



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ALEXSON CAETANO DA SILVA

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE ESCOAMENTO SOB COMPORTAS USANDO TÉCNICAS
DE DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL**

Recife

2017

ALEXSON CAETANO DA SILVA

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE ESCOAMENTO SOB COMPORTAS USANDO TÉCNICAS
DE DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL**

Dissertação apresentada ao curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de Pernambuco para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil

Área de concentração: Recursos Hídricos

Orientador: Prof. Dr. José Roberto Gonçalves de Azevedo.

Recife

2017

Catálogo na fonte

Bibliotecária Maria Luiza de Moura Ferreira, CRB-4 / 1469

S586s

Silva, Alexson Caetano da.

Simulação numérica de escoamento sob comportas usando técnicas de dinâmica dos fluidos computacional / Alexson Caetano da Silva. - 2017.

118 folhas, il., tab., simb. e sigl.

Orientador: Prof. Dr. José Roberto Gonçalves de Azevedo.

Dissertação(Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2017.

Inclui Referências e Apêndice.

1. Engenharia Civil. 2. CFD. 3. Comportas hidráulicas. 4. Ansys CFX.

I. Azevedo, José Roberto Gonçalves de (Orientador). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2017-364



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

A comissão examinadora da Defesa de Dissertação de Mestrado

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE ESCOAMENTO SOB COMPORTAS USANDO TÉCNICAS
DE DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL**

defendida por

Alexson Caetano da Silva

Considera o candidato APROVADO

Recife, 20 de setembro de 2017

Banca Examinadora:

Prof. Dr. José Roberto Gonçalves de Azevedo – UFPE
(orientador)

Prof. Dr. Marcus Costa de Araújo – UFPE
(examinador externo)

Prof. Dr. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral – UFPE
(examinador interno)

*A Deus, à minha mãe, minha avó,
minha noiva e amigos.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por tudo, sem Ele não poderia ter chegado até aqui e conseguido vencer mais esta etapa de minha vida.

A minha mãe pelo apoio e que através do suor do seu trabalho me fez o homem que sou hoje. Pela minha avó Joana, que tem me educado e ajudado em oração. A minha tia Claudia que tanto me apoiou no início dessa jornada da UFPE. Meus dois irmãos Alisson e Laís, a quem procuro ouvir e compartilhar minhas alegrias.

A minha noiva Ruany que muitas vezes sofreu com a minha ausência por conta dos compromissos acadêmicos, mas com seu amor me alimentou e me deu forças pra vencer todas as etapas.

A meus amigos por me apoiarem sempre, principalmente aos da Geosistemas que sempre estiveram ao meu lado, em especial a Michelle Kiemle, pois seu apoio foi de grande relevância para a obtenção deste título.

A Geosistemas na pessoa de sua diretoria em especial a Ângela Paula, que acreditou em mim desde quando cheguei como seu estagiário.

A todos os professores do programa de pós-graduação em engenharia civil da UFPE em especial aos da área de recursos hídricos. Ao professor Jaime Cabral que desde minha iniciação científica vem me apoiando e tem sido um espelho para mim dentro da academia. Ao professor Paulo Lyra pelo apoio nas dúvidas com o modelo em CFD.

A minha coorientadora professora Luciete pela profundidade que garantiu a meu trabalho e pela paciência comigo, por sempre ter sido solícita em tudo e por todas as dúvidas sanadas quanto ao modelo em CFD. Sou grato a Deus por Ele ter me apresentado com uma coorientadora com tanto conhecimento na área.

Ao meu Orientador professor Roberto Azevedo, por toda dedicação e paciência. Fui aluno na graduação e orientado no meu tcc e me surpreendo a cada dia com sua dedicação aos seus alunos e o prazer em lecionar e destravar um ambiente tão burocrático como a UFPE. Vou guardar seus ensinamentos pra o resto da vida.

Agradeço também a banca pela sua colaboração e dedicação para melhoria deste trabalho.

“É necessário que Ele cresça e que eu diminua”

(Jo 3.30)

RESUMO

Estudos do escoamento sob comportas foi realizado experimentalmente por muitos pesquisadores, porém a utilização de ferramentas de fluidodinâmica computacional (CFD) para sua resolução ainda é muito escasso. Neste trabalho realizou-se um estudo de um escoamento sob uma comporta hidráulica, utilizando-se um programa de CFD. Para a modelagem numérica foram geradas cinco malhas tridimensionais e através de um teste de convergência de malhas escolheu-se a que melhor se adapta ao escoamento. As simulações foram realizadas no estado transiente, pois este se mostrou mais apto para representatividade do escoamento. As características do escoamento sob a comporta foram analisadas e comparadas com os resultados experimentais, obtidos por outros autores, desta forma verificou-se que o modelo computacional simulado pode caracterizar o escoamento estudado. Assim, realizou-se uma análise dos perfis das componentes de velocidade água, dos diagramas de velocidade hidráulica, da distribuição de pressão e da distribuição da concentração de água ao longo do tempo. Constatou-se a presença de uma zona de recirculação turbulenta próxima a comporta, que serve como separadora do escoamento. Esta zona presente peculiarmente em escoamentos de canais com seção completamente cheias, represados por comportas hidráulicas. A simulação em CFD mostrou ser bastante promissora e indicada para escoamento em canais com comportas hidráulicas. Ela é de grande importância, pois seus modelos tridimensionais, bifásicos e de superfície livre, obtém resultados muito próximos da realidade, ajudando na escolha de geometrias e reduzindo a necessidade de modelos físicos em tamanho reduzido.

Palavras-Chave: CFD. Comportas hidráulicas. Ansys CFX..

ABSTRACT

Studies of sluice gates were carried out experimentally by many researchers, but the use of computational fluid dynamics (CFD) tools for their resolution is still very scarce. In this work a study of a flow under a hydraulic gate was carried out, using a CFD program. For numerical modeling, five three-dimensional meshes were generated and a mesh convergence test was chosen which best fits the flow. The simulations were performed in the transient state, as this was shown to be more apt for the representativeness of the flow. The characteristics of the runoff under the sluice gates were analyzed and compared with the experimental results, obtained by other authors, in this way it was verified that the simulated computational model can characterize the study flow. Thus, an analysis was made of the profiles of the water velocity components, the hydraulic speed diagrams, the pressure distribution and the water concentration distribution over time. It was verified the presence of a turbulent recirculation zone near the gate, which serves as a separator of the flow. This zone is peculiarly present in channel flows with completely filled sections, dammed by hydraulic gates. The CFD simulation showed to be very promising and indicated for flow in channels with hydraulic floodgates. It is of great importance, because its three-dimensional, biphasic and free surface models obtain results very close to reality, helping in the choice of geometries and eliminating the making of a large number of reduced models.

Keywords: CFD. Hydraulic gates. Ansys CFX.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 Volume de controle	25
Figura 2.2 – Oscilação da variável u ao longo do tempo.....	31
Figura 2.3 – Volume de controle com uma fonte Q	43
Figura 2.4 – Detalhe da malha abaixo da comporta submersa.	50
Figura 2.5 – Análise do efeito da utilização de oito malhas distintas em um modelo de CFD.	51
Figura 2.6 – Perfis de superfície livre computacional e experimental na região abaixo da comporta, usando o modelo de turbulência $k-\epsilon$ padrão para as oito malhas. A linha tracejada representa os perfis de superfície livre experimental.	51
Figura 3.1 – Canal de acrílico presente no Laboratório de Recursos Hídricos do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental UFPE, campus Recife.	53
Figura 3.2 – Geometria modelada.....	53
Figura 3.3 – Disposição dos eixos de coordenadas ao longo do canal.	54
Figura 3.4 – Malhas não-estruturadas.	55
Figura 3.5 – Elementos com menores deformações.	56
Figura 3.6 – Elementos com maiores deformações.	56
Figura 3.7 – Elementos com maiores ortogonalidades.....	57
Figura 3.8 – Elementos com menores ortogonalidades.	57
Figura 3.9 – Domínio computacional com as características físicas do escoamento.....	59
Figura 3.10– a) RMS do Regime Estacionário; b) RMS do Regime Transiente.....	61
Figura 3.11 – Distribuição dos seis pontos analisados ao longo do canal.	62
Figura 3.12 – Variação do módulo da velocidade da água ao longo do tempo para diferentes números de Courant – Ponto 1.	63
Figura 3.13 – Variação do módulo da velocidade da água ao longo do tempo para diferentes números de Courant – Ponto 2.	63
Figura 3.14 – Variação do módulo da velocidade da água ao longo do tempo para diferentes números de Courant – Ponto 3.	64
Figura 3.15 – Variação do módulo da velocidade da água ao longo do tempo para diferentes números de Courant – Ponto 4.	64
Figura 3.16 – Variação do módulo da velocidade da água ao longo do tempo para diferentes números de Courant – Ponto 5.	65
Figura 3.17 – Variação do módulo da velocidade da água ao longo do tempo para diferentes números de Courant – Ponto 6.	65

Figura 3.18 – Variação do módulo da velocidade da água ao longo do tempo para diferentes números de Courant – Ponto 6.....	66
Figura 3.19 - Variação do módulo da velocidade da água ao longo do tempo para diferentes números de iterações de cada passo de tempo – Ponto 1.....	67
Figura 3.20 - Variação do módulo da velocidade da água ao longo do tempo para diferentes números de iterações de cada passo de tempo – Ponto 2.....	68
Figura 3.21- Variação do módulo da velocidade da água ao longo do tempo para diferentes números de iterações de cada passo de tempo – Ponto 3.....	68
Figura 3.22 - Variação do módulo da velocidade da água ao longo do tempo para diferentes números de iterações de cada passo de tempo – Ponto 4.....	68
Figura 3.23 - Variação do módulo da velocidade da água ao longo do tempo para diferentes números de iterações de cada passo de tempo – Ponto 5.....	69
Figura 3.24 - Variação do módulo da velocidade da água ao longo do tempo para diferentes números de iterações de cada passo de tempo – Ponto 6.....	69
Figura 3.25 - Variação do módulo da velocidade da água ao longo do tempo para diferentes números de iterações de cada passo de tempo – Ponto 5.....	70
Figura 3.26 - Variação do módulo da velocidade da água ao longo do tempo para todas as malhas modeladas – Ponto 1.....	71
Figura 3.27 - Variação do módulo da velocidade da água ao longo do tempo para todas as malhas modeladas – Ponto 2.....	71
Figura 3.28 - Variação do módulo da velocidade da água ao longo do tempo para todas as malhas modeladas – Ponto 3.....	72
Figura 3.29 - Variação do módulo da velocidade da água ao longo do tempo para todas as malhas modeladas – Ponto 4.....	72
Figura 3.30 - Variação do módulo da velocidade da água ao longo do tempo para todas as malhas modeladas – Ponto 5.....	72
Figura 3.31 - Variação do módulo da velocidade da água ao longo do tempo para todas as malhas modeladas – Ponto 6.....	73
Figura 3.32 – Perfil de superfície livre computacional e experimental na região abaixo da comporta, usando o modelo de turbulência $k-\epsilon$ padrão para a malha 1. A linha tracejada representa os perfis de superfície livre experimental.	74
Figura 3.33 – Perfil de superfície livre computacional na região abaixo da comporta.....	74
Figura 4.1 – Perfis da componente da velocidade da água longitudinal ao canal para $W = 15$ cm.....	76
Figura 4.2 – Perfis da componente da velocidade da água longitudinal ao canal, obtidos experimentalmente.	77

Figura 4.3 – Perfil da componente da velocidade perpendicular a base do canal, para $x = 2$ cm.....	77
Figura 4.4 – Perfil da componente da velocidade perpendicular a base do canal.	78
Figura 4.5 – Linhas de fluxo do módulo da velocidade da água.....	78
Figura 4.6 – Linhas de fluxo do módulo da velocidade da água. Tempo = 1,00 s.	79
Figura 4.7 – Linhas de fluxo do módulo da velocidade da água. Tempo = 2,00 s.	80
Figura 4.8 – Linhas de fluxo do módulo da velocidade da água. Tempo = 3,00 s.	81
Figura 4.9 – Linhas de fluxo do módulo da velocidade da água. Tempo = 4,00 s.	82
Figura 4.10 – Linhas de fluxo do módulo da velocidade da água. Tempo = 5,00 s.	83
Figura 4.11 – Linhas de fluxo do módulo da velocidade da água. Tempo = 6,00 s.	84
Figura 4.12 – Linhas de fluxo do módulo da velocidade da água. Tempo = 7,00 s.	85
Figura 4.13 – Linhas de fluxo do módulo da velocidade da água. Tempo = 8,00 s.	86
Figura 4.14 – Diagrama dos vetores velocidade da água no instante 3,00 s.....	87
Figura 4.15 – Fração do volume da água no instante 3,80 s.....	88
Figura 4.16 – Fração do volume da água no instante 4,00 s.....	89
Figura 4.17 – Fração do volume da água no instante 4,50 s.....	90
Figura 4.18 – Fração do volume da água no instante 5,00 s.....	91
Figura 4.19 – Diagrama de pressão no instante 7,00 s.....	92
Figura 4.20 – Diagrama de velocidade da água.....	93
Figura 4.21 – Diagrama de vetor velocidade da água no instante igual a 7,00 s.....	94
Figura 4.22 – Fração de volume água no instante igual a 7,00 s.	95
Figura A.1 – Módulos da modelagem do <i>Ansys CFX</i>	106
Figura A.2 – Interface do módulo de geometria do <i>Ansys CFX 15.0</i>	107
Figura A.3 – Interface do módulo de geração de malha do <i>Ansys CFX 15.0</i>	108
Figura A.4 – Detalhe da utilização da ferramenta <i>inflation</i> próximo às comportas, a fim de obter uma maior discretização em regiões específicas – <i>Ansys CFX 15.0</i>	109
Figura A.5 - Vetor usado para calcular o <i>Orthogonal Quality</i> para uma célula.	110
Figura A.6 - Interface do CFX-PRE – <i>Ansys 15.0</i>	112
Figura A.7 – Tipo de análise quanto a transiência ou estacionaridade – <i>Ansys 15.0</i>	112
Figura A.8 – Características iniciais e configurações do domínio – <i>Ansys 15.0</i>	113
Figura A.9 – Solver Control – <i>Ansys 15.0</i>	114
Figura A.10 – Plataforma Solver – Define Run – <i>Ansys 15.0</i>	115
Figura A.11 – Partitioner, Solver, Valores iniciais e Interpolador alocações de memória – <i>Ansys 15.0</i>	116
Figura A.12 - Solver Manager – <i>Ansys CFX 15.0</i>	116
Figura A.13 – Interface de Pós-processamento – <i>Ansys CFX 15.0</i>	117

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Números de nós e elementos referentes a cada malha.....	55
Tabela 3.2 – Valores mínimos, médios e máximos das deformações para todas as malhas geradas.....	57
Tabela 3.3 – Valores mínimos, médios e máximos da ortogonalidade para todas as malhas geradas.....	58
Tabela 3.4 – Convergência do número de Courant.....	62
Tabela 3.5 – Valores da velocidade da água nos seis pontos e para os números de Courant estudados. Erro relativo as velocidade da água, para os maiores números de Courant. Instante igual a 8,00 s.....	67
Tabela 3.6 – Valores da velocidade da água nos seis pontos e para os números de iterações para cada passo de tempo. Erro relativo as velocidade da água, para os maiores números de iterações iguais a 10 e 20. Instante igual a 6,00 s.....	70
Tabela 3.7 – Valores da velocidade da água nos seis pontos para as cinco malhas simuladas. Erro relativo as velocidades da água, das malhas 4 e 5. Instante igual a 6,00 s.....	73

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

Símbolos

A	Área
$A_{\alpha\beta}$	Área interfacial entre as duas fases
\vec{a}	Aceleração
B	Propriedade arbitrária qualquer
d	Densidade
e	energia cinética ou potencial
F	Força
$f_{\alpha\beta}$	Força superficial contínua
$F_{\alpha\beta}$	Força de tensão superficial
g	Aceleração da gravidade
k	Energia cinética turbulenta
$k_{\alpha\beta}$	Curvatura da superfície
L	Comprimento (Diâmetro) característico
m	Massa
\vec{n}	Vetor unitário normal à superfície
$n_{\alpha\beta}$	Vetor normal a interface do fluido primário para o secundário
p	Pressão
P	Campo de pressão
Q	Vazão volumétrica
Re	Número de Reynolds
r_{α} e r_{β}	Fração de volume da fase α e β
SC	Superfície de controle
t	Tempo
u, v, w	Componentes da velocidade em cada eixo cartesiano respectivamente
VC	Volume de Controle
V_0	Velocidade básica da água

\vec{V}	Campo de velocidade vetorial
\mathcal{V}	Volume
x, y, z	Componentes cartesianas
Δt	Passo de tempo
Δ	Varição de uma grandeza qualquer
α, β	Fases dos fluidos nos modelos multifásicos
$\delta_{\alpha\beta}$	Delta de interface
ε	Taxa de dissipação de energia cinética por unidade de massa
μ	Viscosidade dinâmica do fluido
ν	Viscosidade cinemática do fluido
ρ	Massa específica
σ_{ij}	Tensor de tensões de superfície
$\sigma_{\alpha\beta}$	Tensão superficial entre as fases α e β
$\sigma_k, \sigma_\varepsilon, \sigma_\theta, C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}$	Constantes do modelo κ - ε
∇	Gradiente
∇_s	Operador gradiente na interface

Siglas

ASM	Algebraic Stress Model
BSL	Baseline
CFD	Computational Fluid Dynamic
DES	Detached Eddy Simulation
DNS	Direct Numerical Simulation
LES	Large Eddy Simulation
RAM	Random Access Memory
RANS	Reynolds Averaged Navier-Stokes
RMS	Root Mean Square
RNG	Reynolds Normalization Group
RSM	Reynolds Stress Model
SI	Sistemas Internacional de Unidades
SSG	Speziale Sarkar Gatski
SST	Shear Stress Transport

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Comportas Hidráulicas	18
1.2	Objetivo	20
1.2.1	<i>Objetivo Geral</i>	20
1.2.2	<i>Objetivos Específicos</i>	20
2	REVISÃO DA LITERATURA	21
2.1	Equações Representativas do Escoamento	21
2.1.1	<i>Definições dos fluidos</i>	21
2.1.2	<i>Leis de Conservação</i>	22
2.1.2.1	Conservação de massa	22
2.1.2.2	Conservação do Momento	22
2.1.2.3	Conservação de Energia	23
2.2	Equações de Navier-Stokes para Fluidos Incompressíveis e Isotérmicos	23
2.2.1	<i>Teorema de Transporte de Reynolds (TTR)</i>	24
2.2.2	<i>Conservação da Massa – Equação da Continuidade</i>	26
2.2.3	<i>Conservação do Momento Linear – Equação de Cauchy</i>	28
2.2.4	<i>A Equação de Navier-Stokes</i>	28
2.3	Turbulência	29
2.3.1	<i>Modelos de turbulência</i>	32
2.3.1.1	Modelo de comprimento de mistura	34
2.3.1.2	Modelo k- ϵ Padrão	34
2.3.1.3	Modelo κ - ϵ (RNG)	36
2.3.1.4	Modelo k- ω	36
2.3.1.5	Modelo Shear Stress Transport – SST	37
2.3.1.6	Modelo baseado nas tensões de Reynolds (SSG Reynolds Stress)	38
2.3.1.7	Modelo de simulação de grandes escalas “Large Eddy Simulation” (LES)	38
2.4	Fluidodinâmica Computacional	39
2.5	Solução Numérica do Escoamento	40
2.5.1	<i>Métodos das Diferenças Finitas</i>	41
2.5.2	<i>Método dos Elementos Finitos</i>	42

2.5.3	<i>Método dos Volumes Finitos</i>	43
2.5.4	<i>Métodos dos Elementos de Contorno</i>	45
2.6	Modelos Multifásicos	46
2.6.1	<i>Modelo de Superfície Livre</i>	46
2.6.1.1	Tensão Superficial	47
2.7	Número de Courant	48
2.8	Erros e Limitações	48
2.9	Estudo Numérico em Comportas Hidráulicas	49
3	METODOLOGIA	52
3.1	Definição da Geometria	52
3.2	Geração da Malha	54
3.2.1	<i>Qualidade da malha</i>	56
3.3	Definição Física	58
3.3.1	<i>Definição do Regime de Escoamento</i>	60
3.3.1.1	Características Temporais do Estado Transiente	61
3.3.1.2	Número de Iterações para cada passo de Tempo.....	67
3.4	Testes de Convergência das Malhas	71
3.5	Verificação do Modelo	74
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	76
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	96
5.1	Conclusões Gerais	96
5.2	Recomendações	97
	REFERÊNCIAS	98
	APÊNDICE A	106

1 INTRODUÇÃO

1.1 Comportas Hidráulicas

Comportas hidráulicas são estruturas amplamente usadas para controlar descarga e altura de fluxo em canais de irrigação, estações de tratamento de esgoto e em outras estruturas hidráulicas. Duas das principais importâncias práticas das comportas hidráulicas são o seu uso como estruturas de medição e controle, o estudo e análise do comportamento do fluxo abaixo das comportas são um dos problemas clássicos da hidráulica.

A descarga através de uma comporta hidráulica não é apenas efetuada pela altura de fluxo a montante para uma região a jusante livre, mas também pode ocorrer que tanto a montante como a jusante possuem alturas para submergir o fluxo, (Henderson, 1966; Lin et al., 2002). Similarmente, para uma dada descarga, a altura do fluxo a montante é independente da altura do fluxo caudal em um fluxo livre, mas aumenta quando a comporta está operando em condições submersas.

Muitas características do fluxo por comportas hidráulicas podem ser descritos acuradamente pela aplicação de modelos matemáticos baseados na teoria do fluxo potencial, mas há persistentes discrepâncias entre os valores teóricos e experimentais dos coeficientes de contração.

As principais causas dos valores do coeficiente de contração obtidos experimentalmente excederem os valores teóricos é a existência da camada limite, e a perda de energia entre as seções de montante e jusante da comporta.

Algumas pesquisas simplificam o problema assumindo que a superfície livre a montante da comporta pode ser representada por uma superfície horizontal e negligenciando os efeitos gravitacionais. Em adição disso, a viscosidade do fluido e as propriedades de turbulência são assumidas pela representação suficiente apreciável como um fluxo irrotacional invíscido.

Com o avanço dos modelos computacionais para a resolução de equações do fluxo de fluidos através da solução numérica das equações média de Reynolds para Navier-Stokes (*RANS*), com o uso de modelos de turbulência é uma alternativa para analisar a passagem do fluxo em uma comporta.

Logo, este trabalho realiza investigações de fluxo em comportas utilizando um programa de dinâmica dos fluidos computacional. O estudo realiza uma análise profunda das malhas e através do teste de convergência das malhas é escolhida a que melhor representa o escoamento com o menor custo computacional.

O estudo mostra que ferramentas numéricas usando fluidodinâmica computacional são suficientemente avançadas para calcular os coeficientes de contração, fluxo hidráulico e a distribuição de pressão para a passagem do fluxo livre em comportas hidráulicas.

1.2 Objetivo

1.2.1 *Objetivo Geral*

Essa dissertação tem por objetivo modelar o escoamento bifásico sob uma comporta de um canal utilizando fluidodinâmica computacional.

1.2.2 *Objetivos Específicos*

- Elaborar uma malha adequada para representação da geometria do canal e comporta para serem modelados com o CFD;
- Simular o comportamento do escoamento no canal projetado com refinamento das informações no entorno da comporta;
- Analisar o impacto que a mudança do regime permanente para o regime transiente gera no modelo;
- Comparar os resultados obtidos com o CFD aos de métodos clássicos de análise de escoamento;

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo serão abordados os conceitos iniciais sobre os fluidos em escoamentos. As equações representativas do escoamento também serão detalhadas. Para o escoamento, o estudo será direcionado para os fluidos Newtonianos incompressíveis isotérmicos em estado transiente.

2.1 Equações Representativas do Escoamento

2.1.1 Definições dos fluidos

Segundo Çengel e Cimbala (2007), acerca da mecânica dos fluidos, na natureza a matéria se apresenta em dois estados: o sólido e o fluido (líquido e gasoso a depender da pressão e temperatura). Sendo o sólido o único capaz de resistir a tensões de cisalhamento (ou tangencial) por deflexões estáticas. O fluido sujeito a uma tensão de cisalhamento, não importando o quão pequena ela seja, é deformado continuamente. Nos sólidos a tensão de cisalhamento é proporcional à deformação, enquanto que nos fluidos ela é proporcional à taxa de deformação. Segundo White (2011), os líquidos são compostos por moléculas relativamente agrupadas com forças coesivas fortes, que tendem a manter o volume e quando não confinados na parte superior, formam uma superfície livre e são dominadas pelo campo gravitacional. Já os gases possuem suas moléculas amplamente espaçadas e com forças coesivas desprezíveis, isto torna o gás um estado livre para a expansão, sendo limitado pela parede que o confina.

A matéria é constituída de átomos, e em alguns estados, esses possuem espaçamentos, como nos gases. Sendo assim é conveniente considerar uma parte da matéria como contínua, homogênea e sem vazios, isto é denominado de meio contínuo. Esta hipótese é válida contanto que o tamanho da escala de interesse seja suficientemente superior ao espaço entre moléculas. Este conceito está implícito na maioria das aplicações práticas em engenharia, isso pode ser visto ao considerar a densidade do concreto uniforme em qualquer ponto.

Dentre as propriedades de um fluido se destaca as variáveis termodinâmicas (pressão, temperatura e massa específica) e as variáveis secundárias que caracterizam os comportamentos mecânicos dos fluidos.

2.1.2 Leis de Conservação

As leis de conservação são aplicadas primeiro a uma quantidade fixa de matéria chamada sistema fechado ou apenas sistema e, em seguida, são estendidas a regiões no espaço chamadas volumes de controle. As relações de conservação também são chamadas de equações de balanço, uma vez que qualquer quantidade conservada deve ser balanceada durante um processo.

2.1.2.1 Conservação de massa

A massa do sistema permanece constante durante um processo. Para um volume de controle (VC), o balanço de massa é expresso na forma de vazão como a Equação 01.

Conservação de massa:
$$\dot{m}_e - \dot{m}_s = \frac{dm_{VC}}{dt} \quad (1)$$

Onde \dot{m}_e e \dot{m}_s são as vazões totais do escoamento de massa para dentro e para fora do volume de controle, respectivamente, e $\frac{dm_{VC}}{dt}$ é a taxa de variação da massa dentro das fronteiras do volume de controle.

2.1.2.2 Conservação do Momento

O momento linear é o produto da massa e da velocidade de um corpo, e o momento de um corpo rígido de massa m que se move à velocidade \vec{V} é $m\vec{V}$. A segunda Lei de Newton afirma que a taxa de variação do momento de um corpo no tempo é igual à força resultante que age sobre o corpo. Portanto, o momento de um sistema permanece constante quando a força resultante que age sobre ele é zero e, então, o

memento de tal sistema é conservado. Isso é conhecido como princípio de conservação do momento linear.

2.1.2.3 Conservação de Energia

A energia pode ser transferida de ou para um sistema fechado por calor ou trabalho, e o princípio de conservação da energia exige que a transferência de energia de ou para um sistema durante um processo, seja igual à variação da energia contida no sistema. O princípio de conservação da energia, também chamado de balanço de energia, é expresso pela Equação 2.

$$\text{Conservação da energia:} \quad \dot{E}_e - \dot{E}_s = \frac{dE_{VC}}{dt} \quad (2)$$

Onde \dot{E}_e e \dot{E}_s são as taxas totais de transferência de energia para dentro e para fora do volume de controle, respectivamente, e $\frac{dE_{VC}}{dt}$ é a taxa de variação de energia dentro das fronteiras do volume de controle.

2.2 Equações de Navier-Stokes para Fluidos Incompressíveis e Isotérmicos

Os escoamentos incompressíveis são aqueles em que as variações na densidade são desprezíveis. Os líquidos são considerados incompressíveis, já no caso dos gases, segundo White (2011), escoando com velocidade até 30% da velocidade do som também podem ser considerados incompressíveis. Isso indica que para o ar ao nível do mar, escoando até 102 m/s, poderá ser considerado como incompressível. Como nosso estudo as velocidades dos fluidos, ar e água, são baixas logo todos os dois componentes do escoamento podem ser considerados como incompressíveis. A análise também se dará isotermicamente, não havendo variação de temperatura local ou sendo de pequena magnitude, isso elimina a necessidade de uma equação diferencial de energia, segundo Çengel e Cimabala (2007), além das propriedades

como viscosidade dinâmica μ e a viscosidade cinemática ν serem constantes também.

A seguir serão apresentadas as equações diferenciais de movimento do fluido em todos os pontos no campo de escoamento sobre o domínio de escoamento. Essa técnica se dá na análise de milhões de minúsculos volumes de controle ocupando todo o campo do escoamento. Esses volumes de controle tendem para infinito se aproximando de um ponto, logo as equações de conservação se simplificam tornando um grupo de equações diferenciais parciais que valem para todos os pontos do escoamento.

Para o problema de escoamento em comportas hidráulicas, no qual as variações na densidade e temperatura dos fluidos não são significativas, é necessária a resolução de duas equações diferenciais – conservação da massa e conservação do momento linear.

2.2.1 Teorema de Transporte de Reynolds (TTR)

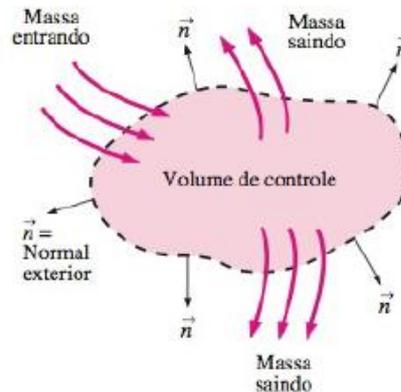
O Teorema de transporte de Reynolds (TTR) relaciona a taxa de variação no tempo de uma propriedade extensiva para um sistema e para um volume de controle. O TTR é o elo de união entre o sistema e o volume de controle.

Considerando uma propriedade B qualquer do fluido, tomando a derivada desta grandeza em relação a massa do sistema, esta será denominada grandeza intensiva correspondente e será definida pela quantidade de B por unidade de massa em uma porção diferencial do fluido, conforme a Equação (3). Para todo o volume de controle da Figura 2.1, pode ser obtida a integral da curva em todo o domínio conforme a Equação (4).

$$b = \frac{dB}{dm} \quad (3)$$

$$B_{VC} = \int_{VC} b \, dm = \int_{VC} b \, dV \quad (4)$$

Figura 2.1 Volume de controle



Fonte: Çengel e Cimbala (2007)

Em relação ao volume de controle (VC) e superfície de controle (SC) expostos na Figura 2.1 é possível descrever que há três formas de variação em B conforme explicitado na Equação (5). Ainda na mesma Figura é possível destacar que o sistema se moveu, acrescentando uma porção do escoamento na saída e perdendo uma porção do escoamento na entrada.

$$\begin{aligned}
 \text{Variação no interior do VC} & \quad \frac{d}{dt} \left(\int_{VC} b\rho \, dV \right) \\
 \text{Fluxo de saída de } \beta \text{ no VC} & \quad \int_{SC} b\rho V \cos\theta \, dA_{Sai} \\
 \text{Fluxo de entrada de } \beta \text{ no VC} & \quad \int_{SC} b\rho V \cos\theta \, dA_{Ent}
 \end{aligned} \tag{5}$$

Tomando o limite quando dt tende a zero, a variação temporal de B no sistema é dada pela soma de sua variação no interior do volume de controle, acrescido do fluxo que sai menos o fluxo que entra neste volume, conforme a Equação (6).

$$\frac{dB_{sis}}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\int_{VC} b\rho \, dV \right) + \int_{SC} b\rho V \cos\theta \, dA_{Sai} - \int_{SC} b\rho V \cos\theta \, dA_{Ent} \tag{6}$$

Esta expressão é denominada Teorema de transporte de Reynolds. Considerando a componente $V \cos\theta$ como a componente normal da velocidade (V_n), e também

expressando a Equação (5) em termos da variação de massa, sabendo que $d\dot{m} = \rho \dot{V}_n dA$ surge a Equação (7).

$$\text{Termo de fluxo} = \int_{SC} b\rho \dot{V}_n dA_{Sai} - \int_{SC} b\rho \dot{V}_n dA_{Ent} = \int_{SC} bdm_{Sai} - \int_{SC} bdm_{Ent} \quad (7)$$

Objetivando escrever de uma forma compacta, adota-se o vetor unitário \vec{n} saindo da superfície de controle, desta forma resultando nas Equações (8) e (9).

$$\text{Saída} \quad \vec{V} \cdot \vec{n} = V_n \quad (8)$$

$$\text{Entrada} \quad \vec{V} \cdot \vec{n} = -V_n \quad (9)$$

Logo, a Equação (7) pode ser reduzida para a Equação (10).

$$\text{Termo de fluxo} = \int_{SC} b\rho(\vec{V} \cdot \vec{n})dA \quad (10)$$

Assim, o Teorema de Transporte de Reynolds pode ser escrito de forma compacta, substituindo a Equação (10) na Equação (6), obtendo a Equação (11).

$$\frac{dB_{sis}}{dt} = \int_{VC} \frac{\partial}{\partial t}(\rho b)dV + \int_{SC} b\rho\vec{V} \cdot \vec{n}dA \quad (11)$$

A Equação 11 representa o teorema de transporte de Reynolds para um volume de controle fixo, também conhecido como a transformação de sistema para volume de controle para um volume de controle fixo.

2.2.2 Conservação da Massa – Equação da Continuidade

Esta conservação parte do pressuposto de que em um sistema fechado não há a variação de massa. Çengel e Cimbala (2007) destacam que segundo a equação de relação entre massa e energia ($E = m \cdot c^2$) para a maioria de interações de energia da natureza (excetuando as reações nucleares) a variação de massa é extremamente pequena, não conseguindo ser detectada por dispositivos de

medição. As vazões totais do escoamento de massa para dentro e para fora do volume de controle são \dot{m}_e e \dot{m}_s respectivamente. Esta vazão é a quantidade de massa que escoar através de uma seção transversal por unidade de tempo. Esta expressão é apontada por Çengel e Cimbala (2007) através da relação:

$$\left(\text{Massa Total entrando} \right) - \left(\text{Massa Total saindo} \right) = \left(\text{Variação Total de Massa} \right)$$

$$\left(\text{no VC durante } \Delta t \right) - \left(\text{no VC durante } \Delta t \right) = \left(\text{dentro do VC durante } \Delta t \right)$$

O teorema de transporte de Reynolds relaciona as taxas de variação do sistema com as integrais de volume e superfície de controle. Eliminando as derivadas temporais do sistema, resultam formas de volume de controle ou formas integrais para as leis da mecânica dos fluidos. Logo, a variável genérica B pode ser considerada como a massa, a quantidade de movimento linear e a energia conforme as Equações (12) a (14).

$$B = m \quad (12)$$

$$b = \frac{dB}{dm} = \frac{dm}{dm} = 1 \quad (13)$$

$$\frac{dm_{sis}}{dt} = 0 = \int_{VC} \frac{\partial}{\partial t} \rho dV + \int_{SC} \rho \vec{V} \cdot \vec{n} dA \quad (14)$$

Aplicando o teorema do divergente na Equação (14) chega-se a equação (15).

$$\int_{VC} \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V}) \right] dV = 0 \quad (15)$$

Logo, a Equação (15) vale para qualquer volume de controle, sendo possível se o integrando for igual à zero. Assim, chega-se a Equação (16), que é conhecida como Equação da continuidade.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (16)$$

2.2.3 Conservação do Momento Linear – Equação de Cauchy

Aplicando o teorema de transporte de Reynolds em um volume de controle, tem-se a Equação (17), que é a expressão geral para a conservação do momento linear.

$$\sum F = \int_{VC} \rho \vec{g} dV + \int_{SC} \sigma_{ij} \cdot \vec{n} dA = \int_{VC} (\rho \vec{V}) dV + \int_{SC} (\rho \vec{V}) \vec{V} \cdot \vec{n} dA \quad (17)$$

Aplicando o Teorema do Divergente no segundo termo do lado esquerdo (termo que possui o tensor da tensão) e no último termo da Equação (17), obtém-se a Equação (18).

$$\int_{VC} \left[\frac{\partial(\rho \vec{V})}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) - \rho \vec{g} - \vec{\nabla} \cdot \sigma_{ij} \right] dV = 0 \quad (18)$$

Logo, fazendo o integrando igual a zero, temos a equação diferencial geral para conservação do momento, ou equação de Cauchy, Equação (19).

$$\frac{\partial(\rho \vec{V})}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = \rho \vec{g} + \vec{\nabla} \cdot \sigma_{ij} \quad (19)$$

Que também pode ser escrita na forma da Equação (20)

$$\rho \left[\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \vec{\nabla}) \vec{V} \right] = \rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = \rho \vec{g} + \vec{\nabla} \cdot \sigma_{ij} \quad (20)$$

2.2.4 A Equação de Navier-Stokes

Considerando os fluidos como Newtoniano, que segundo Çengel e Cimabala (2007), são fluidos em que a taxa de deformação é proporcional à tensão de cisalhamento, incompressíveis, isotérmicos e a viscosidade constante, dessa forma o tensor de tensão pode ser escrito através da Equação (21), em coordenadas cartesianas.

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} -P & 0 & 0 \\ 0 & -P & 0 \\ 0 & 0 & -P \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} & \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ \mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) & 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} & \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \\ \mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) & \mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) & 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \end{pmatrix} \quad (21)$$

Inserindo a Equação (21) na Equação (20) e fazendo os rearranjos adequados obtém-se a Equação (22), que é a equação vetorial de Navier-Stokes para escoamento incompressível com viscosidade constante.

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\vec{\nabla}P + \rho\vec{g} + \mu\nabla^2\vec{V} \quad (22)$$

A Equação (22) é a pedra fundamental da mecânica dos fluidos, trata-se de uma equação diferencial parcial não permanente, não-linear e de segunda ordem (Çengel e Cimabala, 2007). A Equação (22) possui quatro incógnitas (três componentes da velocidade e a pressão), embora represente apenas três equações (três componentes, porque ela é uma equação vetorial). Obviamente precisa-se de uma quarta equação para tornar o problema solucionável. A quarta equação é a equação da continuidade (Equação 16), esta alia-se a equação de Navier-Stokes para dá o fechamento matemático das incógnitas.

2.3 Turbulência

Segundo Hirsch (1988) o sistema de equações de Navier-Stokes complementado por leis empíricas para a viscosidade e a condutividade térmica e pela lei constitutiva, descrevem completamente todos os fenômenos de um fluxo. Grande parte dos fluxos que ocorrem na natureza e nas situações criadas pelo homem, constitui em uma forma particular de instabilidade chamada de turbulência.

Turbulência, segundo Taylor e Kármán (1937), tem que satisfazer uma condição de irregularidade, sendo gerada por forças viscosas ao longo de um escoamento sobre superfícies sólidas ou por várias camadas de fluidos escoando com diferentes velocidades sobre outras camadas. Outra definição foi dada por Hinze (1959) onde o movimento turbulento de um fluido é a condição irregular do escoamento, na qual as variáveis envolvidas podem ser diferenciadas estatisticamente de seus valores

médios. Versteeg e Malalasekera (2007), afirmam que o fluxo turbulento ocorre quando o valor do número de Reynolds (Equação 23), que é a medida relativa a relação das forças inerciais e das forças viscosas, é maior que o número de Reynolds crítico.

$$Re = \frac{\text{Forças inerciais}}{\text{Forças viscosas}} = \frac{VD}{\nu} \quad (23)$$

Onde V é a velocidade média do escoamento, D é o comprimento característico da geometria e ν é a viscosidade cinemática do fluido.

O fluxo turbulento conduz para uma variação radical das características dos fluidos, levando a um comportamento do fluxo e de suas propriedades aleatório e caótico. O movimento se torna intrinsecamente instável com condições de contorno constantes. Como expressado por Taylor e Kármán (1937), existem duas causas diferentes para a geração de turbulência, que é o atrito nas paredes ou o escoamento de camadas de fluidos. Dessa forma pode-se dividir o escoamento turbulento em duas categorias, a turbulência de parede e a turbulência livre. A turbulência de parede é a turbulência afetada continuamente por paredes sólidas fixas e geradas por estas. Já a turbulência livre é definida como a gerada na ausência de paredes, formada pelo movimento entre as camadas de fluidos.

Outra característica do escoamento é a dissipação de energia, no caso real de fluidos viscosos, se não existe uma fonte externa contínua de energia para a geração contínua do movimento turbulento, segundo Silveira Neto (2002), o movimento irá decair.

O escoamento viscoso segundo Çengel e Cimabala (2007) é classificado em escoamento laminar ou turbulento. O movimento altamente ordenado dos fluidos caracterizado por camadas suaves do fluido. O movimento altamente desordenado dos fluidos que ocorre em velocidades altas e é caracterizado por flutuações de velocidade é chamado de turbulento. A principal diferença entre os dois escoamentos é o fato de que no laminar há a transferência de quantidade de movimento a nível molecular e no segundo a nível macroscópico. Se o escoamento é laminar, pequenos distúrbios do escoamento serão amortecidos e desaparecerão. Na transição surgirão alguns picos de turbulência. Já durante o regime turbulento, o escoamento flutuará continuamente.

O regime turbulento é sempre tri dimensional e transiente. Assim, a solução numérica destas equações traz complicações, pois características importantes destes escoamentos estão contidos nas recirculações que possuem alguns milímetros para escoamentos com domínios de metros. Assim, seria necessário passos de tempo muito pequenos e malhas muito finas, para captar os pequenos turbilhões e suas pequenas variações temporais. Surge então a necessidade de se utilizar modelos de turbulência, segundo Nieckle (2016).

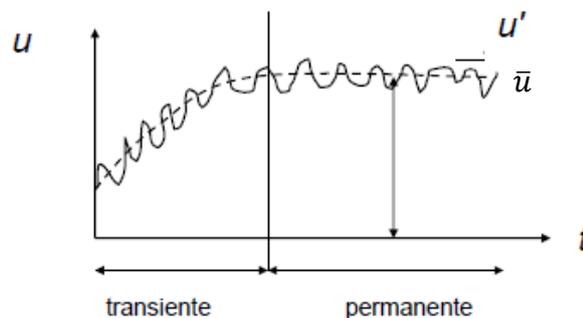
Nieckle (2016) afirma que existem duas alternativas para se analisar a turbulência: uma teoria estatística para correlacionar as funções da turbulência e uma análise semi-empírica das quantidades médias turbulentas.

Segundo Nieckle (2016), a análise estatística está fundamentada no fato de que o escoamento turbulento pode ser expresso por um valor médio (de grande escala) mais uma flutuação (de pequena escala), conforme Equação (24), essa flutuação é geralmente na ordem de 1% a 10% do valor médio.

$$u = \bar{u} + u' \quad (24)$$

Na Figura 2.2 tem-se a representação do comportamento geral de uma variável em função do tempo, em um escoamento. A variável envolvida, geralmente, tende ao decorrer do tempo a atingir um estado de permanência. Logo, quando o escoamento passa para o estado permanente, o valor instantâneo da variável oscila em torno de um valor médio, que permanece praticamente constante.

Figura 2.2 – Oscilação da variável u ao longo do tempo.



Fonte: Silveira Neto (2002)

Dessa forma há uma simplificação bastante acentuada do problema, pois o objetivo é a determinação do campo médio de velocidade, obtendo equações de conservação para essa grandeza.

Segundo Silveira Neto (2002), as grandezas envolvidas nos escoamentos podem ser separadas na soma de seus componentes e média flutuante, conforme as Equações (25) a (28).

$$u = \bar{u} + u \quad (25)$$

$$P = \bar{P} + p \quad (26)$$

$$\rho = \bar{\rho} + \rho \quad (27)$$

$$T = \bar{T} + t \quad (28)$$

Segundo Silveira Neto (2002) as equações da quantidade médias do escoamento podem ser obtidas diretamente pelas equações de Navier-Stokes pela aplicação do operador Média Temporal.

2.3.1 Modelos de turbulência

As Equações de Navier-Stokes que regem o movimento dos fluidos são de alta complexidade. São expressões que, mesmo simplificadas, como no presente trabalho que considera o fluido trabalhando isotermicamente e incompressivelmente, ainda assim é um sistema de equações com quatro incógnitas não lineares o que fornece em certos termos uma instabilidade espontânea do fluxo, ou comportamento caótico do movimento do fluido. Alguns fluxos laminares mais simples podem ser acuradamente copiados computacionalmente, sendo totalmente simulados pois não possuem instabilidades. Porém, fluxos que possuem flutuações estatísticas nas suas propriedades precisariam de malhas muito refinadas a fim capturar os mais pequenos turbilhões que aparecem nesse tipo de fluxo.

Segundo Hirsch (2007), a descrição numérica das flutuações turbulentas necessita de uma alta demanda de recursos computacionais, pois precisaria de uma malha extremamente refinada para esta forma de representação que captura e simula diretamente todo o fluxo turbulento. Esse método de resolução de todas as escalas do fluxo turbulento é denominado de Simulação Numérica Direta (Direct Numerical Simulation - DNS).

Versteeg e Malalasekera (2007) afirmam que a forma de simulação do DNS que captura as variações de todos os tamanhos de turbilhões, atualmente está fora do alcance computacional, assim a maior aproximação, com boas perspectivas de alcançar o estágio industrial num futuro próximo é a aproximação que simula diretamente as flutuações turbulentas em grandes escalas e modela as flutuações de pequena escala, essa aproximação é conhecida como Large Eddy Simulation (LES).

Segundo Versteeg e Malalasekera (2007), o próximo nível de aproximação é o da Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS), que calcula a média do fluxo turbulento, representando a variação instantânea como uma composição média da variável. Assim, são obtidas equações de escoamento médio, estas equações contêm termos que dão origem a viscosidades turbulenta. O RANS varia desde simples modelos de viscosidades, até modelos de comprimentos de misturas.

As flutuações, fruto dos escoamentos turbulentos, podem ser de pequena escala e grande frequência, sendo computacionalmente difíceis e custosas de serem simuladas diretamente. Logo, ao invés da resolução das equações para valores instantâneos, podem ser utilizados artifícios de simplificações numéricas, como o uso de médias temporais ou manipulações para remover as pequenas escalas, deixando as equações mais amenas para a obtenção das soluções. Porém, essas novas equações geradas trazem consigo novas variáveis que para que sejam resolvidas precisam de modelos de turbulência.

Entre os modelos de turbulência existentes podem-se destacar os seguintes (Ansys 2012):

1. Modelos de zero equação

- Modelo de comprimento de mistura

2. Modelo de duas equações

- κ - ϵ Padrão

- κ - ϵ (RNG)

- k- ω

- Shear Stress Transport - SST

3. Modelo baseado nas tensões de Reynolds (SSG Reynolds Stress)
4. Modelo de simulação de grandes escalas “Large Eddy Simulation” (LES)

2.3.1.1 Modelo de comprimento de mistura

Esse modelo não acrescenta nenhuma equação de transporte para a determinação de grandezas turbulentas. Ribeiro (2009) afirma que o modelo, através de aproximação de Boussinesq apenas deve ser utilizado para aproximações iniciais e nunca para a obtenção de soluções finais de um escoamento. Esse modelo é mais utilizado em cálculos de aerodinâmica externa na indústria aeroespacial e possuem desvantagens de ter uma completa incapacidade de descrever fluxos com separação e recirculação além de apenas calcular as propriedades médias dos fluxos e as tensões cisalhantes turbulentas (Versteeg e Malalasekera, 2007).

2.3.1.2 Modelo k - ϵ Padrão

O modelo k - ϵ padrão (Launder e Spalding, 1974) é um modelo semi-empírico que acrescenta duas equações de transporte e tem como base o mecanismo da energia cinética turbulenta (κ) e a taxa na qual as flutuações de velocidade se dissipam (ϵ). Segundo Versteeg e Malalasekera (2007), o modelo possui as vantagens de ser bem estável, possuir um excelente desempenho para muitos fluxos industriais relevantes e é um modelo de turbulência bastante simples de ser implementado, pois só precisa de uma condição inicial e/ ou condição de contorno. Outra característica é a sua indicação para casos que apresenta desvio significativo. No entanto, os autores pontuam algumas desvantagens para o modelo como a performance pobre em variados casos como em alguns fluxos não confinados, fluxos rotacionais, com grandes curvaturas nas linhas de correntes, além de escoamentos desenvolvidos em dutos não circulares.

Os autores Faure, Buil, & Gay (2004), Lira (2014), Sinha, et al (2014), trabalharam com modelo k - ϵ padrão e evidenciaram que o mesmo reúne boa convergência, baixo

custo computacional e respostas razoáveis, para representação global dos escoamentos em canais hidráulicos e estudos em compostas hidráulicas.

Na formulação do modelo κ - ε padrão, considera-se que o escoamento é totalmente turbulento, e que são desprezíveis os efeitos da viscosidade molecular. O modelo mostra-se limitado em escoamentos com baixas escalas de turbulência envolvendo geometrias complexas (Alencar, 2009).

Segundo Versteeg e Malalasekera (2007), a viscosidade turbulenta (μ_t) é relacionada com κ e ε conforme a Equação 29:

$$\mu_t = C_\mu \frac{\kappa^2}{\varepsilon} \quad (29)$$

Onde C_μ é uma constante.

Para os termos κ e ε podem ser escritas duas equações de transportes, respectivamente, as Equação 30 e 31.

$$\rho \frac{\partial k_t}{\partial t} + \rho \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{V}_j k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k_t}{\partial x_i} \right) + P_k + P_{kb} - \rho \varepsilon \quad (30)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{U}_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} (P_k + P_{\varepsilon b}) - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) \quad (31)$$

Onde P_k é o termo de geração de turbulência em razão das forças viscosas, P_{kb} é o empuxo da energia cinética e $P_{\varepsilon b}$ é o termo do empuxo da taxa de dissipação. Onde os parâmetros podem ser descritos pelas Equações 32 a 34.

$$P_k = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} \quad (32)$$

$$P_{kb} = -g_i \beta \frac{\mu_t}{\sigma_\theta} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} \quad (33)$$

$$P_{\varepsilon b} = g_i \frac{\mu_t}{\sigma_\theta} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} \quad (34)$$

As constantes foram atribuídas os seguintes valores por Launder e Spalding (1974).

$$\sigma_k = 1,0; \sigma_\varepsilon = 1,3; \sigma_\theta = 0,09; C_{\varepsilon 1} = 1,44; C_{\varepsilon 2} = 1,92$$

Essas constantes foram determinadas através de vários experimentos em escoamentos, tantos, em duto sob pressão como em escoamentos com superfície livre.

2.3.1.3 Modelo κ - ϵ (RNG)

Arantes (1968) afirma que o modelo κ - ϵ (RNG) de turbulência é proveniente das equações instantâneas de Navier- Stokes, através da utilização de uma técnica matemática intitulada por “normalização de grupo” (RNG). O processo de derivação analítica produz um modelo com constantes diferentes do modelo κ - ϵ padrão, além de termos adicionais nas equações de transporte para κ e ϵ . O modelo obtém uma descrição precisa da relação entre a variação do número de Reynolds efetivo com o transporte turbulento efetivo. Logo, possui um melhor controle tanto nos escoamentos com baixo valor para o numero de Reynolds, como para os escoamentos próximos às paredes. As equações de transporte para o modelo são similares ao do modelo κ - ϵ padrão, porém os valores das constantes diferem.

2.3.1.4 Modelo k- ω

O modelo foi formulado por Kolmogorov (1942) e introduziu o parâmetro ω que é a taxa de dissipação por unidade de volume e tempo, ou frequência turbulenta. O modelo é indicado para escoamentos confinados (Ribeiro, 2009). O modelo utiliza uma versão modificada da equação de transporte de k usada no modelo k- ϵ .

A taxa de dissipação específica ω pode ser definida conforme a Equação 35.

$$\omega = \frac{\epsilon}{k} \quad (35)$$

Segundo Angelo (2013) as equações de transporte para as grandezas k e ω podem ser vistas nas Equações (36) e (37).

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{U}_j k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k_t}{\partial x_i} \right) + P_k + P_{kb} - \beta' \rho k \omega \quad (36)$$

$$\rho \frac{\partial \omega}{\partial t} + \rho \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{U}_j \omega) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega_1}} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right) + \frac{\omega}{k} ((\alpha'_1 P_k + P_{b\omega}) - \beta'_1 \rho k \omega) \quad (37)$$

Onde β' , α'_1 , β'_1 , σ_k , σ_{ω_1} são constantes de valor: 0,09, 5/9, 0,075, 2 e 2.

E a viscosidade turbulenta é obtida pela Equação 38.

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \quad (38)$$

2.3.1.5 Modelo Shear Stress Transport – SST

O *Shear Stress Transport – SST* é um modelo robusto de duas equações, que possui sua formulação baseada na combinação dos modelos k- ω e k- ϵ , tal que é utilizado o modelo k- ω para as regiões internas a camada limite e o k- ϵ na região de fluxo, livre de cisalhamento. Menter (2003) propôs o método a fim de amenizar as deficiências e incorporar as qualidades de cada um dos modelos originais.

Segundo Abraumchuk (2013) o modelo deverá ser utilizado com a combinação do modelo de transição intitulado de γ - θ nos escoamentos com baixos números de Reynolds.

Segundo Angelo (2013), as equações de transporte, para k e ω podem ser escritas conforme as Equações 39 e 40.

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{U}_j k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k_t}{\partial x_i} \right) + P_k + P_{kb} - \beta' \rho k \omega \quad (39)$$

$$\rho \frac{\partial \omega}{\partial t} + \rho \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{U}_j \omega) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega_1}} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right) + 2\rho(1 - F_1) \frac{1}{\sigma_{\omega_2} \omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} + \frac{\omega}{k} ((\alpha'_3 P_k + P_{\omega b}) - \beta'_3 \rho k \omega) \quad (40)$$

Ainda segundo o autor, os coeficientes destas equações de transporte podem ser escritos conforme as Equações 41 a 46.

$$F_1 = \tanh \left\{ \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta r y \omega}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4\rho k}{CD_{k\omega} \sigma_\omega 2y^2} \right]^4 \right\} \quad (41)$$

$$F_2 = \tanh \left\{ \left[\max \left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta r y \omega}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right) \right]^2 \right\} \quad (42)$$

$$P_k = \min(2\mu_t \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}, 10 \beta \rho k \omega) \quad (43)$$

$$CD_{k\omega} = \max \left(2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega 2} \omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 1,0x10^{-10} \right) \quad (44)$$

$$\mu_t = \frac{\rho \alpha_1 k}{\max(\alpha'_1 \omega, F_2 \sqrt{2\bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}})} \quad (45)$$

$$P_{\omega b} = P_{\varepsilon b} = g_i \frac{\mu_t}{\sigma_\theta} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_i} \quad (46)$$

Onde y é a distancia entre a parede e os nós adjacentes e $\alpha'_{(i)}$, $\beta'_{(i)}$ e $\sigma_{\omega(i)}$ são constantes do modelo (Angelo, 2013).

2.3.1.6 Modelo baseado nas tensões de Reynolds (SSG Reynolds Stress)

Uma alternativa para o fechamento das equações RANS é a obtenção de equações diretas para o transporte das tensões de Reynolds, não utilizando a hipótese da viscosidade turbulenta, mas resolvendo uma equação para o transporte de tensões de Reynolds no fluido. Logo, surge um modelo de turbulência baseado nas tensões de Reynolds (SSG Reynolds Stress) onde cada equação de transporte é resolvida para as componentes de tensão individuais.

2.3.1.7 Modelo de simulação de grandes escalas “Large Eddy Simulation” (LES)

Os escoamentos turbulentos possuem diversas escalas de comprimento e de tempo. As escalas menores são responsáveis pela dissipação da energia cinética turbulenta. Já as recirculações maiores são corriqueiramente comparáveis ao comprimento característico do escoamento.

O modelo de turbulência de grandes escalas (Large Eddy Simulation – LES) é obtido através das Equações de Navier-Stokes. Por meio de uma operação de filtragem, modela as pequenas escalas de comprimento do fluxo e resolve diretamente as grandes escalas.

O modelo possui um requisito computacional bastante elevado, pois o esforço total para a simulação LES é proporcional ao $Re^{9/4}$. Mesmo esse valor sendo significativamente menor do que os requisitos para o DNS, ainda assim é elevado para aplicações a fluxo com números de Reynolds elevados, como fluxos próximos a paredes.

2.4 Fluidodinâmica Computacional

A fluidodinâmica computacional, tradução do termo em inglês *Computational Fluid Dynamics*, conhecida hoje como CFD, é um grupo de metodologias que utiliza ferramentas computacionais para simulações numéricas de fluxos em fluidos. CFD obtém soluções numéricas para as leis que governam o movimento dos fluidos dentro ou em torno de um sistema material, onde tanto a geometria como o fluxo são modelados computacionalmente. O sistema é transformado em um ambiente virtual, que pode ser verificado através de uma investigação experimental, caracterizado por um modelo material ou um protótipo do sistema. Essa investigação experimental pode ser feita por meio de modelo produzido exclusivamente para a situação ou através de resultados experimentais já realizados por outros autores, ou dados de experimentos consagrados na literatura.

A simulação em CFD pode ser definida em etapa de desenvolvimento, conforme Hirsch (2007). Essas etapas são:

- Selecionar o modelo matemático, definindo o nível de aproximação com a realidade.
- Realizar discretização do modelo que possui dois componentes, a discretização do espaço através da definição da malha seguindo pela discretização das equações, definindo o esquema numérico utilizado.
- Analisar o esquema numérico e suas propriedades de estabilidade e acurácia.

- Obter a solução do esquema numérico, através da seleção do melhor método de integração do tempo, bem como do método de resolução de sistemas algébricos.
- Obter gráficos de pós-processamento dos dados numéricos a fim de entender e interpretar as propriedades físicas dos resultados da simulação obtidos.

2.5 Solução Numérica do Escoamento

Discretização é o processo pelo qual a expressão da forma matemática fechada, tal qual uma função, ou uma diferencial ou uma equação integral envolvendo funções, todos estes possuem infinitos valores ao longo do mesmo domínio. Logo, há uma aproximação por expressões análogas que prescrevem valores apenas como números finitos de pontos, elementos ou volumes no domínio. Soluções analíticas de equações diferenciais envolvem expressões de forma fechada, que dão os valores de forma contínua através do domínio. Em oposição, soluções numéricas podem dar respostas apenas em pontos discretos no domínio, chamados de pontos das malhas.

Hirsch (1988) cita que a definição de um modelo computacional envolve várias etapas, que se inicia na formulação do modelo matemático e termina em uma solução numérica. O primeiro passo, segundo o autor, é a definição do nível de aproximação do problema físico a ser resolvido, quanto maior a acurácia maior será o custo computacional exigido. O segundo passo é a escolha do método de discretização da formulação matemática, que envolve dois componentes, a discretização do espaço, que ocorre através da geração de uma malha, e a discretização das equações. Na discretização das equações é selecionado um esquema numérico, definido um algoritmo de resolução e por fim deve ser analisado o esquema numérico quanto a sua estabilidade, acurácia e o seu espectro de erro.

Segundo Hirsch (1988), as três mais importantes ferramentas para a discretização espacial e temporal dos operadores diferenciais são: Métodos de Diferenças Finitas, Métodos dos Elementos Finitos e Métodos dos Volumes Finitos. O primeiro método segundo o autor é o mais popular entre os métodos, o segundo método é muito utilizado em análises estruturais, já o terceiro método é a forma integral das leis de

conservações e pode ser tratado como um método independente devido a grande flexibilidade em malhas arbitrárias.

2.5.1 Métodos das Diferenças Finitas

Segundo Hirsch (1988), o Método de Diferenças Finitas é baseado nas propriedades da expansão de Taylor e na aplicação direta da definição de derivadas. O método de diferenças finitas é possivelmente o método mais simples a ser aplicado, particularmente nas malhas uniformes, mas requer alto grau de regularidade das malhas, além de poder ser aplicado a qualquer tipo de malha, seja estruturadas ou não. O método de diferenças finitas substitui as derivadas parciais por um adequado quociente de diferença algébrica.

Segundo Anderson (1995), se $u_{i,j}$ refere-se a componente x da velocidade em um ponto (i,j) , a velocidade $u_{i+1,j}$ do ponto $(i+1,j)$ pode ser expresso em termo da expansão da série de Taylor sobre o ponto (i,j) como o seguinte:

$$u_{i+1,j} = u_{i,j} + \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_{i,j} \Delta x + \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}\right)_{i,j} \frac{\Delta x^2}{2} + \left(\frac{\partial^3 u}{\partial x^3}\right)_{i,j} \frac{\Delta x^3}{6} + \dots \quad (47)$$

Se isolarmos o termo da derivada parcial obtemos,

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_{i,j} = \frac{u_{i+1,j} - u_{i,j}}{\Delta x} - \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}\right)_{i,j} \frac{\Delta x}{2} - \left(\frac{\partial^3 u}{\partial x^3}\right)_{i,j} \frac{\Delta x^2}{6} + \dots \quad (48)$$

O lado esquerdo da Equação 24 é a derivada parcial avaliada no ponto (i, j) . Já o primeiro termo do lado direito é a representação da diferença finita da derivada parcial. Os termos restantes do lado direito constituem o erro de truncamento. Assim, a derivada pode ser aproximada pela expressão,

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_{i,j} \sim \frac{u_{i+1,j} - u_{i,j}}{\Delta x} \quad (49)$$

Onde o erro de truncamento é negligenciado nessa aproximação. Na Equação (49) o termo de maior ordem do erro de truncamento envolve Δx para a potência igual a um. Essa expressão de diferenças finitas possui acurácia de primeira ordem e pode ser escrita formalmente como,

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_{i,j} = \frac{u_{i+1,j} - u_{i,j}}{\Delta x} + O(\Delta x) \quad (50)$$

Na Equação (50) o símbolo $O(\Delta x)$ é a notação que representa “termo de ordem Δx ”. Logo, na Equação (50) fica representada explicitamente a ordem do erro de truncamento. Segundo Anderson (1995) as expressões de diferenças finitas podem ser avançada (*forward*) ou regressiva (*backward*) ou ainda centrada (*central*), isso indica a posição dos pontos da malha que servirão para discretização, além disso, a ordem do erro de truncamento das expressões de diferenças finitas pode ser de ‘n’ ordem.

2.5.2 Método dos Elementos Finitos

O Método dos Elementos Finitos é originado da análise estrutural. As ideias básicas envolvendo o Método foram apresentadas no artigo publicado por Courant em 1943. A partir de 1960 o método se desenvolveu rapidamente, onde foi reformulado com base em considerações energéticas variacionais, em uma forma geral de pesos residuais ou forma fraca, conforme Zienkiewicz e Holister (1965) e Finlayson (1975). O autor Felippa (1966), criou elementos de alta precisão, já os autores Ergatoudis et al (1968) e Irons e Zienkiewicz (1968) criaram elementos curvos e isoparamétricos. A base matemática do método dos elementos finitos foi estabelecida usando análise de funções, segundo Aziz (1972) e Whiteman (1973).

O conceito de elementos pode ser adotado de uma técnica usada para cálculo de forças, através do qual se subdivide uma estrutura em pequenas subestruturas com formas diversas remontando a estrutura depois que cada elemento foi analisado, segundo Hirsch (1988). Compara-se o método de elementos finitos como um quebra cabeça, onde a figura a ser montada é a estrutura final de análise, já as peças, com formas variadas, são os elementos que são analisados individualmente.

A técnica foi aplicada primeiramente com grande êxito em variados problemas lineares e não lineares na mecânica das estruturas, depois aplicou-se na obtenção de soluções para campos contínuos, conforme Zienkiewicz e Cheung (1965). Atualmente, impulsionado por esse êxito nas aplicações, inicialmente, na engenharia estrutural o método tem sido posto pelos matemáticos como muito elegante e

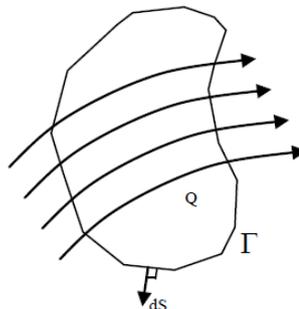
rigoroso, com uma estrutura formal, com condições de precisão matemática para existência, critérios de convergência e limites de erros.

2.5.3 Método dos Volumes Finitos

O Método dos Volumes Finitos foi introduzido independentemente no campo da dinâmica dos fluidos numérica por McDonald (1971) e MacCormack e Paullay (1972), para a solução das equações de Euler dependentes do tempo, em duas dimensões, esse estudo foi estendido para três dimensões por Rizzi e Inouye (1973). O Método dos Volumes Finitos é definido por Hirsch (1988), como a técnica pela qual a formulação integral das leis de conservação são discretizadas diretamente no espaço físico. Embora, de acordo com Hirsch (1988), o método possa ser considerado o método de diferenças finitas aplicado ao diferencial, da forma conservativa da lei de conservação, escrita em coordenadas arbitrária ou como uma variante da forma fraca. A maior vantagem do método é ser usado em malhas arbitrárias, onde existe o maior número de opções para a definição dos volumes de controle.

Seja uma Lei de conservação escalar qualquer dada pela Equação 51, para uma quantidade escalar U , com um volume de fonte Q , um vetor \mathbf{F} de fluxo de U e um vetor $d\mathbf{S}$ de área elementar normal e externa a Γ , conforme Figura 2.3.

Figura 2.3 – Volume de controle com uma fonte Q .



$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} U d\Omega + \oint_{\Gamma} \mathbf{F} \cdot d\mathbf{S} = \int_{\Omega} Q d\Omega \quad (51)$$

Onde a variação temporal de U dentro do volume Ω só depende do valor do fluxo na superfície. Escrevendo para cada subdomínio arbitrário dentro do volume Ω , a lei de conservação, temos:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega_1} U d\Omega_1 + \oint_{S_1} \mathbf{F} \cdot d\mathbf{S}_1 = \int_{\Omega_1} Q d\Omega_1 \quad (52)$$

:

:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega_i} U d\Omega_i + \oint_{S_i} \mathbf{F} \cdot d\mathbf{S}_i = \int_{\Omega_i} Q d\Omega_i \quad (53)$$

As integrais de superfície internas se anulam, pois possuem módulos iguais, porém, de sentidos contrários. Logo, restam as integrais de superfície externa.

A lei de conservação integral pode ser escrita para um volume discreto segundo a Equação (53), e aplicada em um volume de controle Ω_j , onde a equação discreta associada com U_j é definida. Logo, a Equação (53) pode ser escrita na forma discreta conforme a Equação (54):

$$\frac{\partial}{\partial t} (U_j d\Omega_j) + \sum (F \cdot S) = Q_j d\Omega_j \quad (54)$$

Onde a soma dos termos do fluxo refere-se ao lado externo do volume de controle Ω_j . Segundo Hirsch (1988), as seguintes condições tem que ser satisfeitas para a escolha dos volumes Ω_j para o Método de Volumes Finitos:

- Sua soma deve convergir para o domínio Ω ;
- Volumes de controles Ω_j adjacentes devem se sobrepor com cada superfície interna comum a dois volumes;
- O fluxo ao longo da superfície de uma célula será computado de forma independente, para a célula que está sendo considerado.

Segundo Hirsch (1988), a Equação (54) mostra várias diferenças entre o Método de Volumes Finitos, Diferenças Finitas e Elementos Finitos, as quais podem destacar:

- Como as coordenadas do ponto J , que é a localização da variável U de dentro do volume de controle Ω_j não é explicitada, U_j não é necessariamente um

ponto fixo de dentro do volume do controle, logo pode ser considerado como um valor médio da variável U do fluxo sobre a célula de controle;

- As coordenadas da malha aparecem apenas na determinação da célula do volume e nos lados das áreas;
- Na ausência de termos fonte, a formulação de volumes finitos expressa que a variação do valor médio de U para um intervalo de tempo Δt é igual a soma da troca do fluxo entre células vizinhas. Para os fluxos estacionários a solução numérica é obtida como o resultado do balanço de todos os fluxos que entram no volume de controle.
- O método de volumes finitos também permite uma introdução natural de condições de contorno, como uma face onde as componentes de velocidade do fluxo são conhecidas.

2.5.4 Métodos dos Elementos de Contorno

O Método dos Elementos de Contorno (MEC) possui como grande vantagem com relação aos demais métodos numéricos em análises de modelos com domínio infinito ou semi-infinito, pela simplicidade de discretização do modelo. O MEC é um método computacional para a solução de sistemas de equações diferenciais formuladas em forma integral. Nesse método apenas o contorno do domínio é discretizado, logo reduz drasticamente o tamanho do problema, além de ser mais simples a implementação de geradores de geometria e de malha que o Método dos Elementos Finitos, que é o método numérico mais tradicional.

O MEC basicamente efetua a análise de problemas através da discretização do contorno do modelo, através de nós e elementos. Primeiramente se obtêm os valores de forças de superfície e deslocamentos apenas para os nós da discretização do contorno. A partir destes valores, obtêm-se os resultados em qualquer ponto do contorno através da interpolação em cada um dos elementos.

2.6 Modelos Multifásicos

Os modelos multifásicos são utilizados para simular, na fluidodinâmica computacional, as diferentes fases ou misturas dos fluidos em um escoamento. Em geral, consiste de escoamentos de diferentes espécies químicas como ar e água. É importante diferenciar entre escoamentos multicomponentes e multifásicos. Assuma-se como um fluido multicomponente quando existe mistura química a nível molecular, como exemplo temos as misturas gasosas e os líquidos em solução. Já os fluidos em escoamentos multifásicos é a mistura em escalas macroscópicas, muito maiores que o comprimento molecular, como exemplo pode citar o borbulhamento gasoso nos líquidos e gotículas de líquido no gás. Neste caso devem-se resolver suas propriedades, como campo de velocidade e temperatura, para cada fluido. Estes devem interagir entre si, por meio das forças superficiais e através da transferência de massa e de calor na interface das fases.

Os modelos multifásicos são classificados em modelos multifásicos euleriano-euleriano ou euleriano-lagrangiano (Ansys, 2012). O modelo multifásico euleriano-euleriano representa duas ou mais fases do escoamento através do método de Euler. Já o modelo euleriano-lagrangiano representa uma das fases do escoamento através do método de Euler e a outra na forma de Lagrange. O método de Euler representa o escoamento em função do tempo no volume de controle e o método de Lagrange monitora cada molécula ou partícula do sistema isoladamente.

O modelo multifásico euleriano-euleriano é dividido em modelo homogêneo e modelo não-homogêneo. A diferença entre os dois modelos é a forma com que as equações representativas do escoamento são resolvidas, no modelo homogêneo as equações são resolvidas para todos os fluidos de forma unificada, já no modelo não-homogêneo cada fluido possui um sistema de equações.

2.6.1 Modelo de Superfície Livre

O modelo mais utilizado em escoamentos multifásicos é o de superfície livre (Ansys, 2012). O modelo de superfície livre soluciona a interface entre os fluidos. A transferência de momento, calor e massa entre os fluidos depende da área de contato superficial entre as fases. Esta é caracterizada pela área superficial por

unidade de volume entre as fases α e β , conhecida como densidade de área superficial.

No caso da existência de apenas duas fases na simulação, a área de superfície por unidade de volume na interface é obtida pela Equação 55.

$$A_{\alpha\beta} = |\nabla r_{\alpha}| \quad (55)$$

Segundo Ansys (2012), quando existem mais de duas fases presentes no escoamento, tem-se a Equação 56, para representar a área de superfície por unidade de volume.

$$A_{\alpha\beta} = \frac{2|\nabla r_{\alpha}||\nabla r_{\beta}|}{|\nabla r_{\alpha}|+|\nabla r_{\beta}|} \quad (56)$$

Onde r_{α} e r_{β} são, respectivamente, a fração de volume de α e de β .

2.6.1.1 Tensão Superficial

O modelo de tensão superficial usado foi baseado no modelo de forças superficiais contínuas (Brackbill et al, 1992). Neste modelo a força de tensão superficial é modelada como uma força concentrada na interface entre as fases, ao invés de ser uma força de superfície.

Sendo α um fluido primário (geralmente a fase líquida) e β um fluido secundário (geralmente a fase gasosa), a força de tensão superficial é dada pela Equação 57.

$$\mathbf{F}_{\alpha\beta} = \mathbf{f}_{\alpha\beta} \delta_{\alpha\beta} \quad (57)$$

Onde:

$$\mathbf{f}_{\alpha\beta} = -\sigma_{\alpha\beta} k_{\alpha\beta} \mathbf{n}_{\alpha\beta} + \nabla_s \sigma \quad (58)$$

$$\delta_{\alpha\beta} = |\nabla r_{\alpha\beta}| \quad (59)$$

Onde σ é o coeficiente de tensão superficial, $\mathbf{n}_{\alpha\beta}$ é o vetor normal na interface do fluido primário para o fluido secundário, ∇_s é o operador gradiente na interface e k é a curvatura superficial.

2.7 Número de Courant

O número de Courant, ou condição de CFL (Courant-Friedrichs-Levy) é o número de elementos que representa o avanço da frente de concentração por advecção em cada passo de tempo. O número de Courant é constante no tempo, para problemas de transporte, porém é variável em escoamentos onde o passo de tempo varia ou o campo de velocidade depende do tempo. Este número é utilizado como critério para se garantir a estabilidade numérica.

O número de Courant é de fundamental importância para fluxos transientes, que são fluxos onde suas propriedades variam com o tempo em um ponto do campo. O número é definido pela Equação 60.

$$Courant = \frac{u \Delta t}{\Delta x} \quad (60)$$

Segundo Leveque (1992), a condição CFL exige que a distância percorrida durante 1 (um) passo de tempo, deve ser o mais próximo possível ao comprimento de uma célula da malha discretizada, ou seja, o número de Courant deve possuir valor próximo a unidade.

2.8 Erros e Limitações

A principal limitação nas simulações numéricas é a capacidade computacional das máquinas disponíveis no mercado. A modelagem de pequenas geometrias com o grau de refinamento ideal, a fim de realizar a captura de todos vórtices e redemoinhos de um escoamento turbulento, seria impossível atualmente, pois iria requerer uma demanda de processamento inviável para os atuais computadores. Entretanto, como esse trabalho buscou a utilização de computadores domésticos foram consideradas simplificações, quando possíveis, porém sempre com o cuidado, a fim destas não influenciarem drasticamente nos resultados.

Da mesma forma, o processo de modelagem numérica está suscetível a erros, estes são:

- Erros no modelo adotado;
- Erros nos dados do problema;
- Erros de descuido (ou fortuito);
- Erros de arredondamento;
- Erros de aproximação ou numérico;
- Interpretação dos resultados.

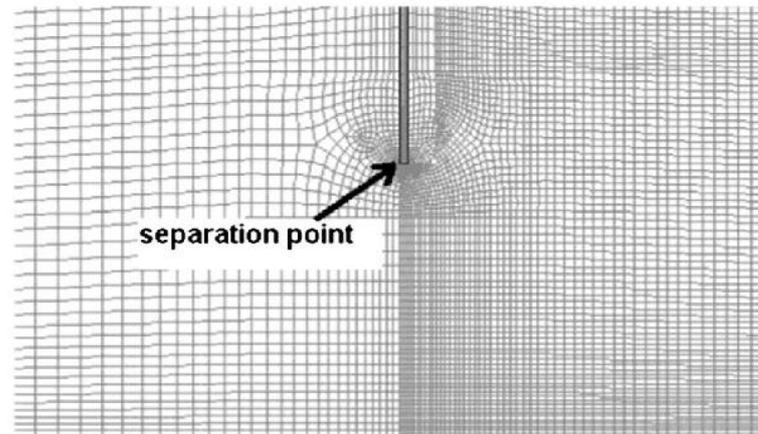
Os erros por conta do uso indevido do modelo matemático deve-se a incoerência na definição das condições de contorno, carregamento, ou modelos de turbulência. Outro erro muito comum é a aproximação de uma análise de um escoamento transiente por um estático.

Segundo Post (2013), um erro inerente ao processo é o numérico vindo da discretização do contínuo em uma malha com dimensões finitas.

2.9 Estudo Numérico em Comportas Hidráulicas

Cassan e Belaud (2012) estudaram o fluxo a montante e a jusante de uma comporta hidráulica tanto experimental como numericamente usando as equações médias de Reynolds para Navier-Stokes em duas dimensões com o método de volumes finitos. Foi dada uma especial atenção a canais de grande abertura e submersos, que é uma situação muito frequente em canais de distribuição e pouco abordado na literatura. Produziu-se uma malha 2D estruturada, no entanto nas regiões abaixo da comporta, por possuir uma forte aceleração do fluxo, adaptou-se localmente a malha (Figura 2.4). Os pesquisadores concluíram que a escolha do modelo de turbulência interfere largamente na estimativa final do coeficiente de contração e no caso de fluxo submerso com grandes aberturas das comportas, o coeficiente de contração não deve ser considerado no fluxo livre.

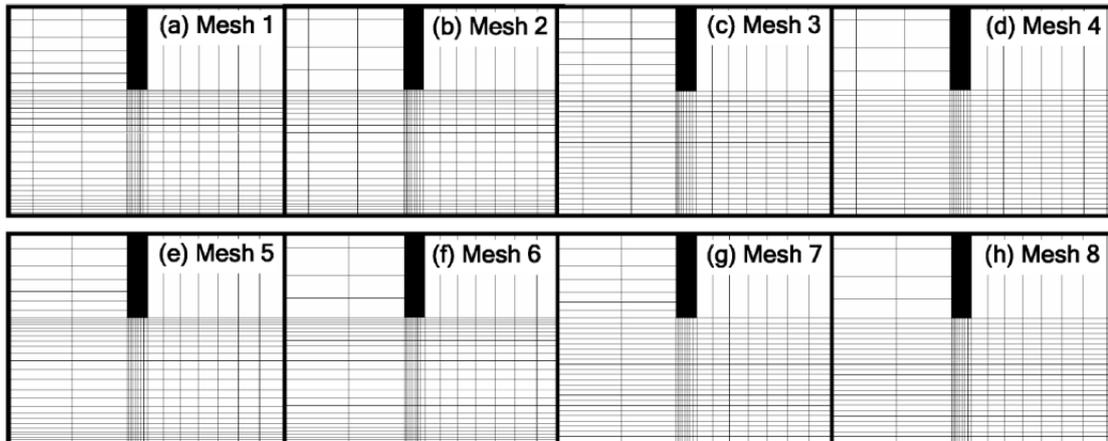
Figura 2.4 – Detalhe da malha abaixo da comporta submersa.



Fonte - Cassan e Belaud (2012).

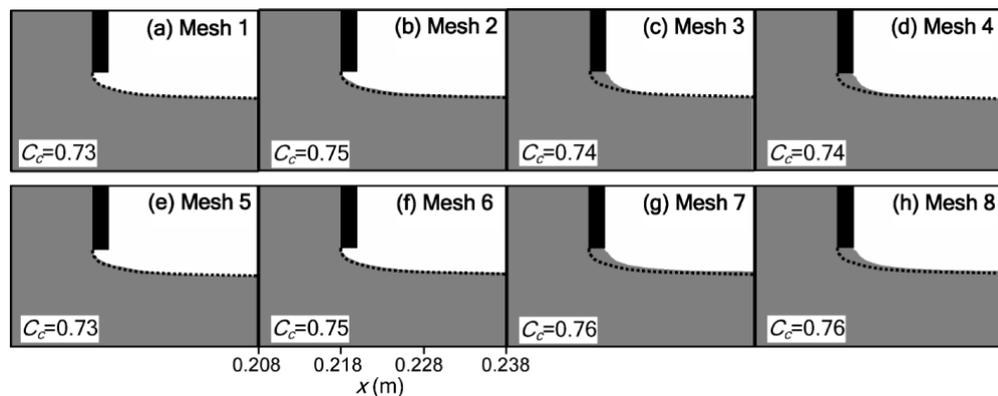
Akoz et al (2009) simularam e analisaram, através da fluidodinâmica computacional, um fluxo através de uma comporta com as mesmas condições de um fluxo experimental realizado em laboratório. Os resultados numéricos para o campo de velocidade e o perfil de superfície livre de oito malhas computacionais são comparados com os dados experimentais. Baseada na comparação foi escolhida a malha mais adequada de entre as oito. O estudo empregou um maior refinamento na região próxima a base da comporta, conforme é mostrada na Figura 2.5. Os pesquisadores chegaram à conclusão de que a densidade local da malha influencia no grau de acurácia dos resultados numéricos em relação aos experimentais, para o campo de velocidade e o perfil de superfície livre. Na Figura 2.6 pode-se observar a comparação entre os perfis de superfície livre obtido experimentalmente e computacionalmente com o modelo de turbulência $k-\epsilon$ padrão, na região onde ocorre uma rápida variação de contração abaixo da comporta das oito malhas.

Figura 2.5 – Análise do efeito da utilização de oito malhas distintas em um modelo de CFD.



Fonte - Akoz et al (2009)

Figura 2.6 – Perfis de superfície livre computacional e experimental na região abaixo da comporta, usando o modelo de turbulência $k-\varepsilon$ padrão para as oito malhas. A linha tracejada representa os perfis de superfície livre experimental.



Fonte - Akoz et al (2009)

Os trabalhos de Xie e LIm (2015) e Kim (2007) também estudaram, com o auxílio da fluidodinâmica computacional, o fluxo em comportas hidráulicas, validando seus resultados com medidas experimentais, ou dados disponíveis na literatura.

3 METODOLOGIA

Os detalhes apresentados no Capítulo 3 deste trabalho compreendem as etapas para qualquer simulação em dinâmica dos fluidos computacional com o *Ansys CFX*. A simulação do escoamento sob comporta deve passar por todas estas etapas tomando os devidos cuidados, pois se trata de um escoamento bifásico, onde o ar e água se movimentam, resultando no fluxo com certa complexidade de modelagem. Diante do exposto neste trabalho em relação à caracterização do escoamento sob comportas em canais, foram realizados os estudos tendo como base, a simulação do escoamento em ferramentas de fluidodinâmica computacional.

Ainda hoje são muito utilizados modelos reduzidos para caracterização de escoamentos sob comportas. Considerando o avanço da capacidade computacional, a utilização dos modelos numéricos vem se tornando uma alternativa viável, com vantagens em termo de detalhes geométricos, comportamento do escoamento além da facilidade de verificação das variáveis do escoamento. Segundo Ansys (2007), com o emprego da fluidodinâmica computacional há a eliminação dos problemas de semelhança dinâmica dos escoamentos em escalas reduzidas e ocorre a redução dos custos com estudos experimentais. No entanto, devem ser escolhidos modelos representativos dos fenômenos envolvidos, para isso devem ser comparados os resultados numéricos obtidos, com as características do escoamento observadas via análise experimental.

Para a verificação do estudo do escoamento sob comportas hidráulicas através de simulação numérica, comparou-se os resultados computacionais, com os obtidos experimentalmente por alguns autores citados na revisão bibliográfica.

Assim, neste capítulo serão apresentados os detalhes do processo de simulação, no *Ansys CFX*, do escoamento sob uma comporta em um canal.

3.1 Definição da Geometria

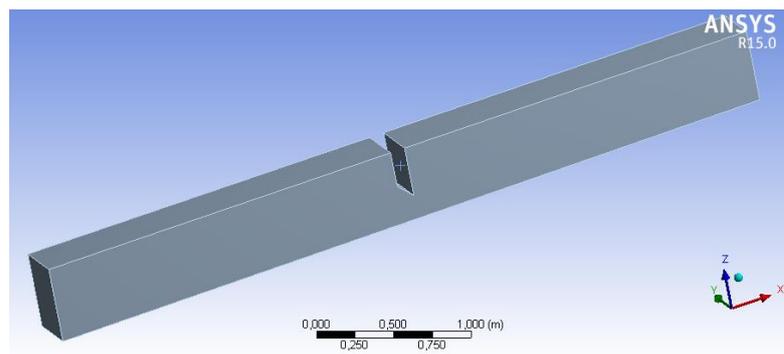
A geometria escolhida foi a do canal de acrílico, conforme Figura 3.1, que se encontra no Laboratório de Recursos Hídricos do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental UFPE, campus Recife.

Figura 3.1 – Canal de acrílico presente no Laboratório de Recursos Hídricos do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental UFPE, campus Recife.



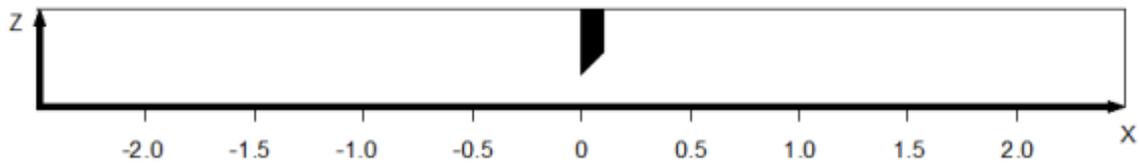
Reproduziram-se as mesmas dimensões de seção transversal do canal de acrílico na modelagem, ou seja, 34 cm de base e 49 cm de altura. Ainda, foi desenhada uma comporta no meio do canal com as bordas chanfradas e com uma abertura de 15 cm de altura, possibilitando a passagem da água por baixo da mesma e um comprimento total de 5,00 m com a comporta locada no meio da extensão. Para desenhar a geometria optou-se pelo *software Auto CAD*, em sua plataforma 3D. Por fim, o desenho foi exportado para a extensão .igs que é compatível com o *Ansys CFX*. Na Figura 3.2 é apresentada a geometria modelada.

Figura 3.2 – Geometria modelada.



Para as análises foi considerado o eixo ao longo do canal (eixo x) com valor zero logo abaixo da comporta e o eixo perpendicular à base do canal (eixo z) com o seu zero na base do canal, conforme mostrado na Figura 3.3.

Figura 3.3 – Disposição dos eixos de coordenadas ao longo do canal.



3.2 Geração da Malha

Com a geometria definida entra-se no processo de geração da malha. No *Ansys CFX* essa etapa acontece no módulo *Mesh CFX*. Sabe-se que quanto mais refinada a malha, melhor a captura dos resultados e menor o resíduo gerado, porém o excesso de detalhamento ocasiona custo computacional que inviabiliza as simulações.

Logo, o processo de escolha da malha mais eficiente para o modelo se dá com o teste de convergência das malhas, onde são geradas malhas com diversos graus de refinamento e a malha que com menor custo computacional conseguem-se os resultados com erros satisfatórios, essa será usada para trabalhar todos os resultados.

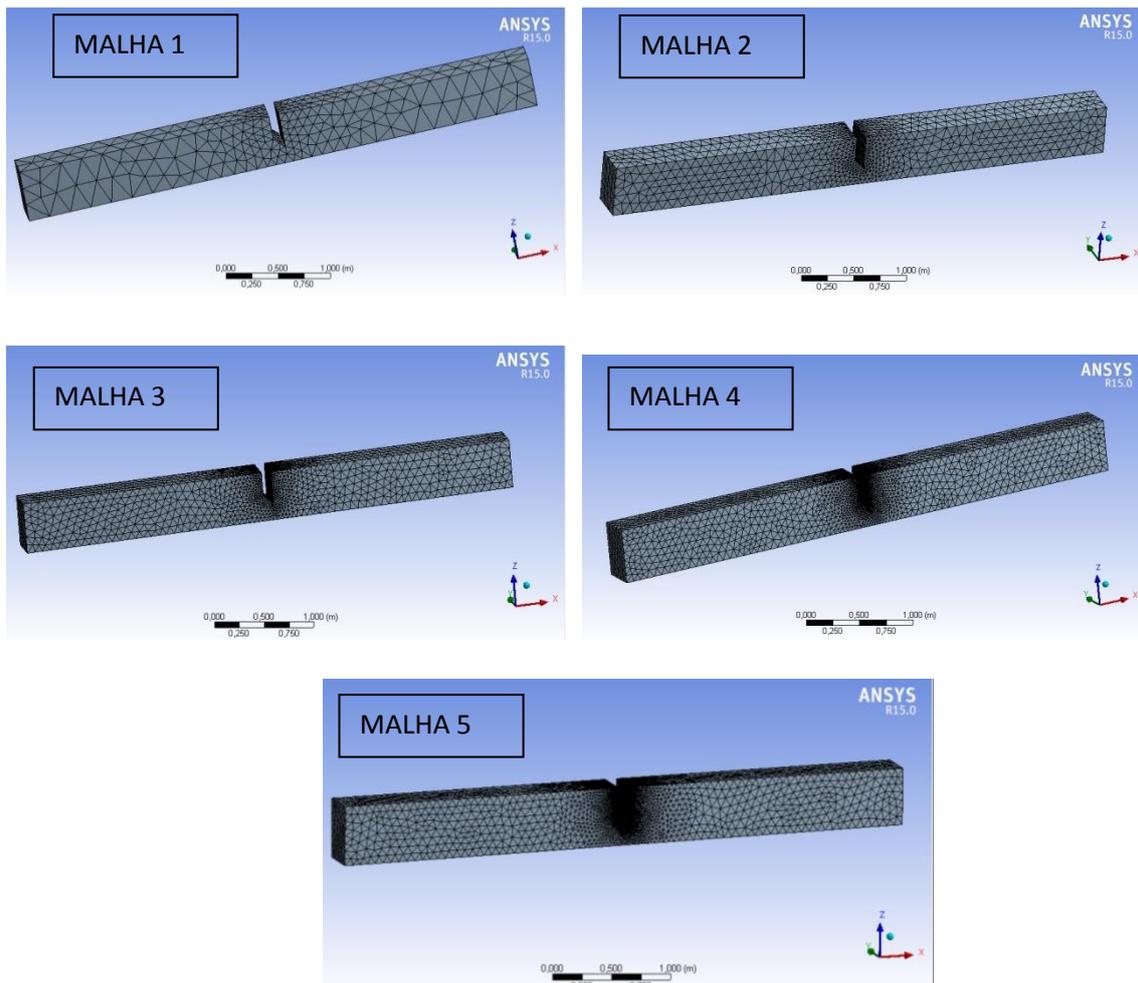
A geração da malha possui grande impacto na qualidade dos resultados, bem como no peso do processamento, logo sua formação deve ser cuidadosamente pensada, havendo a necessidade de um maior refinamento na região de interesse do estudo, no caso, a área próxima à comporta e nas demais áreas a malha pode ser mais grosseira. Para esse refinamento, nessa região, foi utilizada a ferramenta *sizing*.

Além disso, através da ferramenta *inflation*, foi modelada a camada limite. Desta forma são criados elementos piramidais próximos às faces que representam as paredes do canal. Logo, foram definidas cinco malhas conforme a Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Números de nós e elementos referentes a cada malha.

Malha	Número de Nós	Número de Elementos
1	3097	7183
2	12219	33634
3	23043	69608
4	62071	218138
5	209322	824718

Abaixo são apresentadas as malhas geradas no CFX Mesh (Figura 3.4). Essas serão objeto do estudo de convergência para a escolha da malha que melhor se enquadre nas condições de estudo.

Figura 3.4 – Malhas não-estruturadas.

3.2.1 Qualidade da malha

Para cada malha foram estudados os critérios de qualidade quanto à ortogonalidade (*Orthogonal Quality*) e deformação (*Skewness*) dos elementos. Nesta etapa deve-se ter atenção a fim de garantir que os elementos de menor qualidade fiquem afastados da comporta, permitindo a presença destes em regiões de menor influência. Na Figura 3.5 pode-se observar os elementos com menores deformações, para a malha 04. Ou seja, foram omitidos todos os demais elementos, só apresentando os de menores deformações, análogo temos na Figura 3.6, a representação dos elementos de maior deformação para a malha 04.

Figura 3.5 – Elementos com menores deformações.

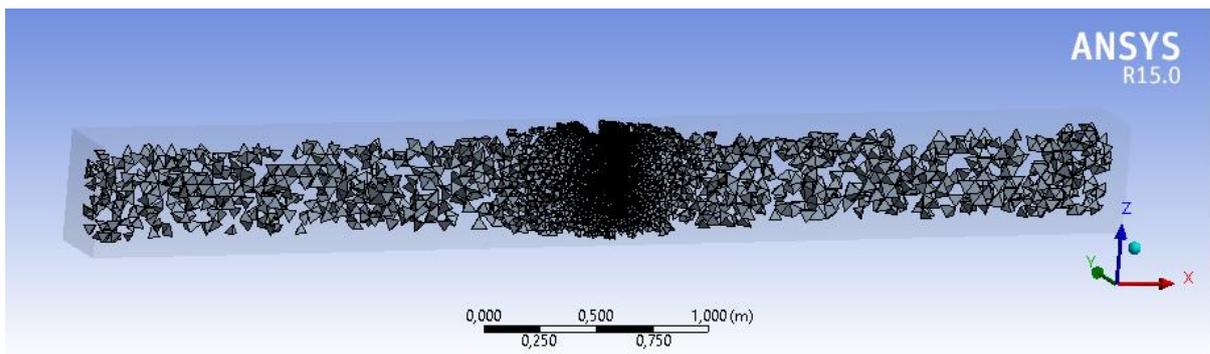
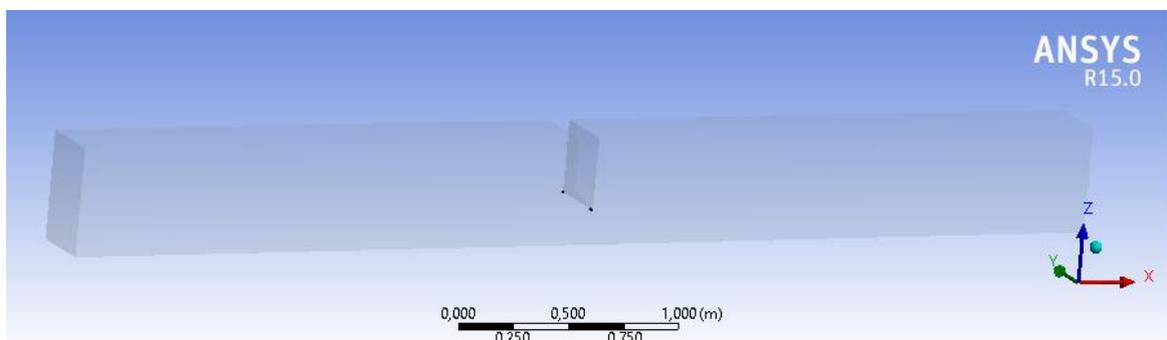


Figura 3.6 – Elementos com maiores deformações.



Na Tabela 3.2 são apresentados os valores com a maior e menor deformação gerada para cada malha.

Tabela 3.2 – Valores mínimos, médios e máximos das deformações para todas as malhas geradas.

Malha	Deformação		
	Valor Mínimo	Valor Médio	Valor Máximo
1	6,08E-03	4,39E-01	8,80E-01
2	2,79E-03	3,22E-01	8,77E-01
3	1,47E-04	2,89E-01	8,05E-01
4	5,35E-04	2,50E-01	8,35E-01
5	1,52E-04	2,26E-01	8,95E-01

Da mesma forma, as Figura 3.7 e Figura 3.8 ilustram a situação de maior e menor ortogonalidade, respectivamente, para a malha 04.

Figura 3.7 – Elementos com maiores ortogonalidades.

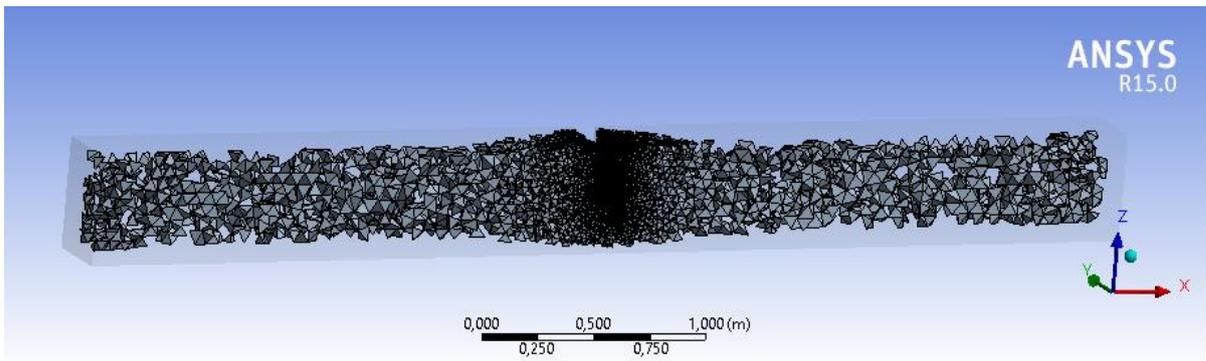
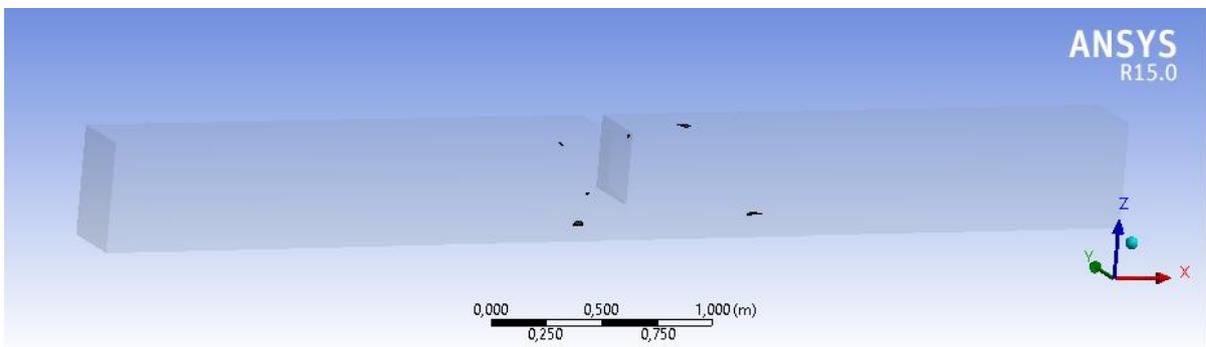


Figura 3.8 – Elementos com menores ortogonalidades.



Na Tabela 3.3 são apresentados os valores de maior, médio e de menor ortogonalidade de todas as malhas.

Tabela 3.3 – Valores mínimos, médios e máximos da ortogonalidade para todas as malhas geradas.

Malha	Ortogonalidade		
	Valor Mínimo	Valor Médio	Valor Máximo
1	1,84E-01	7,42E-01	9,89E-01
2	2,05E-01	8,25E-01	9,97E-01
3	2,53E-01	8,44E-01	9,98E-01
4	2,45E-01	8,62E-01	9,99E-01
5	1,31E-01	8,72E-01	1,00E+00

3.3 Definição Física

Após a modelagem da malha foram definidos os parâmetros físicos do modelo, no *Ansys CFX* essa fase acontece no CFX-Pre. Como se trata de um escoamento bifásico, o fluxo deve ter duas fases contínuas. No caso desse estudo, água e ar. Assim, abaixo serão indicadas as definições físicas para a simulação:

- Materiais

Água a 25 °C

Ar a 25 °C

- Morfologia dos Fluidos

Fluidos Contínuos

- Pressão de Referência

$P = 1 \text{ atm}$

- Aceleração da Gravidade

$X = 0 \text{ m/s}^2$

$Y = 0 \text{ m/s}^2$

$Z = 9,8 \text{ m/s}^2$

- Densidade de Referência

$\rho = 1,184 \text{ kg/m}^3$ (Tomada como a densidade do fluido mais leve, ou seja, a do ar a 25°C)

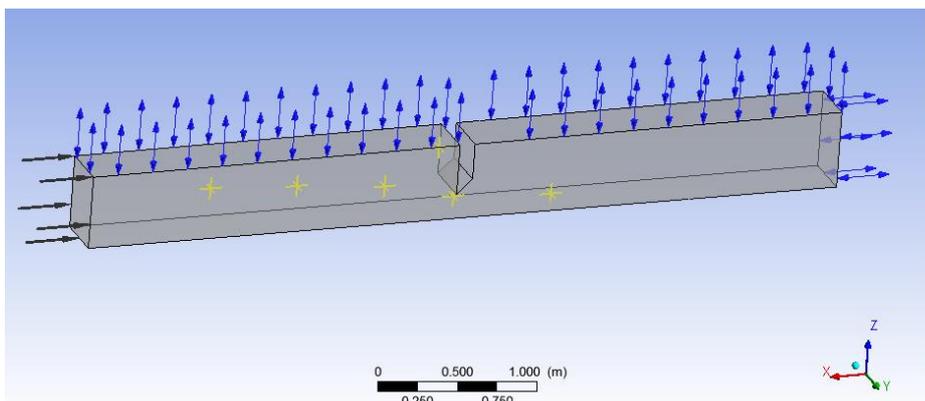
A densidade de referência para escoamentos com superfície livre, segundo Ansys (2012), deve ser tomada como a densidade do fluido mais leve, no caso o ar a 25 °C, pois dá uma funcionalidade intuitiva de pressão (isto é, constante no fluido mais leve e hidrostático no mais pesado).

As duas fases dos fluidos são isotrópicas e newtonianas e são aproximadas como incompressíveis. O fluxo é considerado isotérmico, com temperatura igual a 25°C, além disso, supõem-se que a única força que atua na fração de volume é a da gravidade.

As condições de contorno foram adotadas conforme a Seção 3.1.4 e escolhidas de modo que melhor representem a realidade. O domínio resultante da modelagem pode ser verificado na Figura 3.9:

- Entrada: Na face de entrada (face com setas pretas, conforme Figura 3.9) foi indicada a velocidade do fluxo hidráulico que entra normal à mesma. Tomada como 1,50 m/s.
- Aberto: Nas faces onde foi selecionado esse domínio (faces com setas azuis, segundo Figura 3.9) adotou-se uma pressão relativa de 0 Pa.
- Paredes: Nas demais faces foram adotadas como parede e na condição de *No Slip wall* com rugosidade nula nas paredes, pois se trata de paredes em acrílico e a rugosidade para essas paredes é praticamente zero.

Figura 3.9 – Domínio computacional com as características físicas do escoamento.

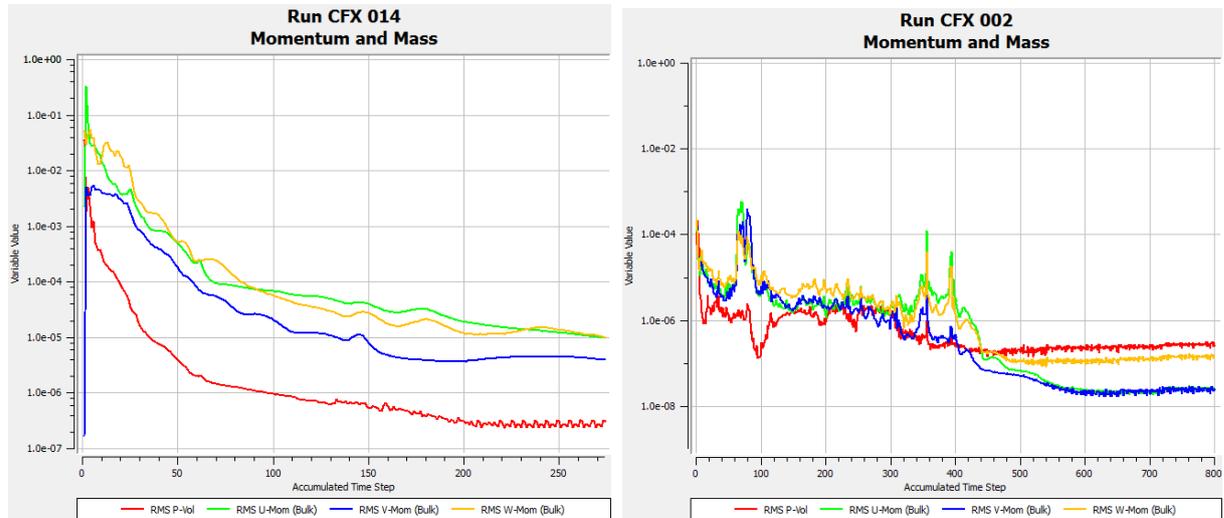


Após essas primeiras definições seguiram-se escolhendo o modelo multifásico como homogêneo (*Multiphase Homogeneous Model*), onde há a mistura macroscópica do ar com a água e todos os fluidos possuem os mesmos campos de velocidade, bem como outros campos relevantes, como temperatura, turbulência, pressão, etc. Ainda, foi considerado o coeficiente de tensão superficial a 25 °C e 1 atm de 0,0732 N/m, conforme Çengel e Cimabala (2007) e o modelo de superfície livre para simular a interface entre o ar e a água. Outra importante definição é a do modelo de turbulência que deve ser utilizado. Foi escolhido o modelo de duas equações o k- ϵ padrão, desenvolvido por Launder & Spalding (1974), este é amplamente utilizado e validado em problemas de escoamento livre, conforme Faure, Buil, & Gay (2004), Lira (2014), Sinha, et al (2014).

3.3.1 Definição do Regime de Escoamento

Partindo da premissa de se obter a melhor solução com o menor custo computacional possível, foi considerada primeiramente a análise do modelo no regime estacionário, considerando como critério de parada um erro médio quadrático (RMS) de 0,001, conforme recomendado por Celik et al (2008). Todas as malhas convergiram para esse valor, no entanto ao se comparar os resíduos entre a malha mais refinada no estado transiente e a malha mais refinada no estado estacionário, verifica-se a diminuição considerável no valor, indo de 10^{-5} , conforme Figura 3.10 (a), para 10^{-7} , conforme Figura 3.10 (b), indicando que o regime transiente representa melhor este fenômeno.

Figura 3.10– a) RMS do Regime Estacionário; b) RMS do Regime Transiente.



3.3.1.1 Características Temporais do Estado Transiente

Assim, prosseguiu-se o estudo no estado transiente. O tempo total de simulação foi considerado tal que o fluido escoe até a variável atingir estabilidade, ou seja, quando não houver alterações significativas em seus valores. Para esse estudo foi percebido que este valor é aproximadamente o tempo para que o fluido atravessasse todo o domínio três vezes. Assim, a partir da definição da velocidade, temos para as dimensões do domínio e velocidade a Equação 61. Esse valor será o de partida, podendo diminuir ou aumentar conforme o grau de refinamento de cada malha.

$$u = \frac{dx}{dt} \rightarrow 1,5 = \frac{5}{t} \quad (61)$$

$$t = 3,33 \text{ s} \rightarrow t_{escoamento} = 3 \times t = 9,99 \text{ s}$$

Outra definição importante para o estudo no estado transiente é do passo de tempo adotado. Esse será definido conforme a convergência do Número de Courant. Para isso foi escolhida a malha intermediária (Malha 3), pois trata-se de uma malha com um refinamento que propicia um baixo custo computacional aliado a pequena divergência dos resultados das malhas mais refinadas. Assim, foi simulado, conforme a Tabela 3.4, cada passo de tempo e número de Courant correspondente, observando como se comporta, para cada malha, o módulo da velocidade da água

em seis pontos ao longo do canal, conforme Figura 3.11. A disposição desses pontos foi escolhida segundo a importância do escoamento. Na região a montante, por possuir um maior volume de água, foram inseridos quatro pontos para monitoramento do módulo da velocidade da água. Ainda, foi inserido um ponto abaixo da comporta e outro a jusante da comporta. Logo, foi simulada a variação do módulo da velocidade da água ao longo do tempo para diferentes números de Courant para os seis pontos, conforme Figura 3.12 e a Figura 3.17.

Tabela 3.4 – Convergência do número de Courant.

Passo de tempo (s)	0,0125	0,025	0,10	0,20	0,40	0,80
Número de Courant	1,70	3,50	14,00	28,00	56,00	114,00

Figura 3.11 – Distribuição dos seis pontos analisados ao longo do canal.

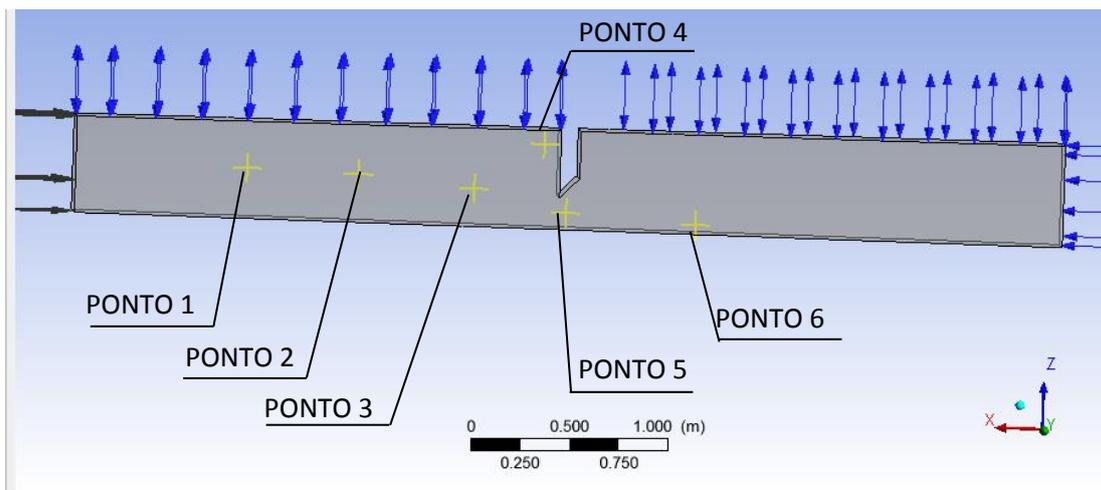


Figura 3.12 – Variação do módulo da velocidade da água ao longo do tempo para diferentes números de Courant – Ponto 1.

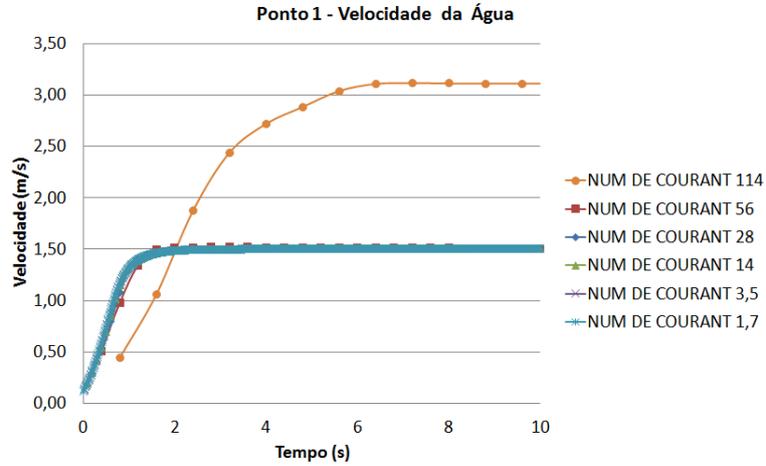


Figura 3.13 – Variação do módulo da velocidade da água ao longo do tempo para diferentes números de Courant – Ponto 2.

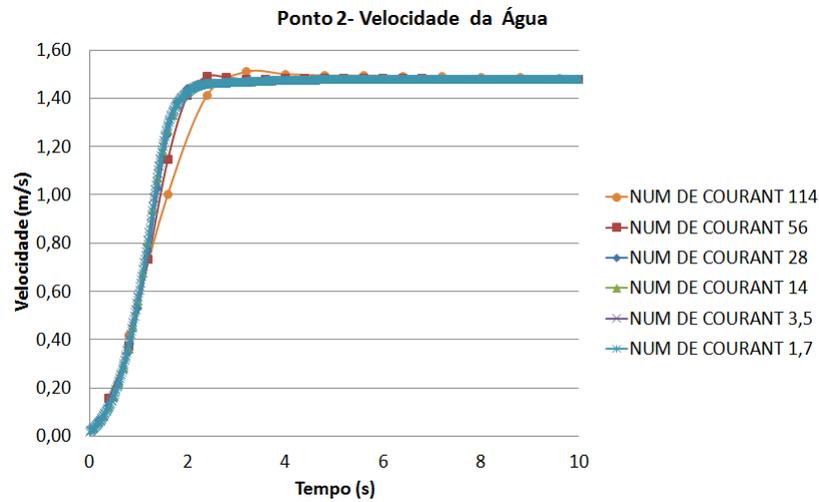


Figura 3.14 – Variação do módulo da velocidade da água ao longo do tempo para diferentes números de Courant – Ponto 3.

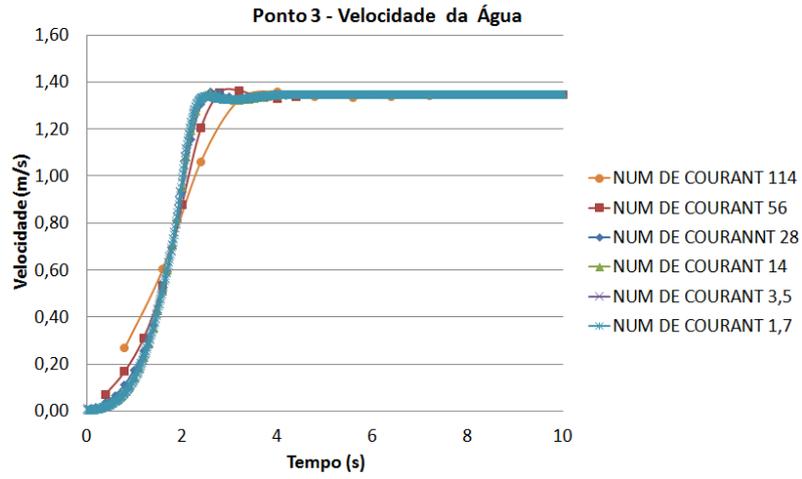


Figura 3.15 – Variação do módulo da velocidade da água ao longo do tempo para diferentes números de Courant – Ponto 4.

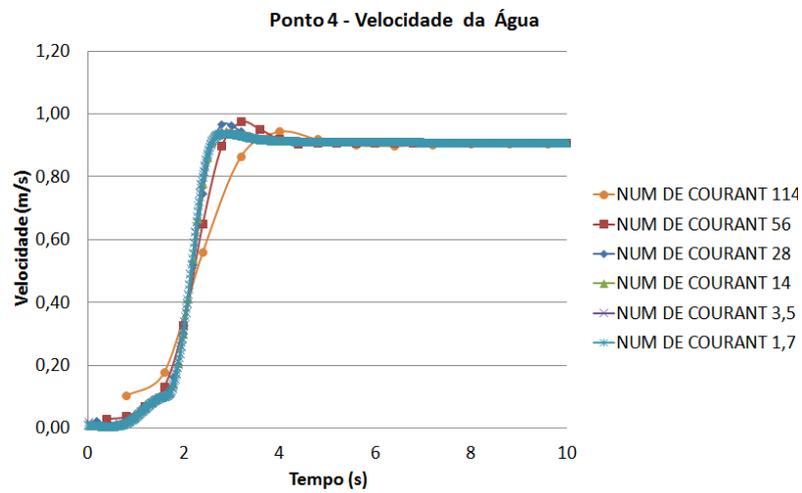


Figura 3.16 – Variação do módulo da velocidade da água ao longo do tempo para diferentes números de Courant – Ponto 5.

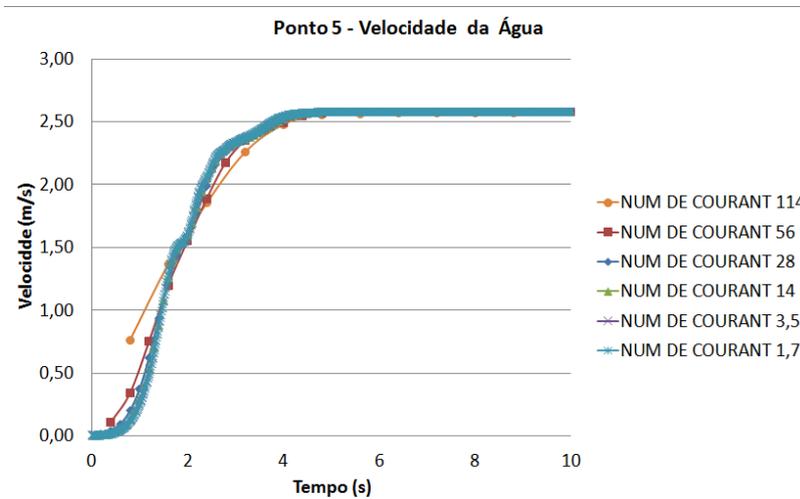
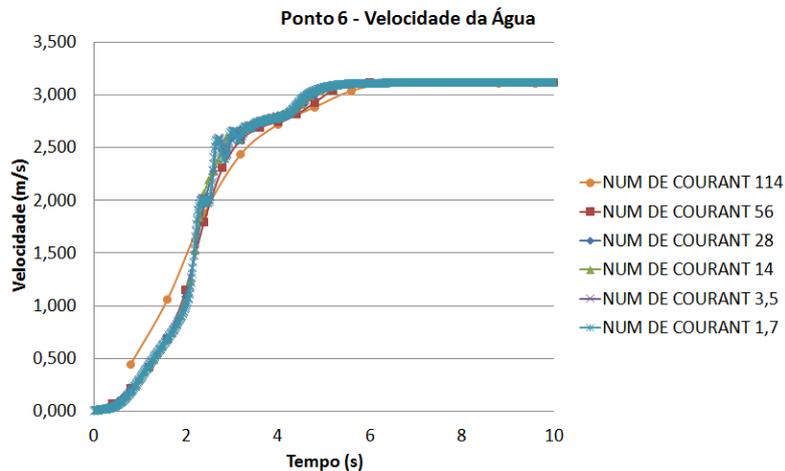


Figura 3.17 – Variação do módulo da velocidade da água ao longo do tempo para diferentes números de Courant – Ponto 6.



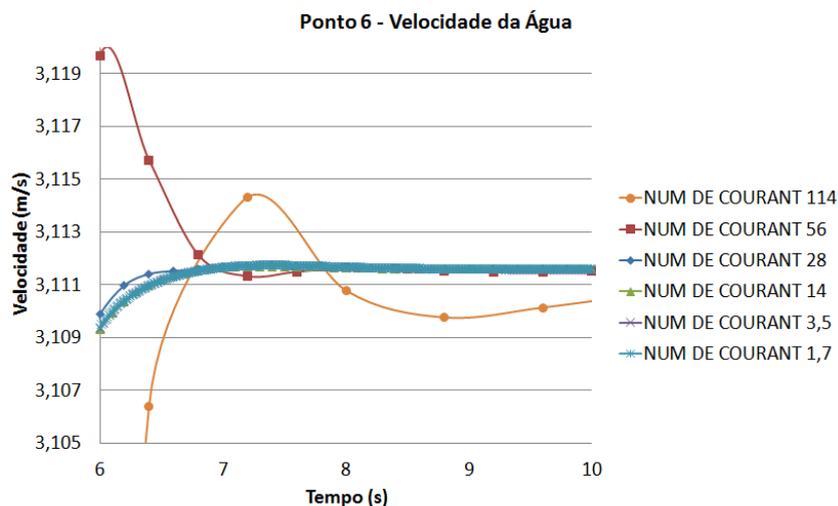
O ponto 1 apresentou a maior variação observada em relação ao módulo da velocidade referente aos diversos Números de Courant simulados. Os valores da simulação com o número de Courant igual a 114 estão totalmente divergente dos demais. Nos demais pontos se pode observar que os valores simulados com os números de Courant iguais a 114 e 56 sempre foram os que tiveram maiores oscilações em relação aos demais, isso se deve ao fato de que os passos de tempo utilizados para estas simulações não são representativos o suficiente para capturar o comportamento do escoamento. No entanto, excluindo o ponto 1, para todos os

demais, pontos os módulos da velocidade se encaminharam para o mesmo valor no estado permanente.

Para uma análise numa escala menor, analisou-se o ponto 6 no intervalo de tempo onde chega a estabilidade dos valores da velocidade da água, ou seja, entre 6 a 10 segundos e plotou-se os gráficos com três casas decimais, conforme Figura 3.18. Na figura observa-se as oscilações dos valores das velocidades simuladas com os Número de Courant iguais a 114 e 56, novamente mostrando que foram as que mais divergiram das demais.

Após a análise dos gráficos, pode-se concluir que apenas os Números de Courant 114 e 56 dão uma razoável divergência dos demais e não devem ser usados para as simulações. Assim, adotou-se para a modelagem o valor de número de Courant igual a 3,5.

Figura 3.18 – Variação do módulo da velocidade da água ao longo do tempo para diferentes números de Courant – Ponto 6.



Abaixo está a Tabela 3.5 com os valores da velocidade da água, no instante igual a 8,00s, nos seis pontos estudados, para os números de Courant iguais a 1,7, 3,5, 14, 28, 56 e 114. Além disso, ainda nesta tabela é apresentado o erro máximo entre os valores da velocidade da água para as simulações com os maiores números de Courant.

Tabela 3.5 – Valores da velocidade da água nos seis pontos e para os números de Courant estudados. Erro relativo as velocidade da água, para os maiores números de Courant. Instante igual a 8,00 s.

NÚM DE COURANT	PONTO 1	PONTO 2	PONTO 3	PONTO 4	PONTO 5	PONTO 6
1,7	1,506	1,478	1,347	0,908	2,577	3,112
3,5	1,506	1,478	1,347	0,908	2,577	3,112
14	1,506	1,478	1,347	0,908	2,577	3,112
28	1,506	1,478	1,347	0,908	2,577	3,112
56	1,508	1,480	1,346	0,907	2,576	3,112
114	1,521	1,486	1,344	0,902	2,572	3,111
ERRO (%)	0,863	0,438	0,182	0,524	0,161	0,027

3.3.1.2 Número de Iterações para cada passo de Tempo

O *software* também possui um número padrão de iterações para cada passo de tempo, esse valor também foi verificado a fim de garantir o melhor número de iterações. Dessa forma, simulou-se para os valores de 2, 5, 10 (número padrão de iterações por passo de tempo, sugerido pelo *software*) e 20, obtendo o valor da velocidade da água ao longo do tempo nos seis pontos definidos na Seção 5.3.2.1. As simulações foram realizadas na malha intermediária (Malha 3) e o critério de parada foi a obtenção da estabilidade dos valores, conforme Figura 3.19 e a Figura 3.24.

Figura 3.19 - Variação do módulo da velocidade da água ao longo do tempo para diferentes números de iterações de cada passo de tempo – Ponto 1.

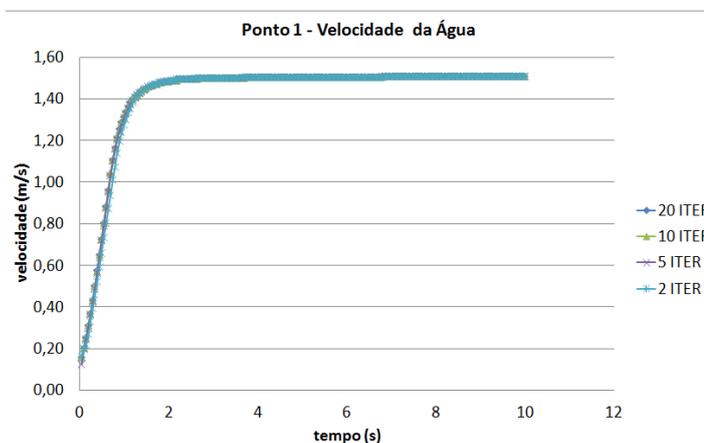


Figura 3.20 - Variação do módulo da velocidade da água ao longo do tempo para diferentes números de iterações de cada passo de tempo – Ponto 2.

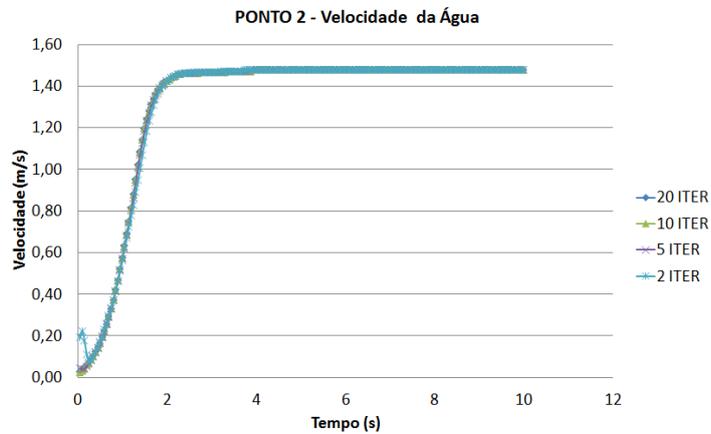


Figura 3.21- Variação do módulo da velocidade da água ao longo do tempo para diferentes números de iterações de cada passo de tempo – Ponto 3.

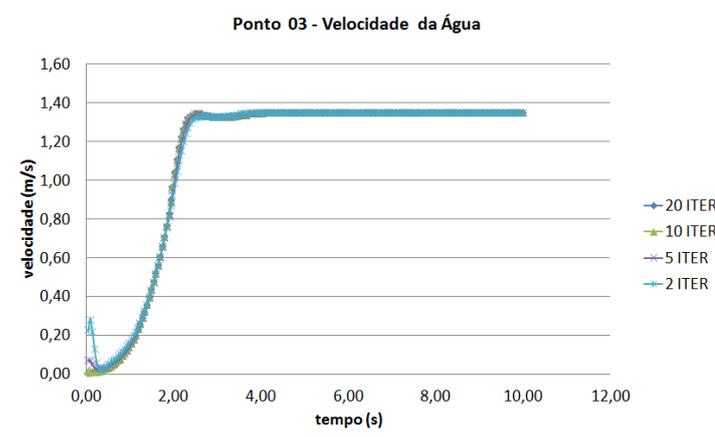


Figura 3.22 - Variação do módulo da velocidade da água ao longo do tempo para diferentes números de iterações de cada passo de tempo – Ponto 4.

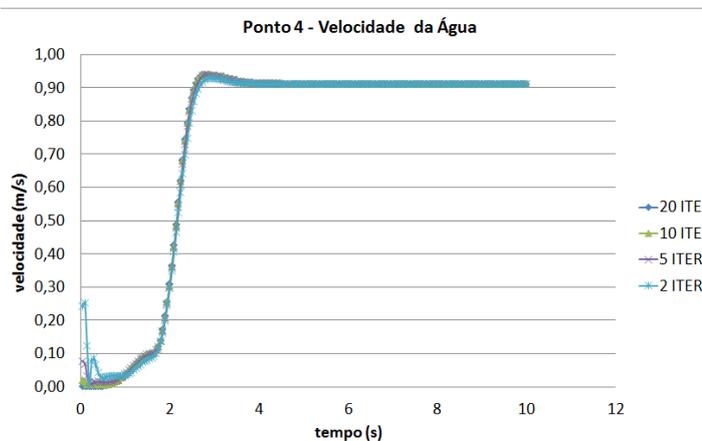


Figura 3.23 - Variação do módulo da velocidade da água ao longo do tempo para diferentes números de iterações de cada passo de tempo – Ponto 5.

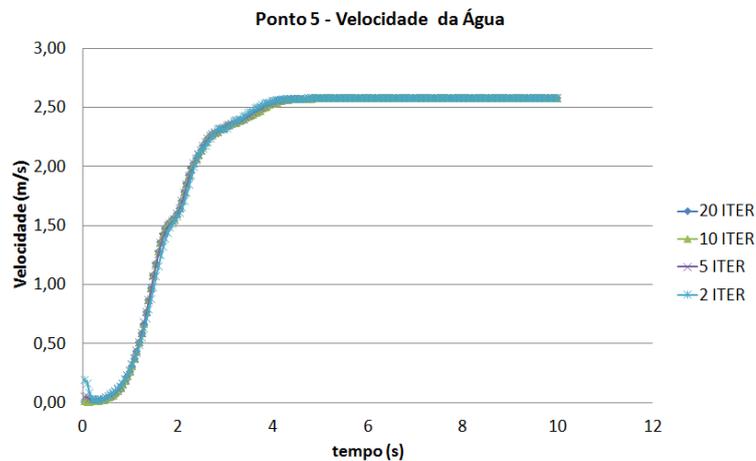
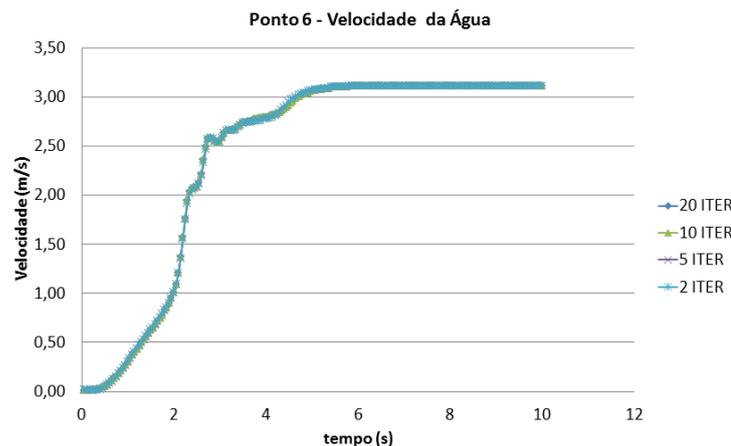


Figura 3.24 - Variação do módulo da velocidade da água ao longo do tempo para diferentes números de iterações de cada passo de tempo – Ponto 6.



Logo percebemos que não há grandes variações nos módulos da velocidade da água ao longo do tempo, com a mudança da quantidade de iterações para cada passo de tempo. Realizando no ponto 5 um estudo mais detalhado do período que se alcança a permanência do valor da velocidade, conforme a Figura 3.25, nota-se que existem oscilações na ordem de 10^{-4} para os valores da velocidade simulados com 2 iterações em relação aos demais. Portanto, esse número de iterações deve ser descartado. Após a análise, foi escolhido para a simulação o número de 10 iterações, conforme o valor padrão sugerido pelo software, para cada passo de tempo, visando a solução com menor custo computacional.

3.4 Testes de Convergência das Malhas

Para a escolha da malha que servirá como base para as simulações foi realizado o teste de convergência das malhas, nesse teste deve ser observado até qual grau o refinamento da malha interfere consideravelmente na alteração do resultado final. Logo, foram analisados os produtos das simulações das cinco malhas geradas, nos pontos estabelecidos na Seção 4.3.1.1 e comparou-se a divergência dos resultados. O teste consistiu no monitoramento do módulo da velocidade da água ao longo do processo, sendo acompanhada até se obter a permanência do valor. As velocidades obtidas são comparadas e verificadas as divergências entre os resultados, conforme a Figura 3.26 a Figura 3.31.

Figura 3.26 - Variação do módulo da velocidade da água ao longo do tempo para todas as malhas modeladas – Ponto 1.

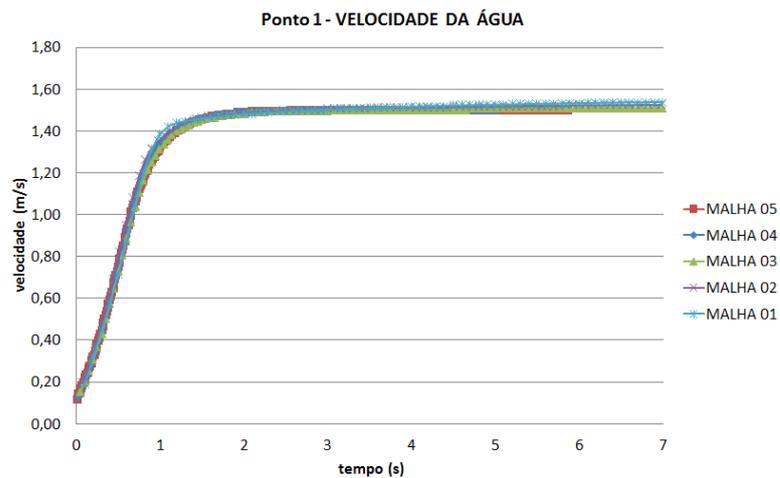


Figura 3.27 - Variação do módulo da velocidade da água ao longo do tempo para todas as malhas modeladas – Ponto 2.

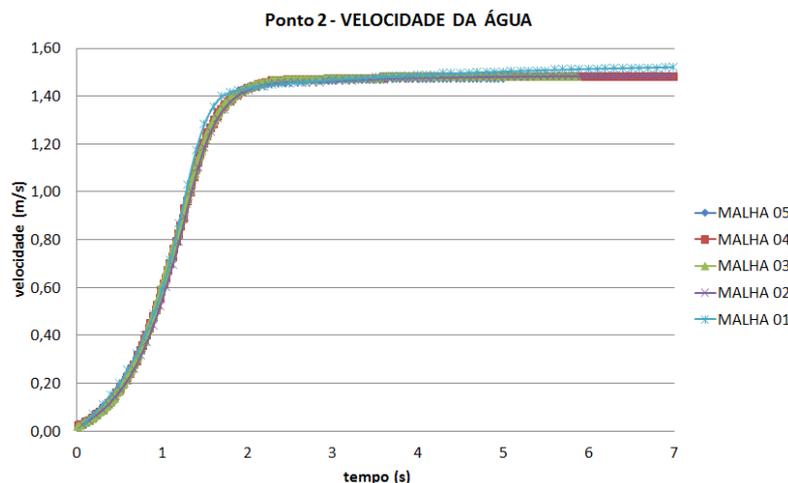


Figura 3.28 - Variação do módulo da velocidade da água ao longo do tempo para todas as malhas modeladas – Ponto 3.

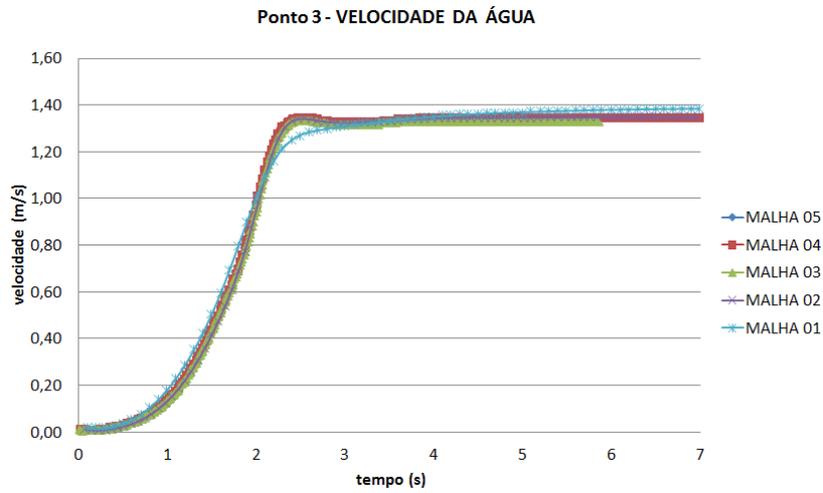


Figura 3.29 - Variação do módulo da velocidade da água ao longo do tempo para todas as malhas modeladas – Ponto 4.

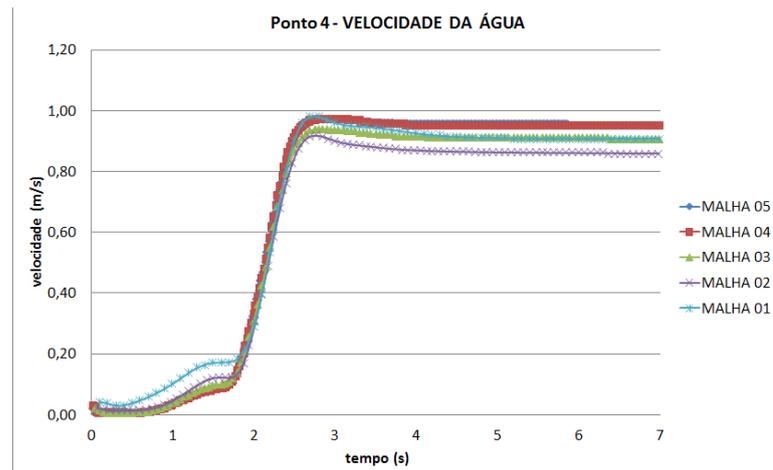


Figura 3.30 - Variação do módulo da velocidade da água ao longo do tempo para todas as malhas modeladas – Ponto 5.

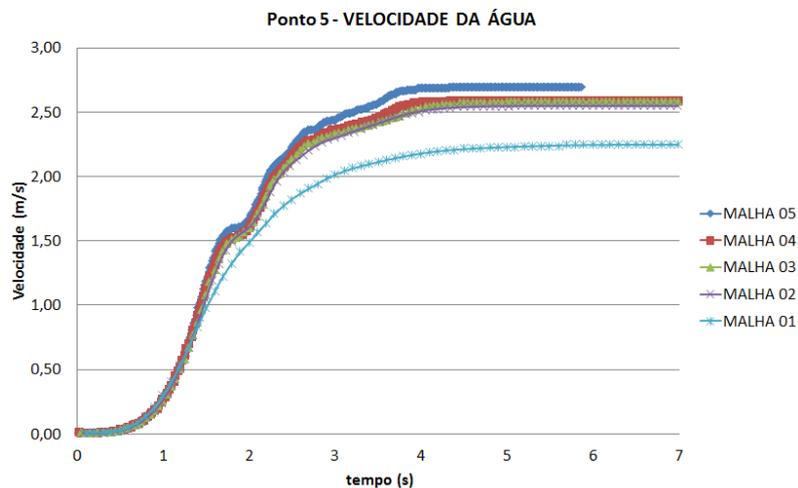
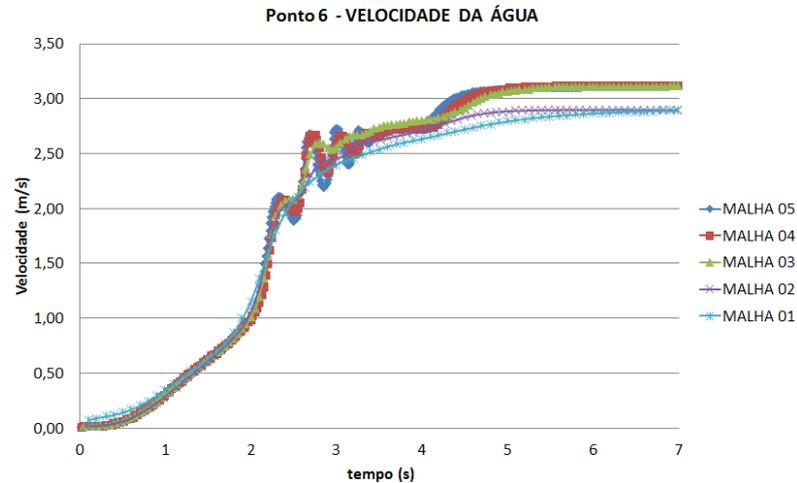


Figura 3.31 - Variação do módulo da velocidade da água ao longo do tempo para todas as malhas modeladas – Ponto 6.



Ao comparar os resultados dos módulos da velocidade da água após a permanência dos valores, para as cinco malhas, em todos os pontos, tem-se que o maior erro relativo entre a malha 5 e a malha 4 é de 3,64% no ponto 5, isso mostra que a malha 4 apresenta condições para representar a modelagem computacional com o menor custo atrelado.

Abaixo está a Tabela 3.7 com os valores da velocidade da água, no instante igual a 6,00s, nos seis pontos estudados, para as cinco malhas. Além disso, ainda nesta tabela é apresentado o erro máximo entre os valores da velocidade da água para as simulações com as malha 4 e 5.

Tabela 3.7 – Valores da velocidade da água nos seis pontos para as cinco malhas simuladas. Erro relativo as velocidades da água, das malhas 4 e 5. Instante igual a 6,00 s.

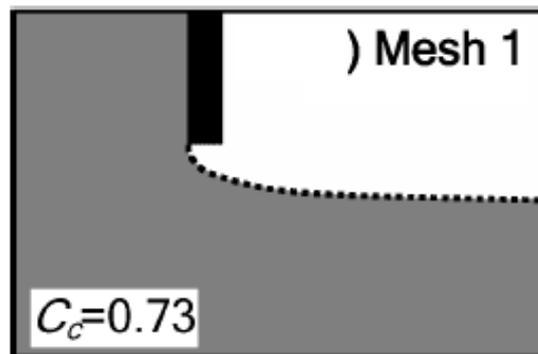
MALHA	PONTO 1	PONTO 2	PONTO 3	PONTO 4	PONTO 5	PONTO 6
1	1,526	1,503	1,370	0,909	2,228	2,793
2	1,518	1,481	1,347	0,862	2,545	2,886
3	1,503	1,477	1,347	0,910	2,576	3,062
4	1,502	1,480	1,343	0,951	2,594	3,111
5	1,502	1,479	1,329	0,955	2,691	3,093
ERRO (%)	0,045	0,048	1,055	0,423	3,769	0,569

3.5 Verificação do Modelo

A validação do modelo não foi realizada, pois o canal do Laboratório de Hidráulica do CTG-UFPE estava em reforma na época do desenvolvimento desse projeto, por isso não foi possível realizar a validação do modelo. Assim, o modelo foi apenas verificado. Para verificação do modelo foi comparado o perfil de superfície livre do fluxo abaixo da comporta modelada numericamente no presente trabalho (Figura 3.33), com os resultados numéricos e experimentais do escoamento do trabalho de Akoz et al (2009), conforme

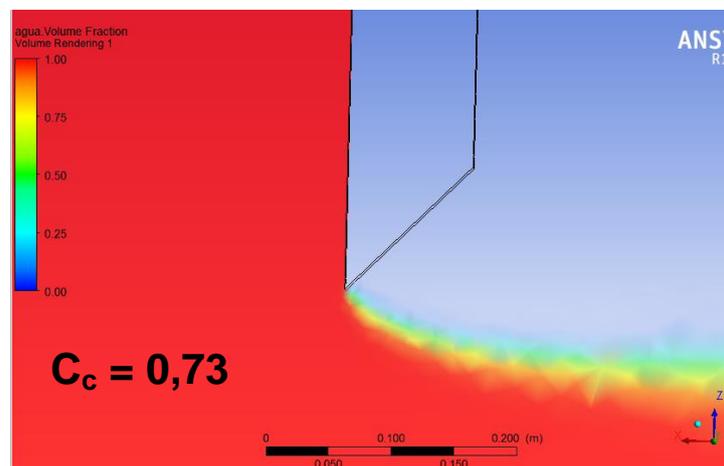
Figura 3.32, para a malha que possui o mesmo coeficiente de contração do modelo simulado, C_c igual a 0,73 além de ter sido simulado com o mesmo modelo de turbulência o $k-\varepsilon$ padrão.

Figura 3.32 – Perfil de superfície livre computacional e experimental na região abaixo da comporta, usando o modelo de turbulência $k-\varepsilon$ padrão para a malha 1. A linha tracejada representa os perfis de superfície livre experimental.



Fonte - Akoz et al (2009).

Figura 3.33 – Perfil de superfície livre computacional na região abaixo da comporta.

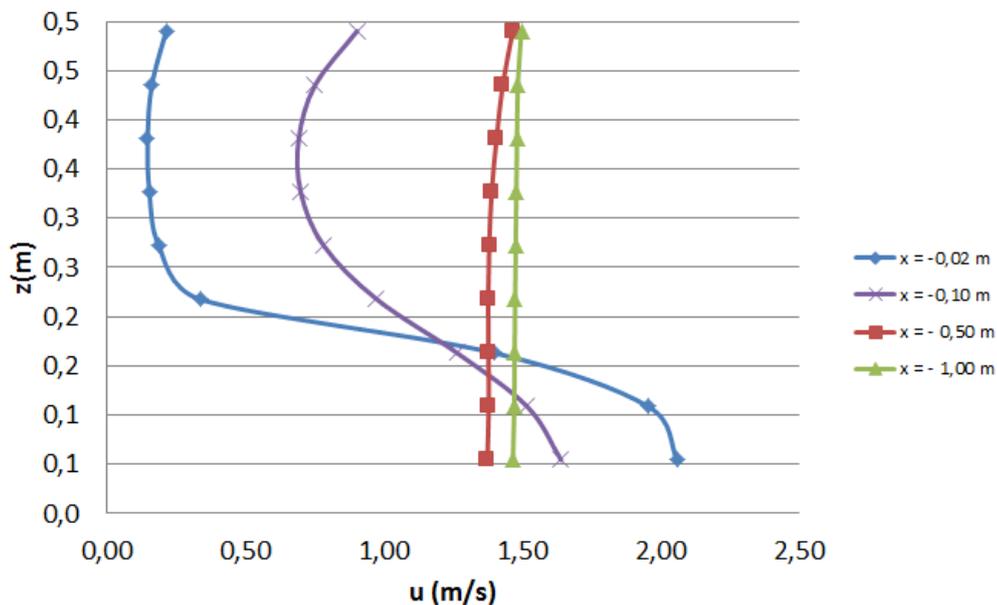


A partir da comparação do perfil de superfície livre do fluxo hidráulico abaixo da comporta, obtido experimentalmente por Akoz et al (2009), com o simulado numericamente nesse trabalho, pode-se observar que não há grandes divergências na forma da superfície do fluxo. Além disso, não existem imperfeições como aderências hidráulicas na base da comporta. Logo, isso indica que os resultados simulados nesse trabalho são razoáveis para representar o fenômeno.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

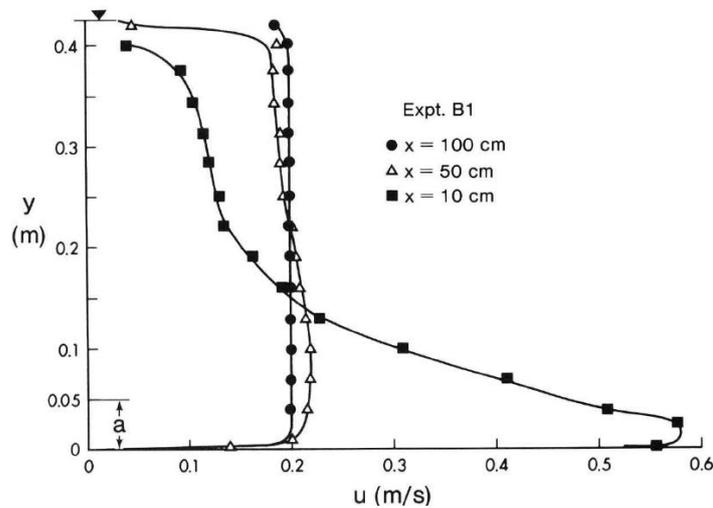
A partir das informações relatadas, foi possível realizar as simulações em estado transiente do modelo mais adequado para representar o fenômeno e que garanta um resultado dentro do esperado com o menor custo computacional possível. Toda simulação foi realizada com o canal completamente cheio a fim de estudar como se comporta a zona de recirculação, que é uma forte zona de turbulência como descrito por Rajaratnam e Humphries (1982), nesse caso. Segundo Cassan e Belaud (2012), esta zona ocorre em $-1 < x/W < 0$, onde W é o comprimento de abertura do canal, que vai da base da comporta até o fundo do canal. Logo, plotou-se perfis do módulo da componente longitudinal da velocidade da água (u) nos pontos $x = -1,00\text{m}$, $x = -0,50\text{m}$, $x = -0,10\text{ m}$ e $x = -0,02\text{ m}$, conforme mostra a Figura 4.1, no meio da seção do canal.

Figura 4.1 – Perfis da componente da velocidade da água longitudinal ao canal para $W = 15\text{ cm}$.



Esses perfis assemelham-se ao obtido por Rajaratnam e Humphries (1982), conforme Figura 4.2, identificando a brusca variação da componente da velocidade longitudinal ao canal. O perfil de velocidade torna-se uniforme, à medida que se afasta para a montante da comporta. No entanto, ao se aproximar da parede o perfil se torna mais distorcido, por conta da desaceleração do escoamento provocado pelo barramento.

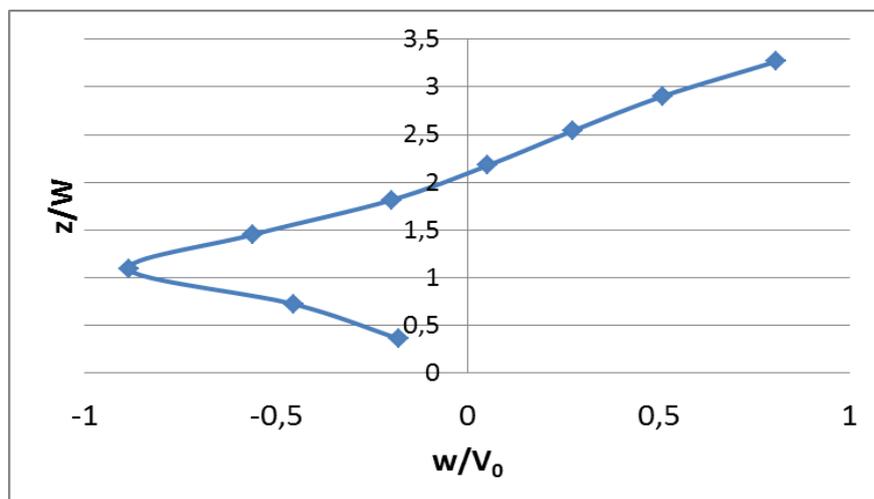
Figura 4.2 – Perfis da componente da velocidade da água longitudinal ao canal, obtidos experimentalmente.



Fonte - Rajaratnam e Humphries (1982).

Também foi plotado o perfil da componente da velocidade perpendicular a base do canal (w) normalizado com a velocidade inicial do escoamento (V_0), na seção mais próximo a comporta a fim de identificar como se comporta a zona de recirculação em canais totalmente cheios, conforme podemos verificar na Figura 4.3.

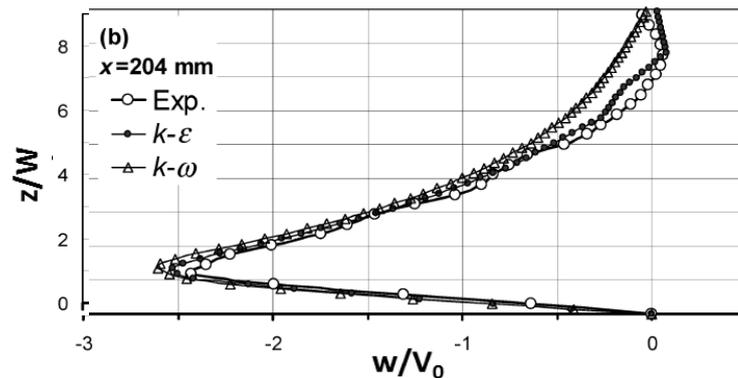
Figura 4.3 – Perfil da componente da velocidade perpendicular a base do canal, para $x = 2$ cm.



Ao comparar a Figura 4.3 com a obtida pelos pesquisadores Cassan e Belaud (2012), Figura 4.4, pode-se notar que os valores de w/V_0 obtidos no presente trabalho não zeram próximo a superfície, mas pouco abaixo da altura média da seção do canal, indicando que a zona de recirculação se encontra, no caso de

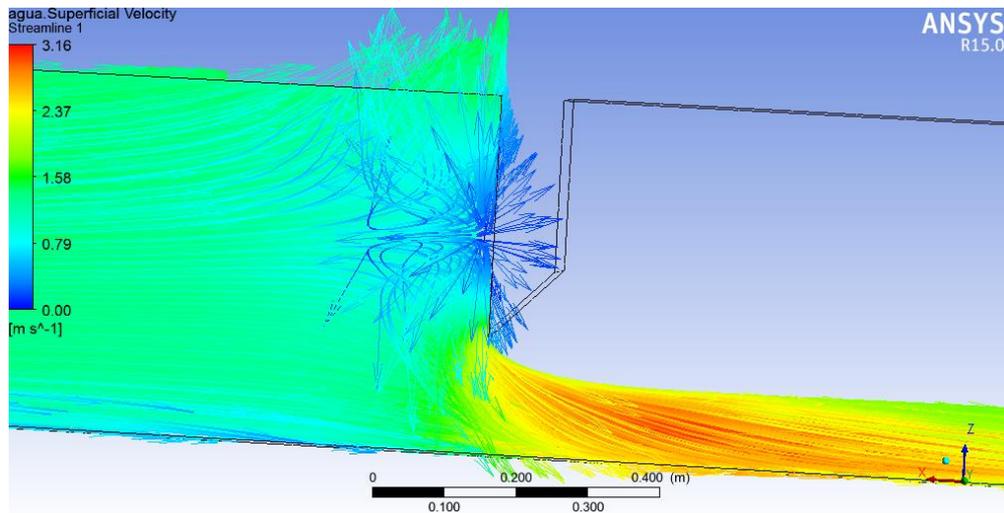
canais cheios, deslocada da superfície. Esse fenômeno pode ser observado na representação das linhas de fluxo, conforme Figura 4.5. Também pode ser inferido que acima da zona recirculação, em canais cheios, há um aumento da velocidade do escoamento, logo a zona de recirculação se torna uma zona de separação do fluxo que transborda acima da comporta e a que escoo para abaixo da mesma.

Figura 4.4 – Perfil da componente da velocidade perpendicular a base do canal.



Fonte - Cassan e Belaud (2012).

Figura 4.5 – Linhas de fluxo do módulo da velocidade da água.



Na interface “Results” foram coletadas as “streamlines” da velocidade da água, para alguns instantes do escoamento, conforme mostrado na Figura 4.6 à Figura 4.13. As linhas representam a variável velocidade da água. Podem-se observar as linhas de escoamento tridimensional e o comportamento do fluxo hidráulico em cada instante indicado.

Figura 4.6 – Linhas de fluxo do módulo da velocidade da água. Tempo = 1,00 s.

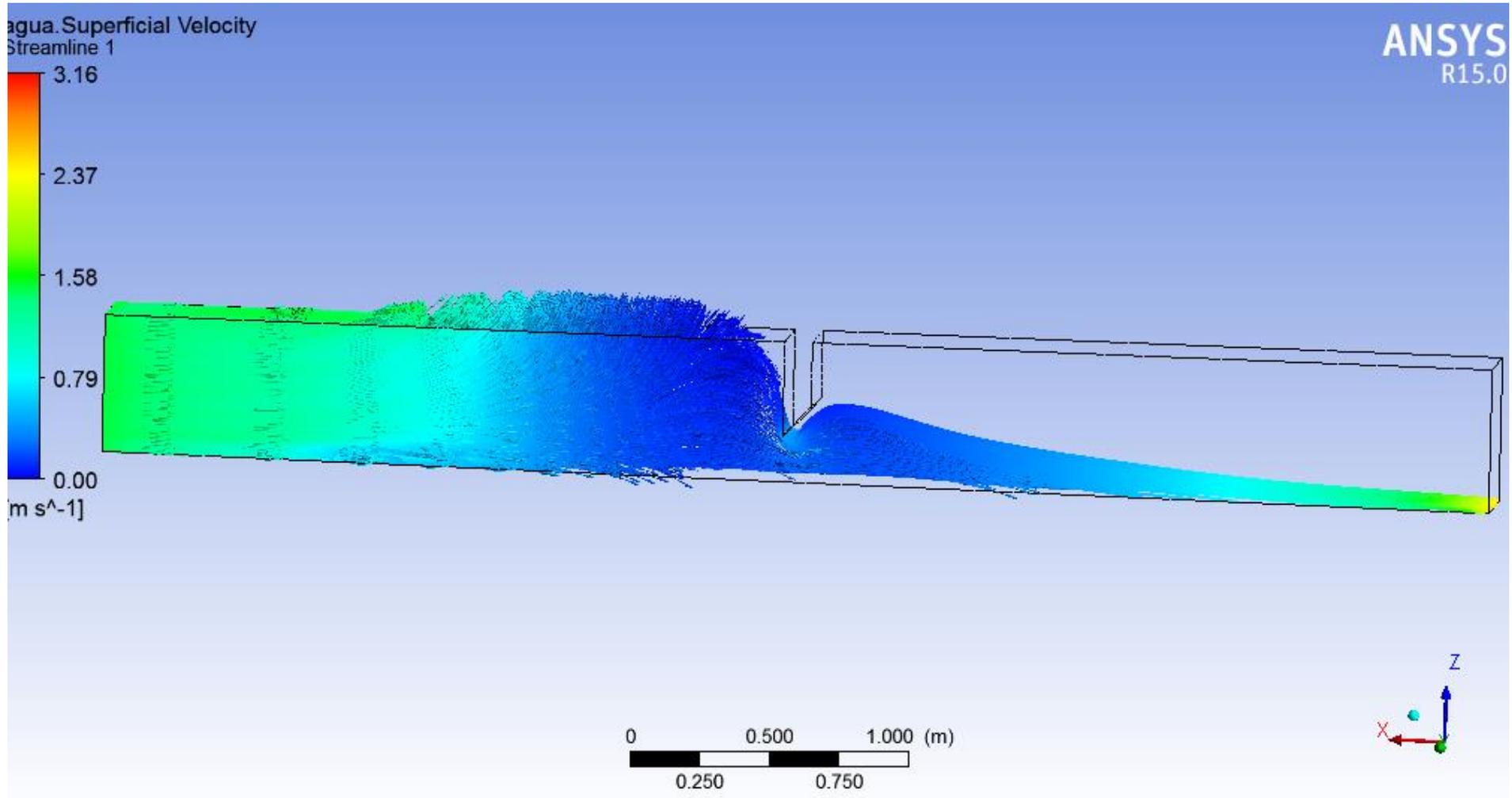


Figura 4.7 – Linhas de fluxo do módulo da velocidade da água. Tempo = 2,00 s.

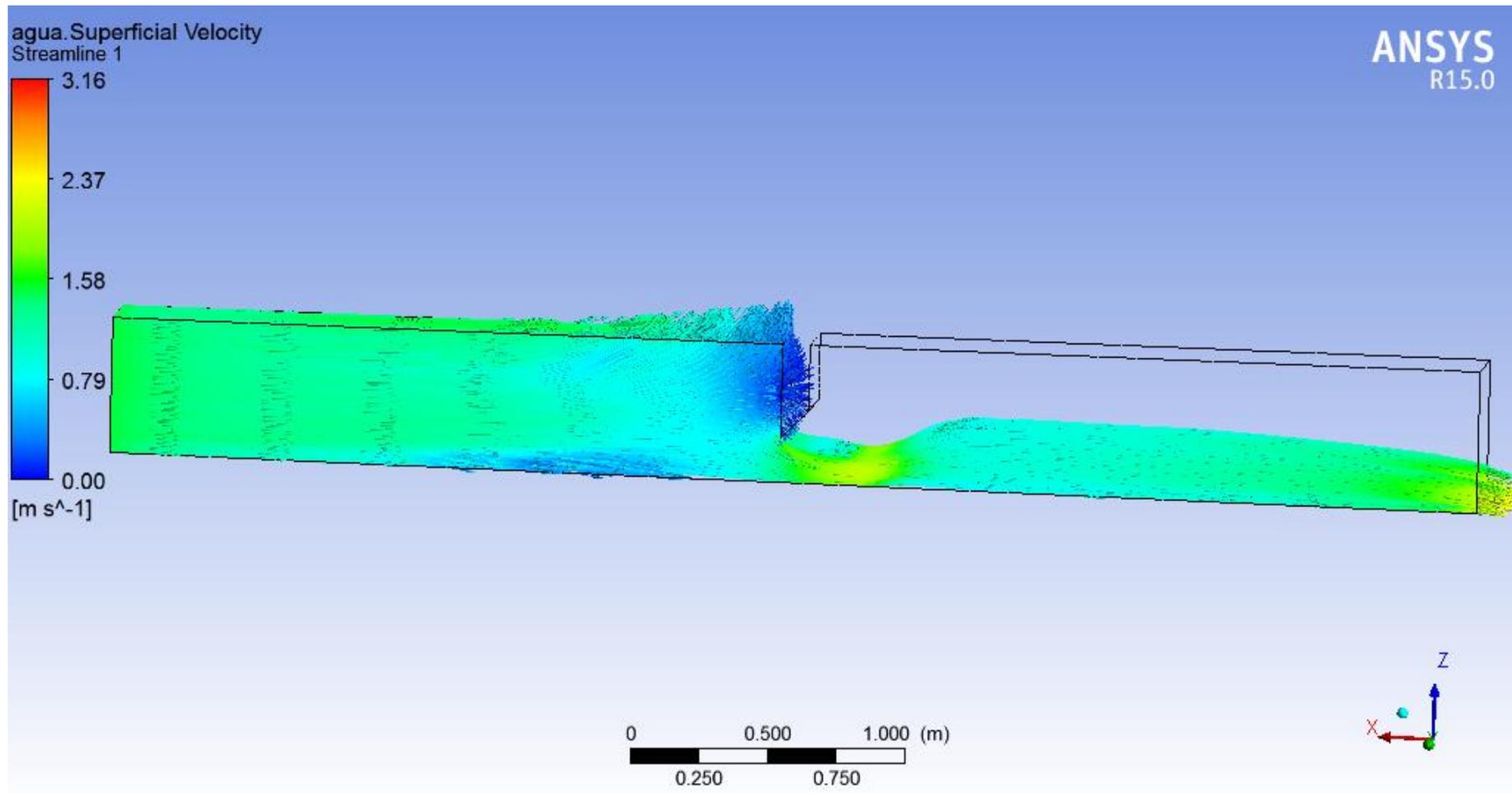


Figura 4.8 – Linhas de fluxo do módulo da velocidade da água. Tempo = 3,00 s.

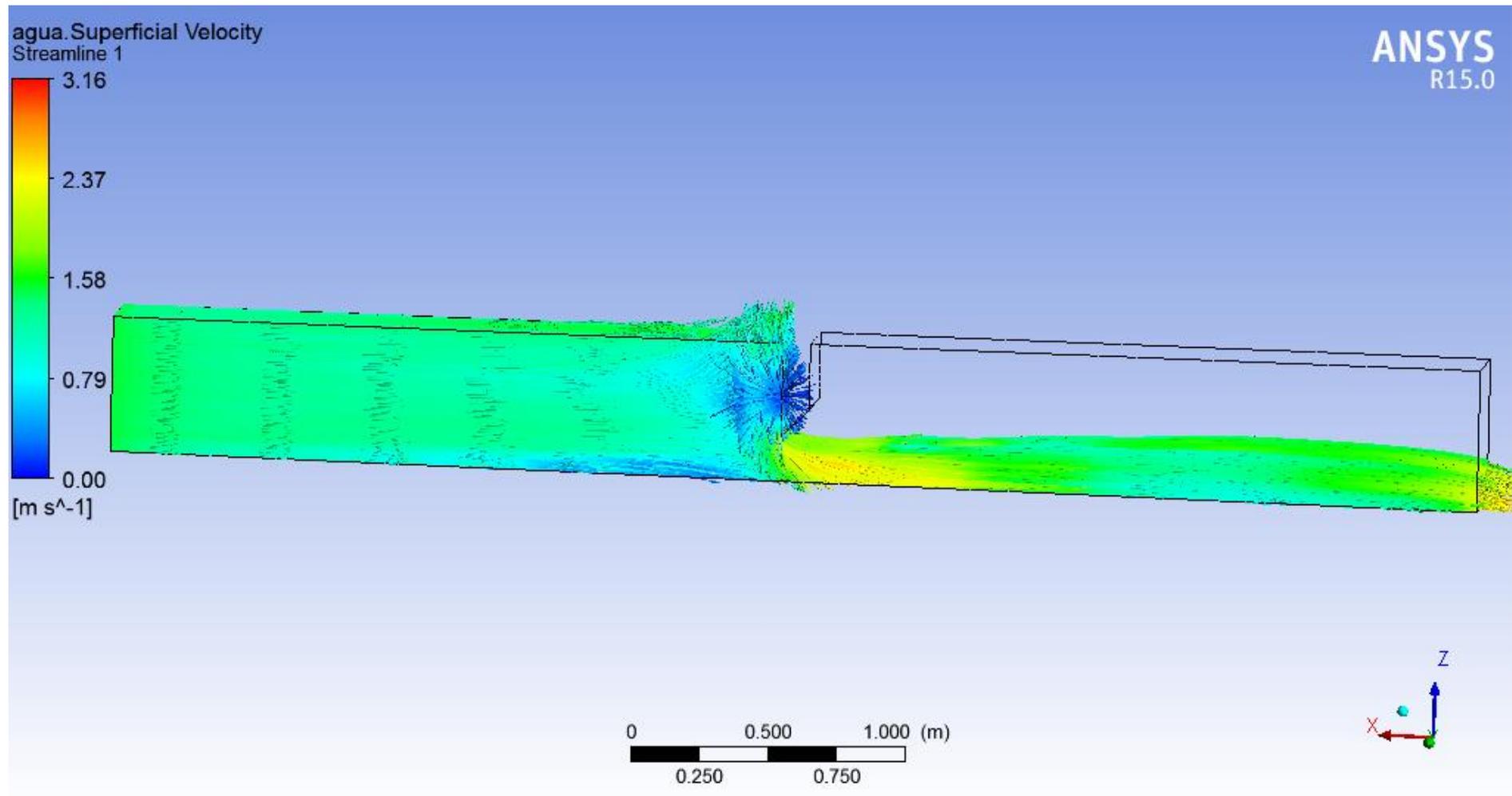


Figura 4.9 – Linhas de fluxo do módulo da velocidade da água. Tempo = 4,00 s.

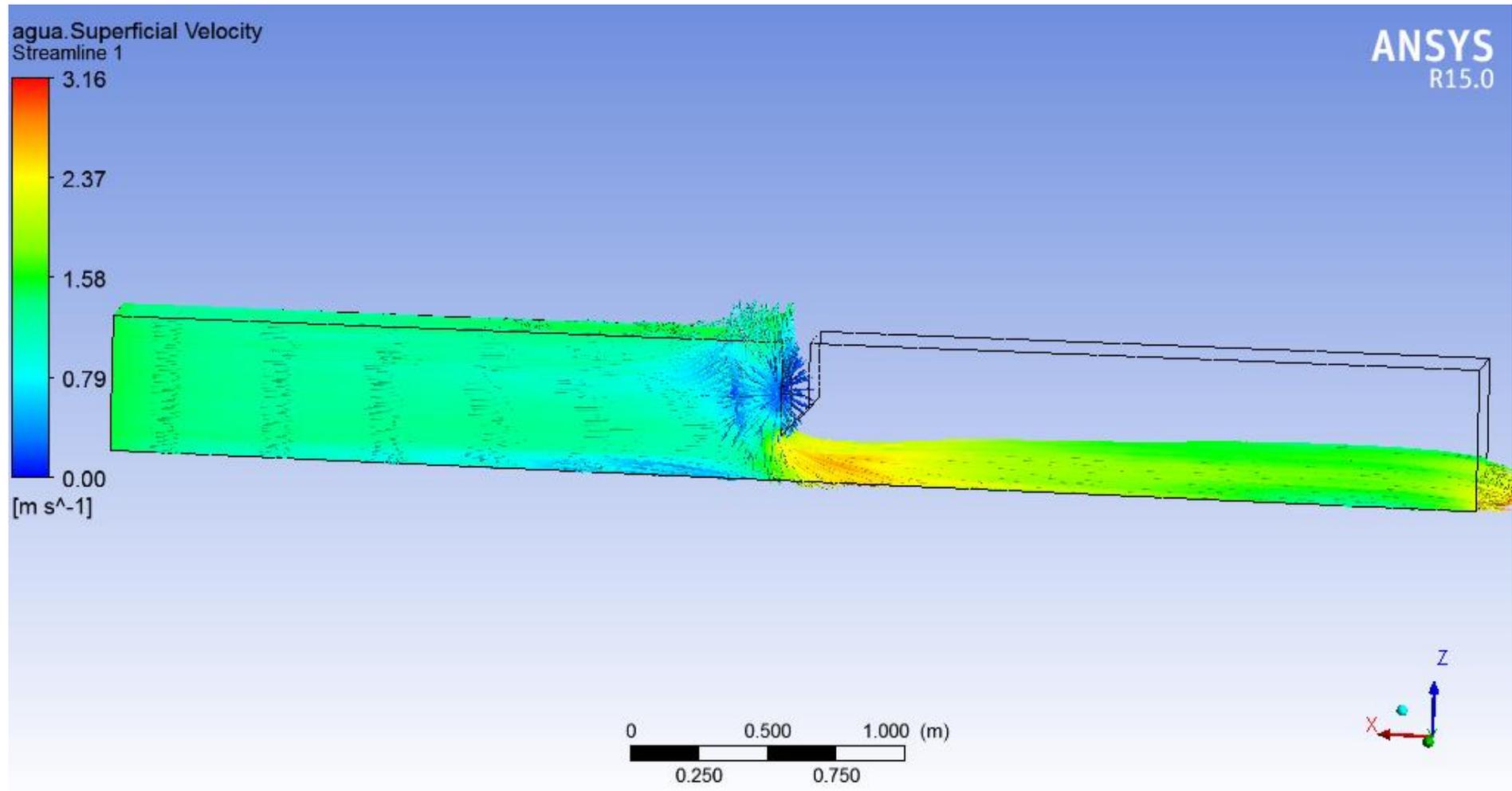


Figura 4.10 – Linhas de fluxo do módulo da velocidade da água. Tempo = 5,00 s.

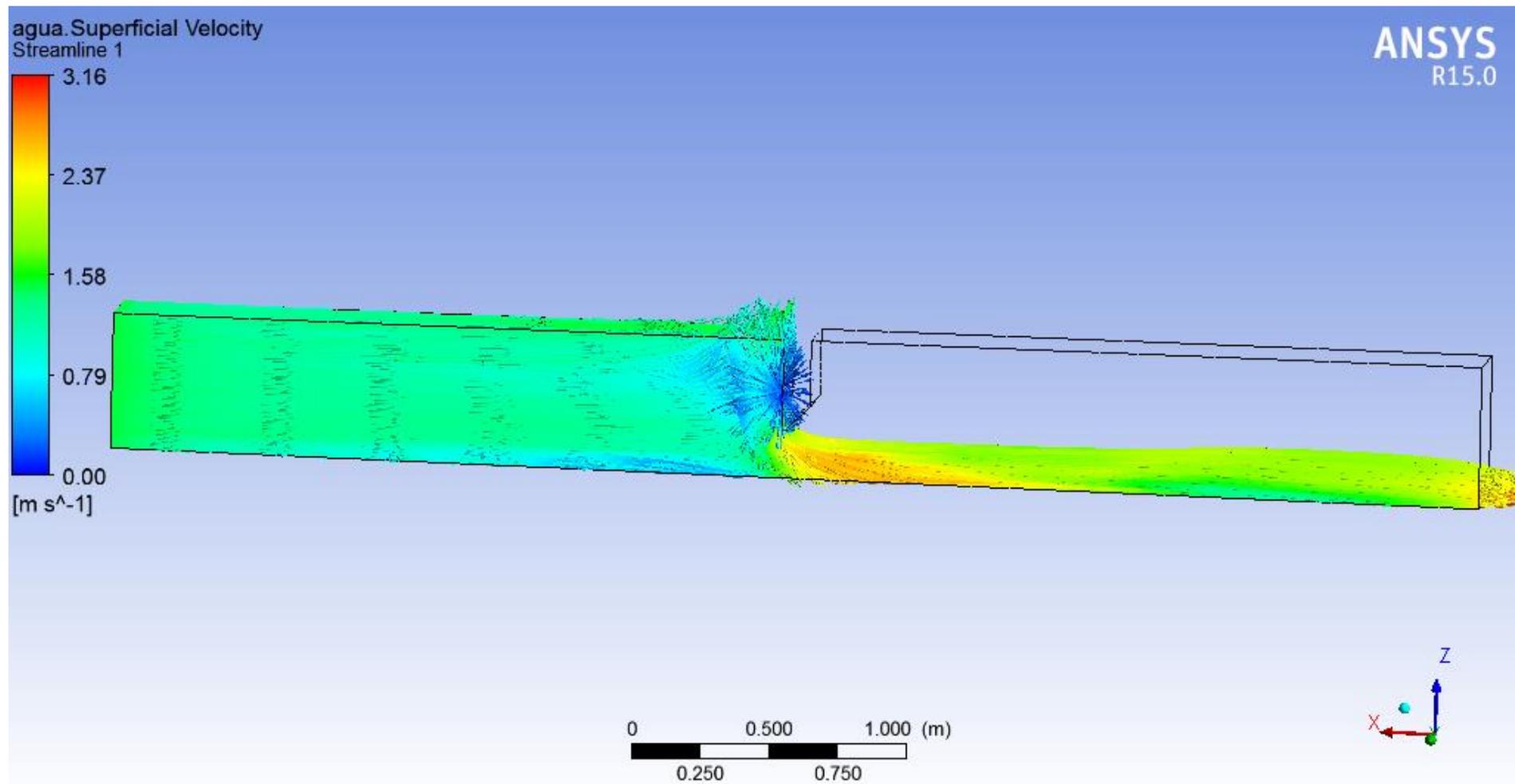


Figura 4.11 – Linhas de fluxo do módulo da velocidade da água. Tempo = 6,00 s.

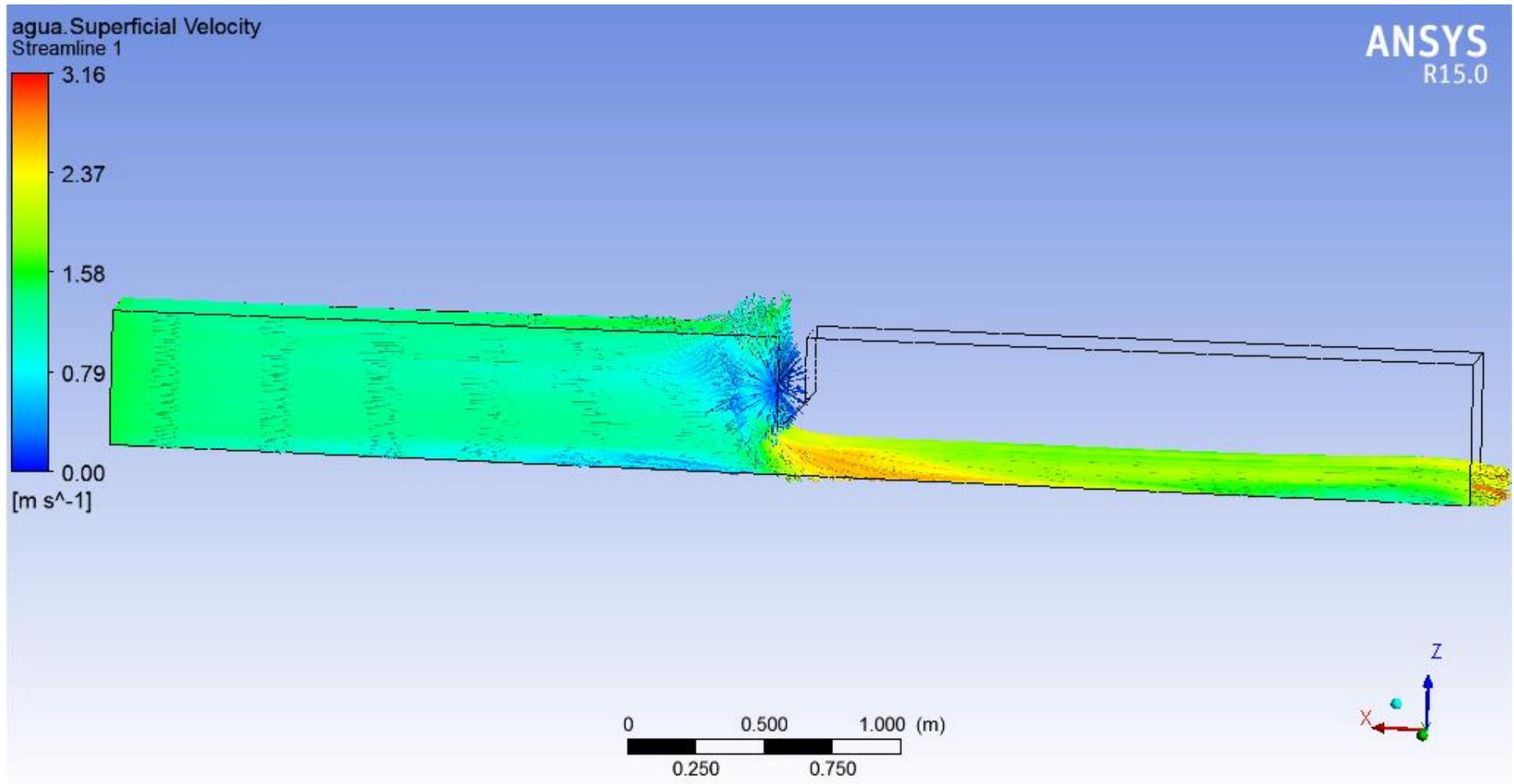


Figura 4.12 – Linhas de fluxo do módulo da velocidade da água. Tempo = 7,00 s.

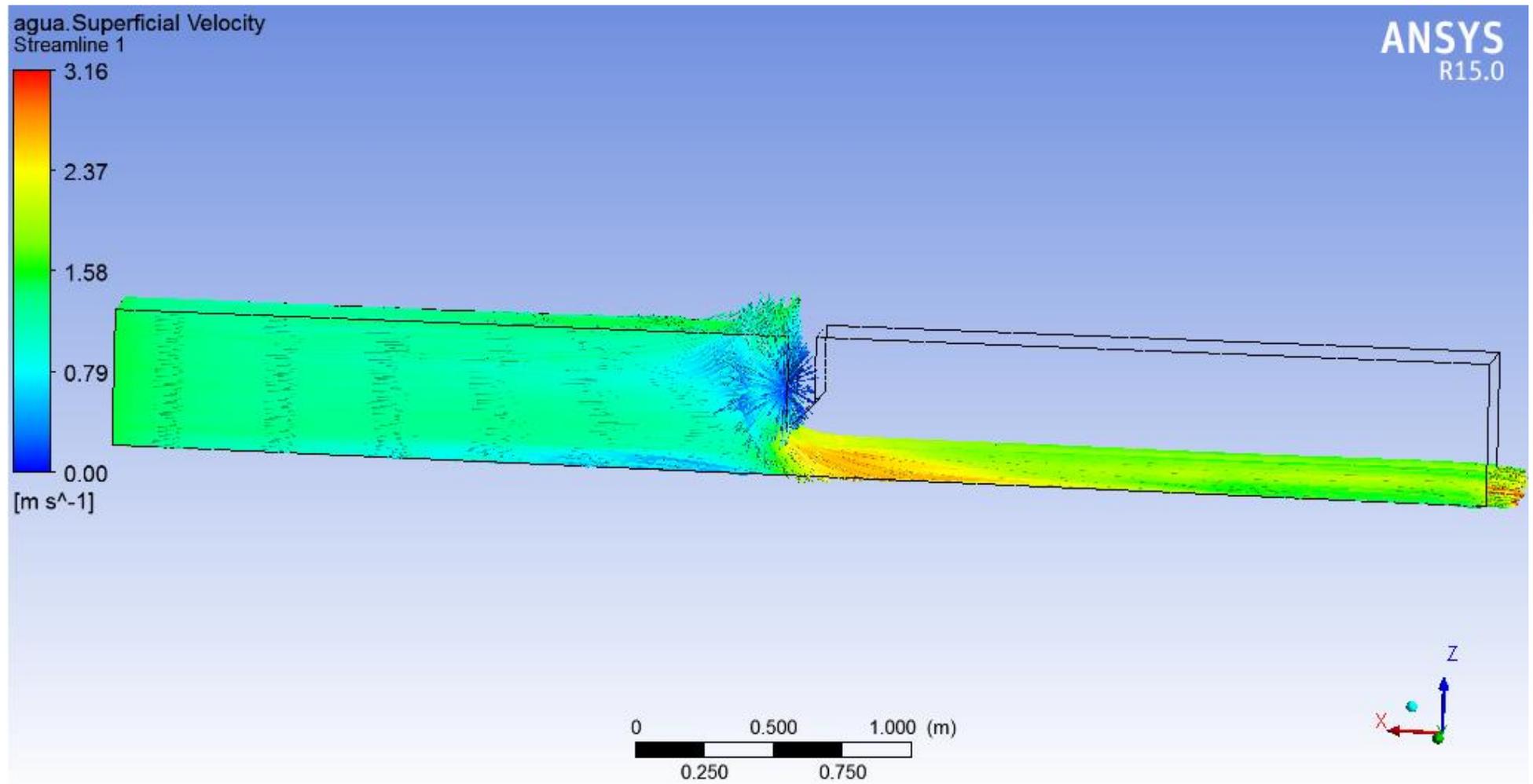
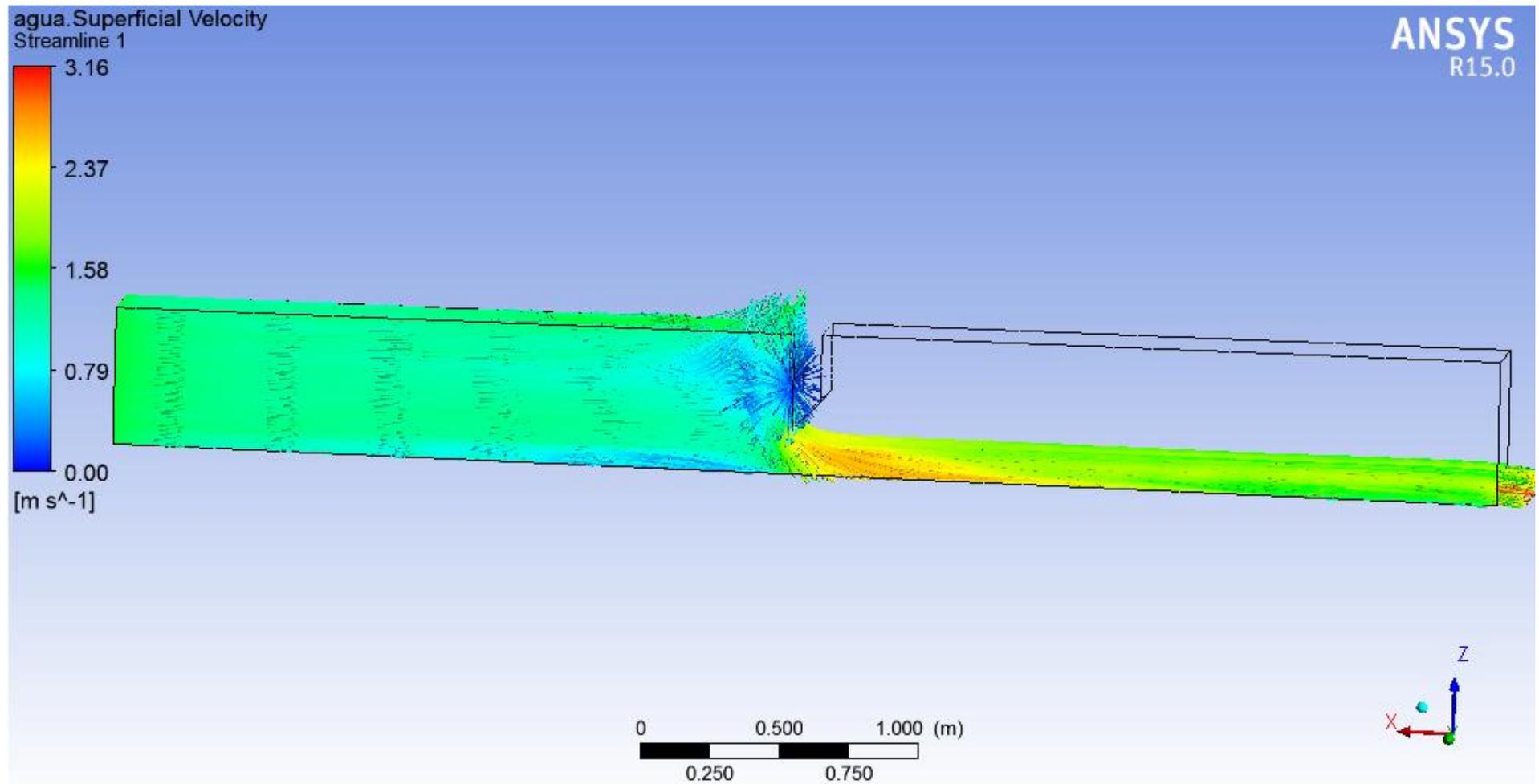


Figura 4.13 – Linhas de fluxo do módulo da velocidade da água. Tempo = 8,00 s.

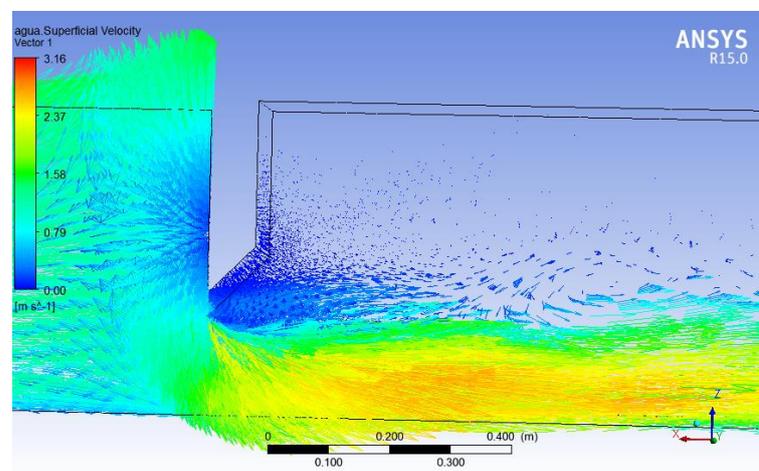


Pode-se observar que no instante igual 1,00 s (Figura 4.6) o escoamento é do tipo afogado, ou seja, a jusante da comporta se encontra parcialmente submersa. A partir de então se forma uma onda de cheia que caminha da comporta até a saída do canal, conforme ilustram as Figura 4.7 à 5.11, que representam as simulações do volume de água nos instantes 2,0s, 4,0s, 5,0s e 6,0s. Após a passagem dessa onda de escoamento o fluxo hidráulico se estabiliza e o escoamento atinge a permanência, não havendo mais mudança em seu comportamento no decorrer do tempo, conforme Figura 4.11 e Figura 4.13.

Ainda ocorre a aceleração do escoamento a jusante da comporta este chegando a seu valor máximo, com o módulo da velocidade da água chegando ao valor de 3,16 m/s.

Outro ponto importante é a simulação das zonas de recirculações do fluxo hidráulico, Figura 4.14, que representa o diagrama dos vetores velocidade da água no instante 3,00 s. Pode-se notar uma forte zona de turbulência a jusante da comporta.

Figura 4.14 – Diagrama dos vetores velocidade da água no instante 3,00 s.



Podemos verificar com a análise da fração de volume de água a formação de uma onda de cheia a partir do instante igual a 3,80 s, Figura 4.15, essa onda avança através do canal até a saída do domínio, conforme mostram as Figura 4.16 à Figura 4.18.

Figura 4.15 – Fração do volume da água no instante 3,80 s.

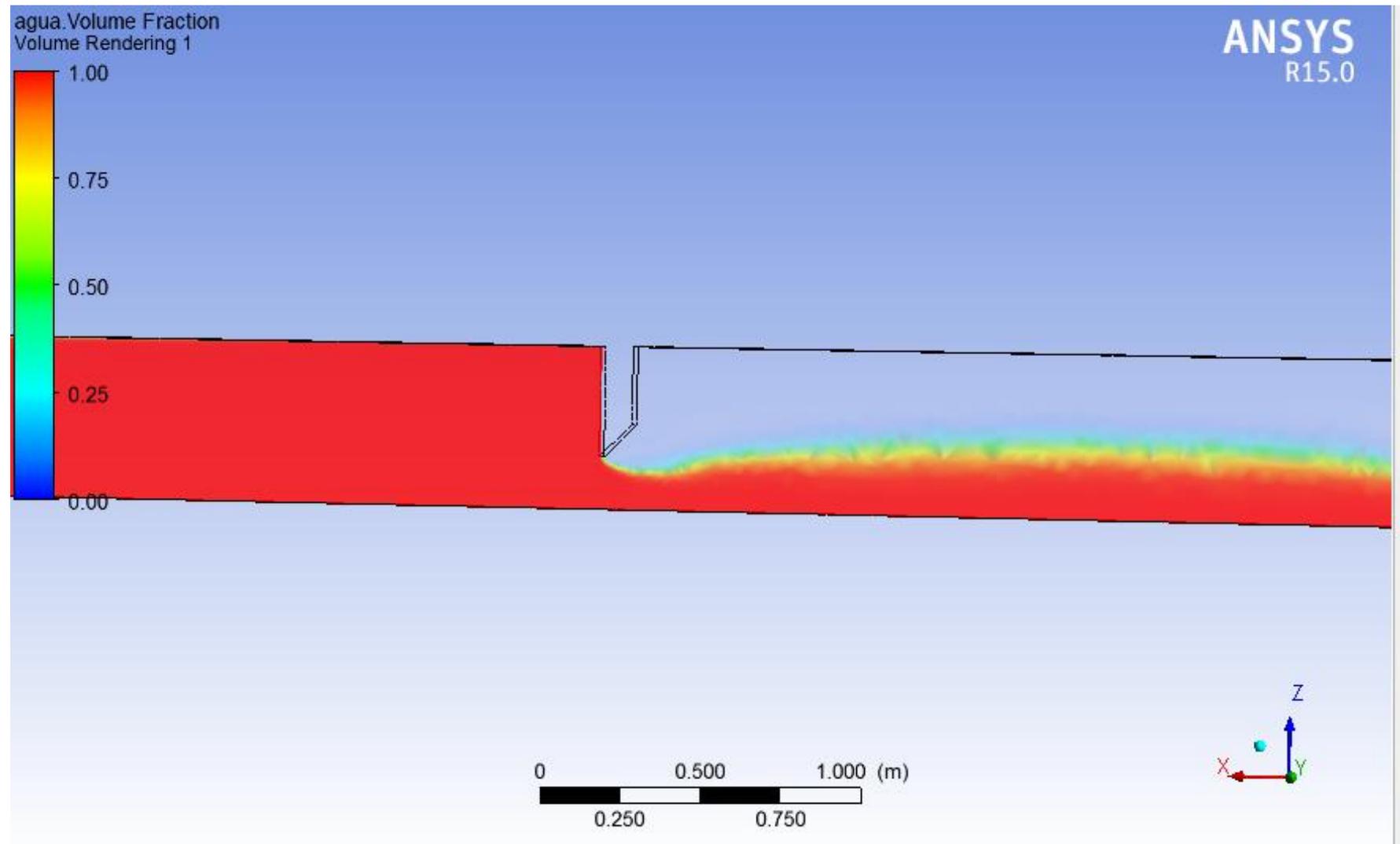


Figura 4.16 – Fração do volume da água no instante 4,00 s.

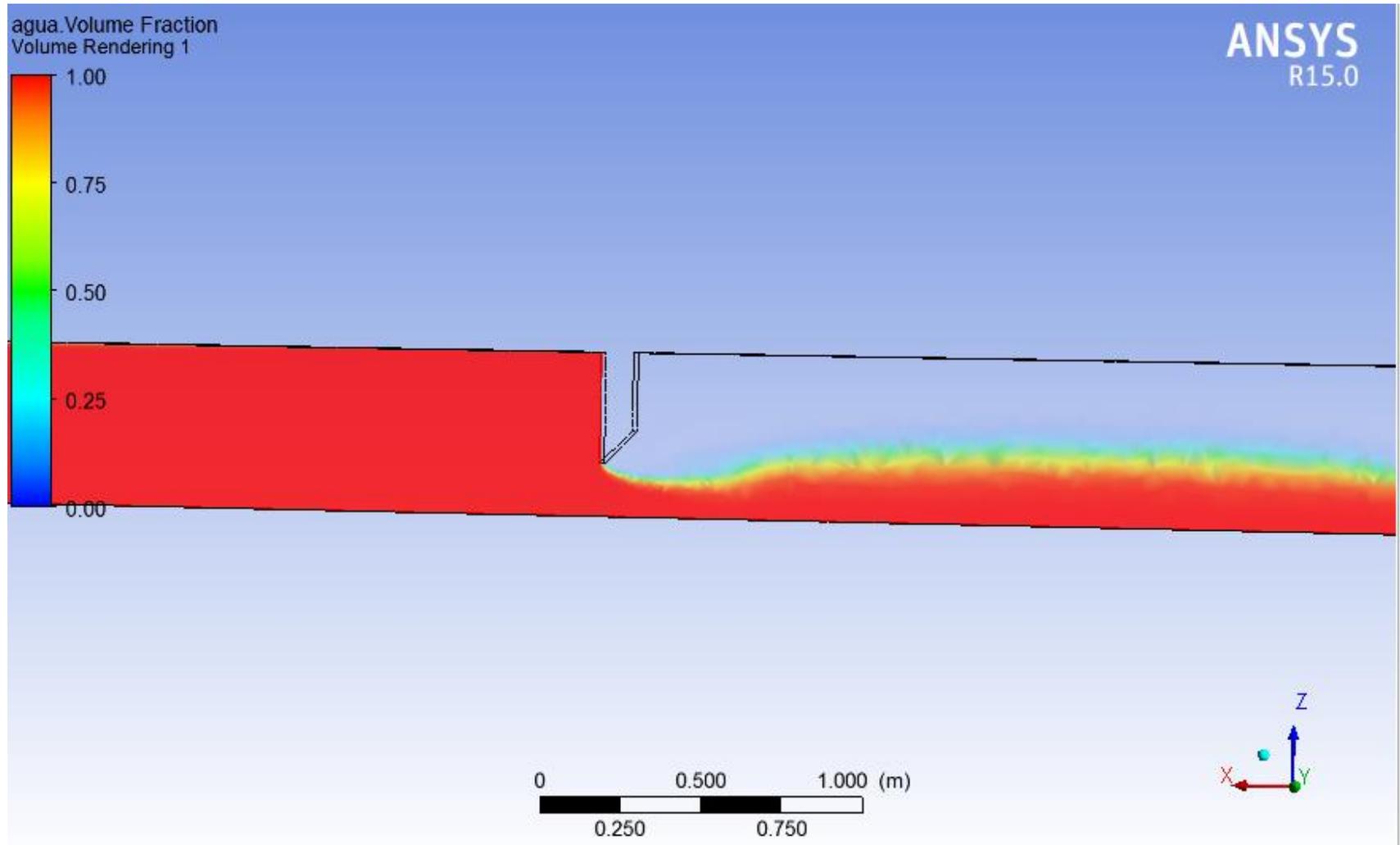


Figura 4.17 – Fração do volume da água no instante 4,50 s.

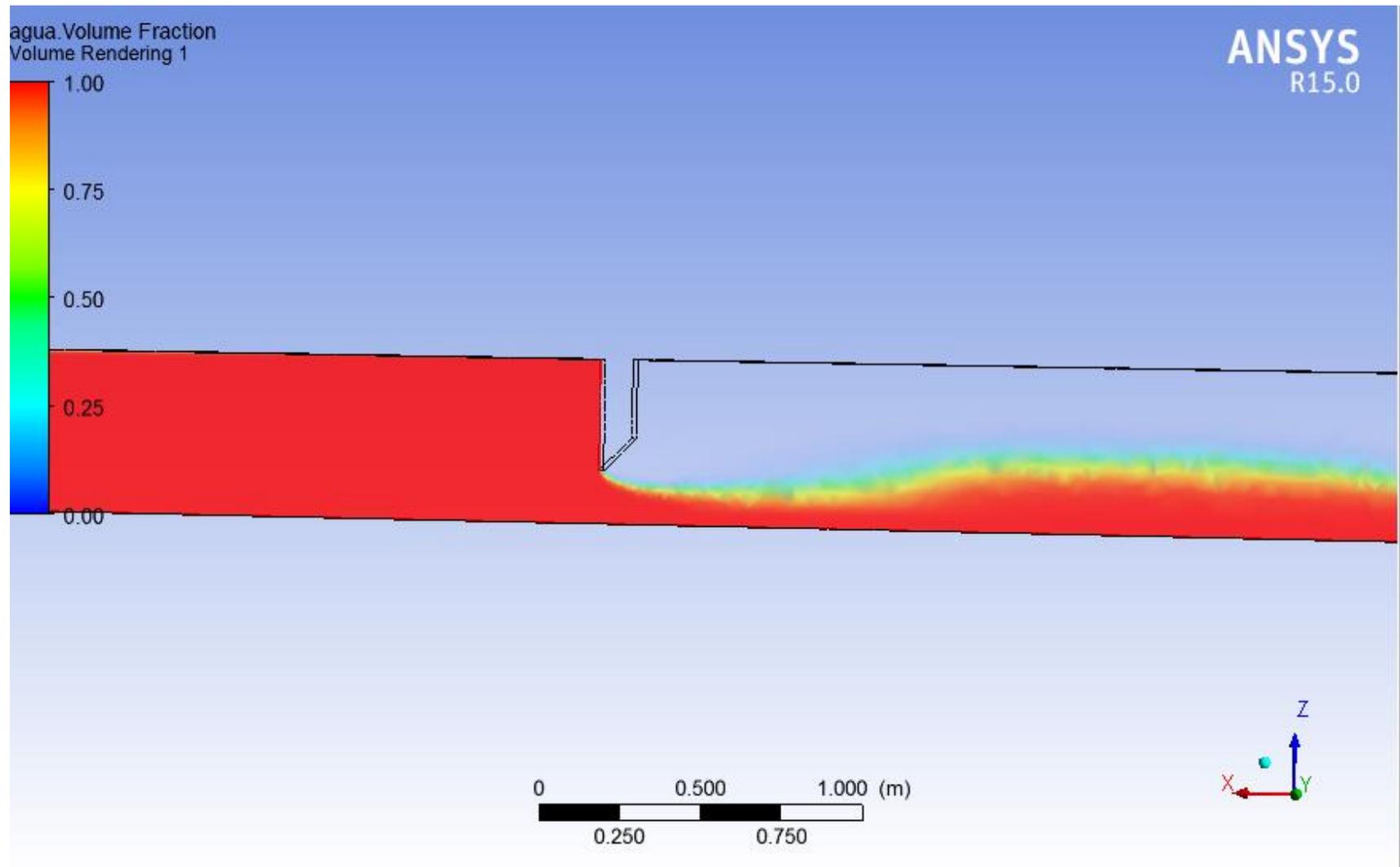
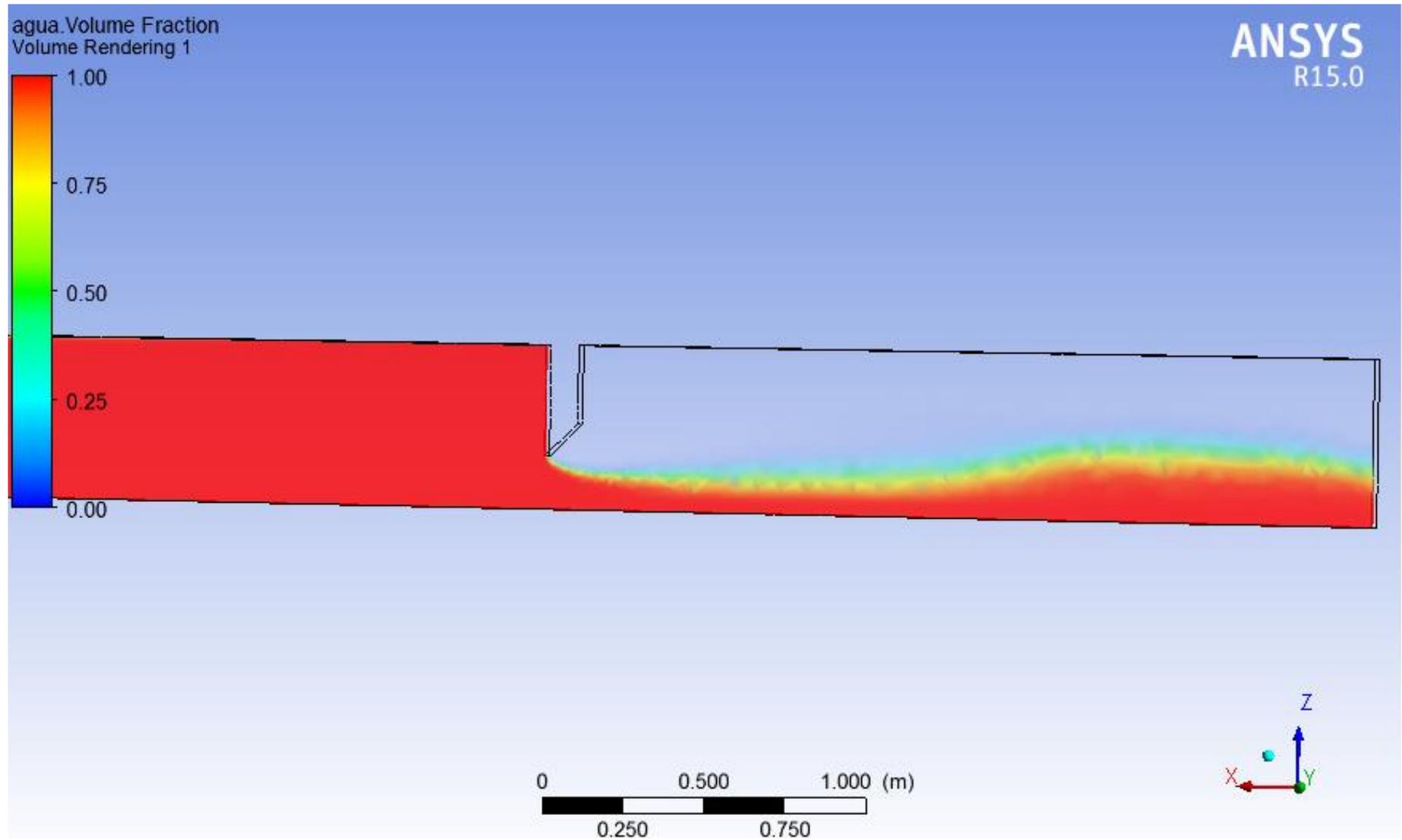
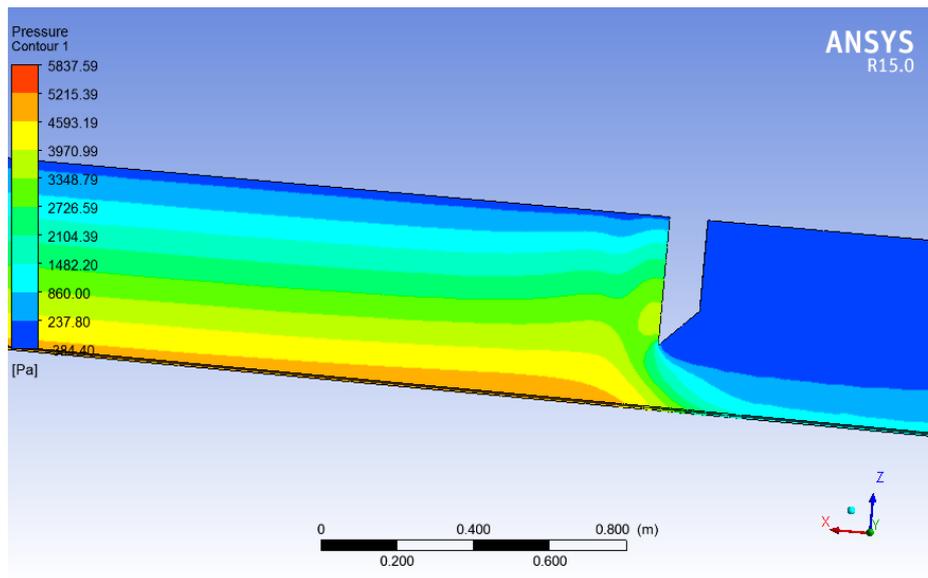


Figura 4.18 – Fração do volume da água no instante 5,00 s.



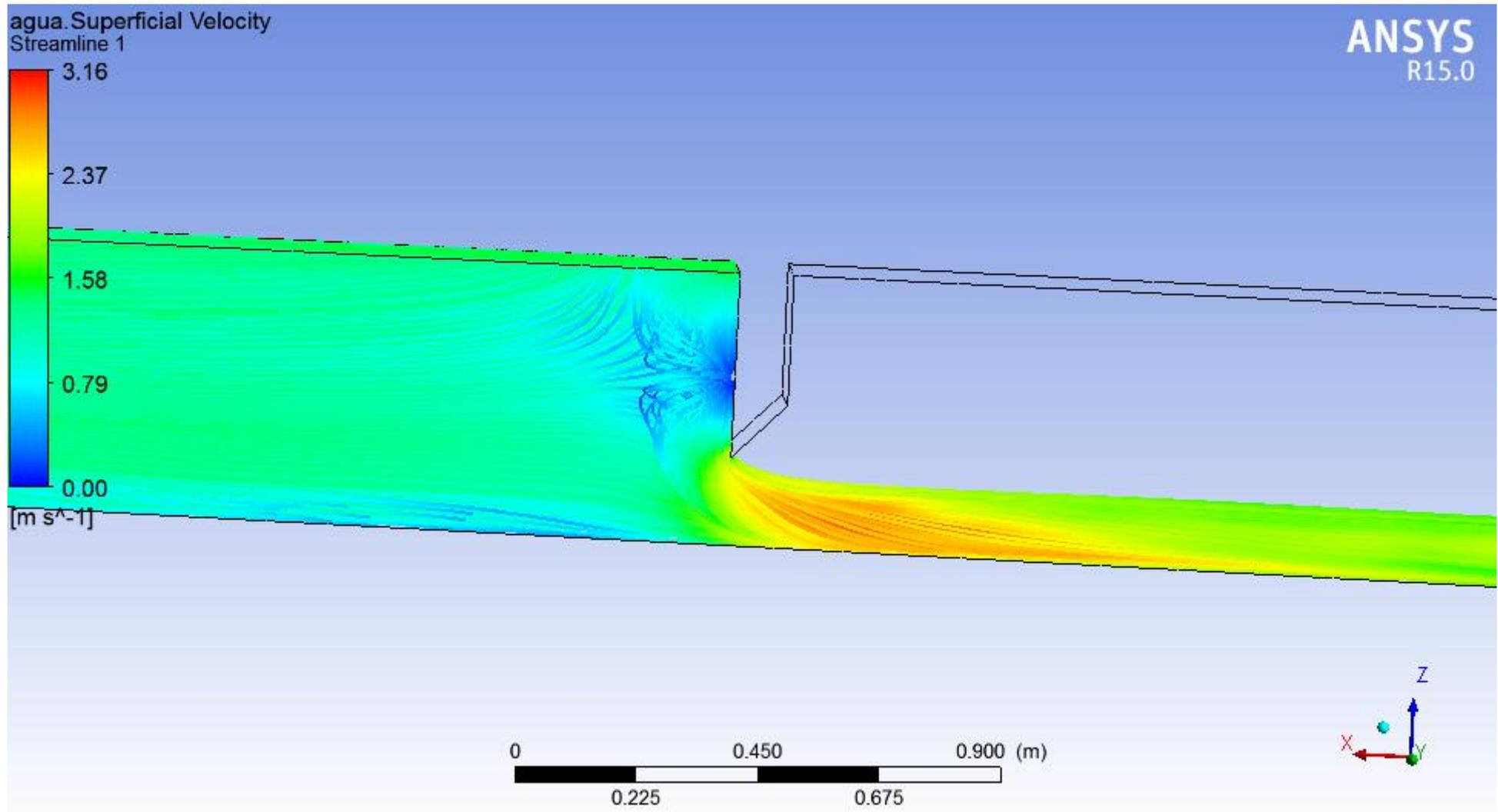
Na Figura 4.19, podemos observar o diagrama de pressão relativa na parede do canal em Pascal, nota-se que os maiores valores estão no fundo do canal, devido à altura de coluna de água, chegando a um valor de 5215,39 Pascal, e na região a montante da comporta, onde percebeu a formação da zona de separação do escoamento, esta região possui uma pressão relativa de 4593,19 Pascal.

Figura 4.19 – Diagrama de pressão no instante 7,00 s.



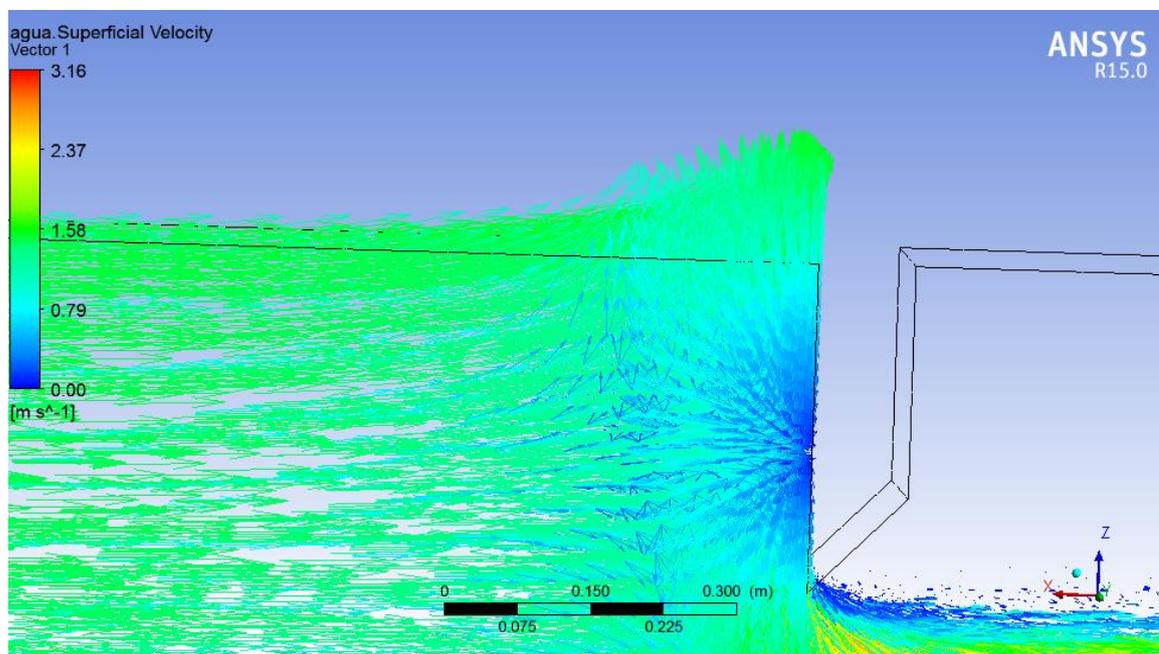
Outra análise que pode ser feita é a da variação da velocidade da água com a passagem do escoamento sob a comporta. O escoamento, ao passar sob o dispositivo hidráulico acelera passando de uma velocidade de em média 0,79 m/s, a montante da comporta, para em média 2,37 m/s, a jusante, conforme Figura 4.20.

Figura 4.20 – Diagrama de velocidade da água.



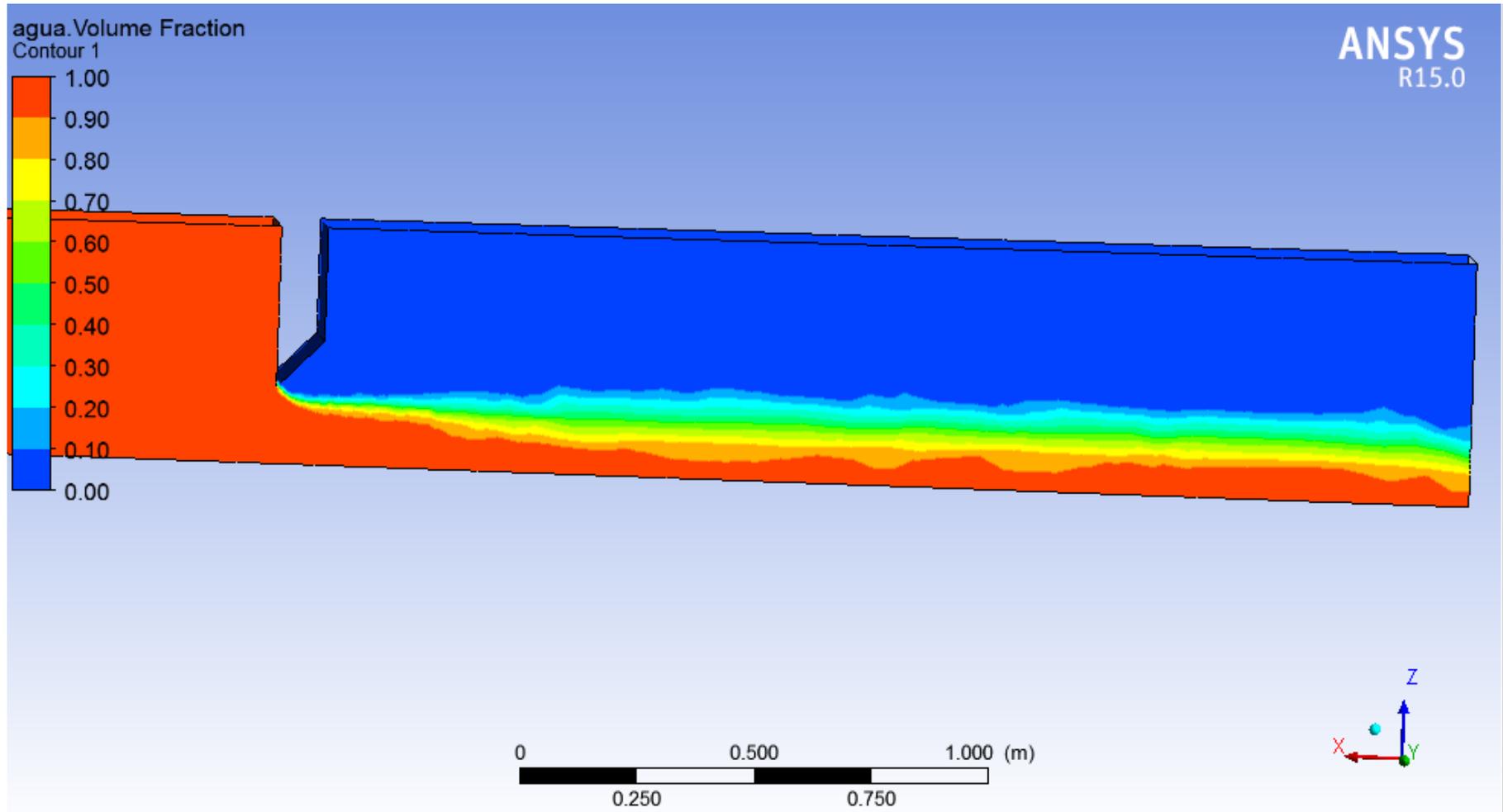
Outro ponto que se pode destacar é a representação do escoamento se chocando na face de montante da comporta, conforme Figura 4.21 que representa o diagrama de vetores velocidades da água. As direções dos vetores, na região da zona de separação do escoamento, apresenta direção oposta ao escoamento. Já na parte superior, o escoamento tem direção paralela a comporta, indicando a saída do escoamento para fora do domínio. Além disso, as camadas mais superficiais do fluxo hidráulico se direcionam para fora do domínio.

Figura 4.21 – Diagrama de vetor velocidade da água no instante igual a 7,00 s.



A Figura 4.22 indica a variação de fração de água no domínio simulado. Pode ser visto a representação da camada de aerção do fluxo hidráulico a jusante a comporta, onde há intensa mistura entre o ar e a água. Essa camada tende a aumentar com o desenvolver do escoamento, aerando o escoamento a jusante do dispositivo hidráulico.

Figura 4.22 – Fração de volume água no instante igual a 7,00 s.



5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 Conclusões Gerais

O estudo de escoamento sobre comportas foi realizado experimentalmente por diversos autores, mas a utilização de simulações numéricas para sua resolução ainda é muito escassa. Logo, este trabalho, através da utilização da fluidodinâmica computacional, caracteriza o escoamento sobre uma comporta hidráulica em um canal de dimensões reais.

O estudo demonstrou que a obtenção do escoamento sob comportas não deve ser estudado a partir do estado estacionário (permanente), este apenas deve servir como estimativa da ordem de grandeza, mesmo possuindo um baixo tempo de processamento. O estudo foi realizado no estado transiente, com um número de Courant adequado a fim de capturar as zonas de turbulência e os vórtices causados pelo escoamento.

A quantidade de iterações para cada passo de tempo teve um impacto menos relevante para o modelo estudado. Já a variação no número de elementos das malhas causou maiores mudanças nos valores do fluxo hidraulico.

Os valores do número de Courant maiores ou iguais a 28 (vinte e oito) influenciaram negativamente os resultados obtidos para a velocidade da água. Logo, não é aconselhável a utilização de números de Courant acima desse valor.

Os pontos de análises abaixo e a jusante da comporta apresentaram uma perturbação considerável no valor da velocidade da água ao longo do tempo com a variação do grau de refinamento da malha. Este fato deve-se a localização dos dois pontos, que estão em uma zona de grande turbulência do escoamento. Porém, nas malhas mais refinadas, a propriedade do escoamento se comportou de forma bastante semelhante.

A simulação também observou a formação de uma zona de separação de escoamento próximo a comporta, esta região é caracterizada por possuir baixas velocidades e escoamento bastante desordenado.

A simulação em CFD mostrou ser bastante promissora e indicada para escoamento em canais com comportas hidráulicas. Ela é de grande importância, pois seus

modelos tridimensionais, bifásicos e de superfície livre, obtém resultados muito próximos da realidade, ajudando na escolha de geometrias e eliminando a confecção de um grande número de modelos reduzidos.

5.2 Recomendações

Para a continuação deste trabalho deve ser realizado a validação deste modelo com a comparação dos resultados obtidos experimentalmente com os simulados computacionalmente.

Ainda propõe-se realizar o estudo com várias aberturas para a comporta e com outros modelos de turbulência e analisar as diferenças nos vórtices e perfis de velocidades.

A utilização de modelos mais apurados, como os de malhas móveis, pode gerar resultados mais representativos, porém o tempo necessário para o processamento seria inviável para essa primeira etapa, logo recomenda-se o avanço e aplicação destas configurações em trabalhos futuros, a fim de verificar essa maior eficácia na representação dos fenômenos.

REFERÊNCIAS

ABRAUMCHUK, V. Estudo da força de arrasto sobre veículos de transporte empregando CFD. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)- Programa de pós graduação da Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

AKOZ, M. S, KIRKGOZ, M. S & ONER, A. A (2009) Experimental and numerical modeling of a sluice gate flow, *Journal of Hydraulic Research*, 47:2, 167-176.

ALENCAR, H.S. Estudo da distribuição da velocidade em tubo Venturi Utilizando Medidas experimentais e técnicas de CFD. In: *Revista Brasileira de Recursos Hídricos- RBRH*. vol. 14, n. 4, pp. 81–92. 2009

ANDERSON J. D., Jr., “Computational Fluid Dynamics –. The Basics with Applications,” McGraw-Hill, Inc.,. New York, ISBN 0-07-001685-2. 1995.

ANGELO, G. Análise da dinâmica do escoamento em circuitos de circulação natural. Tese (doutorado em Ciências de tecnologia Nuclear)- IPEN- Autarquia associada à universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

ANSYS 10.0. Training Manual. Ansys, Incorporation. 2007.

ANSYS 14.0. Training Manual. Ansys, Incorporation. 2012.

ARANTES, E. J. Caracterização do escoamento sobre vertedouros em degraus via CFD. Tese de doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

ARANTES E OLIVEIRA E.R., "Theoretical foundations of the finite element method", International Journal of Solids and Structures, vol.4, pp. 929–952, 1968.

AZIZ A.K. (ed.), The Mathematical Foundations of the Finite Element Method with Applications to Partial Differential Equations, Academic Press, New York, 1972.

BONAKDARI, H.; KOUYI, L. G.; WANG, X. Experimental validation of CFD modeling of multiphase flow through open channel confluence. World Environmental and Water Resources Congress, 2011, Palm Springs, California, 2011.

BRACKBILL, J.U, KOTHE, D.B. AND ZEMACH, C., "A Continuum Method for Modelling Surface Tension", Journal of Computational Physics 100:335-354, 1992.

CASSAN, L., BELAUD, G. (2012). "Experimental and Numerical Investigation of Flow under Sluice Gates" J. Hydraulics Div., ASCE, Vol. 138, No. 4, pp. 367-373.

CELIK, I. B., GHIA, U., ROACHE, P. J., FREITAS, C. J., COLEMAN, H., & RAAD, P. E. (2008). Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications. Journal of Fluids Engineering, 130, 1–4.

ÇENGEL, Y. A. e Cimbala, J.M. Mecânica dos fluidos Fundamentos e aplicações. Mc Graw Hill. AMGH. 2007.

CHENG, A.H.D., LIGGETT, J.A., AND LIU, P. (1981). "Boundary calculations of sluice and spillway flows." J. Hydraulics Div., ASCE, Vol. 107, No. 10, pp. 1163-1178.

COURANT R., "Variational methods for the solution of problems of equilibrium and vibrations", Bulletin of the American Mathematical Society, vol.49, pp.1–23, 1943

ERGATOUDIS J.G., IRONS B.M., ZIENKIEWICZ O.C., "Three-dimensional analysis of Arch Dams and their foundations", Symposium on Arch Dams, Institution of Civil Engineers, London, March 1968.

FANGMEIER, D. AND STRELKOFF, T.S. (1968). "Solution for gravity flow under sluice gates." J. Engineering Mech. Div., ASCE, Vol. 94, No. 1, pp. 153-176.

FAURE, J.-B.; BUIL, N.; & GAY, B. 3-D. Modeling of unsteady free-surface flow in open channel/Modélisation tridimensionnelle d'un écoulement instationnaire à surface libre en rivière, Journal of Hydraulic Research, 42:3, 263-272, DOI: 10.1080/00221686.2004.9641194, 2004

FELIPPA C.A., Refined finite element analysis of linear and non-linear twodimensional structures, Report UC SESM 66-22, Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley, CA, October 1966.

FINLAYSON B.A., "Weighted residual methods and their relation to finite element methods in flow problems", Finite Elements in Fluids, vol. 2, pp. 1–31, 1975.

GANDHI, B. K.; VERMA, H. K.; ABRAHAM, B. Mathematical modeling and simulation of flow velocity profile for rectangular open channel. ISH Journal of Hydraulic Engineering. DOI: [10.1080/09715010.2015.1136244](https://doi.org/10.1080/09715010.2015.1136244). 2016.

HENDERSON, F.M. (1966). Open channel flow, Macmillan, New York.

HIRSCH, C. In: Numerical Computation of internal and External Flows: Volume I, Fundamentals of Numerical Discretization. New York, Wiley e Sons, 1988.

HIRSCH, C. In: Numerical Computation of internal and External Flows: Voume 1, Fundamentals of Computational Fluid Dynamics. New York, Wiley e Sons, 2007.

IRONS B.M.,ZIENKIEWICZ O.C.,“The isoparametric finite element system – a new concept in finite element analysis”,Proceedings,Conference on RecentAdvances in Stress Analysis, Royal Aeronautical Society, London, 1968.

Kim, D. “Numerical analysis of free flow past a sluice gate.”ASCE J. Civil Engineering, 11_2_, 127–132. 2007.

LAUNDER, B. E.; SPALDING, D. B. (1974). The numerical computation of turbulent flows. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, v. 3, n. 2, p. 269-289.

LEE, A. K.; PARK, N. S.; KIM, N. Physical modifications to improve a channel’s flow distribution. Korean J. Chem. Eng., 29(2), p. 201-208, 2012.

LEE, H.; LIN, C. L.; WEBER, L. J. Application of nonhydrostatic model to flow in a free surface fish passag facility. Journal of Hydraulics Engineering., ASCE, JULY 2008, p. 993-999, 2008.

LEVEQUE, R. J. Numerical Methods for Conservation laws, Lectures in Mathematics, ETH Zurich, 2ed., 1992

LIN, C.H., YEN, J.F., AND TSAI, C.T. (2002). "Influence of sluice gate contraction coefficient on distinguishing condition." J. Irrigation and Drainage Eng., ASCE, Vol. 128, No. 4, pp. 249-252.

LIN, F.; WALLACE, E.; NORMAN, K. CFD modeling of supercritical flows in a flood control channel. World Environmental and Water Resources Congress, 2011, Palm Springs, California, 2011.

LIRA, Numerical modeling of a 90° open-channel confluence using Openfoam CFD. Dissertação de mestrado. Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais, 2014.

LIU, X.; GARCIA, M. H. Three-dimensional numerical model with free water surface and deformation for local sediment scour. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, p. 203-217, 2008.

MacCormack, R. W., and Paullay, A. J. (1972). 'Computational efficiency achieved by time splitting of finite difference operators.' AIAA Paper 72-154, San Diego.

McDonald, P. W. (1971). 'The computation of transonic flow through twodimensional gas turbine cascades.' ASME Paper 71-GT-89

MENTER, F.R; KUNTZ, M. LANGTRY, R. "Ten years of industrial experience with the SST turbulence Model". In: Proceedings of the 4th International Symposium on Turbulence, Heat and Mass transfer. 2003

MOHANTA, A. Flow modelling of a non prismatic compound channel by using C.F.D. Master's thesis of Technology in Civil Engineering, Department of civil engineering, National Institute of Technolgy, Rourkela, 2014.

MONTES, J.S. (1997). "Irrotational flow and real fluid effects under planar sluice gates." J. Hydraulic Eng., ASCE, Vol. 123, No. 3, pp. 219-232.

NIELEN, K. D.; DAVIS, A. L. CFD analysis of supercritical converging flow structure. World Environmental and Water Resources Congress, 2007, Tampa, Florida, 2007.

N. Rajaratnam & J. A. Humphries (1982) Free Flow Upstream Of Vertical Sluice Gates, Journal of Hydraulic Research, 20:5, 427-437, DOI: 10.1080/00221688209499471

OLSEN, N. R. B. Three-dimensional CFD modeling os self-forming meandering channel. Journal of Hydraulics Engineering. ASCE, may 2003, p. 366-372, 2003.

POST, S. Mecânica dos fluidos aplicada e computacional. LTC, Rio de Janeiro, 2013.

QIU, J.; FANG, X. Challenges on three dimensional simulations of free surface flow. World Environmental and Water Resources Congress, 2009, Kansas City, Missouri, 2009.

RIBEIRO, A.F.P. Analise aerodinâmica de um edifício por dinâmica dos fluidos computacionais. 76f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil)- Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2009

Rizzi A. W., and Inouye M. (1973). 'Time split finite volume method for threedimensional blunt-body flows.' AIAA Journal, 11, 1478-85.

SILVEIRA NETO, A. Fundamentos da Turbulência nos fluidos. ABCM – Associação Brasileira de Ciências Mecânicas. Br, 2002.

SIMÕES, A. L. A. Considerações sobre a hidráulica de vertedores em degraus – Metodologias adimensionais para pré-dimensionamento. Dissertação de mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

SINHA, J.; SAMIR, K. Das.; PATEL, P.L.; & SAMTANI, B.K. Development of Two-layered model for compound open-channel flow, ISH Journal of Hydraulic Engineering, 20:3, 250-262, DOI: 10.1080/09715010.2013.876727, 2014.

TAYLOR, G. I. and VON KARMÁN. The Fundamentals of the Statistical Theory of Turbulence, Journal of the Aeronautical Sciences. Vol 4. Nº 4. 1937.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. (2007). An introduction to computational fluid dynamics - the finite volume method. Second. ed. Essex: Pearson Prentice Hall.

Xie, C., and Lim, S.Y. (2015). "Effects of Jet Flipping on Local Scour Downstream of a Sluice Gate." J. Hydraulic Eng., ASCE, Vol. 123, No. 3, pp. 219-232.

WHITE, F. M. Mecânica dos Fluidos. 6. ed. Mc Graw Hill, Porto Alegre, 2011.

WHITEMAN J.R.(ed.),The Mathematics of Finite Elements and Applications,
Academic Press, London, 1973.

ZIENKIEWICZ O.C., HOLISTER G.S., Stress Analysis, Wiley, New York,1965

APÊNDICE A

A.1 Etapas de Construção

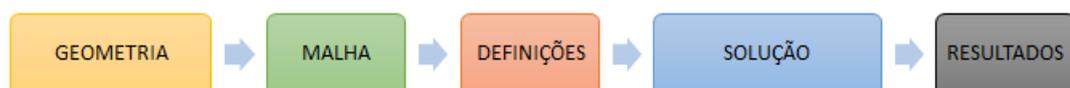
A.1.1. Escolha do Software

Para as simulações foi escolhido o *software* comercial Ansys 15.0 e em seu módulo de fluido dinâmico o CFX. O *Ansys CFX* é um conjunto de *software* de fluidodinâmica computacional de uso geral que combina uma poderosa capacidade de pré- e pós-processamento. Ele utiliza a técnica de volumes finitos, descrita na Seção 2.5.3, para discretizar e obter soluções numéricas das equações que descrevem o processo de momento, transferência de massa e calor, (Ansys, 2007).

Além disso, o CFX possui um avançado solver acoplado que é confiável e robusto, um processo de configuração intuitivo e interativo que utiliza menus e gráficos. O *Ansys CFX* é capaz de modelar fluxos multifásicos no estado transiente, estático, escoamento laminar e turbulentos. Logo, pode ser aplicado ao modelo bifásico de escoamentos sob comportas hidráulicas em canais.

O *Ansys CFX* é constituído de módulos que tomam uma geometria e malha e passam as informações necessárias para realizar uma análise CFD. Na Figura A.1 são apresentados esses módulos, onde é possível configurar cada etapa da modelagem.

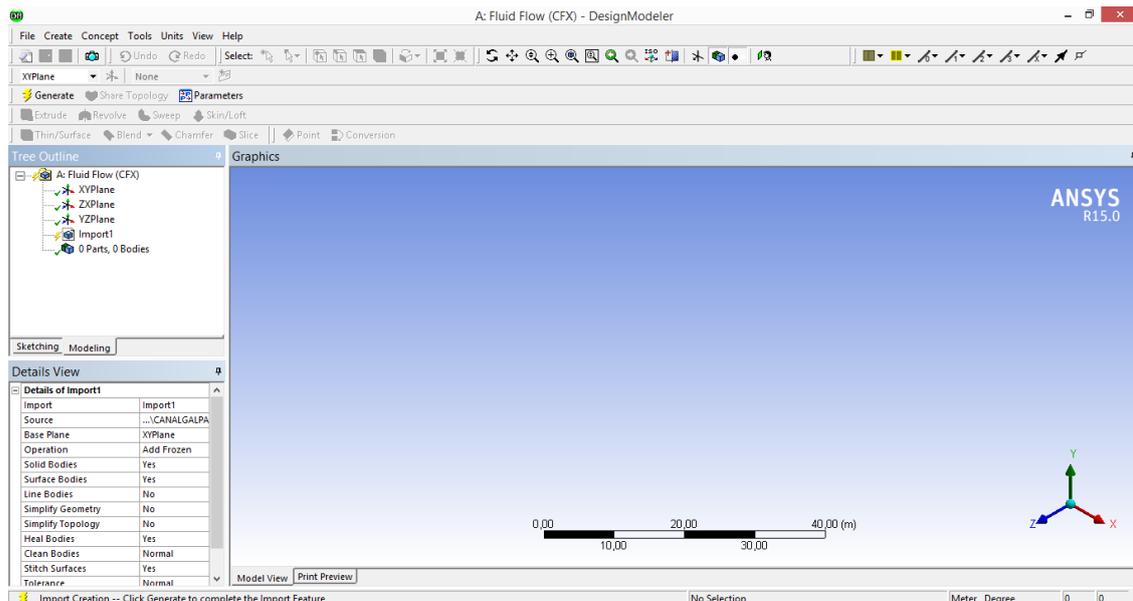
Figura A.1 – Módulos da modelagem do *Ansys CFX*.



A.1.2. Geometria

A primeira fase da modelagem é a definição da geometria, a interface do *software* dedicada para isso é *Geometry*, como indicada na Figura A.2. Essa interface não é muito intuitiva e de difícil execução. No entanto, existe a opção de importar a geometria de ferramentas de desenhos, como: *AutoCAD*, *Microstation* entre outros. Para o trabalho, pela facilidade de execução dos comandos de construção de geometria, foi utilizado o *AutoCAD 3d*. Todo o canal foi desenhado em tamanho real, além da comporta e o seu detalhe chanfrado. O *software Ansys* dá a possibilidade de importação em vários formatos, foi adotada para o trabalho a extensão “IGS”.

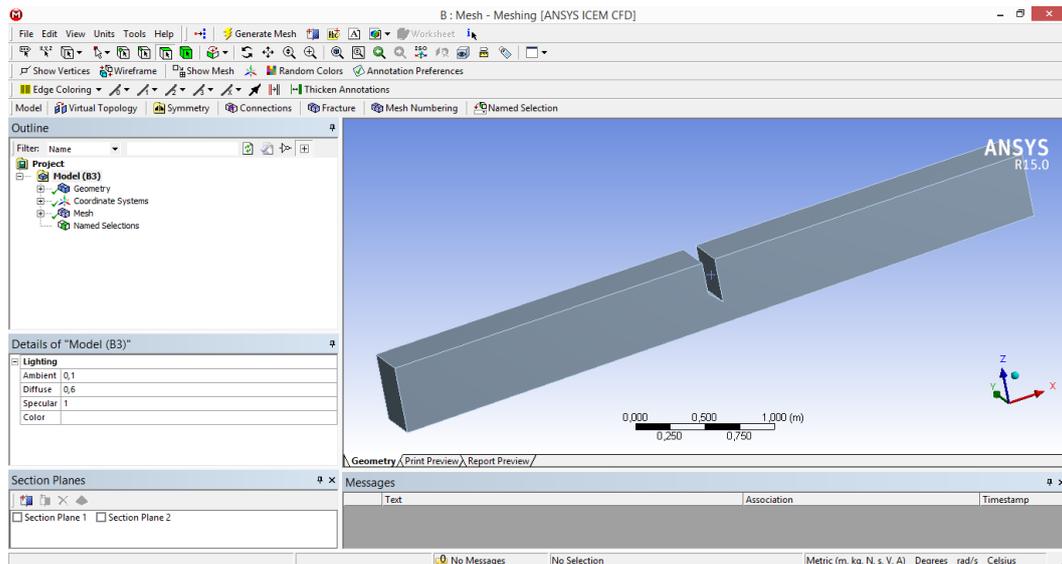
Figura A.2 – Interface do módulo de geometria do *Ansys CFX 15.0*.



A.1.3. Malha

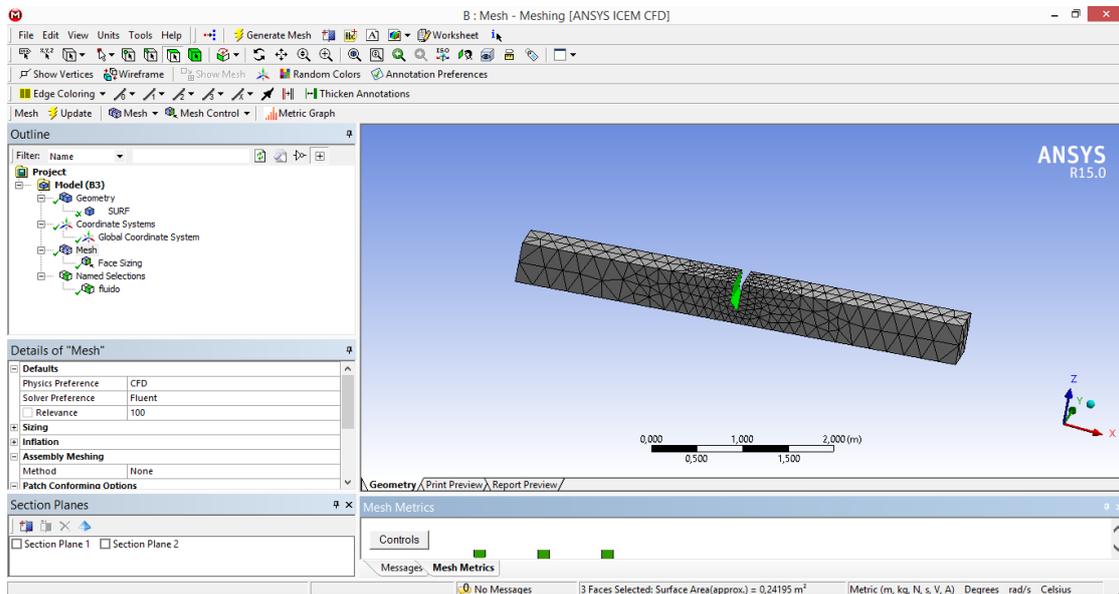
O *Software* possui um módulo de geração de malha denominado *Mesh*, conforme mostrado na Figura A.3.

Figura A.3 – Interface do módulo de geração de malha do Ansys CFX 15.0.



A interface do *Mesh* é provida de um conjunto de ferramentas robusto e de fácil uso, que simplificam o processo da geração da malha. Segundo, Çengel e Cimabala (2007) as malhas podem se estruturadas ou não estruturadas. As malhas estruturadas consistem em células volumétricas com seis faces, onde cada célula pode ser identificada e definida claramente no espaço por meio dos índices (i, j, k), mesmo suas geometrias sendo distorcidas. Já as malhas não estruturadas consistem em células geralmente tetraédricas ou hexaédricas, requerendo uma lista de conectividade que especifica a forma como um determinado conjunto de vértices compõe elementos individuais. Existem ferramentas como *inflation* que modelam a camada limite e *sizing* que serve para refinar áreas previamente selecionadas, podendo definir o tamanho do elemento para um corpo, face ou aresta selecionada, além do número de divisões ao longo de uma borda (Figura A.4).

Figura A.4 – Detalhe da utilização da ferramenta *inflation* próximo às comportas, a fim de obter uma maior discretização em regiões específicas – Ansys CFX 15.0.



A qualidade da malha tem um papel significativo na precisão e estabilidade da computação numérica. A verificação da malha é essencial. Para avaliar a qualidade da malha, obter informações do refinamento e o número de nós e elementos utiliza-se a interface *statistics*. Nessa interface há a opção de métodos de avaliação da qualidade da malha. Para esta tarefa, utilizaram-se dois métodos: o *Orthogonal Quality* e o *Skewness*.

O *Orthogonal Quality* é um parâmetro que determina a qualidade ortogonal de uma dada célula (Figura A.5). Varia de zero a 1 (um) e quanto mais próximo desse último valor, melhor a qualidade quanto a ortogonalidade.

O *Orthogonal Quality* é calculado como o mínimo das seguintes quantidades, calculadas para cada face i :

$$\frac{\vec{A}_i \vec{f}_i}{|\vec{A}_i| |\vec{f}_i|}$$

Onde:

\vec{A}_i = vetor normal face i ;

\vec{f}_i = vetor do centroide da célula para o centroide da face i .

e

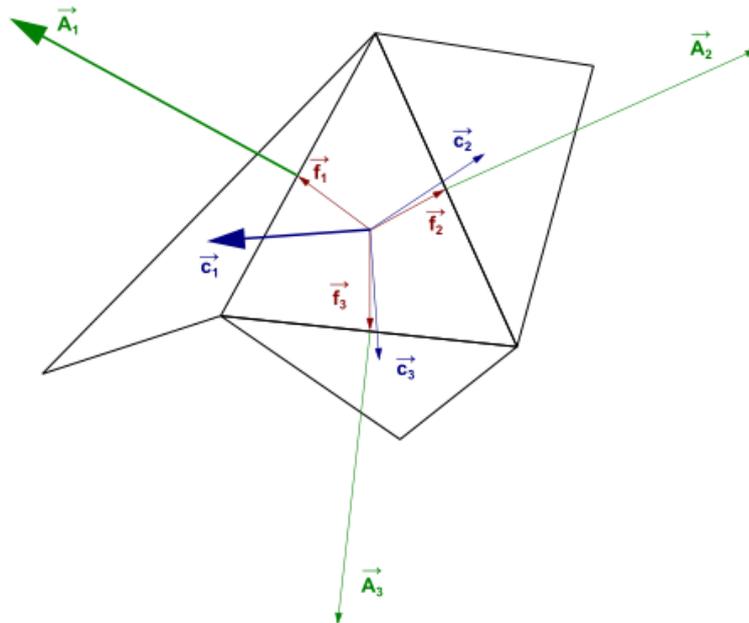
$$\frac{\vec{A}_i \vec{c}_i}{|\vec{A}_i| |\vec{c}_i|}$$

Onde:

\vec{A}_i = vetor normal face i;

\vec{c}_i = vetor que liga o centroide da célula para o centroide da célula adjacente que possuem a face i em comum.

Figura A.5 - Vetor usado para calcular o *Orthogonal Quality* para uma célula.



O outro parâmetro usado para a avaliação da qualidade das malhas foi a deformação da malha (*Skewness*) que é uma das medidas de qualidade primária, ela determina o quão próximo ao ideal é uma célula. O valor zero do parâmetro indica a célula mais igualitária, enquanto o valor 1 (um) indica uma célula completamente degenerada. O método usado para medir o *Skewness* é o baseado no desvio normalizado do ângulo equilátero.

$$\text{máx} \left[\frac{\theta_{\max} - \theta_e}{180 - \theta_e}, \frac{\theta_e - \theta_{\min}}{\theta_e} \right]$$

Onde:

θ_{\max} = maior ângulo na face ou célula;

θ_{\min} = menor ângulo na face ou célula;

θ_e = ângulo para uma célula equiângula (60° para um triângulo, 90° para um quadrado).

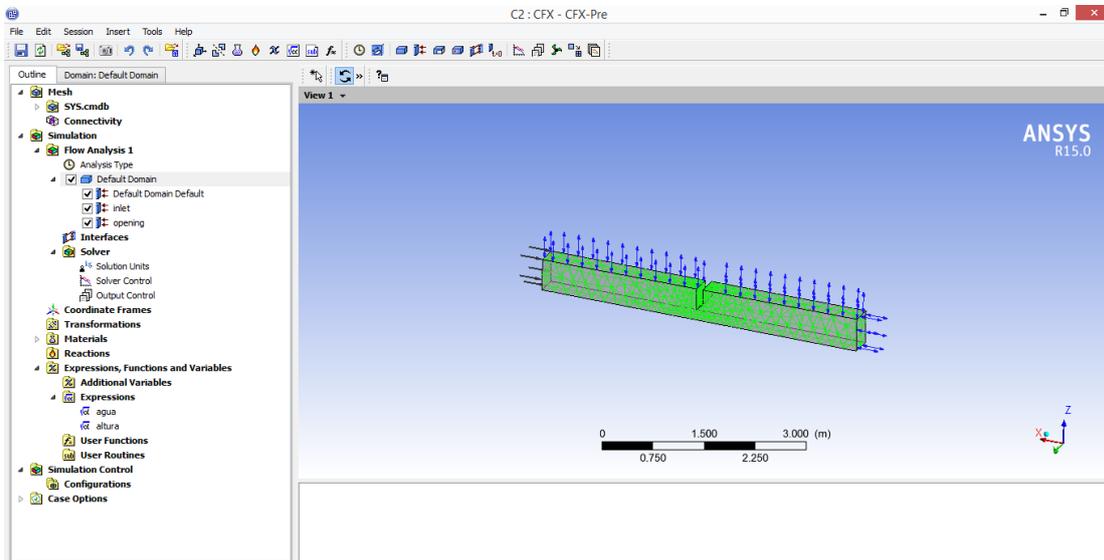
O processo de refinamento é longo, pois envolve o tratamento milhares de elementos com deformações e não ortogonalidades nas regiões mais críticas do problema. O *Ansys Mesh* permite a visualização dos elementos que possuem problemas localizados e seu tratamento, através da ferramenta como *Pinch control*.

Portanto, nessa etapa deve ser gasto tempo na criação de malhas que possam viabilizar uma boa discretização e com boa qualidade quanto a geometria de seus elementos.

A.1.4. Definições Físicas

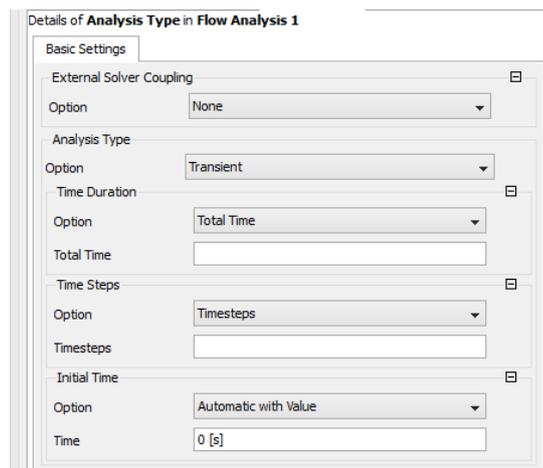
CFX-Pre é o módulo do *Ansys CFX* que contém as definições físicas do modelo. Nessa etapa a malha gerada no *Mesh* é importada para o CFX - Pre e define-se o modelo físico que deve ser usado na simulação CFD (Figura A.6). A seguir, serão apresentados alguns modelos que o CFX-Pre disponibiliza para a modelagem.

Figura A.6 - Interface do CFX-PRE – Ansys 15.0.



Tipo de análise temporal - Na aba *Analysis type* é decidido se a análise deve ser feita no estado estático ou transiente. Caso escolha o transiente, deve ser indicado o tempo total de simulação, o passo de tempo e o tempo inicial de simulação, conforme exibido na Figura A.7.

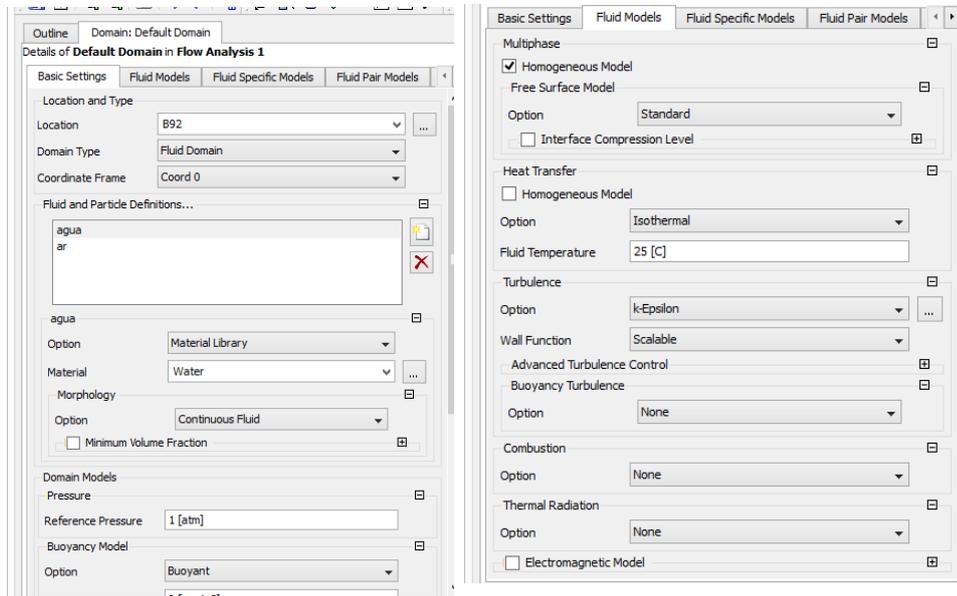
Figura A.7 – Tipo de análise quanto a transiência ou estacionaridade – Ansys 15.0.



Domínio padrão - Nessa interface há a definição do domínio, dos materiais que compõem a modelagem (massa específica, viscosidade, temperatura, entropia, entre outros), da morfologia de cada material, da pressão e densidades de

referência, dos modelos multifásicos, dos modelos de turbulência, de transferência de calor, entre outras definições (Figura A.8).

Figura A.8 – Características iniciais e configurações do domínio – Ansys 15.0.



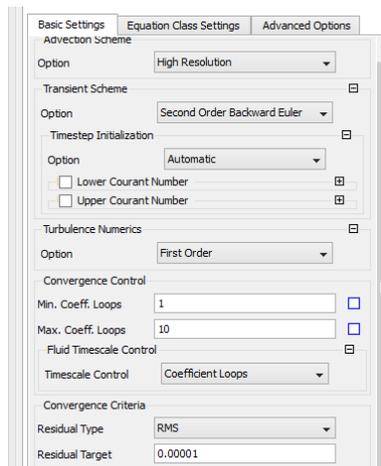
Características do domínio – Os domínios são definidos através de funções paredes (*Boundary Type*), essas são definidas a seguir:

- Entrada (*Inlet*): impõem características de entrada, como velocidade, pressão e escoamento de massa, nas faces selecionadas;
- Saída (*outlet*): impõem características de saída como velocidade, pressão e escoamento de massa para as faces selecionadas;
- Paredes (*wall*): esta aba permite a escolha das condições do fluxo nas paredes. Essas condições podem ser de liberdade para escoar (*Free Slip Wall*) e a de não escorregamento (*No Slip Wall*). Quando selecionada a condição de não deslizamento, pode-se determinar a rugosidade da face, com a escolha das funções, *Smooth Wall* e *Rough Wall*;

- Aberto (opening): neste tipo de domínio as faces selecionadas permitem o movimento tanto de saída como de entrada dos materiais envolvidos no modelo;
- Simetria (*Symmetry*): esse domínio é usado quando um fluxo em um lado de um plano é a imagem espelhada do fluxo no lado oposto.

Control Solver: nesta aba definem-se os parâmetros de marcha, critérios de convergência, números de loops e a escolha da ordem de resolução de transiência numérica e turbulência (Figura A.9).

Figura A.9 – Solver Control – Ansys 15.0.



Por fim, os arquivos produzidos pelo CFX-Pre são enviados para o CFX-Solver.

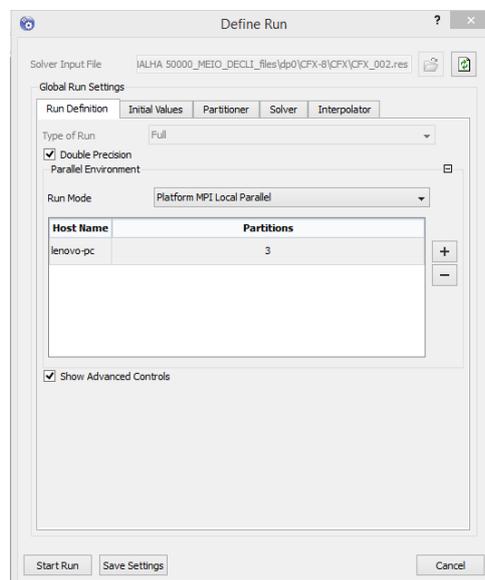
As simulações podem ser feitas tanto no estado transiente como no estacionário. O critério de convergência para o estado estacionário (ou falso transiente), onde o passo de tempo é adiantado em cada iteração, deve ser através da análise do erro médio quadrático (RMS – *Root Mean Square*) obtido para cada simulação. Já nas simulações transientes, a solução numérica é realizada estabelecendo um número de Courant médio limite, esse é o critério para estabelecer o valor de passo de tempo da simulação. Quanto menor o número de Courant médio, maior é a precisão da simulação. Já o critério de convergência é o estabelecimento do estado permanente das variáveis. Logo, deve ser indicado um valor para o tempo total a fim de conseguir o estado permanente para os valores das variáveis simuladas.

A.1.5. Solução

O próximo item da modelagem no *Ansys CFX* é o *Solution*, onde todas as propriedades físicas definidas são processadas e onde são obtidas as soluções para o problema. A seguir são apresentadas as abas onde é possível alterar as definições globais:

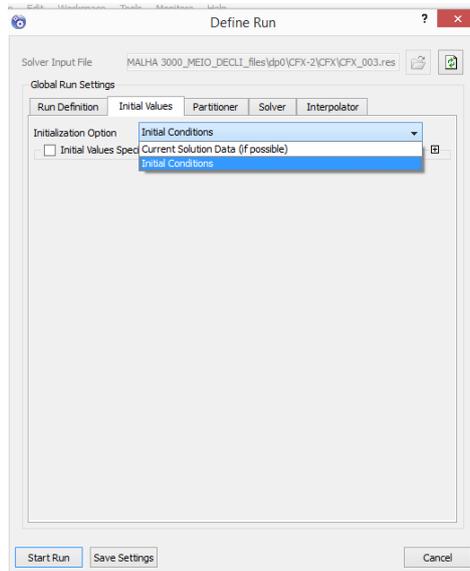
Run Definition: Nesta aba pode-se escolher o tipo de marcha como sendo de precisão dupla (*Double Precision*) ou não, além do tipo de ambiente de processamento da solução, podendo-se escolher a opção de usar apenas um núcleo de processamento, com a escolha da opção *Serial*. Outra opção a ser escolhida é a de processamento paralelo, escolhendo mais de um núcleo de processamento, dependendo do número de núcleos presentes na CPU, essa opção é a *Platform MPI Local Parallel*. Também, pode ser usada a opção *Platform MPI Local Parallel* onde pode ser usada mais de uma máquina para o processamento da solução (Figura A.10).

Figura A.10 – Plataforma Solver – Define Run – Ansys 15.0



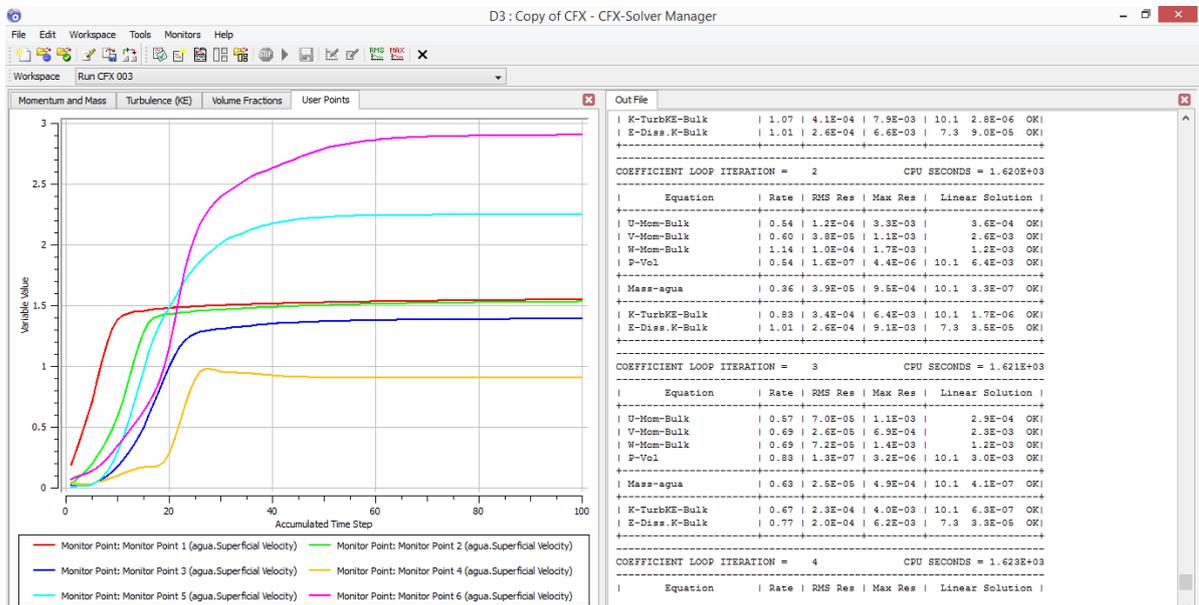
Partitioner, Solver, Initial Values e Interpolator: nestas abas definem-se as opções de inicialização da solução, que pode ser obtida a partir das condições iniciais ou a partir de um processo que se encontra em curso e que foi pausado. Outras definições que podem ser realizadas nestas abas são a definição da prioridade da resolução e o fator de alocação da memória. (Figura A.11).

Figura A.11 – Partitioner, Solver, Valores iniciais e Interpolador alocações de memória – Ansys 15.0.



Após essas definições é iniciada a resolução da solução clicando em *Start Run*. Ao ser dado início ao processo, se abre a janela *Solver Manager* (Figura A.12) onde a resolução pode ser acompanhada, podendo-se interromper o processo a qualquer momento, caso seja observado algo anormal. Ainda, nessa aba é possível pausar a simulação a fim de continuar em outro momento, além de servir como forma de proteção caso haja alguma interrupção inesperada. Pode-se acompanhar, ao longo da simulação, a variação de massa, momento, turbulência entre outras definições. Outro importante processo dessa etapa é a possibilidade de salvar os dados da solução em diversos formatos.

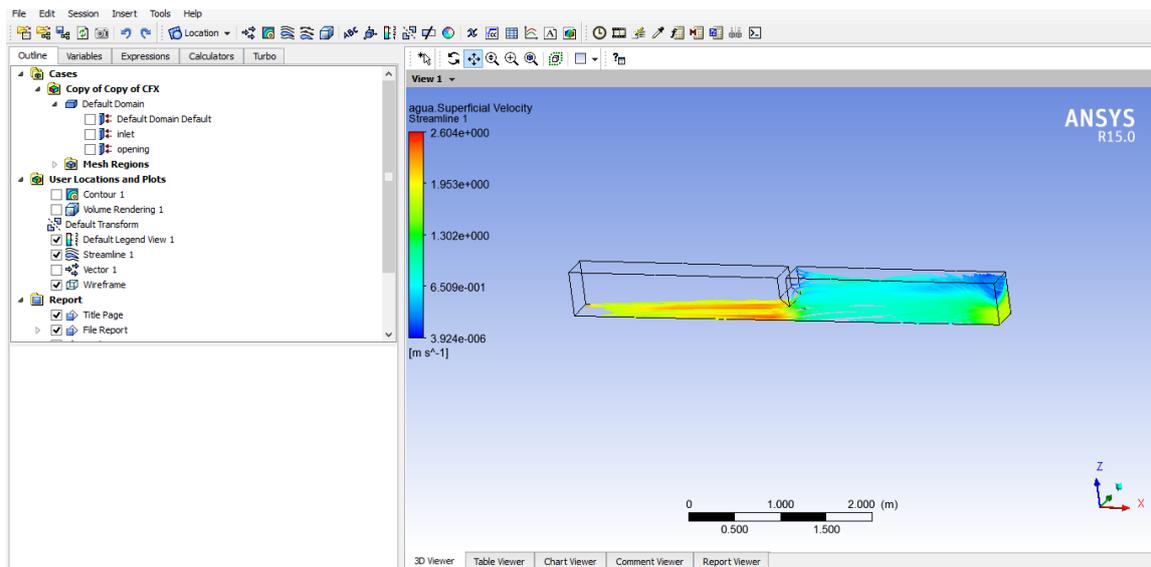
Figura A.12 - Solver Manager – Ansys CFX 15.0



A.1.6. Pós Processamento

A etapa última da simulação é a de apresentação dos resultados, também chamada de pós-processamento, nela é possível a visualização e verificação dos resultados obtidos. A visualização pode ser através de *streamlines*, vetores e partículas em movimento tudo em três dimensões. É possível ainda a visualização de regiões específicas através de gráficos, planos e valores pontuais. Ainda, através da aba *Variables*, pode-se acompanhar os valores das variáveis como velocidades dos fluidos, turbulência, pressão, número de Courant entre outras. Esta saída gráfica é apresentada em cores vivas, por isso segundo Çengel e Cimbala (2007), a dinâmica dos fluidos computacional ganhou o apelido de dinâmica dos fluidos colorida (Figura A.13).

Figura A.13 – Interface de Pós-processamento – Ansys CFX 15.0.



A.1.7. Capacidade Computacional

Para a execução das simulações numéricas foi utilizado um computador doméstico. A máquina possui quatro núcleos de processamento. Logo, três núcleos foram dedicados para trabalhar em regime exclusivo para o *software*. O outro núcleo ficou a disposição do sistema operacional e das outras atribuições da máquina.

A configuração do computador é a seguinte:

Processador Core [™] i5 – 3337U 1.80GHz com 4 núcleos de processamento

Memória de 6,00GB

Sistema operacional de 64 Bits

Hd de 500GB

As simulações realizadas nesse trabalho tiveram duração máxima de aproximadamente um dia.