fato de que há dificuldade de se determinar essas velocidades quando estão próximas à superfície livre.

Para a análise da pressão, foi considerado que os valores, assim como os da velocidade, também seriam próximos aos coletados no experimento. Essa coleta não foi possível pois não havia o equipamento necessário para realizar a medição dos valores.

Portanto, é possível, a partir do modelo de um ressalto em particular, antes da execução de uma série de experimentos no laboratório em busca de condições favoráveis à obtenção dos resultados, proceder com simulações como as apresentadas neste trabalho para encontrar uma combinação de parâmetros satisfatória, e se possível, com alguma abordagem de otimização acoplada. Assim, do presente estudo resulta que a fluidodinâmica do escoamento ajuda a explicar tendências experimentais sobre a influência das condições de operação de um ressalto hidráulico, proporcionando um menor tempo de estudos experimentais e também diminuição de gastos na montagem do experimento.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, Aline Saube; SANTOS, Juliano Pacheco dos; PRIEBE, Priscila dos Santos; COLLARES, Gilberto Loguercio; DAI PRÁ, Mauricio. **Projeto hidráulico de circuito fechado para implementação de modelo física para avaliação das pressões atuantes em aquedutos de eclusas de navegação**. Disponível em http://www2.ufpel.edu.br/cic/2011/anais/pdf/EN/EN_01164.pdf. Acesso em 11/05/2017.

ALMEIDA, Regiani Aparecida. **Estudo do escoamento turbulento de fluido supercrítico em tubo capilar aplicado à produção de nanopartículas**. Tese (Doutorado). Universidade Estadual de Maringá, 2013.

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.

ANSYS. **ANSYS CFX Workbench**. Canonsburg, 2008.

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

CARDOSO, Flávia Aparecida Reitz. **Modelagem da precipitação com antissolvente supercrítico assistida por CFD**. Tese (Doutorado) Universidade Estadual de Maringá, 2014.

CHOW, Ven Te. **Open channel hydraulics**. 1959.

CORRÊA, Polliana. **Água e ciência**. Disponível em <http://www.webradioagua.org/index.php/agua-e-ciencia/item/802-voc%C3%AA-sabe-o-que-%C3%A9-um-modelo-reduzido-em-escala>. Acesso em 11/05/2017.

COSTA, Helisângela Ramos da. A modelagem matemática através de conceitos científicos. **Revista Ciências & Cognição**, 2009 (3) 114-133.

EVANGELISTA, Adão Wagner Pêgo. **Condução de água**. Disponível em http://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/17309/material/3.1__Condu%C3%A7%C3%A3o_de_%C3%A1gua.pdf. Acesso em 10/11/2016.

FERNANDES, Carlos. **Medidores parshall**. Disponível em <http://www.dec.ufcg.edu.br/saneamento/PARSHALL.html>. Acesso em 20/09/2016.

FORTUNA, Armando de O. **Técnicas computacionais para dinâmica dos fluidos- conceitos básicos e aplicações**. EDUSP, 2006.

HOUSTON, K. L. **Hydraulic model studies of upper still water dam and stepped spillways and outlet works**. Denver: Bureau of Reclamation, 1987, p.51.

MEIRELES, Inês; MATOS, Jorge; MELO, José Falcão. **Energia específica residual do escoamento em descarregadores de cheias em degraus**. Aplicação do ressalto hidráulico. 7º Congresso de Águas, 2014.

NETO, Edgar Fernando Treierweiler; MARQUES, Marcelo Guilian. **Análise do campo de pressões em ressalto hidráulico submerso a jusante de uma comporta**. Disponível em https://www.researchgate.net/publication/305306384_Analise_do_Campo_de_Pressoes_em_Ressalto_Hidraulico_Submerso_a_Jusante_de_uma_Comporta. Acesso em 27/05/2017.

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.

NETTO, J. M. d. A. **Manual de hidráulica**. 8. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1998.

NÓBREGA, Juliana Dorn. **Metodologia teórica e experimental para determinação das características do ressalto hidráulico clássico**. Tese (Doutorado) Escola de Engenharia de São Carlos, 2014.

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.

REZENDE, Ricardo Vicente de Paula. **Modelagem matemática e desenvolvimento de metodologia computacional para a simulação numérica do escoamento bifásico de ar e ferro-gusa em canal de corrida de alto-forno**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.

SCHULZ, Harry Edmar; SIMÕES, André Luiz Andrade; PORTO, Rodrigo. **Superfície livre de escoamentos turbulentos em canais: vertedores em degraus e ressalto hidráulico**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 2012.

SIMÕES, André Luiz Andrade. **Considerações sobre a hidráulica de vertedores em degraus metodologias adimensionais para pré-dimensionamento**. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, 2008.

SIMÕES, André Luiz Andrade. **Escoamentos turbulentos em canais com o fundo em degraus: resultados experimentais, soluções numéricas e proposições teóricas**. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, 2012.

SORENSEN, R. M. Stepped spillway hydraulic model investigation. **Journal of Hydraulic Engineering**. ASCE, 1985 (111) 1461-1472.

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.

Quevedo, D. **Análise de pressões junto ao fundo no ressalto hidráulico formado a jusante de um vertedouro através da distribuição bivariada de valores extremos**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008.

Teixeira, E. **Previsão dos valores de pressão junto ao fundo em bacias de dissipação por ressalto hidráulico**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.

TOMAZ, Plínio. **Dissipador de energia para obras hidráulicas de pequeno porte**. Curso de manejo de águas pluviais, 2010.

UNZUE, Javier Garcia. **CFD analysis of two-dimensional linear compressor cascade flows**. Disponível em <http://academica-e.univarra.es>. Acesso em 28/05/2017.

ZANARDI, Maurício Zanardi. **Ressalto hidráulico**. Disponível em http://www.feg.unesp.br/~mzanardi/EXP_RESSALTO_HIDR%C1ULICO.pdf. Acesso em 20/09/2016.

PIZA, Francisco. **Condutos Livres**. Disponível em <https://engenhariacivilfsp.files.wordpress.com/2013/09/apostila-de-hidraulica.pdf>. Acesso em 01/07/2017.

LENCASTRE, Armando. **Manual de Hidráulica Geral**. 1983.