

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

**Análise do comportamento hidráulico de vertedores na variação do número de Froude –
Simulação Computacional**

Poliana Marcela da Silva

Itajubá, Março de 2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

Poliana Marcela da Silva

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO HIDRÁULICO DE VERTEDORES NA
VARIAÇÃO DO NÚMERO DE FROUDE – SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de Concentração: Meio Ambiente e Recursos Hídricos

Orientador: Prof. Dr. Fernando das Graças Braga da Silva

Co-orientador: Prof. Dr. Oswaldo Honorato de Souza Junior

ITAJUBÁ

2021

DEDICATÓRIA

Dedico esta, assim como todas as demais conquistas, a Deus, meus pais, irmãos, sobrinhas e esposo. A presença de vocês durante esta jornada tornou tudo mais fácil.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida e por ser a base das minhas conquistas. Aos meus pais Ilma Silva e Antônio Silva pelo incentivo e auxílio em todos os momentos de minha vida. Aos meus irmãos Mateus Silva e Thiago Silva pelo amor incondicional e todo suporte. As minhas sobrinhas Yasmin Silva, Anna Laura Silva e Maria Isis Silva por todo afeto e momentos de alegrias. Ao meu marido Marcelo Magalhães pela paciência, companheirismo e estímulo. A toda minha família e amigos que me impulsionam e apoiam as minhas decisões. A minha avó querida Tereza Silva a qual tenho muito apreço. Amo vocês!

Aos meus professores por todo ensinamento, ao meu orientador professor Dr. Fernando das Graças Braga da Silva, ao meu co-orientador professor Dr. Oswaldo Honorato de Souza Junior e ao professor Dr. Ivan Felipe Silva dos Santos pelo auxílio, competência e contribuições para a realização deste trabalho e para meu crescimento científico e profissional. Ao professor Marcos Aurélio de Souza e Luiz Fernando Barca (NUSEC) da Universidade Federal de Itajubá por permitir o uso da licença do Ansys 18.2. Ao Núcleo de Modelagem e Simulações em Meio Ambiente e Recursos e Sistemas Hídricos da Universidade Federal de Itajubá (NUMMARH).

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 88882.430168/2019-01.

“Prefiram a minha instrução à prata, e o conhecimento ao ouro puro, pois a sabedoria é mais preciosa do que rubis; nada do que vocês possam desejar compara-se a ela.”

Provérbios, capítulo 8, verso 10 e 11.

RESUMO

O escoamento hidráulico possui amplo número de aplicações técnicas na engenharia em áreas que envolvem o saneamento, drenagem urbana, irrigação, hidroelétrica, navegação e preservação do meio ambiente. Dessa maneira o escoamento em superfície livre pode ser considerado um fator destrutivo na natureza podendo danificar estruturas e tirar vidas humanas. O objetivo deste trabalho é estudar o comportamento do escoamento em um canal retangular real por meio de simulações computacionais em fluidodinâmica computacional para determinar o tipo de escoamento através do número de Froude e analisar o comportamento hidráulico para três vertedores com geometrias diferentes: fundo, retangular e triangular com diferentes valores de vazão. Para tal foi utilizado a linguagem de programação Fortran para realização de simulações preliminares com finalidade de prever o comportamento do canal que através de cálculos pode-se definir o tipo de geometria dos vertedores. Por outro lado foi utilizado o software de fluidodinâmica computacional que permite analisar o comportamento hidráulico do canal além de permitir a construção de mapas de cores de cada vertedor inserido no canal. O presente estudo indica que o modelo computacional consegue reproduzir os escoamentos em superfície livre tomando as precauções em relação a qualidade da malha que garante a convergência da solução computacional. Através das análises foi possível realizar o cálculo do número de Froude a montante do vertedor, em cima do vertedor e a jusante do vertedor permitindo compreender o comportamento hidráulico para cada situação em estudo.

Palavras-chave: canais hidráulicos, escoamento livre, vertedores, número de Froude, dinâmica computacional dos fluidos.

ABSTRACT

Hydraulic flow has a wide range of technical applications in engineering in areas involving sanitation, urban drainage, irrigation, hydroelectric, navigation and environmental preservation. In this way, runoff on a free surface can be considered a destructive factor in nature and can damage structures and take human lives. The objective of this work is study the behavior of the flow in a real rectangular channel by means of computational simulations in computational fluid dynamics to determine the type of flow through the Froude number and to analyze the hydraulic behavior for three spillways with different geometry: bottom, rectangular and triangular with different flow values. For this purpose, a Fortran programming language was used to carry out preliminary simulations with the prediction of the channel behavior which, through calculations, can define the type of spillway geometry. On the other hand, computational fluid dynamics software was used, which allows analyzing the hydraulic behavior of the channel in addition to allowing the colors maps construction of each spillway inserted in the channel. The present study indicates that the computational model is able to reproduce flows on a free surface taking precautions regarding the quality of the mesh that guarantees the convergence of the computational solution. The analyzes allowed the calculation of the Froude number to be carried out upstream of the spillway, on top of the spillway and downstream of the spillway, allowing to understand the hydraulic behavior for each situation under study.

Keywords: hydraulic channels, free flow, spillways, Froude number, computational fluid dynamics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Elementos geométricos de uma seção	17
Figura 2 – Tipos de escoamentos permanentes, uniformes e variados	18
Figura 3 – Terminologia de um vertedor	19
Figura 4 – Vertedor de parede delgada (a); Vertedor sem contrações (b)	20
Figura 5 – Vertedor triangular de parede fina	21
Figura 6 – Vertedor Cipoletti	22
Figura 7 – Vertedor circular	22
Figura 8 – Vertedor de soleira espessa horizontal	23
Figura 9 – Vertedor tipo <i>Creager</i>	23
Figura 10 – Malha de volumes finitos e células	27
Figura 11 – Estrutura da ferramenta CFX	30
Figura 12 – Localização do canal hidráulico (UNIFEI – Itajubá, MG)	36
Figura 13 – Canal hidráulico (UNIFEI – Itajubá, MG)	37
Figura 14 – Fluxograma das etapas da pesquisa	38
Figura 15 – Nível de água de entrada	41
Figura 16 – Esquema para modelagem do problema	42
Figura 17 – Condições de contorno de entrada, saída, superfície e fundo do canal	44
Figura 18 – Geometria do vertedor de fundo	48
Figura 19 – Geometria do vertedor retangular e triangular	49
Figura 20 – Malha resultante da geometria do vertedor de fundo e vertedor retangular	49
Figura 21 – Malha resultante da geometria do vertedor triangular	50
Figura 22 – Campos de pressão absoluta do vertedor retangular e vertedor triangular ($Q=0,05$ m^3/s)	51
Figura 23 – Campos de pressão absoluta do vertedor de fundo e vertedor triangular ($Q=0,25$ m^3/s)	52
Figura 24 – Frações de volume de ar e água do escoamento nos vertedores de fundo, retangular e triangular ($Q=0,05$ m^3/s)	53
Figura 25 – Frações de volume de ar e água do escoamento nos vertedores de fundo, retangular e triangular ($Q=0,25$ m^3/s)	54
Figura 26 – Movimento da água em um vertedor retangular	55
Figura 27 – Vertedor de parede delgada	55
Figura 28 – Vertedor triangular	55

Figura 29 – Campos de velocidade no vertedor de fundo, retangular e triangular ($Q=0,05 \text{ m}^3/\text{s}$)	56
Figura 30 – Campos de velocidade no vertedores de fundo, retangular e triangular ($Q=0,25 \text{ m}^3/\text{s}$)	57
Figura 31 – Indicação do local de cálculo do número de Froude	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Equações governantes para fluidos compressíveis em coordenadas cartesianas....	25
Tabela 2 – Dados do canal UNIFEI.....	37
Tabela 3 – Alturas do escoamento a montante do vertedor de acordo com a vazão	41
Tabela 4 – Malha computacional de cada vertedor	43
Tabela 5 – Expressões utilizadas em solver (ANSYS).....	44
Tabela 6 – Definições no software de CFD.....	45
Tabela 7 – Resultados da simulação do canal no Fortran.....	47
Tabela 8 – Resultados da geometria, malha e tempo de simulação.....	50
Tabela 9 – Cálculo do número de Froude ($Q=0,05 \text{ m}^3/\text{s}$)	60
Tabela 10 – Cálculo do número de Froude ($Q=0,25 \text{ m}^3/\text{s}$)	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A – Área molhada (m)

B – Largura da seção na superfície livre (m)

CFD – Dinâmica computacional dos fluidos

Fr – Número de Froude (Adimensional)

g – Aceleração da gravidade (m/s²)

H_m – Altura hidráulica (m)

k- ϵ – Modelo de turbulência

k- ω – Modelo de turbulência

L – Largura da seção na superfície livre (m)

P – Perímetro molhado (m)

p' – Pressão estática (flutuações)

\bar{p} – Pressão estática (valor médio)

Q – Vazão (m³/s)

\bar{T}_e – Temperatura (valor médio)

T_e' – Temperatura (flutuações)

u', *v*' – Componente de vetor de velocidade (flutuações)

\bar{u} , \bar{v} – Componente de vetor de velocidade (valor médio)

V – Velocidade (m/s)

Y – Altura da lâmina de água (m)

α – difusividade térmica do fluido.

SUMÁRIO

1. Introdução	13
2. Objetivos	15
2.1 Objetivo geral	15
2.2 Objetivo específico	15
3. Revisão bibliográfica	16
3.1 Canais hidráulicos	16
3.2 Vertedores	18
3.2.1 Vertedor retangular	20
3.2.2 Vertedor triangular	21
3.2.3 Vertedor trapezoidal	21
3.2.4 Vertedor circular	22
3.2.5 Vertedor de soleira espessa horizontal	22
3.3 Fluidodinâmica computacional – CFD	23
3.3.1 Equações médias de Reynolds Average Navier-Stokes – RANS	24
3.3.2 Modelagem da turbulência	26
3.3.3 Discretização das malhas computacionais	27
3.4 Dinâmica computacional dos fluidos: modelo Ansys CFX	29
3.4.1 Procedimentos de solução em CFD	30
3.4.1.1 Pré-processamento	30
3.4.1.2 Processamento	31
3.4.1.3 Pós-processamento	32
3.5 Aplicações de simulação fluidodinâmica computacional em canais	32
4. MATERIAIS E MÉTODOS	36
4.1 Modelagem matemática - Fortran	38
4.2 Definição da geometria dos vertedores	40
4.3 Modelagem Computacional	42

4.3.1 Criação da geometria e malhas	42
4.3.2 Condições de contorno nos domínios	43
4.4 Avaliação dos resultados	46
5. Resultados e discussão	47
5.1 Simulação – Linguagem de programação: Fortran.....	47
5.2 Estruturas geométricas geradas – CFX.....	48
5.3 Malha Computacional – CFX.....	49
5.4 Análises – CFX.....	51
5.4.1 Análise dos campos de pressão – $Q=0,05 \text{ m}^3/\text{s}$	51
5.4.2 Análise dos campos de pressão – $Q=0,25 \text{ m}^3/\text{s}$	52
5.4.3 Análise das frações volumétricas de água e ar – $Q=0,05 \text{ m}^3/\text{s}$	53
5.4.4 Análise das frações volumétricas de água e ar – $Q=0,25 \text{ m}^3/\text{s}$	54
5.4.5 Análise dos campos de velocidade – $Q=0,05 \text{ m}^3/\text{s}$	56
5.4.6 Análise dos campos de velocidade – $Q=0,25 \text{ m}^3/\text{s}$	57
5.5 Análise do Número de Froude	59
5.5.1 Vazão $0,05 \text{ m}^3/\text{s}$	60
5.5.2 Vazão $0,25 \text{ m}^3/\text{s}$	61
6. Conclusões e recomendações	63
Referências bibliográficas	65

1. INTRODUÇÃO

Os canais e os vertedores são estruturas amplamente utilizadas em diversas áreas da engenharia hidráulica. Estudar os parâmetros envolvidos no escoamento desses canais podem diminuir os efeitos hidráulicos, dessa forma considera-se que um dimensionamento ineficaz do sistema hidráulico pode provocar operações inadequadas em centrais hidrelétricas, comprometer economicamente seu processo e afetar diretamente na distribuição de água.

O comportamento das variáveis (velocidade, pressão, altura da lâmina d'água), no qual dão características ao escoamento em canais, e o interesse na economia vinculada ao uso de estruturas nas barragens têm estimulado a prática de pesquisas sobre simulações computacionais de fluidodinâmica há alguns anos em diversas instituições nacionais e internacionais devido ao grande interesse científico a respeito do comportamento hidráulico (SIMÕES; PORTO; SCHULZ, 2012).

O escoamento em canais possui vasto número de aplicações técnicas na engenharia em áreas como saneamento, drenagem urbana, irrigação, hidroelétrica, navegação e preservação do meio ambiente. O escoamento é caracterizado por propriedades físicas, como velocidade, pressão, área molhada, altura da lâmina d'água e pelo comportamento ao longo do espaço e do tempo. O comportamento das propriedades físicas permite fazer a separação dos escoamentos em classes que facilita o entendimento e descrição em termos matemáticos para criar modelos que os representem (SOUTO, 2008).

Aumento da vazão em canais abertos são encontrados com frequência em estruturas hidráulicas como: vertedores, saídas, rampas, canais de alívio de inundações e canais destinados a saneamento e drenagem de águas pluviais. A configuração desse aumento é realizada na prática utilizando informações de estudos experimentais ou através de cálculos hidráulicos (STAMOU; CHAPSAS; CHRISTODOULOU, 2008).

Além do ponto de vista prático, Pineda, Blanco e Rojas-Solórzano (2009) afirmam a importância de estudar o comportamento do escoamento em canais. A vazão em superfície livre pode ser um fator destrutivo na natureza provocando fortes chuvas e inundações, podendo danificar estruturas e tirar vidas humanas. Dessa forma, considera-se importante prever o comportamento do fluido em superfície livre. Dada importância ao grande número de cenários que podem ser considerados, a modelagem numérica é uma abordagem ideal para avaliar os fluxos da superfície.

A importância de simular o escoamento em superfície livre pode ajudar prevenir danos nas estruturas hidráulicas em caso de chuvas fortes e inundações recorrentes. Para isso é

necessário conhecer o escoamento para eliminar incertezas e variações durante o processo. Este estudo realiza simulações computacionais em um canal hidráulico da Universidade Federal de Itajubá e avalia o escoamento nas estruturas usando como parâmetro o número de Froude.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho consiste em realizar simulações computacionais de vertedores com diversos tipos de geometrias em um canal retangular com superfície livre com software de simulação fluidodinâmica computacional, analisar o escoamento e comparar as grandezas simuladas do escoamento.

2.2 Objetivo específico

- a) Simular cenário de topologia do canal através da linguagem de programação Fortran para nortear na construção da geometria do projeto de vertedores;
- b) Estudar o comportamento hidráulico e simular o escoamento em CFD do canal para cada tipo de vertedor;
- c) Analisar o comportamento nas estruturas usando como parâmetro o número de Froude para definir o tipo de escoamento;
- d) Interpretar os resultados e comparar o comportamento do escoamento em cada vertedor.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesse item serão abordados temas fundamentais para a pesquisa abrangendo conceitos de canais hidráulicos, fluidodinâmica computacional (CFD), simulações em canais e número de Froude.

3.1 Canais hidráulicos

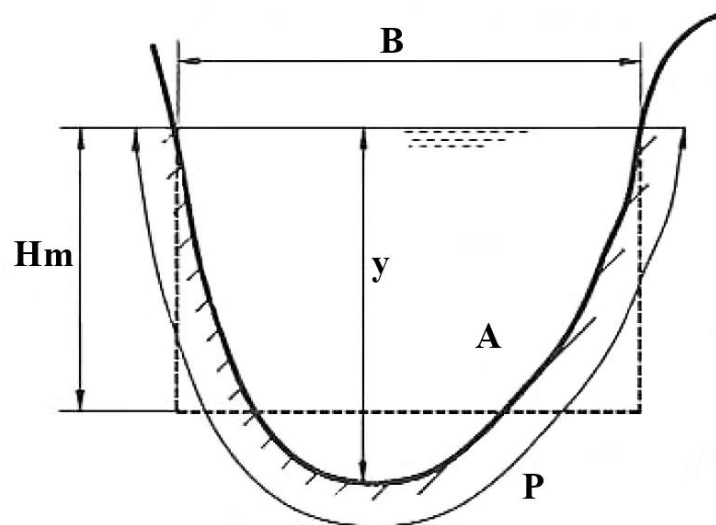
Recentemente a hidráulica é empregada em diferentes segmentos, entretanto é importante evidenciar duas finalidades fundamentais que envolvem o transporte de fluido e a hidráulica industrial. É indiscutível a importância do conhecimento que incluem os fenômenos físicos que acontecem na natureza envolvendo fluidos. Estes fenômenos permitem ao homem um progresso gradativo em desenvolvimento técnico (SOTOMAYOR, 2016; SOUTO, 2008).

O que deu origem aos estudos relacionados a hidráulica foi o transporte de fluido no qual tem papel importante em diferentes categorias como: geração de energia elétrica, irrigação, saneamento, habitação, construção de máquinas, hidráulica, meteorologia, acústica, transporte, agricultura, escoamento de hidrocarbonetos, escoamento de fluidos industriais entre outras aplicações. Os campos da hidráulica se desenvolvem com aplicação de conhecimentos que envolve a mecânica dos fluidos. As estruturas típicas mais comuns na aplicação da engenharia hidráulica abrangem os canais de transporte, vertedores, sistema de abastecimento de água, sistema de saneamento e outros (SOTOMAYOR, 2016; SOUTO, 2008).

Os canais hidráulicos possuem finalidades relevantes, no qual podemos citar o transporte de água para abastecimento da população e geração de energia elétrica, dessa forma é imprescindível estudar o comportamento do escoamento através dos canais, visto que eventos de cheias com grande variação de vazão podem danificar estruturas hidráulicas. Por essa razão, as estruturas civis devem ser avaliadas e projetadas para delimitar zonas de riscos prevendo o comportamento do escoamento em canais de superfície livre (PINEDA; BLANCO; ROJAS-SOLÓRZANO, 2009).

Em canais hidráulicos uma série de parâmetros são necessários para caracterizar geometricamente a seção e as declividades. Segundo Porto (2006), os principais elementos de um canal são apresentados na Figura 1.

Figura 1 – Elementos geométricos de uma seção



Fonte: Porto (2006)

Onde:

- Área molhada (A): área da seção reta do escoamento, normal à direção do fluxo;
- Perímetro molhado (P): comprimento da parte fronteira sólida da seção do canal (fundo e paredes) em contato com o líquido. A superfície livre não faz parte do perímetro molhado;
- Raio hidráulico: relação entre a área molhada e o perímetro molhado;
- Altura d'água ou tirante d'água (y): distância vertical do ponto mais baixo da seção do canal até a superfície livre;
- Largura do topo (B): largura da seção do canal na superfície livre, função da forma geométrica da seção e da altura d'água;
- Altura hidráulica (H_m): relação entre a área molhada e a largura da seção na superfície livre.

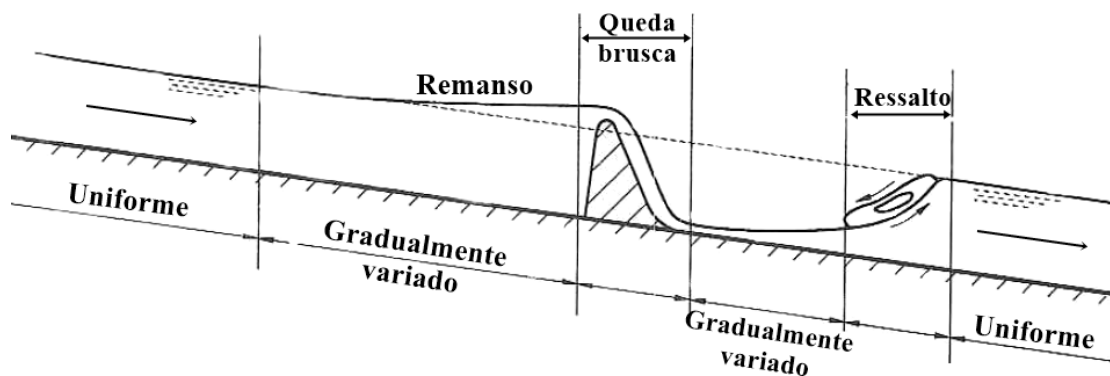
Para Porto (2006), o escoamento é considerado livre quando o líquido está sempre em contato com a atmosfera e pode-se dizer que o escoamento se dá necessariamente pela ação da gravidade e qualquer perturbação em um trecho local pode modificar a seção transversal da corrente em outros trechos. Já o escoamento forçado (ou em pressão) decorre no interior das tubulações ocupando sua área sem o contato com o meio externo. A pressão gerada pelo líquido sobre a tubulação é diferente da pressão atmosférica.

O escoamento em um conduto livre sucede quando o fluido dispõe de uma superfície livre que está em contato com o ar. O escoamento então ocorre através do comportamento das

forças gravitacionais, inércias e de difusão que operam sobre o fluido. No momento em que não existe variação de velocidade no escoamento em nenhuma seção do canal, o escoamento é considerado uniforme, logo quando há mudança na variação de velocidade no escoamento, o fluxo é considerado variado, conforme Figura 2 (WIELEWICKI, 2014).

Quando a velocidade difere com o tempo o fluxo é chamado de não permanente e o regime é considerado permanente quando a velocidade local em um ponto da corrente não varia no tempo, módulo e direção. Como consequência, os parâmetros hidráulicos (profundidade, vazão, área molhada, perímetro molhado, entre outros) possuem valores constantes (PORTO, 2006; WIELEWICKI, 2014).

Figura 2 – Tipos de escoamentos permanentes, uniformes e variados



Fonte: Porto (2006)

De acordo com o valor do número de Froude, o comportamento do fluxo pode ser muito diferente. O número Froude é um número adimensional que representa a relação entre as forças inércias e as forças gravitacionais em um campo de fluido e permite classificar o escoamento (PINEDA; BLANCO; ROJAS-SOLÓRZANO, 2009).

Os resultados de simulações e experimentos apontam a importância do número de Froude para classificar o escoamento de superfície livre no trajeto do fluido. A equação de Froude permite determinar os parâmetros do escoamento aproximado das condições reais dos canais (LUCAS, HAGER, BOES, 2013).

3.2 Vertedores

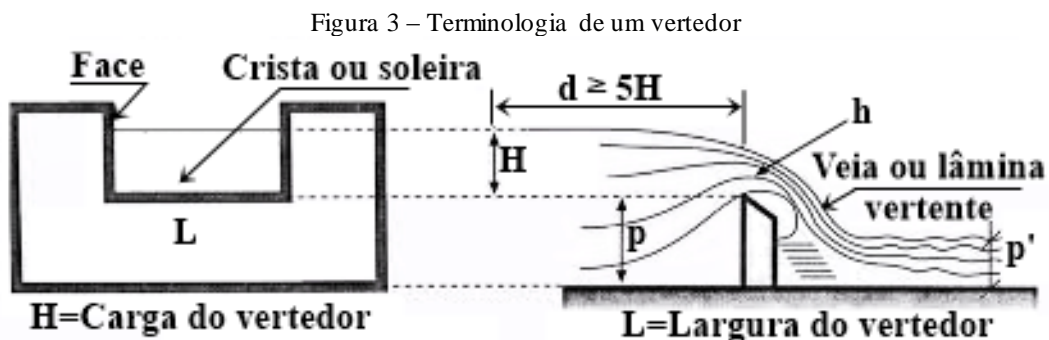
De acordo com Netto (1998) os vertedores são definidos como simples paredes, diques ou aberturas no qual o líquido escoar. O termo vertedores também pode ser aplicado a obstáculos de passagem do fluido e aos extravasores de barragens. Os vertedores tem sido usado

intensivamente e satisfatoriamente para realização de medições de vazão em pequenos cursos d'água, bem como no controle do escoamento em galerias e canais.

Os vertedores são considerados dispositivos que fazem a medição e controle da vazão em escoamento de canais. Podem ser classificados quanto a sua forma (simples ou composto), espessura da soleira (delgada ou espessa), presença ou não de contrações laterais, livres ou afogados. Os dispositivos de vertedores são frequentemente utilizados em irrigação, estações de tratamento de esgoto, tratamento de água, barragens, controle e medição de vazão em cursos d'água de pequena escala e controle de escoamento em condutos livres (ALMEIDA *et al.*, 2016).

O vertedor na maioria das vezes é posicionado perpendicularmente à corrente elevando o nível d'água a montante até que o nível alcance uma cota suficiente para produzir uma lâmina d'água sobre o obstáculo compatível com a vazão descarregada. Essa lâmina adquire velocidade provocando um processo de convergência vertical dos filetes, localizando-se abaixo da superfície livre da região não perturbada a montante (PORTO, 2006).

Os termos específicos de um vertedor estão apresentados na Figura 3.



Fonte: Netto (1998)

As principais partes que constituem um vertedor são (PORTO, 2006):

- a) Crista ou soleira: parte superior da parede em que há contato com a lâmina vertente.
- b) Carga sobre a soleira H : diferença de cota entre o nível de água a montante e o nível da soleira.
- c) Altura do vertedor p : diferença de cotas entre a soleira e o fundo do canal de chegada.
- d) Largura L : dimensão da soleira através da qual ocorre o fluido.

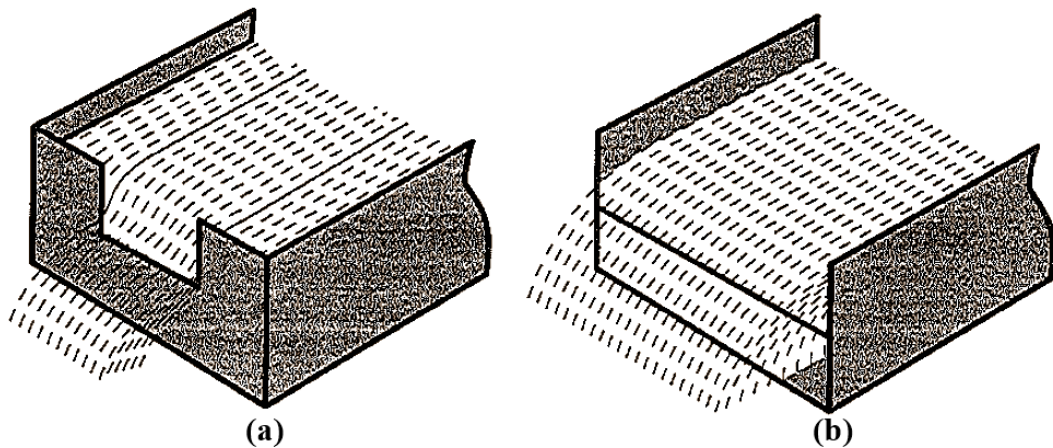
Assumindo as mais diversas formas e composições, os vertedores exprimem os comportamentos mais variados, sendo alguns dos fatores que servem de base para sua classificação (NETTO, 1998).

- a) Forma:
 1. Simples (Retangulares, Triangulares, Trapezoidais, entre outros)
 2. Compostos (Seções combinadas)
- b) Altura relativa da soleira
 1. Vertedores completos ou livres ($p > p'$)
 2. Vertedores incompletos ou afogados ($p < p'$)
- c) Natureza da parede
 1. Vertedores em parede delgada (chapas ou madeiras chanfrada)
 2. Vertedores de parede espessa ($e > 0,66H$)
- d) Largura relativa
 1. Vertedores sem contrações laterais ($L = B$)
 2. Vertedores contraídos ($L < B$). Vertedor cuja largura é menor que a largura do canal.

3.2.1 Vertedor retangular

O vertedor retangular consiste em uma estrutura cujo o perfil da crista possui geometria de um retângulo, tanto como aqueles com contrações laterais quanto aqueles sem contrações laterais. A Figura 4 apresenta um vertedor retangular de parede delgada com contrações (a) e outro vertedor sem contrações (b).

Figura 4 – Vertedor de parede delgada (a); Vertedor sem contrações (b)



Fonte: Netto (1998)

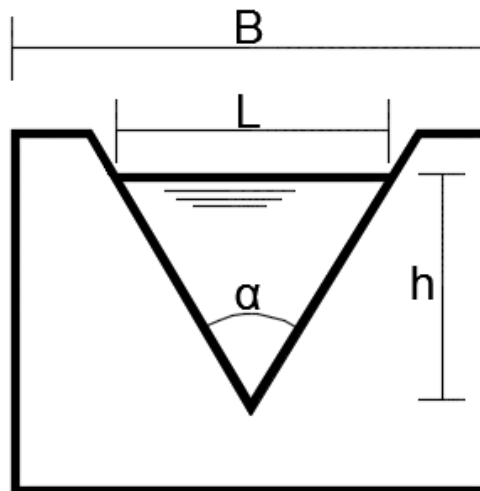
3.2.2 Vertedor triangular

O vertedor triangular possibilita maior precisão na medida de cargas de vazões reduzidas. Na prática, são utilizados os vertedores que possuem formato isósceles, sendo os mais usuais os que formam ângulo de 90° (NETTO, 1998).

Um vertedor triangular consiste em um vertedor cujo perfil da crista é de geometria triangular. Vertedores triangulares de parede fina são instrumentos muito precisos de medição de vazão, principalmente para pequenos escoamentos. Isso ocorre porque a área da seção triangular e a vazão diminuem acentuadamente com a queda da carga hidráulica e permite uma medida mais precisa (BENGSTON, 2010).

A Figura 5 mostra um vertedor triangular com ângulo de abertura α e carga h . Dentre os vertedores triangulares, o mais utilizado é aquele com ângulo de abertura igual a 90° (PORTO, 2006).

Figura 5 – Vertedor triangular de parede fina



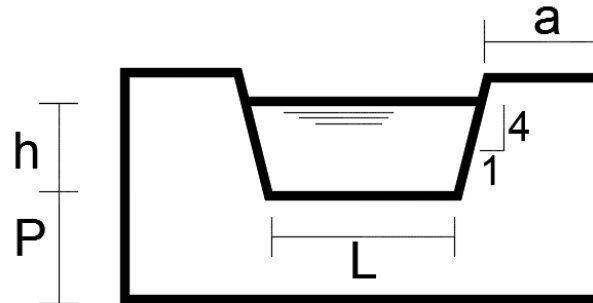
Fonte: Porto (2006), adaptado pelo autor

3.2.3 Vertedor trapezoidal

Os vertedores com geometria trapezoidal não são de tanto interesse de aplicação como os vertedores triangulares e retangulares. Porém, existe uma importância no vertedor *Cipoletti* que tem o formato de um trapézio isósceles, cuja geometria é feita de maneira que as inclinações laterais compensem a diminuição da vazão. Para essas condições, o talude deve respeitar a

proporção 1H:4V (1 horizontal para 4 vertical). A Figura 6 representa o vertedor trapezoidal *Cipoletti* (NETTO, 1998; PORTO, 2006).

Figura 6 – Vertedor *Cipoletti*

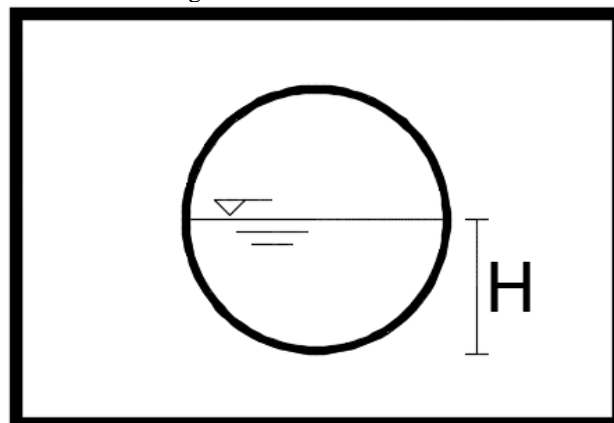


Fonte: Porto (1998), adaptado pelo autor

3.2.4 Vertedor circular

O vertedor de seção circular, apesar de raramente ser utilizado, proporciona uma vantagem como a facilidade de execução e não requer o nivelamento da soleira. A Figura 7 indica o vertedor circular em parede vertical (NETTO, 1998).

Figura 7 – Vertedor circular



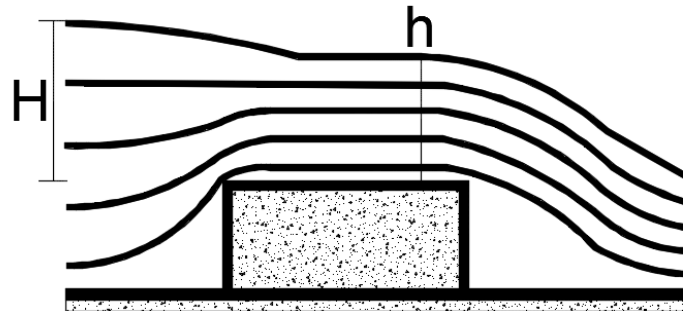
Fonte: Netto (1998), adaptado pelo autor

3.2.5 Vertedor de soleira espessa horizontal

O vertedor retangular de parede espessa é uma elevação no fundo do canal com dimensões suficientes para produzir a elevação do nível d'água a sua montante. O vertedor é chamado de parede espessa de forma que na veia aderente se estabeleça o paralelismo dos

filetes. O vertedor é considerado de parede espessa conforme Figura 8 (NETTO, 1998; PORTO, 2006).

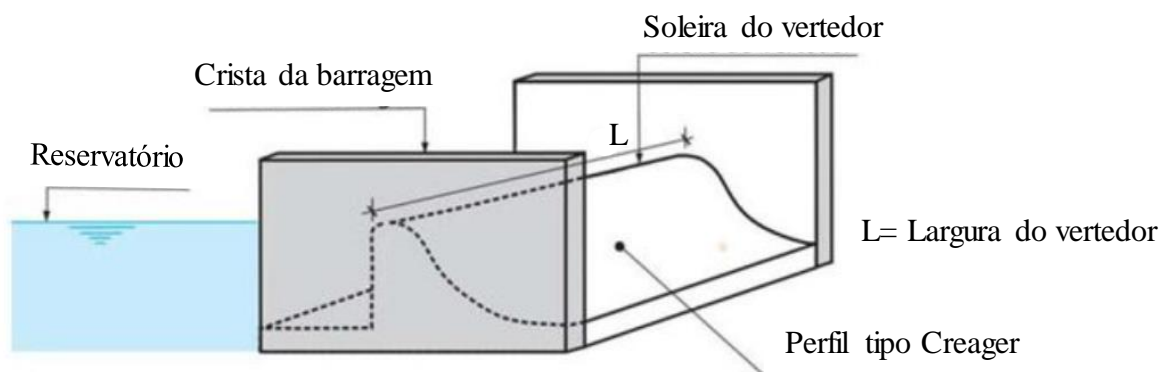
Figura 8 – Vertedor de soleira espessa horizontal



Fonte: Netto (1998), adaptado pelo autor

Para Porto (2006) existem vários perfis de soleira para este tipo de vertedor podendo citar entre eles o perfil *Creager* (1917). O vertedor de parede espessa perfil *Creager* (Figura 9) possui sua crista de forma especial para permitir a aderência da lâmina vertente, evitando a sua oscilação e efeito de cavitação.

Figura 9 – Vertedor tipo *Creager*



Fonte: Google (2020)

3.3 Fluidodinâmica computacional – CFD

O alto desempenho dos computadores e pacotes de software comercial apresentam novas possibilidades no cenário da hidráulica numérica. A fluidodinâmica computacional (CFD) constitui de um conjunto de métodos numéricos computacionais que possibilita a simulação de escoamentos de fluidos. A vantagem em estudar o escoamento em canais parte da importância na engenharia e indispensavelmente necessário para reduzir incertezas

relacionadas a capacidade de vazão em determinada seção e gestão de riscos de cheias. Apresentando códigos tridimensionais (3D), o CFD se mostra em uma versão robusta e completa incluindo modelos de turbulências e modelos específicos para trabalhar com uma vasta variedade de problemas que podem envolver turbulência nos escoamentos (FILONOVICH *et al.*, 2009; LEE *et al.*, 2011).

3.3.1 Equações médias de Reynolds Average Navier-Stokes – RANS

A simulação computacional executada no presente estudo é fundamentada nas equações médias de Reynolds, através de uma técnica titulada como Reynolds Average Navier-Stokes (RANS). A técnica é escolhida por não exigir esforços computacionais elevados e por gerar resultados de alta qualidade, sendo a técnica mais utilizada atualmente na solução de casos de engenharia. Outra vantagem que pode ser citada é a dependência de dados somente do campo de velocidade média e do escoamento em regime permanente (ARAÚJO; REZENDE, 2018).

As equações de Navier-Stokes são aplicadas ao escoamento turbulento, as grandezas são descritas como média mais flutuação. A flutuação entra na equação que fica ainda mais complexa, então tem-se a formação das RANS que envolvem as equações de Navier-Stokes e média temporal de Reynolds que considera as flutuações médias (SANTOS, 2019).

Esta categoria de usuários de CFD está quase sempre satisfeita com informações sobre as propriedades médias do tempo do escoamento (por exemplo: velocidades médias, pressões médias, tensões médias, etc.). As equações de RANS estão expressas nas Equações 3.1 a 3.4 da Tabela 1 no formato 2D para resumir as expressões propostas (DAVIDSON, 2018; SANTOS, 2019; TU; YEOH; LIU, 2008).

Tabela 1 – Equações governantes para fluidos compressíveis em coordenadas cartesianas

Conservação da massa	$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} = 0$	(3.1)
Equações da conservação da quantidade de movimento	$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}\bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial (\bar{v}\bar{u})}{\partial y} =$ $-\frac{1}{p} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[\nu \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\nu \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right] - \left[\frac{\partial (\bar{u}'\bar{u}')}{\partial x} + \frac{\partial (\bar{u}'\bar{v}')}{\partial y} \right]$	(3.2)
Equações da conservação da quantidade de movimento	$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}\bar{v})}{\partial x} + \frac{\partial (\bar{v}\bar{v})}{\partial y} =$ $-\frac{1}{p} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[\nu \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\nu \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right] - \left[\frac{\partial (\bar{u}'\bar{v}')}{\partial x} + \frac{\partial (\bar{v}'\bar{v}')}{\partial y} \right]$	(3.3)
Equações da energia	$\frac{\partial \bar{T}e}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}\bar{T}e)}{\partial x} + \frac{\partial (\bar{v}\bar{T}e)}{\partial y} =$ $\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k}{\rho C_p} \frac{\partial \bar{T}e}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\alpha \frac{\partial \bar{T}e}{\partial y} \right) - \left[\frac{\partial (\bar{u}'\bar{T}e')}{\partial x} + \frac{\partial (\bar{v}'\bar{T}e')}{\partial y} \right]$	(3.4)

Fonte: Davidson (2018), Santos (2019), Tu, Yeoh e Liu (2008)

Onde:

u, v, p e Te: valores médios

u', v', p' e Te': flutuações turbulentas

k/ρC_p Eq. (3.4): difusividade térmica (α) do fluido.

As equações citadas são similares às equações para fluxos laminares, com exceção pela presença dos termos a' b'. Em decorrência disto, têm-se três incógnitas adicionais e em três dimensões tem-se nove incógnitas adicionais chamadas de tensões de Reynolds nas equações de momento de média temporal.

Do mesmo modo, a equação de temperatura média no tempo indica os termos extras u'T' e v'T' e em três dimensões temos um termo extra w'T'. As equações da média do tempo podem ser solucionadas se as tensões de Reynolds e os termos de transporte de temperatura extra puderem ser relacionadas ao fluxo médio e as quantidades de calor (TU; YEOH; LIU, 2008).

Vale lembrar que a equação de energia não é utilizada nas aplicações do presente trabalho, visto que o escoamento das aplicações da dissertação é isotérmico, mantendo a temperatura constante.

3.3.2 Modelagem da turbulência

Os modelos de turbulência têm um papel fundamental nas simulações, visto que resolvem as equações médias de Navier-Stokes de Reynolds (RANS) que são equações de alta complexidade vistas no tópico anterior e que não podem ser resolvidas analiticamente, então os modelos de turbulência entram para solucionar as equações. Para Davidson (2018) existem modelos de turbulência capazes de representar a geração e o transporte de turbulência e outro representando o transporte de dissipação da turbulência, assim a viscosidade turbulenta pode ser calculada a partir de dois termos transportados nas equações. Exemplos de modelos de turbulência de equações são k - ε , k - ω e SST.

a) Modelo k - ε

O modelo de turbulência padrão k - ε é embasado nas equações de transporte para a energia cinética da turbulência (k) e a taxa de dissipação (ε). A equação de transporte para k é derivada de uma equação exata, em contrapartida a equação de transporte de ε é adquirida usando o raciocínio físico. O modelo é apropriado para simular trocas de calor, visto que os resultados numéricos são resultados experimentais aproximados ao corrigir propriedades do termo dependente do fluido (ORTIZ *et al.*, 2017).

b) Modelo k - ω

O modelo de turbulência padrão k - ω é um modelo empírico que baseia-se em equações de transporte para a energia cinética da turbulência (k) e a taxa de dissipação específica (ω). Neste modelo, muitos coeficientes usados para o fechamento do modelo k - ε com valores contínuos definidos empiricamente, tornam-se funções de parâmetros diferentes tornando-a mais complexa e mais precisa na análise dos fenômenos da camada limite (ORTIZ *et al.*, 2017).

c) Modelo SST (*Shear Stress Transports*)

O modelo de transporte de tensão de cisalhamento (SST) foi desenvolvido para uso externo de simulações de escoamento aerodinâmico e demonstrou ser superior aos modelos k - ε e k - ω padrão. O modelo foi originalmente desenvolvido para fluxos turbulentos, assim o melhor acordo geral para todos os casos de teste foi atingido com o modelo SST tornando-o uma interessante escolha para previsões de transferência de calor (MENTER *et al.*, 2003).

O modelo de turbulência SST apresenta resultados precisos, apesar do modelo de turbulência $k-\varepsilon$ ser amplamente utilizado, principalmente quando é empregado para escoamentos complexos. Por esta razão, um vasto número de outros modelos de turbulência foi desenvolvido e implementado em diversos códigos CFD incluindo o CFX (WILKENING; BARALDI; HEITSCH, 2007).

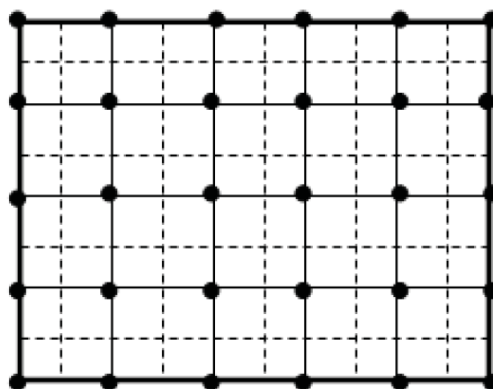
O modelo SST é baseado na experiência de Menter (1994) em testar grandes números de modelos de turbulência contra uma grande variedade de casos experimentos. O modelo combina o modelo de turbulência $k-\omega$ e o modelo de turbulência $k-\varepsilon$, de modo que o $k-\omega$ seja usado na região interna da camada limite e alterne para o $k-\varepsilon$ no fluxo de cisalhamento livre.

3.3.3 Discretização das malhas computacionais

O método de alcance da solução computacional compreende duas etapas. A primeira fase abrange a conversão das equações diferenciais parciais e condições auxiliares (contorno e iniciais) em um conjunto de equações algébricas discretas. Esta primeira etapa é chamada de estágio de discretização, onde os números básicos são ilustrados com técnicas populares de discretização como: método das diferenças finitas e método dos volumes finitos (adotado na maioria dos códigos comerciais) que resolvem problemas de vazão (SAYMA, 2009).

As técnicas numéricas convertem a equação diferencial contínua para obter a solução em pontos discretos no espaço chamados malhas computacionais, apresentado na Figura 10. Dessa forma, uma imagem completa do escoamento pode ser construída a partir da solução nestes pontos (SAYMA, 2009).

Figura 10 – Malha de volumes finitos e células



Fonte: Sayma (2009)

Os autores ressaltam que mesmo em uma simulação simplificada, a utilização de duas aplicações CFD diversas (porém com modelos de turbulências idênticos) produzem resultados extremamente diferentes. Isto exprime que o acréscimo de complexidade dos modelos provoca um acréscimo de especificações de condições de domínio de cálculo, bastando pequenas diferenças para atingirem soluções divergentes a serem corrigidas ao longo processo de calibração (FILONOVICH *et al.*, 2009).

Os métodos mais utilizados são explanados nas três subseções a seguir (SAYMA, 2009).

a) O método das diferenças finitas

Considerada a ferramenta mais simples, o método das diferenças finitas é o mais empregado para derivar o discreto de uma equação diferencial que consiste em aproximar as derivadas na equação diferencial utilizando uma série Taylor truncada. O método das diferenças finitas é o método mais simples de aplicação, no entanto requer alto grau de regularidade da malha. A malha, por sua vez, deve ser configurada de modo estruturada onde os pontos de malha devem estar situados nos pontos de interseção das famílias de curvas retilíneas (SAYMA, 2009).

b) O método dos elementos finitos

O método dos elementos finitos é fundamentado no “método de resíduos ponderados”, método importante para resolver as equações diferenciais parciais que foi criado entre os anos de 1940 e 1960, particularmente para resolver problemas de dinâmica estrutural que foi estendido seguidamente para o campo de fluxo de fluido. A vantagem da utilização deste método permite lidar naturalmente com geometrias arbitrárias complexas podendo ser facilmente aplicado usando malhas irregulares de diversos formatos. Esse método também proporciona um conjunto de funções que fornecem a variação das equações diferenciais entre os pontos da malha, enquanto o método das diferenças finitas fornece informações para valores de malha somente nos pontos (SAYMA, 2009).

De acordo com Tu, Yeoh e Liu (2008) o método dos elementos finitos não apresentou uso extensivo no CFD, apesar de existir inúmeros códigos comerciais e pesquisas disponíveis que aplicam esse método. Entretanto, pode-se dizer que o método de elementos finitos requer maiores recursos computacionais e um poder de processamento computacional maior do que o método de volumes finitos, sendo assim, sua popularidade tem sido altamente limitada.

c) O método dos volumes finitos

No método dos volumes finitos, várias equações residuais ponderadas são geradas dividindo o domínio da solução em subdomínios chamados “volumes de controle” e ajustando a função ponderação como unidade sobre os volumes de controle, um de cada vez, e zero em outro local. Isto provoca que o resíduo em cada volume deve se tornar zero. Uma maneira diferente de obter a discretização pelo método dos volumes finitos é iniciando da forma integral das equações de vazão. Presentemente, o método mais empregado na maior parte dos códigos comerciais de CFD é o método dos volumes finitos (SAYMA, 2009; TU; YEOH; LIU, 2008).

3.4 Dinâmica computacional dos fluidos: modelo Ansys CFX

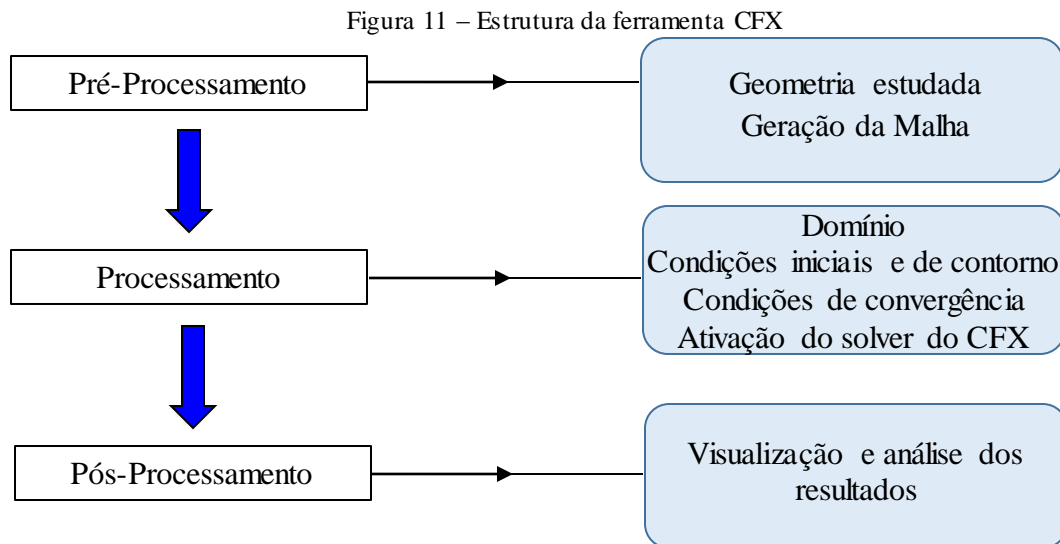
A dinâmica computacional dos fluidos consiste na técnica numérica para resolver os problemas envolvendo o fluxo de fluido e o CFX é um dos softwares do pacote Ansys capaz de solucionar os problemas de CFD.

O código Ansys CFX corresponde a um pacote comercial para a utilização geral em termo fluidodinâmica que controla as equações de escoamento por meio da discretização, na maioria das vezes, por volumes finitos. De acordo com Magalhães *et al.* (2007), o CFX é composto por 4 módulos, sendo: pré-processamento para construção de geometria e malha, definição das condições físicas e de contorno, solução de sistemas de equações e análise de resultados. Para Ansari, Memon e Memon (2012) o modelo pode ser usado com confiança para outros estudos semelhantes.

O software CFX então é capaz de fazer simulações em canais abertos com mudanças na inclinação do leito e diferentes seções transversais, retangular e trapezoidal. O software pode ser usado para simular o escoamento em regime subcrítico e transições entre regimes subcrítico e supercrítico. Também é apto para determinar o ponto exato onde o ressalto hidráulico acontece e simular a posição desse ponto onde a profundidade da água atinge o valor máximo para fluxos moderados. Para finalizar, o software comercial CFX é habilitado para simular o fluxo de superfície livre para fluxos transcíticos. Assim, pode-se afirmar que o modelo CFX leva resultados mais precisos (PINEDA; BLANCO; ROJAS-SOLÓRZANO, 2009; TÃNASE; BROBOANÃ; BÃLAN, 2015).

3.4.1 Procedimentos de solução em CFD

As etapas da modelagem pela fluidodinâmica computacional são representadas no fluxograma da Figura 11.



Fonte: Neto *et al.* (2008)

3.4.1.1 Pré-processamento

A primeira etapa consiste em entrar com a problemática de escoamento no CFD e a sequência é a transformação de dados de entrada em uma maneira adequada para o solucionador utilizá-las. O operador deverá fornecer os dados do modelo físico necessários para simplificar a operação, poupar recursos computacionais e diminuir o tempo necessário de processamento para gerar as soluções (ESSS, 2016; VERSTEEG, MALALASEKERA, 2007). Os passos do pré-processamento consiste na criação da geometria, malhas computacionais e configurações da simulação, citados a seguir.

a) Criação da geometria

A primeira etapa é identificar a região de interesse para definir a geometria dessa região. A geometria tridimensional pode ser criada no software ou ser transportada do AUTOCAD (ESSS, 2016; REYNOL, 2008; TU; YEOH; LIU, 2008).

O objetivo deste processo é produzir uma malha para introduzir a física do problema no pré-processador. Dessa maneira, antes que uma malha possa ser produzida é necessário a criação de um sólido geométrico fechado (SILVA, 2019).

b) Criação das malhas computacionais

A geração das malhas computacionais é considerada uma das etapas mais importantes no pré-processamento depois da definição de domínio da geometria. O tempo maior gasto em um projeto de CFD é frequentemente aplicado a uma geração de malha bem sucedida. Nesta etapa deve determinar os tipos de elemento e determinar o nível de qualidade da malha. O foco de local de estudo mais aprofundado devem ter suas malhas refinadas aumentando o número de elementos nessa região (ESSS, 2016; TU; YEOH; LIU, 2008).

c) Configurações de simulação

A configuração de simulação é o estágio onde se define os materiais que constituem o fluido a ser analisado e as propriedades desse fluido. Nesta etapa de pré-processamento deve-se fazer a seleção de modelos físicos e condições de contorno, e configurar as opções do solver (ESSS, 2016).

Para caracterizar as condições de contorno, o operador deverá definir as condições apropriadas que representam o comportamento físico real que ocorre no escoamento do fluido de maneira que a problemática possa ser solucionada pelo CFD. Neste estágio é definido os limites permitidos pela condição de contorno disponíveis para a simulação (TU; YEOH; LIU, 2008).

3.4.1.2 Processamento

Para Tu, Yeoh e Liu (2008), apresentar condições iniciais (envolvendo pressão, velocidade, vazão, temperatura e demais parâmetros de transporte de importância) de maneira inteligente antes de realizar os cálculos possui certas vantagens como um processo iterativo mais veloz que irá convergir e gerar resultados de maneira rápida caso as condições iniciais se aproximem das condições reais, caso contrário os cálculos de CFD irão demorar mais e dificultar a convergência nos processos iterativos.

Os requisitos no procedimento de soluções computacionais envolvem inicialização, controle da solução, monitoramento da solução, cálculos de CFD e busca por convergência. Os pontos que caracterizam uma solução de CFD bem sucedida são a convergência do processo iterativo e a independência da malha. A solução convergente é alcançada quando os resíduos caem abaixo dos critérios ou tolerâncias de convergência definidos dentro do parâmetros de controle do solucionador iterativo. As soluções aproximadas convergirão para a solução exata de modo que as quantidades finitas diminuam e a solução aproximada na malha mais fina deve

ser utilizada no lugar da solução exata e a solução de independência da rede é assim alcançada (TU; YEOH; LIU, 2008).

Para Tu, Yeoh e Liu (2008) diferentes configurações dos valores de convergência são usados pela ANSYS CFX para terminar o processo iterativo. A convergência é atingida quando a variação dos resultados entre duas iterações consecutivas encontra-se abaixo do critério de convergência adotado pelo usuário.

3.4.1.3 Pós-processamento

O pós-processamento consiste na análise dos resultados que obtém valores para velocidade e pressões do escoamento em determinada região de interesse escolhida, extrair gráficos com contornos de pressão durante o escoamento entre outras variáveis. Objetiva também a validação do modelo quando comparado com dados analíticos ou experimentais (ESSS, 2016).

3.5 Aplicações de simulação fluidodinâmica computacional em canais

Os estudos de aplicações de fluidodinâmica computacional foram baseados em buscas de aplicações de CFD em canais para analisar dispositivos de diferentes geometrias inseridos no canal através do número de Froude para determinar o tipo de escoamento. O software utilizado para refinar as buscas de artigos foi o sistema livre e gratuito R cuja popularidade tem aumentado no âmbito acadêmico. No entanto não foi possível encontrar estudos totalmente voltados para o tema desta pesquisa.

A dinâmica computacional dos fluidos possui aplicação no estudo sobre canais abrangendo simulações e revisões de literatura. O avanço na técnica de cálculo computacional viabilizou a modelagem numérica de escoamentos com boa exatidão. O processo conhecido por CFD tem atraído indústrias nucleares referindo a questões de segurança e respectiva validação. Os experimentos passados por esse processo estabelecem grande quantidade de informação para validação do modelo matemático e fenômenos específicos (MAGALHÃES *et al.*, 2007).

Recentemente, o uso de métodos numéricos e simulações de campo de vazão nas estruturas hidráulicas amplificou consideravelmente. Os modelos numéricos vêm sendo muito utilizados na simulação de fenômenos na engenharia e o número dessas pesquisas tem aumentado constantemente. De acordo com a literatura, apesar da importância da

conscientização sobre canais, poucos são os estudos experimentais, analíticos e numéricos conduzidos nessa temática (AZIMI *et al.*, 2017).

Cavalcante (2017) afirma que os estudos de modelagem hidráulica em canais simulados são imprescindíveis para projetos de drenagem urbana, principalmente na proposta de soluções de problemas relacionados ao sistema de drenagem ineficaz podendo provocar inundações em áreas baixas, erosão da superfície de canais e solos, o que pode causar prejuízos econômicos, sociais e ambientais.

Em estruturas hidráulicas são frequentemente encontradas expansões graduais no fluxo supercrítico de canal aberto, estes podem ser vertedores, calhas, canais de alívio de inundações e drenagem de águas pluviais em canais. A configuração dessas expansões, comumente é feita utilizando informações de estudos experimentais e também por meios de cálculos hidráulicos (STAMOU; CHAPSAS; CHRISTODOULOU, 2008).

Com isso, a modelagem hidráulica e as simulações computacionais têm ganhado grande espaço na pesquisa devido a crescente evolução da capacidade de processamento dos softwares permitindo a utilização mais frequente desta ferramenta. Os estudos sobre a temática vêm se tornando uma alternativa cada vez mais interessante (FILHO; OTA, 2016).

De acordo com as pesquisas literárias, algumas simulações foram estudadas e citadas nesta pesquisa. Azimi *et al.* (2017) afirmam que é necessário ajustar e calcular parâmetros da descarga que passa pelo orifício, profundidade, velocidade, altura do orifício e número de Froude no canal principal para prever o coeficiente de descarga.

Já Roushangar, Ghasempour e Valizadeh (2018) estudam dados que correspondem aos ressaltos hidráulicos em canais. Os autores afirmam que o canal sem nenhum dispositivo obtém melhor previsão do que os canais retangulares com paredes ásperas ou com degraus.

As características do ressalto hidráulico mostram que o número de Froude é o parâmetro mais eficiente avaliando o comprimento do ressalto e a profundidade. Durante a análise de sensibilidade pode afirmar que entre todas as variáveis de entrada, o número de Froude obtém maior impacto significativo para caracterizar o ressalto hidráulico (ROUSHANGAR, GHASEMPOUR; VALIZADEH 2017).

Um dos códigos comerciais utilizado para a dinâmica computacional dos fluidos é o ANSYS CFX que permite fazer simulações numéricas em estado estacionário. Percebe-se que conforme o nível da água a jusante é diminuído, a vazão aumenta. Através de cálculos do número de Froude é possível certificar que ao longo do canal a transição subcrítico para supercrítico acontece (HÖS; KULLMANN, 2007).

Hös e Kullmann (2007) consideram que os parâmetros mais importantes para o estudo abrangem o número de Froude e a altura da lâmina d'água no ressalto e na primeira onda da crista. Para a teoria clássica de 1D, os dados referenciais de Ohtsu, Yasuda e Gotoh (2003) são utilizados para validar os cálculos. Em seu estudo, são realizadas apenas simulações 2D que mostram que a primeira crista da onda prevista pela teoria clássica e cálculos de CFD concordam satisfatoriamente.

Para Morvan *et al.* (2002) é necessário condições de contornos para a definição do comportamento das variáveis nos limites do modelo, sendo consideradas 4 variáveis: Entrada, saída, paredes sólidas e superfície livre. O perfil de velocidade é definido na entrada. O autores relatam a importância de um investimento para refinar a rede e analisar a sensibilidade ao invés de tentar resolver o mesmo problema em uma malha grossa.

Conforme pesquisas na literatura, alguns experimentos e simulações foram estudados e citados. Tănase, Broboană e Bălan (2015) realizam seu estudo que consiste em um canal de água transparente e superfície livre. Para controlar a vazão suportada e o nível da superfície livre, a barragem de crista larga é inserida no meio do canal fixado em um açude retangular de espessura 6 mm. Os autores certificam que durante o experimento pode se observar que o regime do escoamento está a todo momento estacionário a montante do açude com a crista. As oscilações da superfície livre apontam um perfil desordenado, principalmente na região imediata a jusante do açude com a crista larga.

Stamou, Chapsas e Christodoulou (2008) utilizaram um modelo experimental relatado por Mazumder e Hager (1993) para a verificação do modelo. Os estudos envolveram o rio Diakoniaris que verte por um intervalo de aproximadamente 5 km pela periferia a oeste da cidade de Patras, na Grécia. Em dezembro de 2001, no decorrer de violenta inundação, a seção transversal da parte regulada do rio foi confirmada ser ineficaz para conduzir o pico de descarga. O ocorrido resultou em perdas humanas e chamou a atenção do público. Estudos da atualidade resultaram em algumas modificações propostas para aumentar o design de descarga.

Os autores então concluem que a solução numérica tem capacidade de simular o escoamento de superfície livre em canais abertos (PINEDA; BLANCO; ROJAS-SOLÓRZANO, 2009).

Para o estudo numérico de Bonakdari, Lipeme-Kouyi e Asawa (2014), utiliza-se o pacote de software ANSYS CFX que resolvem fluxos tridimensionais e permite calcular o campo de velocidade em qualquer seção transversal. Para as condições de contorno comuns entre os problemas de escoamento de canais abertos, temos:

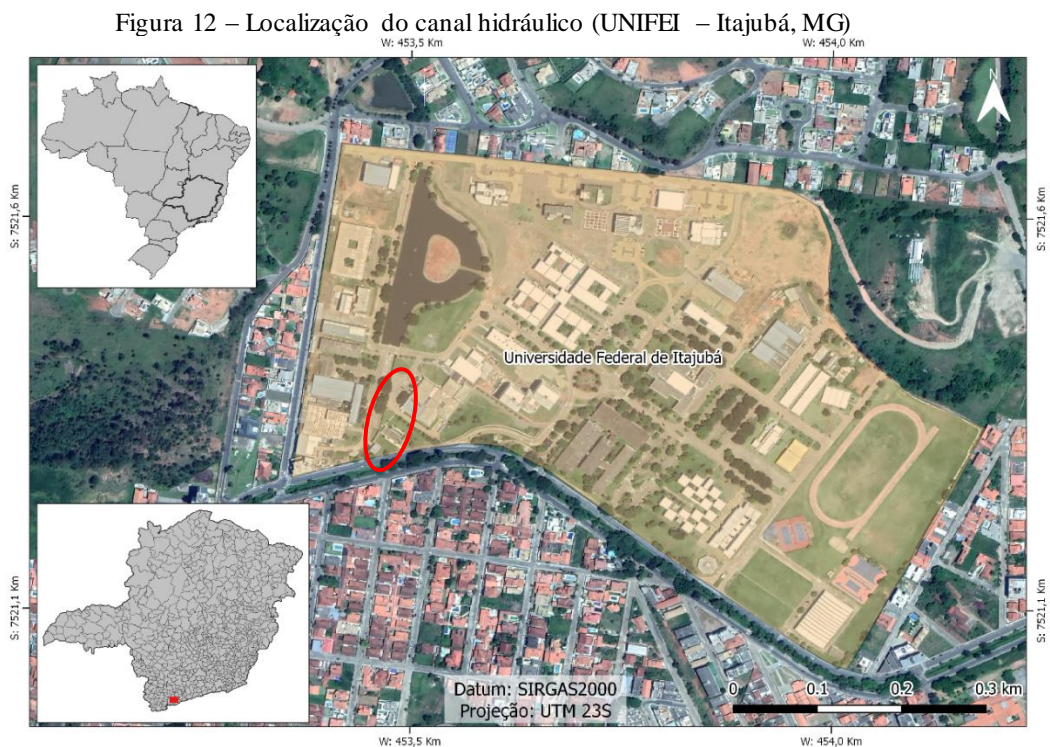
- a) Entrada: O nível da água deve ser determinado e consistente com a velocidade média do fluxo no canal;
- b) A interação entre as paredes do fluido e o limite é importante para os fluxos turbulentos;
- c) Suponha-se que a atmosfera não exerça nenhum cisalhamento e inércia, então a igualdade entre as forças nos dois lados da interface é imposta.

A análise resulta em uma relação funcional: estudo de variação da rugosidade relativa para o cálculo do número de Froude é importante variar um parâmetro enquanto mantém os outros constantes. Os autores afirmam que a escolha de um comprimento muito grande pode aumentar o custo experimental ou o tempo de computação (BONAKDARI; LIPEME-KOUYI; ASAWA, 2014).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

O método utilizado nesta pesquisa abrangeu a realização de modelagem matemática e simulações computacionais do problema empregando a dinâmica computacional dos fluidos (CFD) em canais de superfície livre.

As simulações realizadas nesta pesquisa envolvem estudo em um canal hidráulico real de superfície livre situado na Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais, de acordo com a Figura 12.



Fonte: Autor (2019)

O canal hidráulico em estudo possui forma retangular e é alimentado por uma bomba. O material da parede do canal é de concreto e as setas em vermelho indicam o sentido da vazão, conforme o modelo físico da Figura 13.

Figura 13 – Canal hidráulico (UNIFEI – Itajubá, MG)



Fonte: Autor (2019)

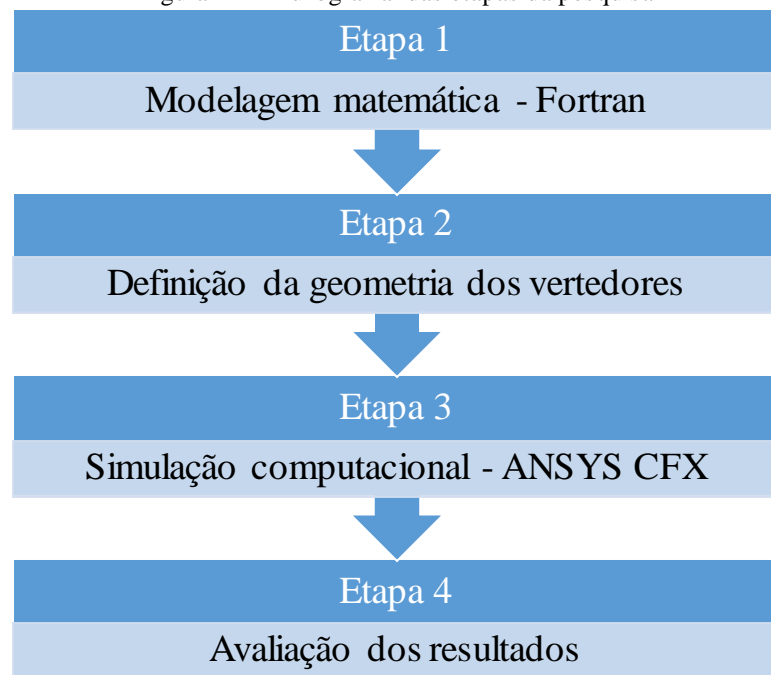
O canal hidráulico do presente estudo não apresenta declividade e o modelo físico do canal possui suas principais características evidenciadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Dados do canal UNIFEI	
Dados	
Altura do canal	1,20 m
Altura máxima usual	1,00 m
Largura máxima	1,00 m
Comprimento máximo	100,00 m
Vazão máxima	400 L/s

Fonte: Autor (2019)

A metodologia utilizada neste trabalho consiste no cumprimento das etapas citadas no fluxograma da Figura 14 e descritas a seguir.

Figura 14 – Fluxograma das etapas da pesquisa



Fonte: Autor (2019)

4.1 Modelagem matemática - Fortran

A etapa da modelagem matemática na linguagem de programação Fortran consiste na realização de simulações preliminares com o intuito de prever o comportamento do hidráulico do canal em estudo e nortear na definição de tipos de vertedores e suas respectivas dimensões. Visto que as simulações preliminares no Fortran não é o objetivo principal do trabalho, mas simulações com propósito de orientar na escolha dos vertedores.

As simulações no Fortran compreendem auxiliar na escolha da geometria dos vertedores e classificar o escoamento de acordo com o número de Froude variando os valores de vazão e altura da lâmina d'água conforme informações do canal real e calculando a velocidade para cada cenário de vazão e altura de lâmina d'água.

Para classificar o escoamento, o número adimensional muito utilizado em estudos de canais é o número de Froude que relaciona a velocidade em relação a gravidade e a altura da lâmina d'água. Em canais é habitual definir como dimensão característica a altura hidráulica da seção de maneira que o número de Froude é apresentado na Equação 4.1 (PORTO, 2006).

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot Hm}} \quad (4.1)$$

Onde:

Fr= número de Froude

V= velocidade (m/s)

g= aceleração da gravidade (m/s²)

Hm= altura hidráulica (m)

A altura hidráulica relaciona a área molhada e a largura da seção na superfície livre, Equação 4.2.

$$Hm = \frac{A}{B} \quad (4.2)$$

Onde:

Hm = altura hidráulica (m)

A= área molhada (m²)

B= largura da seção na superfície livre (m)

Para canais retangulares, a altura hidráulica é a própria altura d'água, Equação 4.3.

$$Hm = \frac{A}{B} = \frac{B*Y}{B} = Y \quad (4.3)$$

Onde:

Hm = altura hidráulica (m)

A= área molhada (m²)

B= largura da seção na superfície livre (m)

Y= altura da lâmina de água (m)

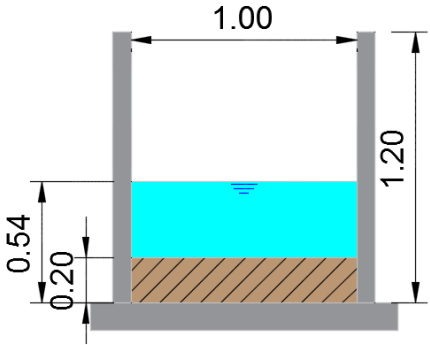
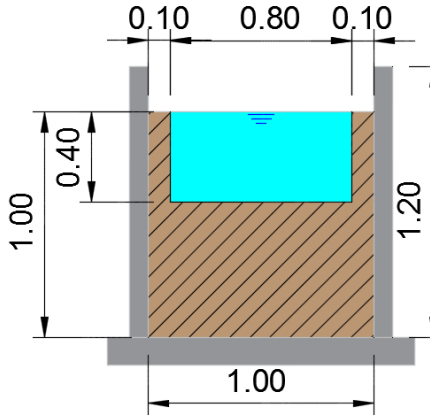
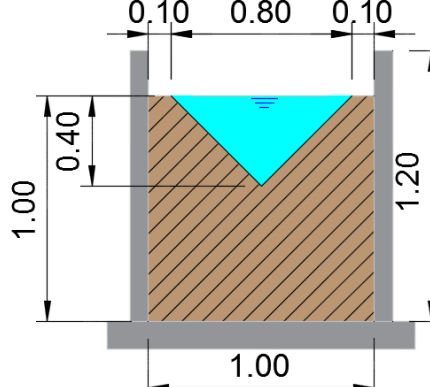
De acordo com Porto (2006) o número de Froude é aplicado para classificar o tipo de escoamento livre que ocorrem nas aplicabilidades práticas em três tipos:

- 1) Escoamento subcrítico ou fluvial, quando o $Fr < 1$
- 2) Escoamento crítico, quando o $Fr = 1$
- 3) Escoamento supercrítico ou torrencial, quando o $Fr > 1$

4.2 Definição da geometria dos vertedores

A partir dos dados obtidos da linguagem de programação Fortran foi possível orientar na escolha das dimensões dos vertedores através de tentativas obedecendo as equações de descarga e respeitando os valores máximos de altura do canal. As particularidades dos vertedores utilizados neste estudo são apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1 – Detalhe dos vertedores

Tipo de vertedor	Geometria	Equação de Descarga
Vertedor de Fundo		$Q = 1,838 * L * H^{\frac{3}{2}} \quad (4.4)$
Vertedor Retangular		$Q = 1,838 * L * H^{\frac{3}{2}} \quad (4.5)$
Vertedor Triangular		$Q = 1,4 * H^{\frac{5}{2}} \quad (\text{Ângulo de } 90^\circ) \quad (4.6)$

Fonte: Porto (2006)

Onde:

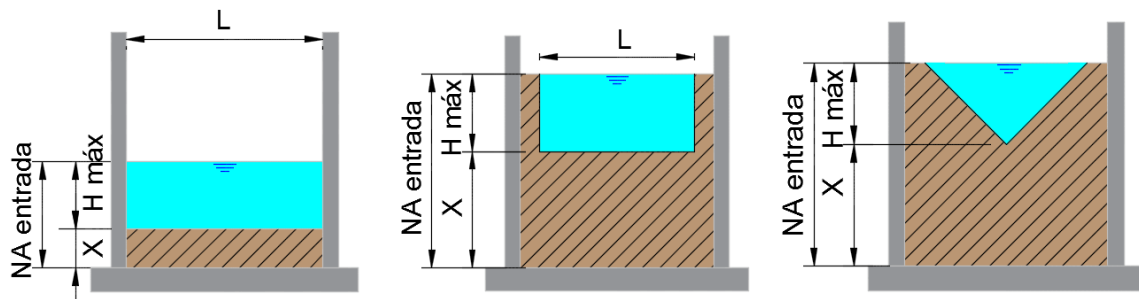
Q = vazão (m^3/s)

L = largura da seção na superfície livre (m)

H = carga (m)

Para cada tipo de vertedor tem-se uma equação para determinar a vazão. O nível de água de entrada é calculado através da equação de descarga no qual obtém-se o valor da carga máxima ($H_{\text{máx}}$) e soma-se parte da altura do vertedor (até a zona vertente) representado pela letra X ($NA_{\text{entrada}} = H_{\text{máx}} + X$), de acordo com a Figura 15.

Figura 15 – Nível de água de entrada



Fonte: Autor (2020)

As simulações foram realizadas com dois diferentes valores de vazão: $0,05 \text{ m}^3/\text{s}$ e $0,25 \text{ m}^3/\text{s}$. Os valores escolhidos para a simulação respeitaram o valor mínimo de vazão de trabalhabilidade do canal ($0,05 \text{ m}^3/\text{s}$) e a vazão intermediária ($0,25 \text{ m}^3/\text{s}$) foi adotada pelo fato de que a geometria do canal não suportava vazões maiores para estudo dos vertedores, podendo extravasar. A Tabela 3 apresenta os valores de NA de entrada com suas respectivas vazões e tipo de vertedor.

Tabela 3 – Alturas do escoamento a montante do vertedor de acordo com a vazão

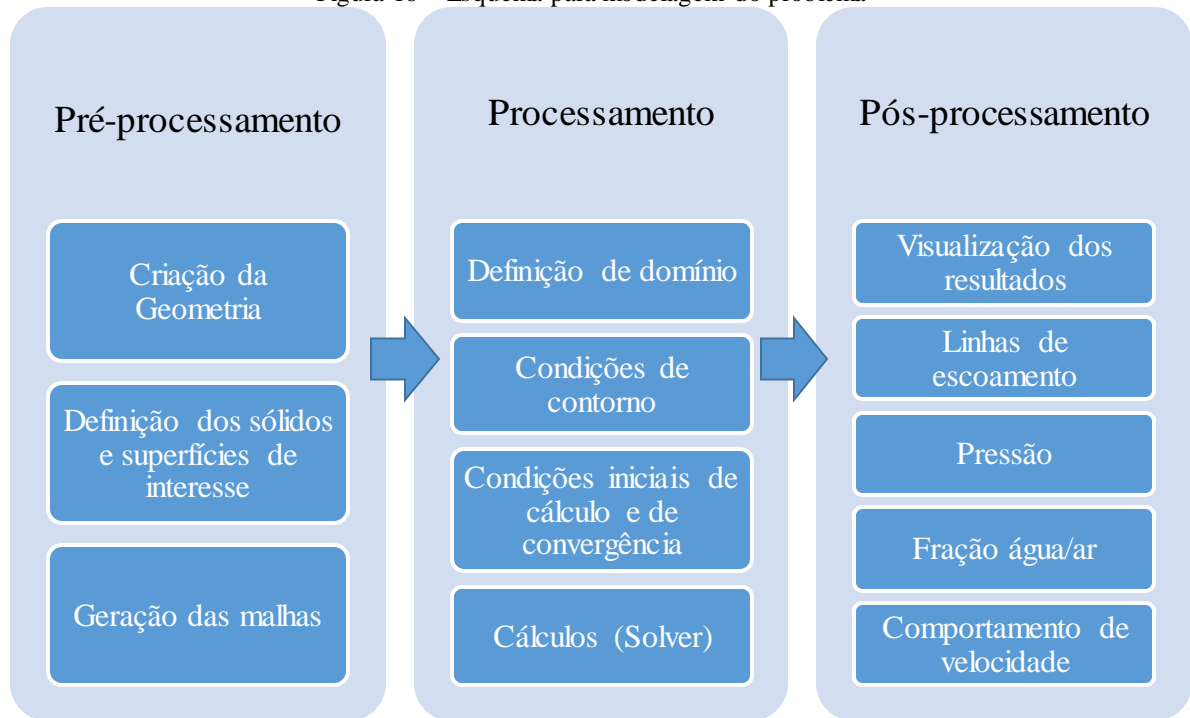
Vertedor	Vazão (m^3/s)	$H_{\text{máx}}$ (m)	X (m)	NA_{entrada} (m)
Fundo	0,05	0,090	0,200	0,290
	0,25	0,264	0,200	0,464
Retangular	0,05	0,105	0,600	0,705
	0,25	0,307	0,600	0,907
Triangular	0,05	0,300	0,600	0,900
	0,25	0,500	0,600	1,100

Fonte: Autor (2020)

4.3 Modelagem Computacional

A modelagem computacional é realizada em três etapas principais: pré-processamento, processamento e pós-processamento, citados na Figura 16 (FILHO; OTA, 2016).

Figura 16 – Esquema para modelagem do problema



Fonte: Almeida (2018), adaptado pelo autor

4.3.1 Criação da geometria e malhas

Baseado no pacote computacional ANSYS CFX, as simulações foram efetuadas por meio do ANSYS Workbench que é integrado ao CFX. A primeira geometria a ser criada foi a do vertedor de fundo com 1 m de largura (eixo X), 0,20 m de altura (eixo Y) e 0,05 m de comprimento (eixo Z). Ao redor desse vertedor foi criado um volume de água com 2 m de comprimento (eixo Z) e 1 m de altura (eixo Y). Outro canal é criado acima do volume de água, este é chamado de camada de ar para capturar a interação entre o nível de água e o ar provocando variações de níveis. Essa metodologia foi escolhida de acordo com o manual da ANSYS 13.0 (2010) que cita a importância da criação de uma superfície para mostrar a superfície livre, onde provoca a variação da altura livre da superfície ao longo do canal. Para a camada de ar foram considerados 2 m de comprimento (eixo Z) e 0,5 m de altura (eixo Y).

Escoamentos de superfície livre sofrem influência da aceleração pela gravidade, então o $g=9,81 \text{ [m/s}^2\text{]}$ é adotado negativo em Y (ALMEIDA, 2018). Para a construção da malha nos sólidos foi utilizado o ANSYS Meshing que também é integrado ao CFX, porém as malhas não apresentaram mesmas dimensões. Assim, houve o refinamento das malhas para obter resultados mais precisos. A geometria do canal foi refinado de acordo com a Tabela 4.

Tabela 4 – Malha computacional de cada vertedor

Geometria	Malha	
Vertedor de fundo	Canal superior	0,035
	Canal inferior	0,020
	Vertedor	0,020
Vertedor retangular	Canal superior	0,020
	Canal inferior	0,014
	Vertedor	0,012
Vertedor triangular	Canal superior	0,020
	Canal inferior	0,014
	Vertedor	0,012

Fonte: Autor (2020)

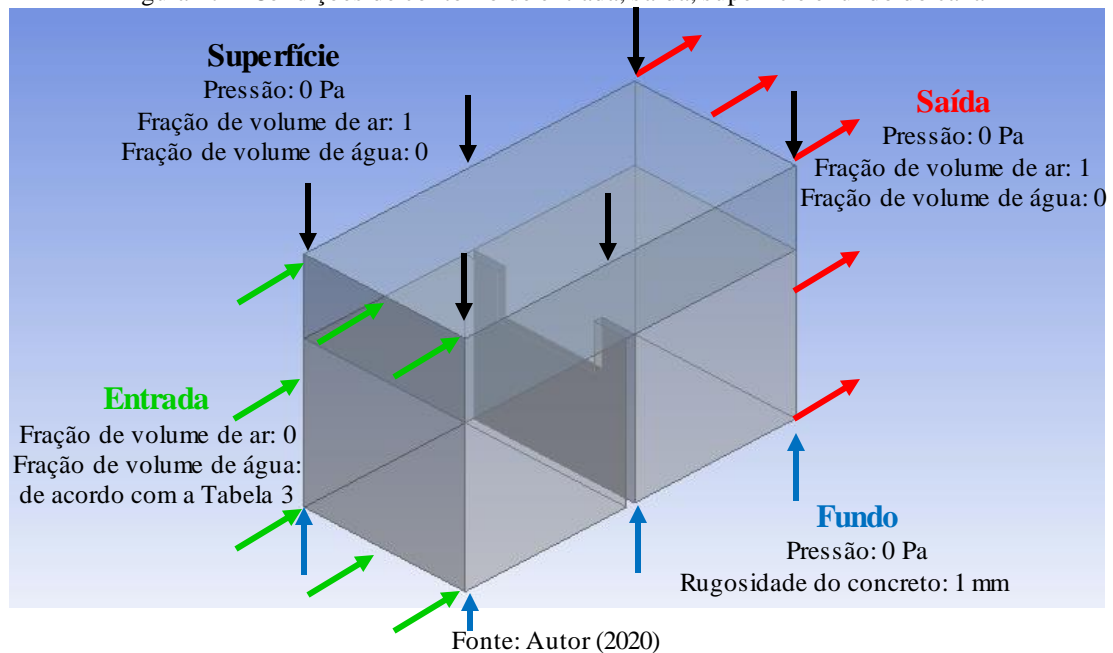
Para as simulações com o vertedor retangular e triangular a malha obteve menores valores para refinamento por se tratar de geometrias mais complexas e sujeitas a mais gradientes das grandezas de interesse.

4.3.2 Condições de contorno nos domínios

É necessário definir e especificar as condições de contorno apropriadas que imitam o comportamento físico real que acontece no escoamento do fluido de modo que o problema possa ser solucionado pelo software de CFD. Neste estágio são definidos os limites permitidos pelas condições de contorno disponíveis para a simulação (TU; YEOH; LIU, 2008).

As condições de contorno adotadas de acordo com recomendações do manual da ANSYS 13.0 (2010) para a simulação são apresentadas na Figura 17, que englobam a criação das superfícies de entrada, saída, superfície e fundo.

Figura 17 – Condições de contorno de entrada, saída, superfície e fundo do canal



Para as geometrias, foram inseridas expressões no solver sugeridas em ANSYS como configurações extras para a modelagem da superfície livre do escoamento com intenção de controlar os valores das condições de contorno no domínio. O software trabalha com aplicações para escoamento em conduto fechados e de superfície livre, porém, para trabalhar em escoamento de superfície livre é necessário fornecer ao solver equações para aprimorar a resolução do problema, estas equações são representadas na Tabela 5, conforme recomendado pelo manual da ANSYS (2010). As equações são utilizadas para inserir as condições de contorno no escoamento de superfície livre.

Os valores de Pressão de entrada, Volume de entrada de ar e Volume de entrada de água foram retiradas através de cálculos das equações a seguir.

Tabela 5 – Expressões utilizadas em solver (ANSYS)

Parâmetro	Equação	
Diferencial de densidades	$DenH = (DenWater - DenRef)$	(4.7)
Densidade de referência	$DenRef = 1.185 \text{ [kg/m}^3\text{]}$	(4.8)
Densidade da água	$DenWater = 997 \text{ [kg/m}^3\text{]}$	(4.9)
Pressão a jusante do vertedor	$DownPres = DenH * g * DownVFWater * (DownH - y)$	(4.10)
Pressão a montante do vertedor	$UpPres = DenH * g * UpVFWater * (UpH - y)$	(4.11)
Fração de ar a montante do vertedor	$UpVFAir = step((y - UpH) / 1[m])$	(4.12)
Fração de água a montante do vertedor	$UpVFWater = 1 - UpVFAir$	(4.13)

Fonte: ANSYS (2010)

Onde:

DenH: Diferencial de densidades (densidade – densidade de referência de fluabilidade)

DenWater: Densidade da água

DenRef: Densidade de referência de fluabilidade

DownPres: Distribuição de pressão a jusante do vertedor

DownVFWater: Fração de água a jusante do vertedor

DownH: Altura da superfície livre a jusante do vertedor

UpPres: Distribuição de pressão a montante do vertedor

UpVFWater: Fração de água a montante do vertedor

UpH: Diferencial de densidades a montante do vertedor

UpVFAir: Fração de ar a montante do vertedor

As simulações no software de CFD são realizadas com dois valores diferentes de vazão: 0,05 m³/s e 0,25 m³/s. São consideradas também condições de contorno necessárias para definir o comportamento das variáveis, os dados são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Definições no software de CFD

Definição de fluidos e partículas	
Ar e Agua	
Pressão de referência	1 atm
Gravidade em X	0 m/s ²
Gravidade em Y	– 9,81 m/s ²
Gravidade em Z	0 m/s ²
Densidade de referência	1,2 kg/m ³

Fonte: Autor (2020)

O modelo de turbulência utilizado foi o k-ε de acordo com o manual da ANSYS. O método utilizado foi o método dos volumes finitos e o escoamento foi considerado multifásico (água e ar) sem transferência de calor (isotérmico) com temperatura de referência de 20 °C. O coeficiente de tensão superficial utilizado foi de 0,072 N/m e o modelo de tensão superficial selecionado foi uma força superficial contínua.

Os requisitos no procedimento de soluções computacionais envolvem inicialização, controle da solução, monitoramento da solução, cálculos de CFD e busca por convergência. Os pontos que caracterizam uma solução de CFD bem sucedida são a convergência do processo iterativo e a independência da malha. A solução convergente é alcançada quando os resíduos das equações governantes do escoamento entre iterações subsequentes caem abaixo dos

critérios ou tolerâncias de convergência definidos dentro dos parâmetros de controle do solucionador iterativo (TU; YEOH; LIU, 2008).

A configuração adotada do solucionador para o critério de convergência foi com um resíduo menor que 10^{-3} (critério de convergência adota por Shashikumar, Vijaykumar e Vasudeva (2020), o número de iterações foi igual a 1000 e tipo de escoamento adotado é o permanente. Vale ressaltar que o software resolve todas as equações envolvidas.

Após as simulações no CFX o número de Froude é então calculado a 0,5 m montante do vertedor, no centro do vertedor e a 0,5 m a jusante do vertedor.

4.4 Avaliação dos resultados

A última etapa então é avaliar os resultados obtidos. O software possui um aplicativo que analisa os resultados através de construção de planos, avalia campos de velocidade e pressão em qualquer ponto da geometria além de permitir a construção de mapas de cores.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados do presente estudo são apresentados a seguir.

5.1 Simulação – Linguagem de programação: Fortran

A simulação hidráulica no Fortran foram simulações preliminares. Com os dados do canal real têm-se os resultados de simulação do comportamento do canal sem nenhum vertedor inserido. A simulação consistiu em calcular a velocidade, área molhada, altura da lâmina d'água e número de Froude variando os valores de vazão com intervalo de 0,05 m³/s e 0,40 m³/s (vazão máxima do canal) e valores de altura da lâmina d'água com intervalo de 0,10 m e 1,0 m (altura máxima do canal).

A partir dos dados obtidos foi possível analisar qual geometria do vertedor ideal para a simulação no CFX respeitando as equações de cada vertedor, dimensões máximas e mínimas. A Tabela 7 traz alguns valores obtidos na simulação preliminar através da linguagem de programação Fortran e percebe-se que a variação do número de Froude e velocidade são considerados baixas quando não há nenhum obstáculo. Vale ressaltar que a simulação preliminar serviu de base para a escolha da geometria dos vertedores e não o objetivo principal do trabalho.

Tabela 7 – Resultados da simulação do canal no Fortran

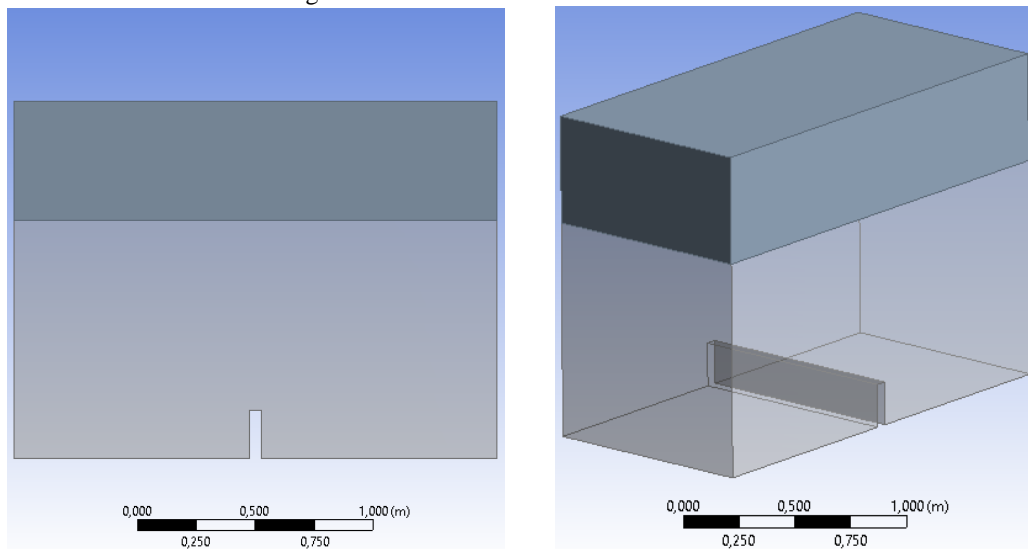
Y (m)	V (m/s)	Froude	Y (m)	V (m/s)	Froude
0,998	0,050	0,016	0,296	0,169	0,099
0,610	0,082	0,034	0,220	0,227	0,155
0,969	0,052	0,017	0,910	0,055	0,018
0,773	0,065	0,023	0,910	0,055	0,018
0,431	0,116	0,056	0,910	0,055	0,018
0,533	0,094	0,041	0,448	0,112	0,053
0,166	0,301	0,235	0,501	0,100	0,045
0,105	0,477	0,470	0,696	0,072	0,028
0,412	0,121	0,060	0,114	0,437	0,412
0,408	0,123	0,061	0,686	0,073	0,028

Fonte: Autor (2019)

5.2 Estruturas geométricas geradas – CFX

Para a geração das geometrias foi utilizado o software de fluidodinâmica computacional, o ANSYS CFX. A Geometria do vertedor de fundo é apresentado na Figura 18 no qual a cor cinza claro representam as paredes laterais do canal com água, a cor cinza escuro representa a cama de ar criada para fazer a iteração entre água e ar e os vertedores são representados com a cor mais clara.

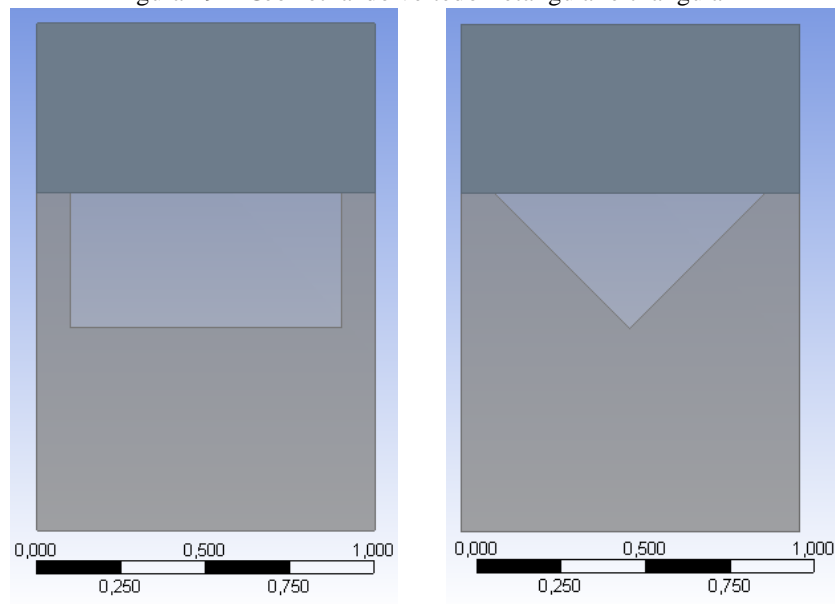
Figura 18 – Geometria do vertedor de fundo



Fonte: Autor (2020)

As geometrias do vertedor retangular e vertedor triangular são apresentadas na Figura 19 em uma vista frontal da simulação.

Figura 19 – Geometria do vertedor retangular e triangular

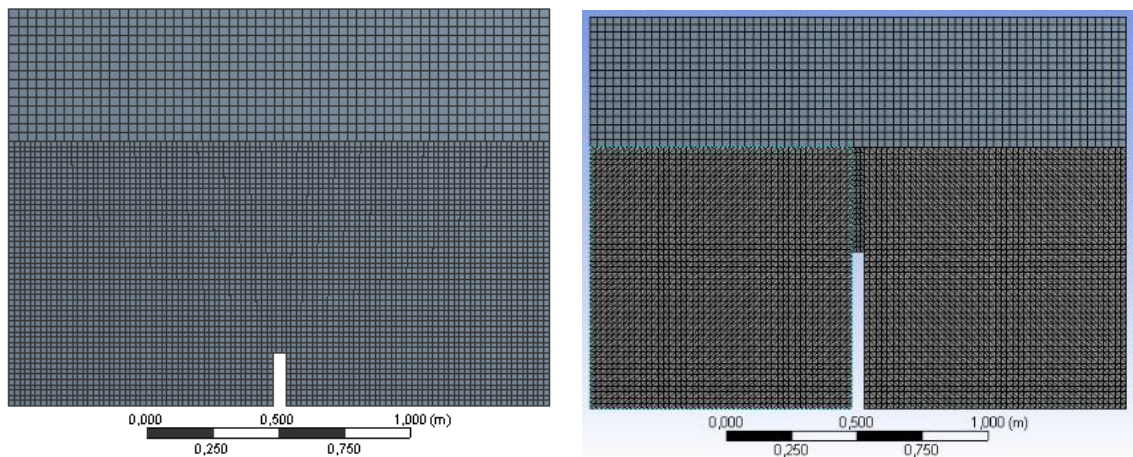


Fonte: Autor (2020)

5.3 Malha Computacional – CFX

As malhas computacionais resultantes refinadas para o vertedor de fundo e vertedor retangular são apresentadas na Figura 20.

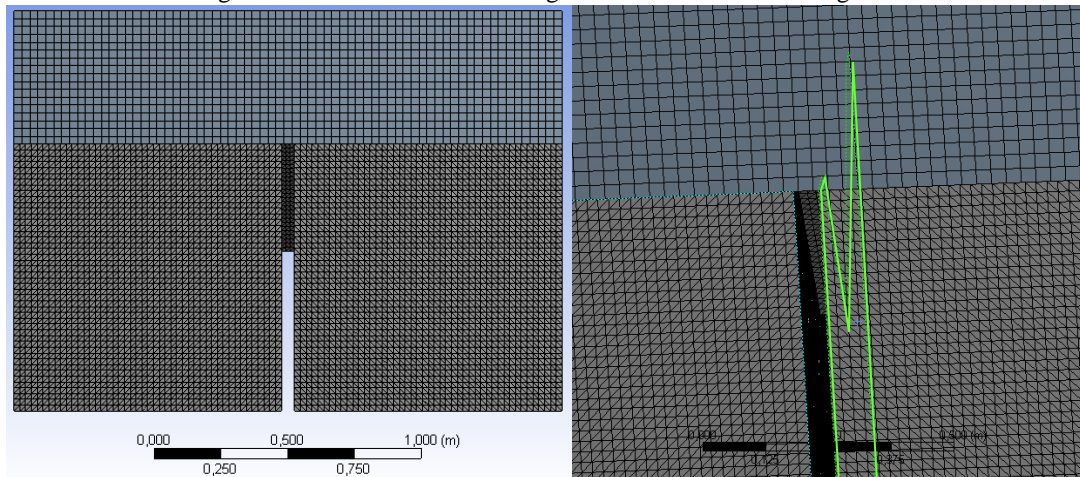
Figura 20 – Malha resultante da geometria do vertedor de fundo e vertedor retangular



Fonte: Autor (2020)

Na Figura 21 tem-se apresentado a malha computacional resultante do vertedor triangular e seus refinamentos. A malha do vertedor triangular se assemelha a malha do vertedor retangular por possuir dimensões geométricas parecidas entre si.

Figura 21 – Malha resultante da geometria do vertedor triangular



Fonte: Autor (2020)

Os vertedores estudados apresentaram números de nós, número de elementos e número de iterações conforme explícito na Tabela 8. O número de iterações é retirado de cada gráfico de simulação no qual é coletado o intervalo do último pico até o final da simulação.

Tabela 8 – Resultados da geometria, malha e tempo de simulação

Geometria	Número de nós	Número de elementos	Vazão m ³ /s	Número de iterações
Vertedor de fundo	1176197	281665	0,05	1000
			0,25	1000
Vertedor retangular	2372489	1650093	0,05	1000
			0,25	1000
Vertedor triangular	2368628	1646274	0,05	1425
			0,25	1000

Fonte: Autor (2020)

Vale ressaltar que o grande número de nós durante as simulações se deu ao refinamento feito nas malhas de cada simulação. O tempo de simulação apresenta grande diferença entre os diferentes tipos geometrias dos vertedores e isso se deve ao refinamento das malhas, número de nós e elementos.

Os modelos computacionais desenvolvidos para simulações em regime permanente tem se tornado limitado, com isso o estudo dos transientes é considerado negligenciado por ser de difícil análise e exigir grande esforço matemático e computacional. O transitório é definido como a situação em que o fluxo é considerado não permanente. Um problema encontrado durante as simulações é o escoamento em regime transitório que se adapta ao regime

permanente, no qual não alcançou convergência, porém a simulação permaneceu sempre estável resultando em uma qualidade boa de simulação (ANDRADE, 2017).

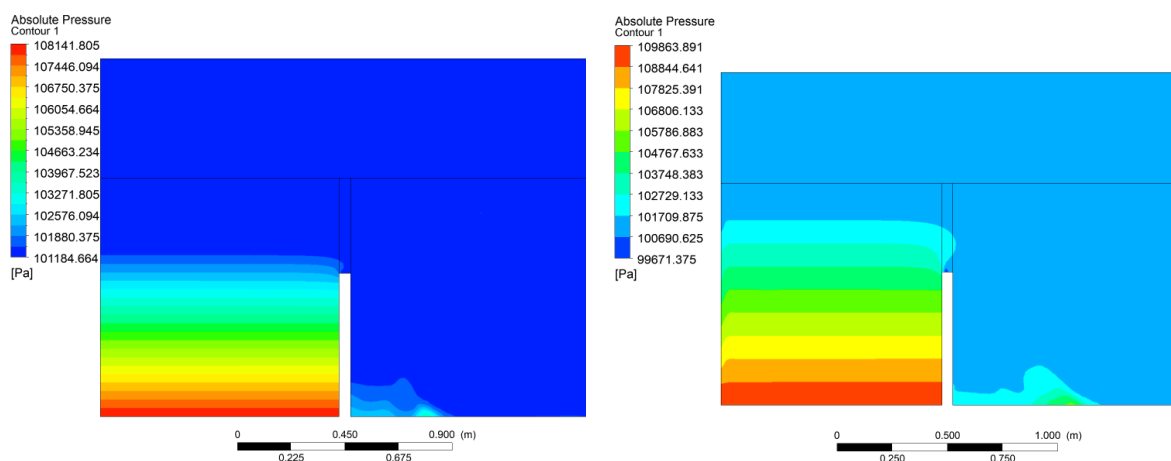
5.4 Análises – CFX

As análises dos campos de pressão absoluta, análises das frações volumétricas de água e ar e análises dos campos de velocidade foram descritas a seguir para os diferentes tipos de vertedores e valores de vazão. As figuras apresentadas pelo software CFX permitiu gerar os mapas de cores para cada análise realizada.

5.4.1 Análise dos campos de pressão – $Q=0,05 \text{ m}^3/\text{s}$

A Figura 22 mostra os campos de pressão absoluta obtidos para o vertedor retangular e vertedor triangular com uma vazão de $0,05 \text{ m}^3/\text{s}$. O escoamento acontece no sentido positivo do eixo X. Pode-se observar que as pressões maiores encontram-se na parte de baixo no canal onde a carga hidráulica é maior. A pressão vai diminuindo até chegar na superfície e obter valores próximos a pressão atmosférica ($1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pa}$), já que as simulações acontecem em superfície livre em contato com a atmosfera.

Figura 22 – Campos de pressão absoluta do vertedor retangular e vertedor triangular ($Q=0,05 \text{ m}^3/\text{s}$)



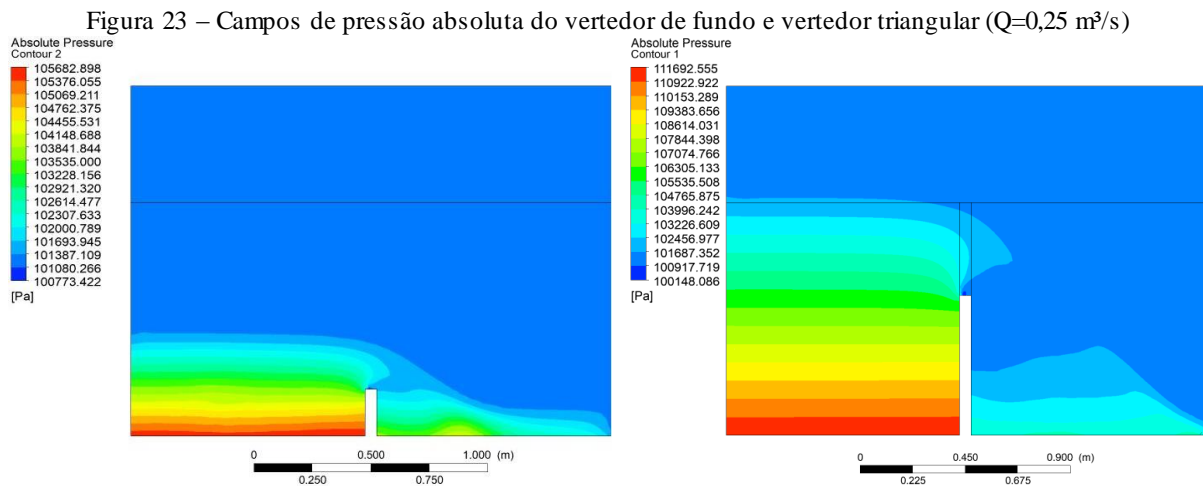
Fonte: Autor (2020)

A distribuição de pressão do escoamento que antecede o vertedor em todos os casos, é considerada hidrostática, ou seja, proporcional a profundidade. Pode-se dizer que a pressão

absoluta se comporta dessa maneira porque a aceleração da gravidade e a massa específica foram considerados constantes. O comportamento já era esperado por se tratar de um escoamento sob pressão atmosférica e aponta uma qualidade boa das simulações realizadas.

5.4.2 Análise dos campos de pressão – $Q=0,25 \text{ m}^3/\text{s}$

Para a vazão de $0,25 \text{ m}^3/\text{s}$ novas simulações foram realizadas e as figuras geradas são apresentadas a seguir. A Figura 23 representa os campos de pressão para o vertedor de fundo e vertedor triangular para a maior vazão ($0,25 \text{ m}^3/\text{s}$) simulada.



Fonte: Autor (2020)

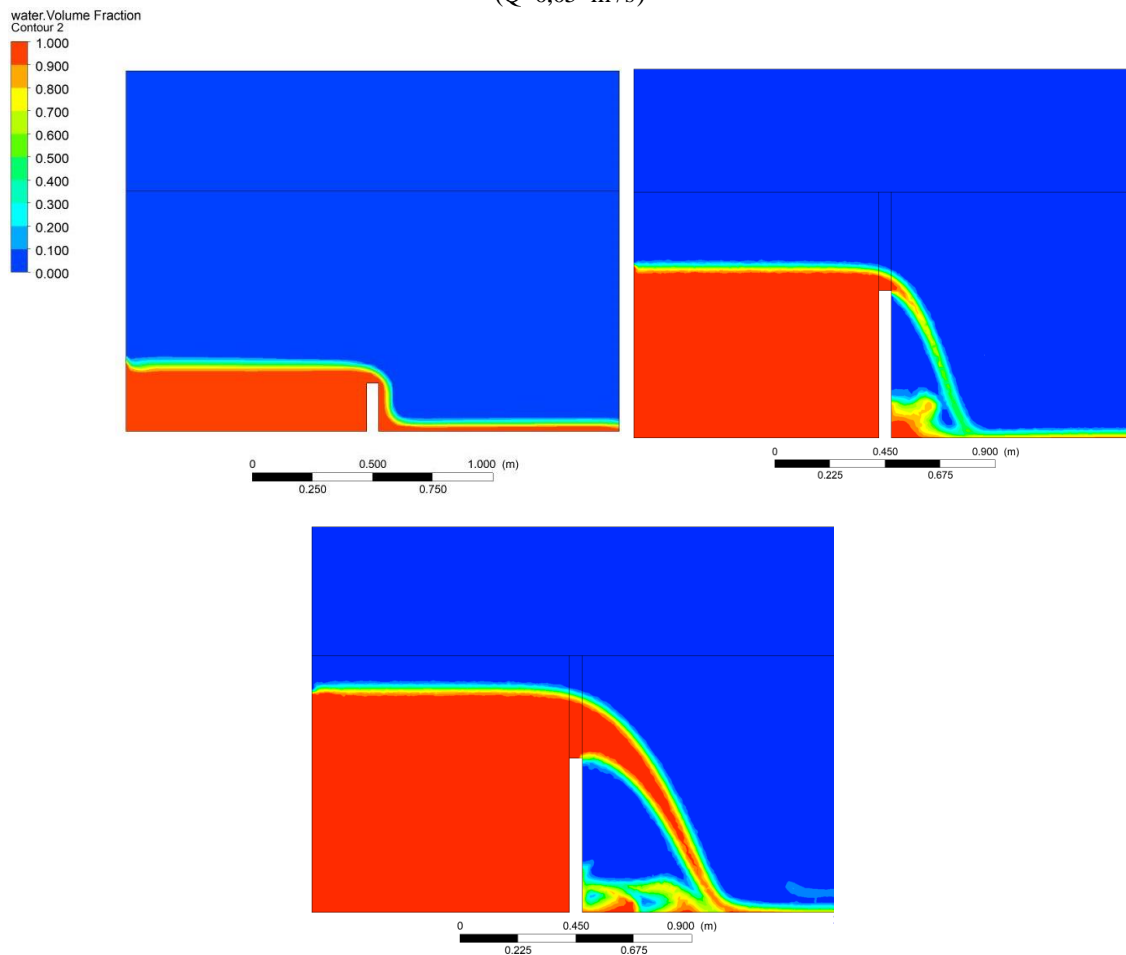
Através da equação da pressão hidrostática, quando a altura da lâmina aumenta a pressão tende a aumentar, isso ocorre em todos os casos das simulações. A região onde apresenta valores de pressão negativos é considerada um problema para o escoamento, que pode produzir perda de carga e induzir entrada de ar no escoamento podendo atrapalhar a eficiência do processo hidráulico na utilização dos modelos de vertedores adotados.

Pode-se observar que existe um região na qual a pressão é menor que a pressão atmosférica ($1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pa}$). Essa pressão se manifesta devido ao escoamento onde o ar é arrastado pela água. A presença de pressões menores que a pressão atmosférica certamente decorre do brusco aumento de velocidade e da interação com o ar naquela região.

5.4.3 Análise das frações volumétricas de água e ar – $Q=0,05 \text{ m}^3/\text{s}$

No presente estudo, a análise das frações volumétricas de água e ar são representadas por cores quentes e frias. As cores frias (tons de azul) representam a fase gasosa de ar no qual os valores são próximos de 0 e as cores quentes (tons de vermelho) representam a fase líquida da simulação onde os valores são próximos a 1. A Figura 24 retrata as frações volumétricas para os vertedores de fundo, vertedor retangular e vertedor triangular com uma vazão de $0,05 \text{ m}^3/\text{s}$.

Figura 24 – Frações de volume de ar e água do escoamento nos vertedores de fundo, retangular e triangular ($Q=0,05 \text{ m}^3/\text{s}$)



Fonte: Autor (2020)

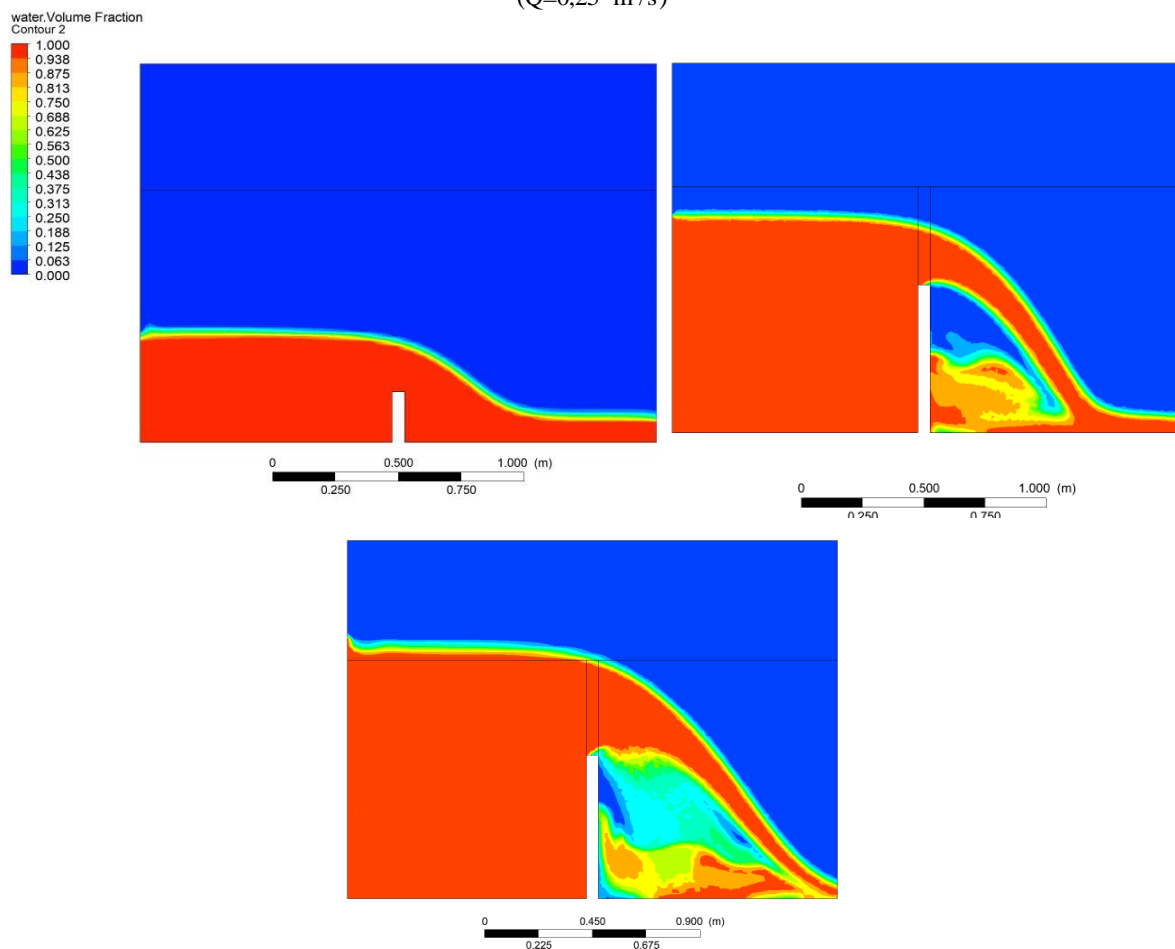
A camada em azul representa a distribuição de ar na superfície e no interior do jato emitido, esta presença de ar no interior pode ser explicada como a presença indevida de ar provocada pela geometria. Para o vertedor triangular, a configuração do escoamento se mantém diferente do vertedor retangular mesmo possuindo as mesmas dimensões, porém para este caso

a área por onde o líquido escoar é menor. Pode perceber que uma fina camada de fase dupla (água e ar) acompanha a superfície do escoamento em todos os casos.

5.4.4 Análise das frações volumétricas de água e ar – $Q=0,25 \text{ m}^3/\text{s}$

Para as novas simulações com a vazão de $0,25 \text{ m}^3/\text{s}$, os mapas de cores das frações volumétricas de água e ar para vertedor de fundo, retangular e triangular são representados pela Figura 25.

Figura 25 – Frações de volume de ar e água do escoamento nos vertedores de fundo, retangular e triangular ($Q=0,25 \text{ m}^3/\text{s}$)

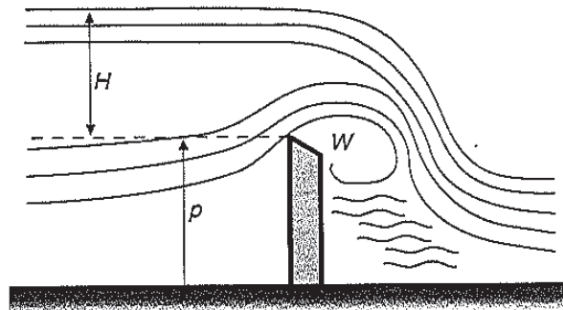


Fonte: Autor (2020)

Observa-se um comportamento com a presença de uma região com água e ar a jusante dos vertedores. Esta presença de ar provoca perturbações no escoamento. Verifica-se que após a água tocar a crista do vertedor e o jato de água ser emitido, existe uma presença de ar entre o vertedor e a lâmina vertente. Este comportamento é observado durante as simulações e podemos comparar com as literaturas de referência, no qual se assemelham em alguns aspectos, conforme

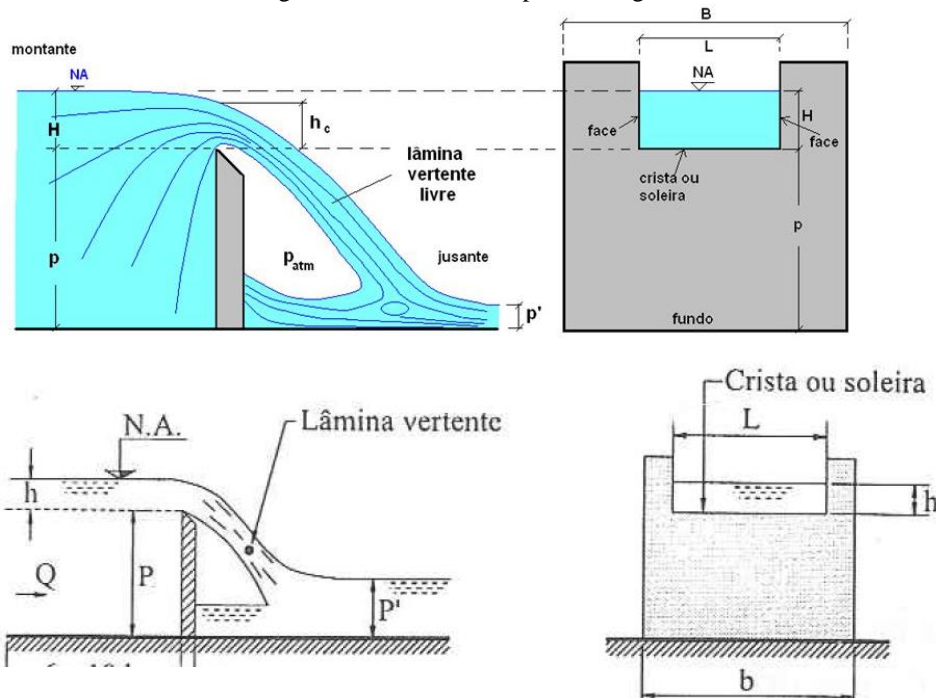
Figura 26 e Figura 27 para o vertedor retangular com contrações e Figura 28 para o vertedor triangular.

Figura 26 – Movimento da água em um vertedor retangular



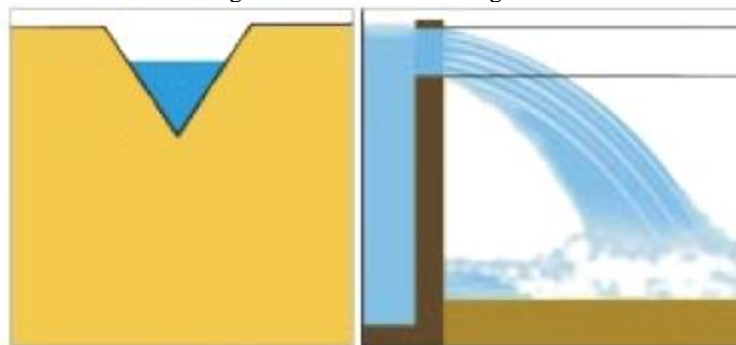
Fonte: Netto (1998)

Figura 27 – Vertedor de parede delgada



Fonte: Porto (2006)

Figura 28 – Vertedor triangular



Fonte: UFRJ (2002)

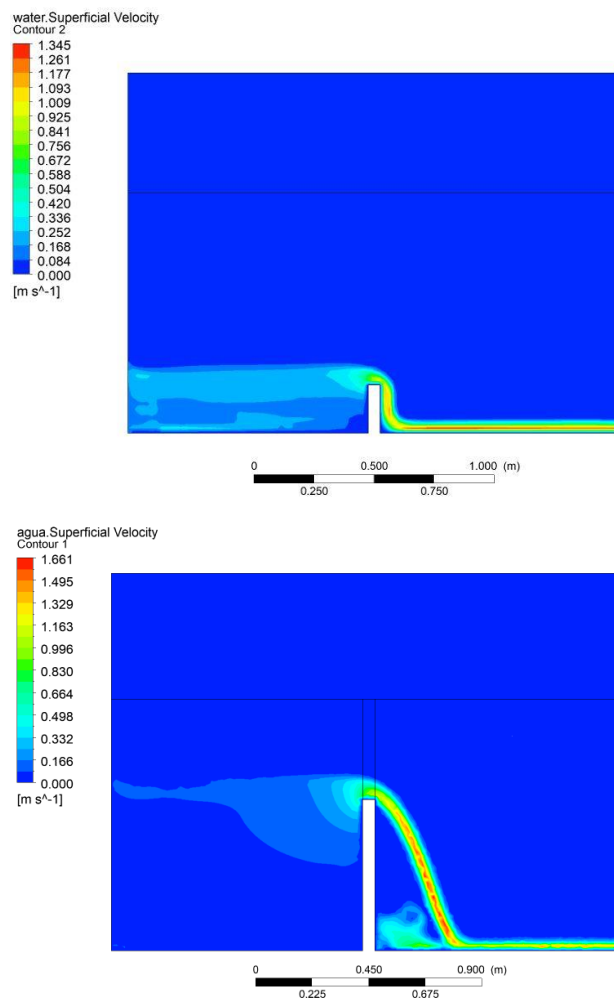
As figuras das simulações indicam resultados de uma boa simulação já que o escoamento se comporta de acordo com o esperado e as cores conseguem representar bem a situação do escoamento.

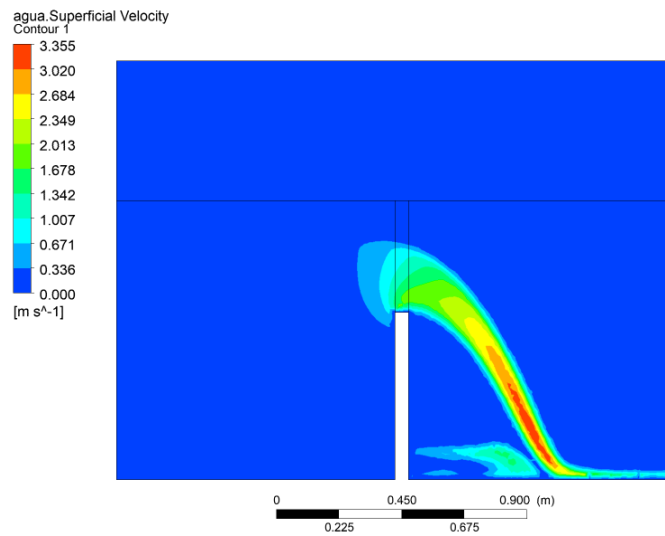
Analisando os casos de frações volumétricas de água e ar verifica-se que os cenários apresentam na maioria dos casos zonas mortas (no qual circulam água e ar no interior do jato) que são prejudiciais para o sistema hidráulico. O perfil *Creager*, por sua vez, não apresenta zonas mortas além de possuir uma eficiência hidráulica e resguardar a estrutura de surgimento de pressões negativas.

5.4.5 Análise dos campos de velocidade – $Q=0,05 \text{ m}^3/\text{s}$

A Figura 29 mostra os campos de velocidade obtidos para os vertedores de fundo, retangular e triangular com vazão de $0,05 \text{ m}^3/\text{s}$.

Figura 29 – Campos de velocidade no vertedor de fundo, retangular e triangular ($Q=0,05 \text{ m}^3/\text{s}$)





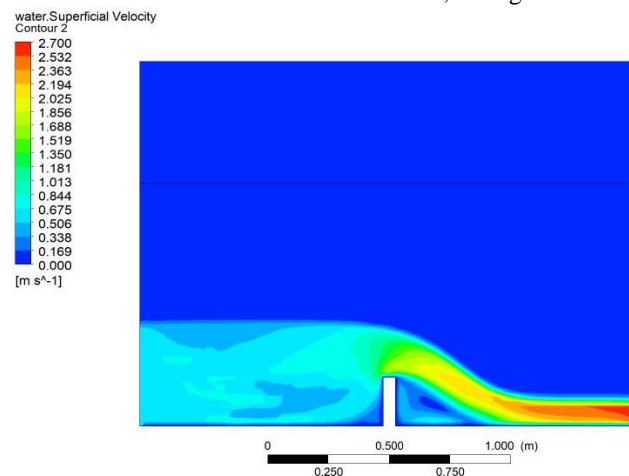
Fonte: Autor (2020)

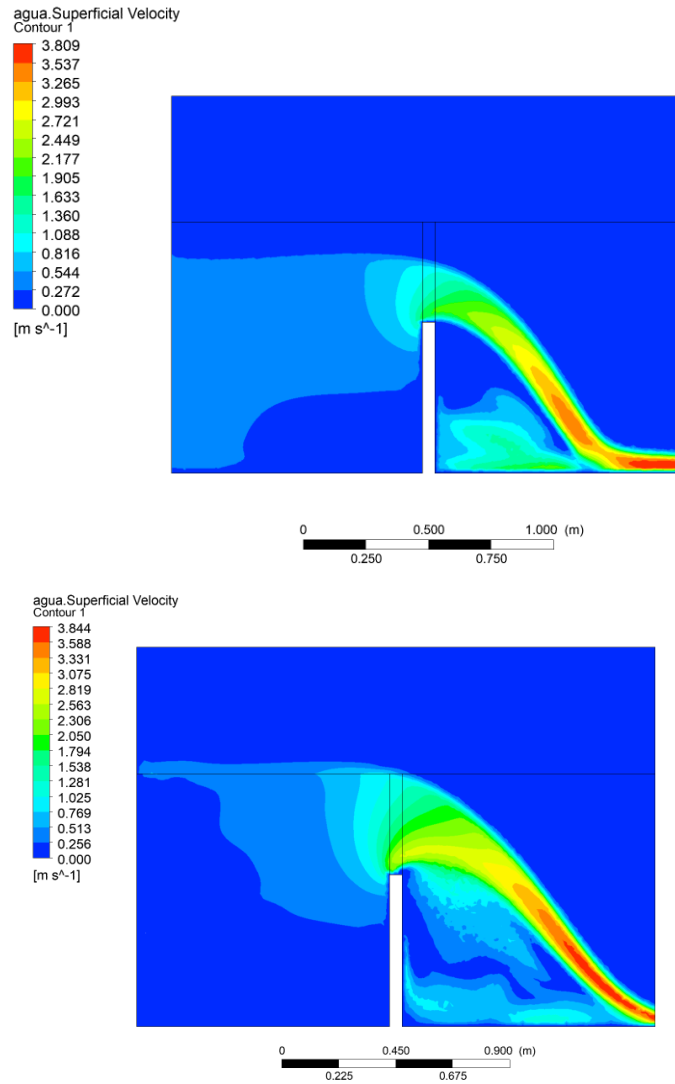
É comum o aumento da velocidade quando passa em cima do vertedor. A montante do vertedor têm-se uma velocidade em determinada área, quando o fluido passa pelo vertedor a área diminui e, de acordo com a equação da continuidade (que relaciona a área disponível para o escoamento de um fluido e a sua velocidade), a velocidade aumenta. Todos os escoamentos acontecem no sentido positivo ao eixo X.

5.4.6 Análise dos campos de velocidade – $Q=0,25 \text{ m}^3/\text{s}$

Para a maior vazão de simulação, os campos de velocidade estão representados a seguir. A Figura 30 representa os campos de velocidade para o vertedor de fundo, vertedor retangular e vertedor triangular com a vazão de $0,25 \text{ m}^3/\text{s}$.

Figura 30 – Campos de velocidade no vertedores de fundo, retangular e triangular ($Q=0,25 \text{ m}^3/\text{s}$)





Fonte: Autor (2020)

Através de cálculos, pode-se verificar que vazão que passa pelo vertedor é a mesma vazão de entrada, como deveria ser. A vazão é igual em todos os pontos. Para a vazão de 0,25 m³/s a redução de velocidade acontece porque há pouca água (azul escuro), esta região é chamada de zona de escoamento secundário. A tendência da água é ficar circulando e elevar a perda de carga do escoamento, atrapalhando o processo antes de seguir com o escoamento. Sabe-se que nesta área há presença de água (visto na fração volumétrica de água e ar).

De acordo com a equação de Bernoulli (continuidade), a soma das energias de cota, pressão e velocidade no escoamento têm de ser constantes desconsiderando a perda de carga. Dessa forma, é esperado que nos pontos na qual a pressão é reduzida, a velocidade aumente ou vice-versa.

No trecho inicial do canal localizam as velocidades mais baixas enquanto pouco antes do obstáculo essa velocidade varia provando que nas maiores profundidades a variação de

pressão é maior e a variação de velocidade é menor. As maiores velocidades são localizadas a montante do vertedor no jato emitido.

Observando o movimento da água em um vertedor de parede retangular delgada com contração (Retangular) ou sem contração nota-se que os filetes inferiores a montante se elevam, toca a crista do vertedor e sobrelevam-se ligeiramente em seguida. A superfície livre da água e os filetes próximos baixam, Figura 26 (NETTO, 1998). Este cenário é visualizado durante as simulações para o vertedor de fundo e o vertedor retangular.

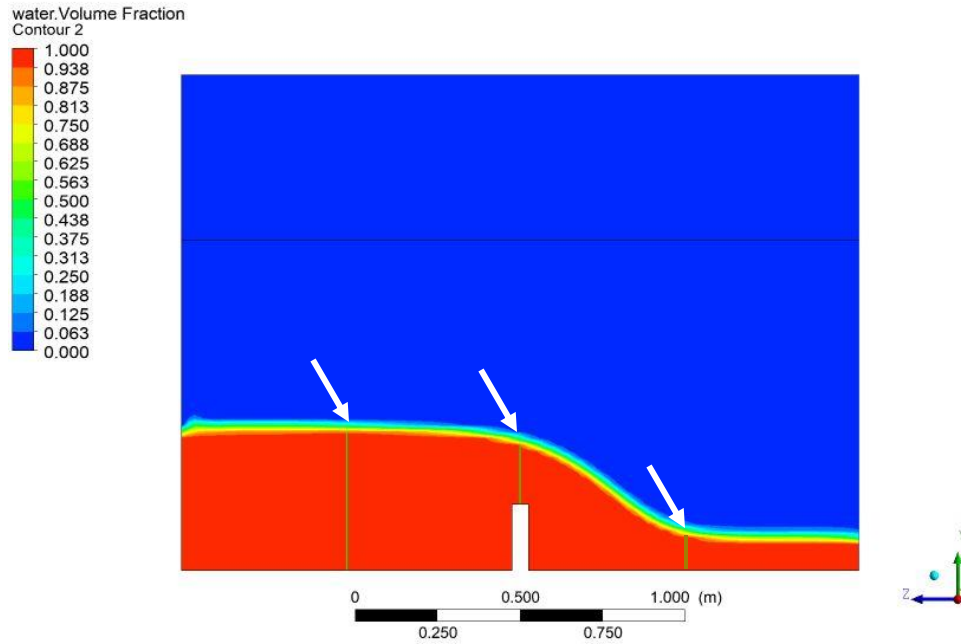
O escoamento bruscamente variado devido a presença dos vertedores provocam fenômenos locais como o ressalto hidráulico elevando-se bruscamente a superfície livre que se produz quando uma corrente de forte velocidade encontra uma corrente com baixa velocidade após a queda brusca (PORTO, 2006). Nota-se que as simulações de CFD reproduziram resultados semelhantes a literatura, conforme Figura 2.

Percebe-se um aumento da velocidade no vertedor triangular que apresentam valores de velocidade em torno de 3,355 no interior do jato para a vazão de 0,05 m³/s. Já para a simulação com vazão 0,25 m³/s a velocidade máxima ficou em torno de 3,844 m/s, valores considerados altos para o escoamento.

5.5 Análise do Número de Froude

A partir das figuras dos campos gerados, foi possível coletar dados para o cálculo do número de Froude para classificar o tipo do escoamento em cada caso e suas particularidades do canal em estudo. O cálculo do número de Froude foi realizado a 0,5 m a montante do vertedor, em cima do vertedor e 0,5 m a jusante do vertedor, indicados na Figura 31.

Figura 31 – Indicação do local de cálculo do número de Froude



Fonte: Autor (2020)

5.5.1 Vazão 0,05 m³/s

Para a vazão de 0,05 m³/s, os dados de velocidade média, altura da lâmina e o cálculo do número de Froude para cada tipo de vertedor a montante, em cima e a jusante do vertedor são expressos na Tabela 9.

Tabela 9 – Cálculo do número de Froude (Q=0,05 m³/s)

Vertedor	A montante do vertedor			Em cima do vertedor			A jusante do vertedor		
	V (m/s)	Y (m)	Froude	V (m/s)	Y (m)	Froude	V (m/s)	Y (m)	Froude
Fundo	0,143	0,302	0,083	0,440	0,277	0,267	0,614	0,061	0,794
Retangular	0,060	0,714	0,023	0,523	0,698	0,200	0,548	0,054	0,755
Triangular	0,037	0,890	0,013	1,100	0,862	0,378	1,862	0,173	1,431

Fonte: Autor (2020)

Para o vertedor de fundo, retangular e triangular com a simulação com vazão de 0,05 m³/s de acordo com o número de Froude o escoamento foi classificado como subcrítico quando apresentou valores menores que 1 e escoamento crítico para valores de número de Froude maior que 1. O escoamento foi considerando subcrítico nas regiões a montante e em cima do vertedor, quando o fluido passa pela abertura do vertedor o escoamento foi considerado subcrítico ou supercrítico.

O escoamento sofre alterações quando analisado a jusante do vertedor já que aumenta a velocidade e diminui a altura da lâmina. As maiores velocidades durante a simulação são encontradas na simulação do vertedor triangular podendo comprovar que a diminuição da área da seção vertente triangular (que possui a menor área do presente trabalho) provoca aumento da velocidade. A velocidade para o caso de vazão de $0,05 \text{ m}^3/\text{s}$ variou de $0,037 \text{ m/s}$ a montante do vertedor até $1,862 \text{ m/s}$ a jusante do vertedor, a altura da lâmina d'água variou de $0,054 \text{ m}$ a $0,890 \text{ m}$. O número de Froude se manteve entre $0,013$ e $1,431$. O maior valor do número de Froude foi encontrado na simulação do vertedor triangular.

5.5.2 Vazão $0,25 \text{ m}^3/\text{s}$

Para a maior vazão utilizada durante as simulações ($0,25 \text{ m}^3/\text{s}$), os valores para velocidade e altura da lâmina d'água são apresentados na Tabela 10, bem como os resultados dos cálculos do número de Froude a montante, em cima e a jusante do vertedor para os três tipos de vertedores simulados.

Tabela 10 – Cálculo do número de Froude ($Q=0,25 \text{ m}^3/\text{s}$)

Vertedor	A montante do vertedor			Em cima do vertedor			A jusante do vertedor		
	V (m/s)	Y (m)	Froude	V (m/s)	Y (m)	Froude	V (m/s)	Y (m)	Froude
Fundo	0,456	0,443	0,219	0,991	0,421	0,488	1,401	0,150	1,156
Retangular	0,246	0,900	0,083	1,058	0,867	0,363	2,014	0,400	1,016
Triangular	0,212	1,078	0,065	1,392	1,020	0,440	1,486	0,598	0,614

Fonte: Autor (2020)

Compreende-se que com o aumento da vazão e redução da área do escoamento (que depende do tipo de geometria do vertedor) a velocidade tende-se a sofrer aumento gradativo após tocar a crista do vertedor e emitir o jato. Nestas condições ocorre a diminuição da lâmina d'água.

Para o caso do vertedor triangular, grande parte do jato emitido ocorreu a uma distância maior que $0,5 \text{ m}$ a jusante, dessa forma apresentou resultados menores por essa análise acontecer a $0,5 \text{ m}$. O aumento da velocidade média para os vertedores analisados em 2 cenários (vazões de $0,05 \text{ m}^3/\text{s}$ e $0,25 \text{ m}^3/\text{s}$) apontam maiores chances de desenvolver um escoamento supercrítico com situações em que o número de Froude seja maior que 1. A velocidade para o caso de vazão de $0,25 \text{ m}^3/\text{s}$ variou de $0,212 \text{ m/s}$ a montante do vertedor até $2,014 \text{ m/s}$, a altura da lâmina d'água variou de $0,150 \text{ m}$ a $1,078 \text{ m}$.

O número de Froude se manteve entre 0,065 e 1,156. Os maiores valores do número de Froude foram encontrados na simulação do vertedor retangular e fundo, que analisando a 0,5 m a jusante do vertedor apresentaram valores maiores que o local de análise para o vertedor triangular.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

As simulações computacionais de fluidodinâmica realizadas permitiram estudar o comportamento hidráulico e as análises dos campos de pressão, análises volumétricas de água e ar e análises dos campos de velocidade para diferentes tipos de vertedores e vazões. O presente estudo indica que o modelo computacional utilizado consegue reproduzir os escoamentos em superfície livre tomando as precauções em relação a qualidade da malha que garante a convergência da solução computacional.

Verificou-se que o fluido possui maior velocidade final nas simulações com maior vazão e com a geometria de vertedor retangular e triangular já que possuem contrações laterais capazes de conter uma porção de água, além de diminuir a área vertente e assim provocar aumento na velocidade. Todas as velocidades finais das simulações realizadas apresentaram valores superiores aos valores de entrada, como esperado.

Em relação as pressões absolutas do escoamento das simulações, se mostram hidrostáticas até próximo o vertedor e seguidamente foram perturbadas devido a presença de vertedores que provocam turbulências.

O software de fluidodinâmica computacional se mostrou eficiente para simular o escoamento do canal com os vertedores apresentando resultados eficientes que permitiu a análise dos campos de pressão, velocidade e frações volumétricas de água e ar. O software também permitiu interpretar os resultados, coletar dados para comparação entre os vertedores. O modelo de turbulência k- ϵ foi capaz de prever com precisão a distribuição do coeficiente de pressão na superfície resultando em boas previsões de pressão e perfil de velocidade. O modelo foi capaz de reproduzir satisfatoriamente o comportamento do escoamento no canal.

Através do parâmetro número de Froude foi possível analisar o comportamento do canal e classificar o escoamento em subcrítico, crítico ou supercrítico para cada vertedor em estudo. As análises permitiram que o cálculo do número de Froude fosse realizado a montante do vertedor, em cima do vertedor e a jusante do vertedor permitindo compreender o comportamento hidráulica para cada situação em estudo.

O presente trabalho é considerado significativo e de grande interesse para a engenharia hidráulica, visto que o problema de escoamento em canais tem atraído a atenção de engenheiros ao longo do tempo e os resultados expostos neste estudo permite uma contribuição das análises dos parâmetros envolvidos além de prever o comportamento do escoamento do canal.

Recomenda-se para futuros trabalhos realizar uma quantidade maior de testes com diferentes malhas computacionais para identificar a malha que melhor se adequa as simulações.

Recomenda-se ainda realizar experimentos em um canal com as mesmas características (ou semelhantes) para comparar os resultados obtidos durante as simulações para cada vertedor e valores de vazão com o propósito de validar o software e os resultados obtidos durante esta pesquisa.

A proposta para futuros trabalhos abrange ainda medir o comprimento do jato emitido para cada vertedor, verificar o comportamento hidráulico a uma distância maior a jusante do vertedor para análise da formação de um ressalto hidráulico e o reestabelecimento do escoamento hidráulico. Também, é recomendado realizar simulações com geometria do vertedor com perfil Creager que possui maior eficiência hidráulica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, A. L. U. de; ANGELO, R. M. B. de; DANTAS, S. C.; SILVA, D. F. da. Determinação da Vazão em Diferentes Tipos de Vertedores. **Ciências exatas e tecnológicas**, Maceió, v. 3, n. 3, p. 97-106, nov. 2016. Disponível em: <https://periodicos.set.edu.br/index.php/fitsexatas/article/view/3584>. Acesso em: 25 maio 2020.

ALMEIDA, W. C. R. **Estudo de Vertedores Utilizando Técnicas CFD: Uma Comparação de Diferentes Geometrias**. 2018. Monografia (Graduação em Engenharia Hídrica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2018.

ANDRADE, P. N. de. **Estudo comparativo da calibração de rugosidades em redes de distribuição de água submetidas a regimes de escoamento transiente rápido e lento**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará.

ANSARI, K., MEMON, N. A.; MEMON, A. A. The Setup and Validation of a Numerical Model for Wall Shear in Trapezoidal Open Channels. **Sindh University Research Journal**, Paquistão, v. 44, n. 4, p. 613–616, July 2012. Disponível em: <http://sujo-old.usindh.edu.pk/index.php/SURJ/article/view/1559>. Acesso em: 12 ago. 2019.

ANSYS, Inc. **ANSYS CFX Tutorials**. [ebook] Canonsburg, PA 15317: Southpointe, 2010.

ARAUJO, P. P.; REZENDE, A. L. T. Modelo de fechamento de segunda ordem da turbulência aplicado ao escoamento sobre degrau descendente. **Revista Militar de Ciência e Tecnologia**, Rio de Janeiro, v. 35, n. 3, p. 26–35, set. 2018. Disponível em: <http://ebrevistas.eb.mil.br/index.php/CT/article/view/2803>. Acesso em: 14 maio 2020.

AZIMI, H.; SHABANLOU, S.; EBTEHAJ, I.; BONAKDARI, H.; KARDAR, S. Combination of Computational Fluid Dynamics, Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System, and Genetic Algorithm for Predicting Discharge Coefficient of Rectangular Side Orifices. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Estados Unidos, v. 143, n. 7, p. 1–11, July 2017. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29IR.1943-4774.0001190>. Acesso em: 03 nov. 2019.

BENGTSON, H. H. Open channel flow measurement – weirs and flumes. **SunCam**. 2010.

BONAKDARI, H.; LIPEME-KOUYI, G.; ASAWA, G. L. Developing turbulent flows in rectangular channels: A parametric study. **Journal of Applied Research in Water & Wastewater**, Irã, v. 2, p. 51–56. Apr. 2014. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/Developing-turbulent-flows-in-rectangular-channels%3A-Bonakdari-Lipeme-Kouyi/687c0a2c671c8bc926d414c969469320aad57899>. Acesso em: 06 ago. 2019.

CAVALCANTE, F. G. **Estudo dos Efeitos das Pontes, Rugosidade e Declividade Longitudinal no Escoamento em Canal Artificial Urbano Aplicando Modelagem Computacional**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará, Juazeiro do Norte, 2017.

DAVIDSON, L. An Introduction to Turbulence Models. Department of Thermo and Fluid

Dynamics. Chalmers university of technology. Gutemberg, Suécia, 2018. Disponível em: http://www.fem.unicamp.br/~im450/palestras&artigos/kompendium_turb.pdf. Acesso em: 15 maio 2020.

ESSS (Org.). **Processo de simulação fluidodinâmica (CFD)**. 2016. Disponível em: <https://www.esss.co/blog/processo-de-simulacao-fluidodinamica-cfd/>. Acesso em: 01 jun. 2020.

FILHO, M. F. A.; OTA, J. J. Modelagem Computacional Tridimensional de um Vertedouro de Baixa Queda. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 21, n. 2, p. 360-376, jun. 2016. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/rbrh/v21n2/2318-0331-rbrh-21-2-360.pdf>. Acesso em: 25 maio 2020.

FILONOVICH, M.; SOUSA, V.; MEIRELES, I.; BOMBARDELLI, F. A.; FERREIRA, R. L.; ROJAS-SOLORZANO, L. R.; LEAL, J. B. Avaliação da performance de códigos CFD na previsão da velocidade em canais de secção composta. *In: PORTUGUESE CONFERENCE ON FLUID MECHANICS THERMODYNAMICS AND ENERGY, III.*, 2009, Braganza. **Anais eletrônicos** [...]. Braganza: EfS-UC, 2009. p. 1-9. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/273463831_Avaliacao_da_performance_de_codigos_CFD_na_previsao_da_velocidade_em canais_de_seccao_composta. Acesso em: 06 ago. 2019.

HÖS, C., & KULLMANN, L. A numerical study on the free-surface channel flow over a bottom obstacle. **Journal of Computational and Applied Mechanics**, Teerã, v. 8, n. 1, p. 57–70, Mar. 2007. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/264907149_A_numerical_study_on_the_free-surface_channel_flow_over_a_bottom_obstacle. Acesso em: 06 ago. 2019.

LEE, A. K.; PARK, N. S.; KIM, S.; KIM, N. Physical modifications to improve a channel's flow distribution. **Korean Journal of Chemical Engineering**, Seul, v. 29, n. 2, p. 201–208, Oct. 2011. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11814-011-0163-9>. Acesso em: 06 ago. 2019.

LUCAS, J.; HAGER, W. H.; BOES, R. M. Deflector effect on chute flow. **Journal of Hydraulic Engineering**, Nova Iorque, v. 139, n. 4, p. 444–449, Apr. 2013. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29HY.1943-7900.0000652>. Acesso em: 02 mar. 2020.

MAGALHÃES, F. A. P.; NAVARRO, M. A.; FILHO, J. A. B.; SANTOS, A. A.; DOS, C. Simulação de Escoamento em Canal com Contração e Expansão Abrupta da Seção. *In: International Nuclear Atlantic Conference ABEN*, 2007, Santos. **Anais eletrônicos** [...]. Santos: ABEN, 2007. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/266885739_SIMULACAO_DE_ESCOAMENTO_EM_CANAL_COM_CONTRACAO_E_EXPANSAO_ABRUPTA_DA_SECAO?enrichId=rgreq-aceb622ddefaedcd1b80baf04a021746-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdIOzI2Njg4NTczOTtBUzoOTg1MjkwOTI5ODQ4MzJAMTQyNDM0NDQzMjQzNQ%3D%3D&el=1_x_3&_esc=publicationCoverPdf. Acesso em: 06 ago. 2019.

MAZUMDER, S. K.; HAGER, W. H. Supercritical Expansion Flow in Rouse Modified and Reversed Transitions. **Journal Of Hydraulic Engineering**, Nova Iorque, v. 119, n. 2, p. 201-219, feb. 1993. disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28asce%290733-9429%281993%29119%3a2%28201%29>. Acesso em: 26 maio 2020.

MENTER, F. R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications. **AIAA Journal**, Reston, v. 32, n. 8, p. 1598–1605, Aug 1994. Disponível em: <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/3.12149?journalCode=aiaaj>. Acesso em: 14 maio 2020.

MENTER, F. R.; FERREIRA, J. C.; ESCH, T.; KONNO, B. The SST Turbulence Model with Improved Wall Treatment for Heat Transfer Predictions in Gas Turbines. *In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL GAS TURBINE CONGRESS, 2003, Tóquio. Anais eletrônicos [...].* Tóquio, 2003. p. 1–7. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/The-SST-Turbulence-Model-with-Improved-Wall-for-in-Menter-Ferreira/06cc622fb262b39b3ef0eb2c266baf08a94a6f1d>. Acesso em: 12 maio 2020.

MORVAN, H.; PENDER, G.; WRIGHT, N. G.; ERVINE, D. A. Three-Dimensional Hydrodynamics of Meandering Compound Channels. **Journal of Hydraulic Engineering**, Nova Iorque, v. 128, n. 7, p. 674–682, July 2002. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-9429%282002%29128%3A7%28674%29>. Acesso em: 06 ago. 2019.

NETO, H. J.; ALENCAR, H. S.; BERNARDES, M. E. C.; SILVA, F. das G. B. da. Modelagem e simulação do comportamento de uma válvula de fluxo hidráulica com o uso de ferramenta de hidroinformática. **Revista Tecnológica**, Fortaleza, v. 29, n. 2, p. 224-232, dez. 2008. Disponível em: <https://periodicos.unifor.br/tec/article/view/39/4493>. Acesso em: 01 jun. 2020.

NETTO, A. **Manual de Hidráulica**. São Paulo: Edgard Blucher LTDA, 1998.

OHTSU, I.; YASUDA, Y.; GOTOH, H. Flow Conditions of Undular Hydraulic Jumps in Horizontal Rectangular Channels. **Journal of Hydraulic Engineering**, Nova Iorque, v. 129, n. 12, p. 948-955, Dec. 2003. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-9429%282003%29129%3A12%28948%29>. Acesso em: 25 maio 2020.

ORTIZ, M. J. V.; MARÍN, J. G. A.; PÉREZ, A. F. M.; GÓMEZ, J. D. B. Análisis Numérico Vía ANSYS de Intercambiadores de Calor con Mejora Pasiva: Casos de Estudio Densidad del Mallado y Modelo de Turbulencia. **Cintex**, Colômbia, v. 22, n. 1, p. 59–68, jun. 2017. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/An%C3%A1lisis-num%C3%A9rico-v%C3%ADa-Ansys-de-intercambiadores-de-Ortiz-Mar%C3%ADn/b87594db87789c6b58140a875951cb9215830eeb>. Acesso em: 14 maio 2020.

PINEDA, S. F.; BLANCO, A. J.; ROJAS-SOLÓRZANO, L. CFD Software Applications for Transcritical Free Surface Flow. *In: CONFERENCE: ASME 2009 FLUIDS ENGINEERING DIVISION SUMMER MEETING, 2009, Colorado. Anais eletrônicos [...].* Colorado: FEDSM, 2009. p. 1987–1994. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/267496806_CFD_Software_Applications_for_Transcritical_Free_Surface_Flow. Acesso em: 03 nov. 2019.

PORTO, R. de M. **Hidráulica Básica**. São Carlos: EESC-USP, 2006.

REYNOL, A. **Modelagem e Simulação de Microestruturas**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

ROUSHANGAR, K.; GHASEMPOUR, R.; VALIZADEH, R. Effect of channel boundary conditions in predicting hydraulic jump characteristics using an ANFIS-based approach. **Journal of Applied Fluid Mechanics**, Isfahã, v. 11, n. 3, p. 555–565, May 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/325450758_Effect_of_Channel_Boundary_Conditions_in_Predicting_Hydraulic_Jump_Characteristics_using_an_ANFIS-Based_Approach. Acesso em: 03 nov. 2019.

SAYMA, A. **Computational fluid dynamics**. Londres: Bookboon, 2009.

SANTOS, I. F. S. **Análise técnica e econômica de parques hidrocinéticos com base em previsões numéricas (CFD) e dados experimentais**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2019.

SHASHIKUMAR, C. M., VIJAYKUMAR, H., VASUDEVA, M. Numerical investigation of conventional and tapered Savonius hydrokinetic turbines for low-velocity hydropower application in an irrigation channel. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, [S.l.], v. 43, p. 1-21, Nov. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213138820312984>. Acessado em: 21 mar. 2021.

SIMÕES, A. L. A.; PORTO, R. de M.; SCHULZ, H. M. Superfície Livre de Escoamentos Turbulentos em Canais: Vertedores em Degraus e Ressalto Hidráulico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 17, n. 4, p. 125-139, out./dez. 2012. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Harry_Schulz/publication/259399074_Superficie_Livre_de_E escoamentos_Turbulentos_em_Canais_Vertedores_em_Degraus_e_Ressalto_Hidraulico/links/54d575cc0cf246475807a149.pdf. Acessado em: 25 maio 2020.

SILVA, C. V. da. **Introdução ao Ansys CFX**. Rio Grande do Sul: UFRGS, 2019.

SOTOMAYOR, H. B.; **Estudo Comparativo Entre Válvulas Hidráulicas**. 2016. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

SOUTO, J. N.; **Análise e Estudo de Escoamento em Condutos Livres com um Tratamento Computacional Através de Software de Simulação**. 2008. Monografia (Graduação em Engenharia da Computação) - Centro Universitário de Brasília, Brasília, 2008.

STAMOU, A. I.; CHAPSAS, D. G.; CHRISTODOULOU, G. C. 3-D numerical modeling of supercritical flow in gradual expansions. **Journal of Hydraulic Research**, [S. l.], v. 46, n. 3, p. 402–409, Dec. 2008. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.3826/jhr.2008.3162>. Acesso em: 03 nov. 2019.

TÃNASE, N. O.; BROBOANÃ, D.; BĂLAN, C. Free Surface Flow Over the Broad -

Crested Weir. *In*: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ADVANCED TOPICS IN ELECTRICAL ENGINEERING, 9., 2015, Bucareste. **Anais eletrônicos** [...]. Bucareste, 2015. p. 548–551. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7133881>. Acesso em: 03 nov. 2019.

TU, J.; YEOH, G. H.; LIU, C. **Computational Fluid Dynamics a Practical Approach**. Burlington: Elsevier, 2008.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics**. Inglaterra: PEARSON, 2007.

UFRJ. VestiProvas. 2002. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

WILKENING, H.; BARALDI, D.; HEITSCH, M. CFD simulations of light gas release and mixing in the Battelle Model-Containment with CFX. **Nuclear Engineering and Design**, [S.l.], v. 238, n. 3, p. 618–626, Feb. 2007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002954930700338X>. Acesso em: 12 maio 2020.

WIELEWICKI, R. P. **Análise da Influência da Sinuosidade Sobre o escoamento em Rios com Planície de Inundação Utilizando Simulação Numérica Tridimensional**. 2014. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.