

ANDHROS GUIMARÃES SILVA

**Estudo numérico de escoamento bifásico anular utilizando
ferramenta CFD**

**Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Ciências**

**São Paulo
2017**

ANDHROS GUIMARÃES SILVA

**Estudo numérico de escoamento bifásico anular utilizando
ferramenta CFD**

**Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Ciências**

**Área de Concentração:
Engenharia Química:**

**Orientador:
Prof. Dr. Ardson dos Santos Vianna
Jr.**

**São Paulo
2017**

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Silva, Andhros

Estudo numérico de escoamento bifásico anular utilizando ferramenta CFD / A. Silva -- versão corr. -- São Paulo, 2017.
104 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Química.

1.Petróleo 2.Escoamento Multifásico Anular 3.Interface
4.Fluidodinâmica Computacional 5.Turbulência I.Universidade de São Paulo.
Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Química II.t.

Dedico à minha tia **Valeria Soriano da Silva Ramos** (“*In Memoriam*”) e ao meu pai **Leandro Luiz Soriano Silva** por me guiarem com sabedoria e trilhar esta importante jornada da minha vida.

Ao Universo

À Família

Maria Margaret Guimarães Csenger (“In Memoriam”)
Wanda Soriano Silva de Almeida
Vitória Soriano Silva
Esther Augusta Mello
Ronaldo Soriano Silva
Haroldo Guimarães
Maria Izabel Varella Guimarães
Daphne Csenger
Daniel Guimarães Rocha
Maria Elizabeth Guimarães Rocha

Ao meu Orientador e Amigo
Ardson dos Santos Vianna Jr.

Aos Amigos Engenheiros
Fabio Coffani dos Santos de Siqueira
Flavia Daylane Tavares de Luna
José Carlos Gonçalves Peres
Thais Keiko Arakaki
Rita Zolin
Ana Maria Mosquera
Maria Adelfa Abreu Zamora
José Otávio Matias
Leandro Goulart
José Eduardo Alves Graciano
Danilo Tavares dos Santos
André Ramos Barbosa
Daniel José de Oliveira Ferreira
Flavio Cesar Cunha Galeazzo

Aos Professores
Moisés Teles dos Santos
Song Won Park
Jorge Luis Baliño
Galo Carillo Le Roux
Roberto Guardani
José Luis de Paiva
Adriano Rodrigues Azzoni
Jorge Andrey Wilhelms Gut
Deovaldo de Moraes Jr.

Aos Servidores Públicos

Valter Gonçalves Junior

Alexandre Oliveira

Maria Elisete Alves Monteiro

Maria das Graças Alves de Sousa

Aos Amigos

Vitor Malheiro Dias

Gabriel Fernandes Xavier

Rodolfo Ferreira

Alexandre Araujo

Marcelo Pupo Estevan Tocci

Ao Departamento de Engenharia Química da USP

Ao Departamento de Engenharia Mecânica da USP

Ao Laboratório de Engenharia Química da UNISANTA

À ESSS - Engineering Simulation and Scientific Software

CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

“...A ideia veio como um relâmpago e num instante a verdade foi revelada...”

- **Nikola Tesla** (1856 – 1943)

RESUMO

Uma das dificuldades relacionadas com a exploração de petróleo é o transporte de óleo pesado, que devido a sua alta viscosidade, acarreta em uma elevada perda de carga no sistema. Para proporcionar economia de energia aplica-se o método do *Core Annular Flow* (CAF) onde é utilizado um escoamento anular bifásico em que a água escoar na periferia da tubulação para redução do gasto energético. O presente trabalho visou compreender e reproduzir este fenômeno, desenvolvendo simulações em CFD através do pacote comercial ANSYS FLUENT considerando o escoamento 3D, turbulento, isotérmico e incompressível para casos estacionários e transientes. A interface entre a água e o óleo foi adequadamente reproduzida em diferentes geometrias como tubo reto e com curva. O método *LES* para simulação de grandes escalas provou ser o melhor método de turbulência dentre os testados, como k-epsilon e modelo de tensores de Reynolds, de forma com que a interface fosse representada corretamente. O modelo para sistema multifásico adotado foi o Volume de Fluido (VOF), comparado com o comportamento experimental e com dados da literatura. Os fenômenos de *swirl* observados experimentalmente também foram reproduzidos de forma satisfatória.

Palavras-chave: Petróleo, Escoamento Multifásico Anular, Interface Líquido-Líquido, Fluidodinâmica Computacional, Turbulência.

ABSTRACT

One of the difficulties related to oil exploration is the transportation of heavy oil, which due to its high viscosity, causes a high pressure drop in the system. In order to provide energy savings, the Core Annular Flow (CAF) method applies where a two-phase annular flow occurs in which water flows at the periphery adjacent to the pipe to reduce energy expenditure. The present work aimed to understand and reproduce this phenomenon, developing CFD simulations through the commercial package ANSYS FLUENT considering flow as 3D, turbulent, isothermal and incompressible for stationary and transient cases. The interface between water and oil has been properly reproduced in different geometries such as straight pipe and pipe with a curve. The LES method for large scale simulation proved to be the best turbulence method among the tested, such as k-epsilon and Reynolds stress model, so that the interface was correctly represented. The model for the multiphase system adopted was the Volume of Fluid (VOF), compared to the experimental behavior and with data from the literature. The experimentally observed swirl phenomena were also reproduced satisfactorily.

Keywords: Oil, Annular Multiphase Flow, Liquid-Liquid Interface, Computational Fluid Dynamics, Turbulence.

Lista de Figuras

Figura 1 - Perspectiva de crescimento da demanda mundial de energia primária	5
Figura 2 - Boletim de produção de petróleo e gás natural. (Fonte: ANP, 2016)	5
Figura 3 - escoamento anular óleo-água (Core Annular Flow). a) Visão frontal do tubo; b) Visão lateral do tubo (Fonte: Elaborada pelo autor)	5
Figura 4 – Carta de Fluxo para fluxo ascendente óleo-água. Fonte: Joseph et al. (1997)	5
Figura 5 - Padrões de Fluxo para escoamento água-óleo vertical. Fonte: Joseph et al. (1997)	5
Figura 6 – Carta de Fluxo de escoamento água-óleo horizontal. Fonte: Joseph et al. (1997)	5
Figura 7 - Padrões de Fluxo para escoamento água-óleo horizontal. Fonte: Joseph et al. (1997)	5
Figura 8 - CAFs formados por diferentes velocidades entre o óleo e a água (Silva et al., 2014).	5
Figura 9 - Considerações para a criação do modelo multifásico. Fonte: Ishii (2011).	5
Figura 10 - Exemplo de tubulação com Rifling. Fonte: Autodesk Community, acessado em 22/03/2016.	5
Figura 11 - Variáveis do CAF. Fonte: Brauner (1991)	5
Figura 12 - Estratégia do Método dos Volumes Finitos. Fonte: Criado pelo Autor	5
Figura 13 - A) Abordagem para volume de controle finito; B) Abordagem para elemento infinitesimal. Fonte: Anderson (1995).	5
Figura 14 - Malha estruturada simples por blocagem.	5
Figura 15 - Exemplo de malha ortogonal curvilínea. Fonte: Versteeg & Malalasekera (2007)	5
Figura 16 - Exemplo de malha não-ortogonal. Fonte: Versteeg & Malalasekera (2007)	5
Figura 17 - Representação do método VOF. Fonte: Manual de Teoria ANSYS (2014)	5

- Figura 18** - Esquemas de interpolação na interface. Fonte: Manual de teoria ANSYS (2014) 5
- Figura 19** - Nível de resolução para turbulência em CFD. Fonte: Adaptado de Visavale (2016), Manual de introdução à turbulência. 5
- Figura 20** - Média no tempo para turbulência não estacionária (Tennekes, Lumley, 1972). 5
- Figura 21** - Perfis de interface gerados pela simulação. Fonte: Ghosh et al., (2010). 5
- Figura 22** - Desvio de espessura das simulações com a medida experimentalmente. Fonte: Ghosh et al., (2010). 5
- Figura 23** - Disposição da geometria de estudo. Fonte: Vieira et al., (2015). 5
- Figura 24** - Seção transversal das Malhas 1, 2 e 3. A Malha 4 não é mostrada pois sua seção transversal é idêntica à Malha 3. Todas as malhas tiveram sua face de entradas "varridas" por todo o domínio computacional. Fonte: Vieira et al., (2015). 5
- Figura 25** - Comparação qualitativa entre os dados do WMS e os gerados por CFD. As cores branca (WMS) e vermelha (CFD) indicam a presença de gás respectivamente. Fonte: Vieira et al., (2015). 5
- Figura 26** - Esquema da geometria e malha utilizada para as simulações. Fonte: José et al., (2013). 5
- Figura 27** - Perfis de velocidade superficial: (a) trifásico e (b) bifásico para o óleo; (c) trifásico e (d) bifásico para a água. Fonte: José et al., (2013). 5
- Figura 28** - Fração volumétrica de óleo na seção transversal em diferentes planos YZ ao longo do tubo; (a) para fluxo bifásico e (b) para fluxo trifásico. Fonte: José et al., (2013). 5
- Figura 29** - Geometria utilizada nas simulações. Fonte: Ghorai; Nigam, (2006). 5
- Figura 30** - Representação do cálculo da interface: (a) formato real da interface e (b) formato calculado pelo VOF com esquema de reconstrução geométrica. Fonte: Ghorai; Nigam, (2006). 5
- Figura 31** - Face transversal do tubo varrida por todo o domínio computacional. Fonte: Ghorai; Nigam, (2006). 5

Figura 32 – Perda de carga do gás na parede e na interface. Fonte: Ghorai; Nigam, (2006).	5
Figura 33 - Perfis de velocidade axiais para diferentes velocidades da fase gasosa. Fonte: Ghorai; Nigam, (2006).	5
Figura 34 - Contornos de fração volumétrica em diferentes instantes de tempo. Fonte: Tripathi et al., (2015).	5
Figura 35 - Perfis de Pressão e Velocidade com suas variações ao longo do tempo. Fonte: Tripathi et al., (2015).	5
Figura 36 - Duas geometrias utilizadas para as simulações; A - Expansão e B - Contração. Fonte: Kaushik et al., (2012).	5
Figura 37 - Linhas de Fluxo (A) e Contornos de fração volumétrica (B). Fonte: Kaushik et al., (2012).	5
Figura 38 - Esquema de injeção de óleo e de água na face de entrada do tubo.	5
Figura 39 - Evolução dos tipos de malha utilizadas. 1 e 2 criadas no ANSYS Meshing. 3 Criada no ICEM CFD para a seção com curva.	5
Figura 40 - Malha para geometria do trecho reto do tubo.	5
Figura 41 - Malha para geometria com curva.	5
Figura 42 - Simulação realizada para tubo reto. Perfis de velocidade, fração volumétrica e pressão.	5
Figura 43 - Comparação entre modelo de CFD e experimento físico. Fonte: Silva et al., (2014).	5
Figura 44 - Perfis de velocidade.	5
Figura 45 - Perfis de velocidade e fração volumétrica para trecho com curva.	5
Figura 46 - Perfis de velocidade na curva	5
Figura 47 - Comparação do fenômeno físico (B) com modelo de CFD (A).	5
Figura 48 - Efeito da utilização de modelos RANS (Boussinesq) de turbulência para representações de interfaces com alta frequência de variação e com fenômeno de entranhamento interfásico (Bestion, 2012).	5

Figura 49 - Tubo injetor de óleo na tubulação de água.	5
Figura 50 - Fluxo de Core Annular Flow com modelo Euleriano completo e k-epsilon para turbulência.	5
Figura 51 - Blocagem para geometria com duplo-tubo	5
Figura 52 - Malha com Tubo-duplo. (A) Face de injeção de água, (B) Face de injeção de óleo, (C) Seção pré-injeção.	5
Figura 53 - Simulação com tubo-duplo, considerando RSM para turbulência e o VOF explícito para o esquema multifásico.	5
Figura 54 - Streamlines de velocidade da água e isosuperfície de óleo.	5
Figura 55 - LES combinado com VOF para o Core Annular Flow.	5
Figura 56 - Vetores de velocidade da água que escoam sozinhas em tubulação duplo-tubo.	5
Figura 57 - Vetores de velocidade da água após a adição da fase óleo. Imagem capturada logo após a adição do óleo.	5
Figura 58 - Visão externa da tubulação com tubulação de água transparente. Visualização do CAF.	5
Figura 59 - Perfil de fração mássica na posição transversal da tubulação com uma altura de 20 cm.	5
Figura 60 - Linhas de fluxo da água e sua influência na interface do óleo.	5
Figura 61 - Visão superior oblíqua de simulação de CAF.	5

Lista de Tabelas

Tabela 1	Resíduos da simulação com os modelos VOF para sistema multifásico e $k-\epsilon$ para a turbulência.	61
Tabela 2	Estudo de convergência de malha foi realizado	64

Lista de Abreviações

CAF – *Core Annular Flow*

CFD – *Computational Fluid Dynamics*

VOF – *Volume of Fluid*

API – *American Petroleum Institute*

Lista de Símbolos

Letras Latinas

A	Área	$[L^2]$
A_{ac}	Área da fase nuclear “a”	$[L^2]$
A_c	Área da região do núcleo do escoamento	$[L^2]$
A_{bw}	Área da fase periférica “b”	$[L^2]$
A_w	Área da região anular adjacente à parede do escoamento	$[L^2]$
B	Denota o aumento do cisalhamento interfacial devido à ondulação interfacial	$[-]$
$c_{1\varepsilon}$	Constante do modelo de turbulência $k-\varepsilon$	$[-]$
$c_{2\varepsilon}$	Constante do modelo de turbulência $k-\varepsilon$	$[-]$
c_s	Coeficiente de Smagorinsky	$[-]$
c_L	Coeficiente de fechamento	$[-]$
c_μ	Constante do modelo de turbulência $k-\varepsilon$	$[-]$
C_w	Constante do modelo físico para comportamento do escoamento adjacente à parede	$[-]$
C_c	Constante do modelo físico para comportamento do escoamento no núcleo	$[-]$
D_c	Diâmetro hidráulico para região do núcleo	$[L]$
D_w	Diâmetro hidráulico para região adjacente à parede	$[L]$
f_i	Fator de fricção interfacial	$[-]$
f_w	Fator de fricção da parede	$[-]$
\hat{g}_k	Aceleração da gravidade terrestre	$[L.T^{-2}]$
$\bar{\bar{H}}_{21}$	Curvatura média instantânea local	$[L]$
J	Termo difusivo	$[M.L^{-2}.T^{-1}]$
M_k	Força Interfacial	$[M.T^{-2}]$
M_m^H	Força resultante devido à mudanças na curvatura média	$[M.T^{-2}]$

n_c	Constante de ajuste para fator de fricção no núcleo do escoamento	$[-]$
p	Pressão	$[M.T^{-2}]$
q	Energia cinética SGS	$[L^2.T^{-2}]$
s_{ij}	Tensor deformação	$[M.L^{-1}T^{-2}]$
S	Termo Fonte	$[-]$
S_i	Perímetro da Interface	$[L]$
S_w	Perímetro da Parede da Tubulação	$[L]$
t	Tempo	$[T]$
u_i	Velocidade instantânea	$[L.T^{-1}]$
U_i	Velocidade média	$[L.T^{-1}]$
u_i'	Velocidade Flutuante	$[L.T^{-1}]$
\hat{u}_k	Velocidade média da fase k	$[L.T^{-1}]$
U_w	Velocidade instantânea da fase anular	$[L.T^{-1}]$
U_c	Velocidade instantânea da fase do núcleo	$[L.T^{-1}]$
\vec{V}	Vetor velocidade	$[L.T^{-1}]$
V	Volume	$[L^3]$
v_c	Velocidade média da fase do núcleo	$[L.T^{-1}]$
v_w	Velocidade média da fase anular	$[L.T^{-1}]$

Letras Gregas

α	Fração volumétrica das fases	$[-]$
α_2	Fração volumétrica da fase 2	$[-]$
α_k	Fração volumétrica da fase k	$[-]$
α_c	Fração volumétrica do núcleo	$[-]$
α_w	Fração volumétrica do escoamento na periferia	$[-]$
β	Ângulo	$[-]$

ε	Taxa de Dissipação Viscosa de k	$[M^2.T^{-3}]$
ε_{ikm}	Taxa de Dissipação Viscosa de k	$[M^2.T^{-3}]$
ε_{jkm}	Taxa de Dissipação Viscosa de k	$[M^2.T^{-3}]$
φ	Quantidade escalar ou vetorial	$[-]$
κ	Energia Cinética Turbulenta	$[M^2.T^{-2}]$
λ	Coefficiente de difusão	$[M^2.T^{-1}]$
ρ	Densidade	$[M.L^{-3}]$
$\bar{\rho}$	Densidade média	$[M.L^{-3}]$
ρ_a	Densidade da fase a	$[M.L^{-3}]$
ρ_b	Densidade da fase b	$[M.L^{-3}]$
ρ_c	Densidade do escoamento no núcleo	$[M.L^{-3}]$
ρ_w	Densidade do escoamento na periferia da tubulação adjacente à parede	$[M.L^{-3}]$
μ	Viscosidade Molecular	$[M.L^{-1}.T^{-1}]$
μ_T	Viscosidade Turbulenta	$[M.L^{-1}.T^{-1}]$
σ_κ	Constante do modelo de turbulência $k-\varepsilon$	$[-]$
σ_ε	Constante do modelo de turbulência $k-\varepsilon$	$[-]$
$\bar{\sigma}$	Tensão superficial média	$[M.T^{-2}]$
τ_{ij}	Tensor tensão	$[M.L^{-1}.T^{-2}]$
τ_k^T	Tensor turbulento	$[M.L^{-1}.T^{-2}]$
Γ_k	Transferência de fluxo de massa interfacial por unidade de volume	$[M.L^{-3}.T^{-1}]$
Ω_κ	Número <i>Swirl</i> (Rotacionalidade)	$[-]$

Sumário Estruturado

1. Introdução	5
2. Objetivos Gerais e Específicos	5
2.1. Objetivo Geral	5
2.2. Objetivos Específicos	5
3. Revisão Bibliográfica	5
3.1. Conceito de Fase e Padrão de Fluxo	5
3.2. Equação Geral da Conservação	5
3.3. Escoamento Multifásico	5
3.3.1. Modelos de Dois Fluidos	5
3.3.2. Formulação Básica	5
3.4. <i>Core Annular Flow</i> : Modelagem Física e Equações Governantes	5
3.4.1. Método Numérico de Discretização: Volumes Finitos	5
3.5. Malhas	5
3.5.1. Malhas Estruturadas e Não-Estruturadas	5
3.5.2. Malhas Ortogonais e Não-Ortogonais	5
3.6. Fluidodinâmica Computacional - CFD	5
3.6.1. Modelos Multifásicos para CFD	5
3.6.1.1. Volumes de Fluido	5
3.6.1.1.1. Interpolação próxima da interface	5
3.6.1.1.2. Modelo de Mistura	5
3.6.1.3. Modelo Euleriano	5
3.6.1.3.1. Modelo de Volume Multi-Fluídico	5
3.6.2. Modelos de Turbulência	5
3.6.2.1. Modelos <i>RANS</i>	5
3.6.2.1.1. Modelo <i>k-epsilon</i>	5
3.6.2.1.2. Modelo <i>RSM (Reynolds Stress Model)</i>	5
3.6.2.2. Modelos do tipo <i>LES (Large Eddy Simulation)</i>	5
4. Artigos Analisados	5
4.1. <i>Simulation of core annular downflow through CFD – A comprehensive study. (Ghosh; et al., 2010).</i>	5
4.2. <i>Assessment of a hybrid CFD model for simulation of complex vertical upward gas-liquid churn flow (Vieira et al., 2015).</i>	5

4.3. <i>Thermo-Hydrodynamics of Core-Annular Flow of Water, Heavy Oil and Air Using CFX (José et al., 2013).</i>	5
4.4. <i>CFD Modeling Of Flow Profiles And Interfacial Phenomena In Two-Phase Flow In Pipes (Ghorai; Nigam, 2006).</i>	5
4.5. <i>Lubricated Transport of Highly Viscous Non-Newtonian Fluid as Core-Annular Flow: A CFD Study (Tripathi et al., 2015).</i>	5
4.6. <i>CFD Simulation of Core Annular Flow Through Sudden Contraction and Expansion (Kaushik et al., 2012).</i>	5
5. Material e Métodos	5
5.1. Software	5
5.2. Hardware.....	5
5.3. Parâmetros de Simulação	5
5.4. Malhas.....	5
5.5. Modelos Utilizados	5
5.4. Condições de Contorno.....	5
5.6. Critérios de Convergência e Relaxação Numérica	5
6. Resultados e Discussão	5
6.1. Simulação do Trecho Reto do Tubo e Curva com <i>RANS</i>	5
6.2. Modelo de Tensores de Reynolds (RSM) e Simulação de Grandes Escalas (LES).	5
7. Conclusões	5
8. Referências	5

1. Introdução

O uso das reservas de petróleo e o seu transporte depende de novas tecnologias que o torne viável economicamente, desde a sua exploração, produção, transporte até o refino. Um dos principais problemas da exploração de petróleo envolve a questão do escoamento de óleos pesados, cuja alta viscosidade eleva o custo de sua produção e transporte. De acordo com o relatório *World Energy Outlook* publicado pela Agência Internacional de Energia (IEA) em 2014, o consumo de energia aumentará cerca de 30% em 27 anos e de todo esse consumo, a participação da utilização de petróleo e derivados diminuirá apenas 5%. O petróleo ainda terá uma presença significativa para o fornecimento de energia apesar de esforços paralelos para se criar meios alternativos de geração de energia limpa (Figura 1).

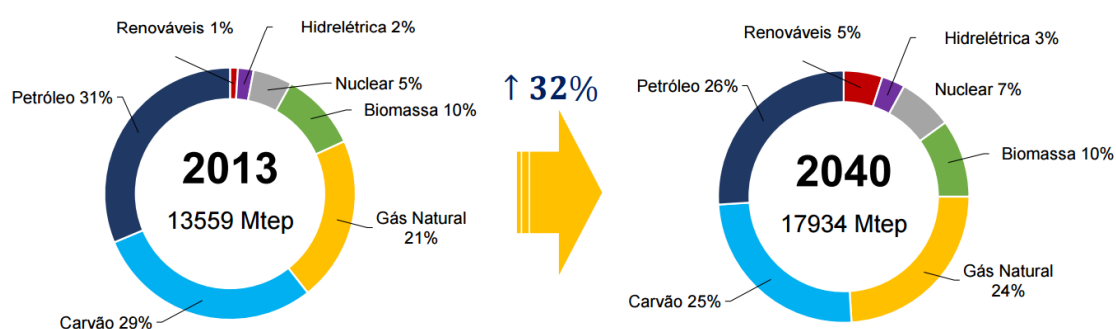


Figura 1 - Perspectiva de crescimento da demanda mundial de energia primária (Fonte: *World Energy Outlook*, 2014)

O resultado da exploração de petróleo no Brasil, realizada nos últimos anos, evidencia que parte do produto descoberto apresenta características de óleo pesado como viscosidade entre 100 e 10000 Cp e baixo grau API (American Petroleum Institute) entre 12 e 22,3° de acordo com a classificação da Agência Nacional de Petróleo (ANP, 2016) (Figura 2).

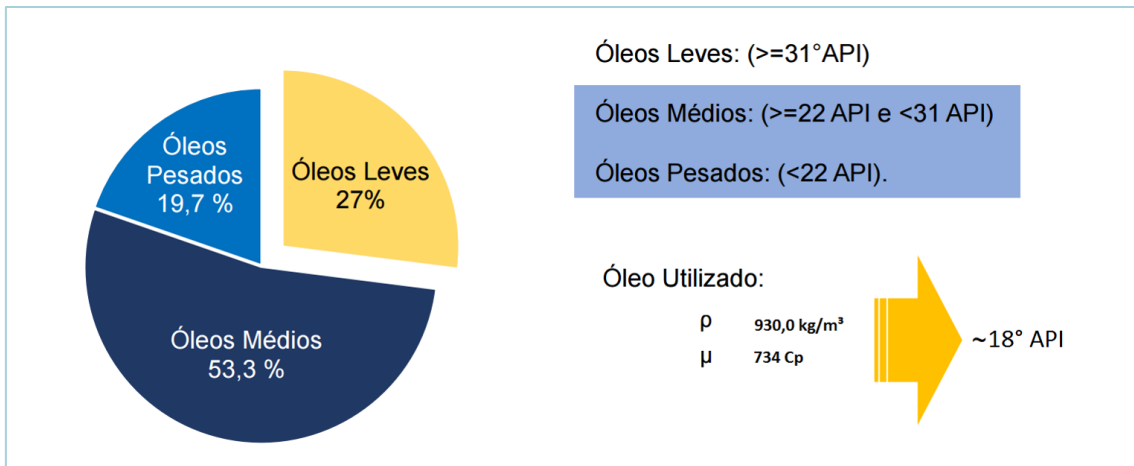


Figura 2 - Boletim de produção de petróleo e gás natural. (Fonte: ANP, 2016)

Uma alternativa é acrescentar água ao fluido, o que permite uma redução significativa no consumo de energia para se transportar óleo pesado. A técnica que surgiu no início do século passado em 1904 (Joseph *et al.*, 1997) propõe que os dois fluidos escoem simultaneamente, sendo que a água ocuparia a seção anular do tubo e o óleo, por causa de sua imiscibilidade, ocuparia o núcleo (Figura 3). Isto resulta em uma drástica redução na perda de carga e no consequente consumo de energia. Ao longo do século passado, várias patentes foram propostas com diversos métodos de injeção de óleo na tubulação e projetos de tubulações, porém foram empresas como a Exxon e a Shell que se tornaram pioneiras aplicando a técnica em escala industrial (Joseph *et al.*, 1997).

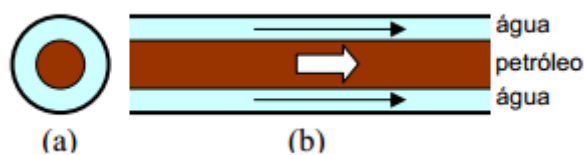


Figura 3 - Escoamento anular óleo-água (*Core Annular Flow*). a) Visão frontal do tubo; b) Visão lateral do tubo (Fonte: Elaborada pelo autor)

CFD ou *Computational Fluid Dynamics* é a análise de sistemas envolvendo fluxo de fluidos, transferência de calor e fenômenos associados como reações químicas por meio de simulação computacional. É uma técnica poderosa, abrange tanto áreas industriais como não industriais (Versteeg; Malalasekera, 2007) e possui um conjunto de vantagens fundamentais que possibilitaram e possibilitam precisão assertiva em incontáveis projetos de engenharia. Por meio desta ferramenta, a proposta deste trabalho é modelar um padrão de fluxo singular entre água e óleo denominado de *Core Annular Flow*. Na literatura é possível encontrar alguns poucos trabalhos experimentais sobre o *CAF* visando buscar modelos empíricos (Parda; Bannwart, 2001). Poucos trabalhos foram executados desde então tentando reproduzir computacionalmente o fenômeno físico, que apesar de ter uma concepção simples, resulta na formação de estruturas complexas que necessitam de pontos de operação sensíveis para sua estabilização e no aspecto computacional.

2. Objetivos Gerais e Específicos

2.1. Objetivo Geral

Este trabalho visa, como objetivo geral, estudar uma corrente bifásica Água-Óleo usando o *Software* de CFD *ANSYS Fluent*, no intuito de desenvolver um modelo de CFD fidedigno que consiga reproduzir o perfil característico observado experimentalmente da técnica de transporte *Core Annular Flow*, capaz de prever o comportamento dos fluidos através de condições de contorno arbitrárias.

2.2. Objetivos Específicos

- a) Avaliar modelos para sistemas multifásicos de forma a representar adequadamente o acoplamento entre as fases com enfoque na interface;
- b) Avaliar modelos de turbulência e suas particularidades para sistemas multifásicos de forma a representar o escoamento;
- c) Avaliar métodos de construção de malha adequados para o problema em questão.

3. Revisão Bibliográfica

3.1. Conceito de Fase e Padrão de Fluxo

Uma fase é simplesmente um dos estados da matéria e pode ser tanto um gás, um líquido ou um sólido. Entende-se por fluxo multifásico, o escoamento simultâneo de múltiplas fases. Mais da metade de todos os processos da engenharia química estão envolvidos com fluxos multifásicos e estes dependem do “estado da arte” envolvido com a precisão de projetos para sistemas multicomponentes (Wallis, 1969).

O termo fase em fluidodinâmica não é sinônimo do estado da matéria: gás, líquido ou sólido. Essa ambiguidade do uso do termo causa uma insegurança no seu emprego, uma vez que nem sempre o número de estados da matéria corresponde ao número de fases de uma mistura de materiais (Rosa, 2012). O tipo de escoamento proposto para o presente estudo possui duas fases líquidas correspondentes a dois materiais (água e óleo).

A resposta do escoamento bifásico para determinado gradiente de pressão depende do tipo de fluxo. A estabilidade dos tipos de fluxo está diretamente relacionada com a velocidade das fases. Na literatura de engenharia, é possível encontrar as cartas de fluxo, que delimitam regiões no plano de U_o vs U_w (*velocidade do óleo vs velocidade da água*), nos quais diferentes tipos de fluxo são encontrados (Joseph *et al.*, 1997). As Figura 4 e Figura 5 representam a carta de fluxo e os tipos de fluxo formados respectivamente para o **escoamento ascendente água-óleo**.

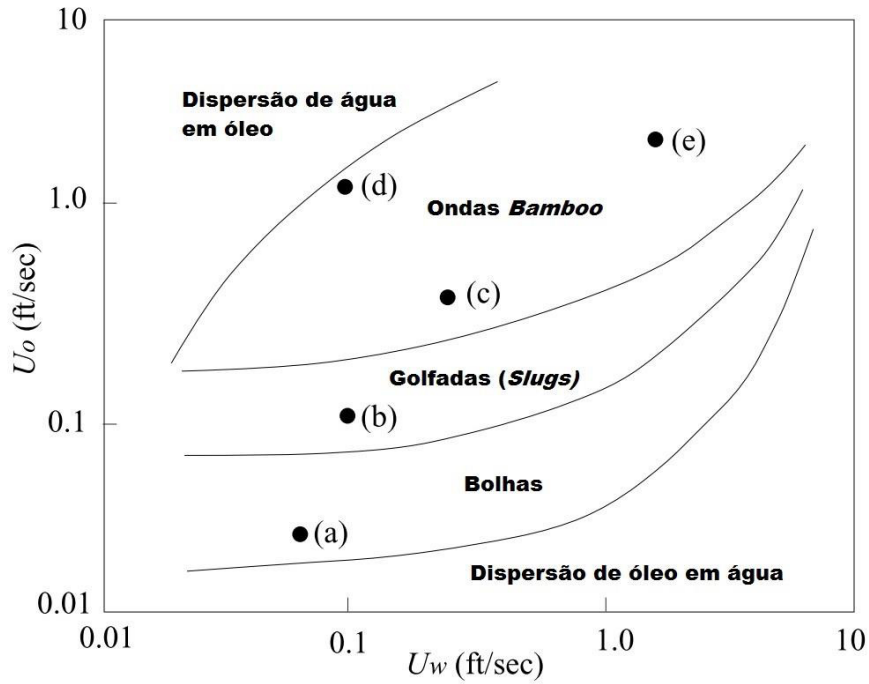


Figura 4 – Carta de Fluxo para fluxo ascendente óleo-água. Fonte: Joseph *et al.* (1997)

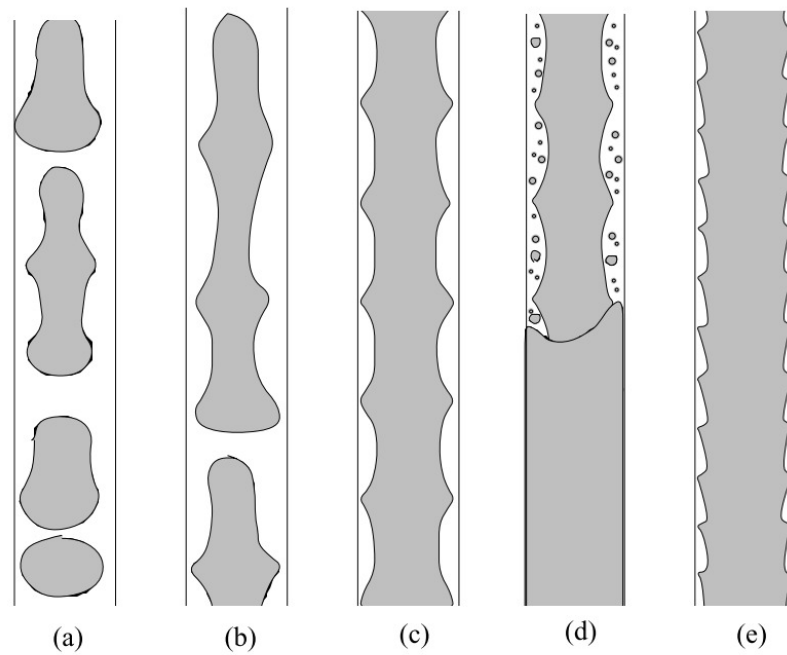


Figura 5 - Padrões de Fluxo para escoamento água-óleo vertical. Fonte: Joseph *et al.* (1997)

Para o escoamento horizontal, diferentes tipos de fluxo também podem ser observados, pois a ação da gravidade influencia diferentemente na ocorrência dos padrões dependendo da orientação espacial da tubulação. Nas Figura 6 e Figura 7 são definidos os padrões de escoamento na horizontal.

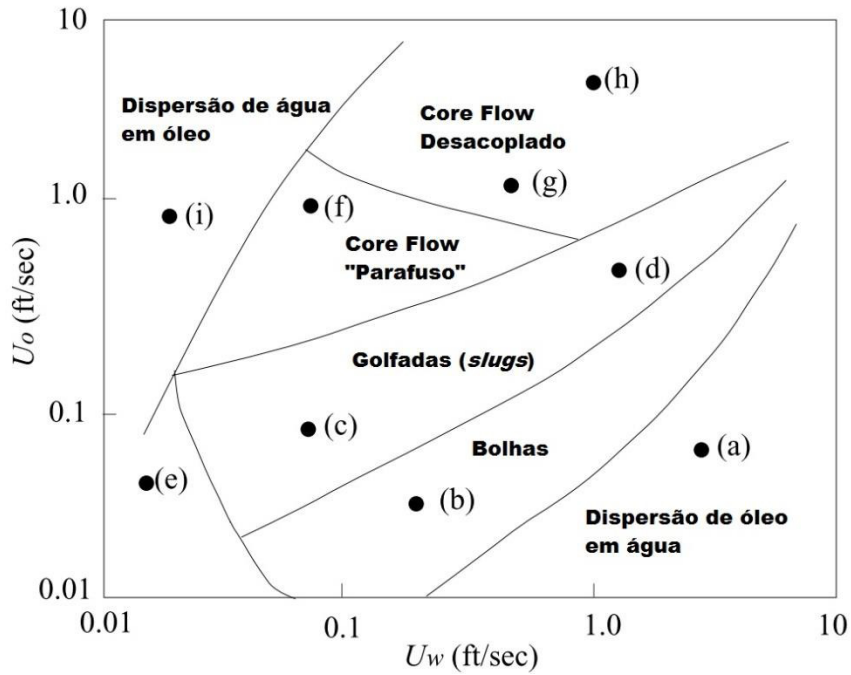


Figura 6 – Carta de Fluxo de escoamento água-óleo horizontal. Fonte: Joseph *et al.* (1997)

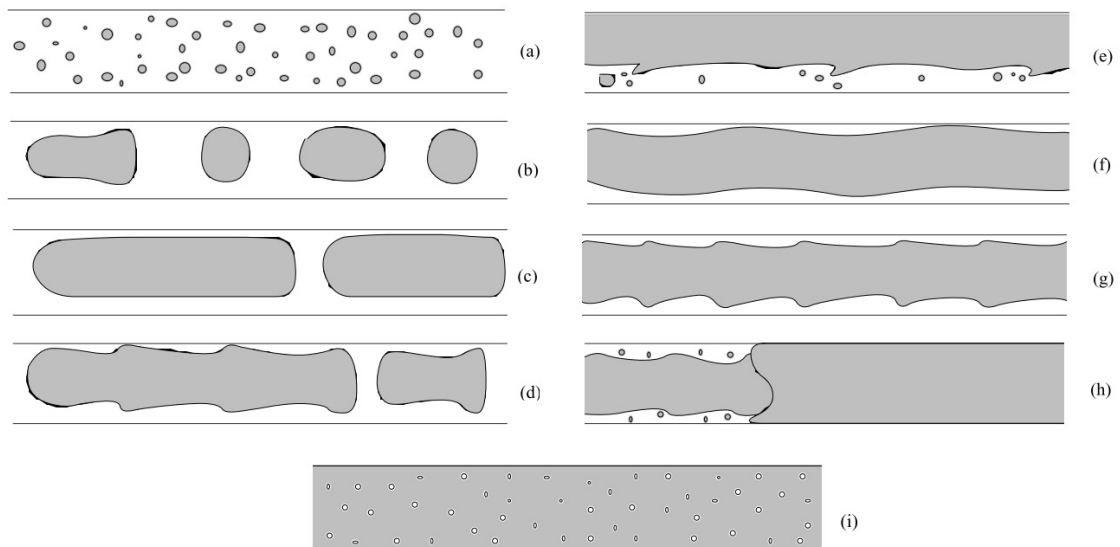


Figura 7 - Padrões de Fluxo para escoamento água-óleo horizontal. Fonte: Joseph *et al.* (1997)

O fenômeno, apesar da aparente simplicidade, apresenta grande complexidade na transferência de quantidade de movimento na interface formada entre os dois fluidos. O comportamento e a estabilidade do núcleo dependem diretamente do regime de escoamento das duas fases, que por sua vez depende diretamente da relação de velocidade entre as fases.

O perfil ótimo de transporte de óleo para o CAF é possível quando há a maior vazão de óleo para a menor vazão de água possível, assim maximizando

o fluxo de óleo e ao mesmo tempo diminuindo consideravelmente a perda de carga do sistema, que posteriormente leva a redução do custo energético. Na Figura 8, é possível visualizar dois tipos de CAF gerados por diferentes velocidades entre os dois fluidos.



Figura 8 - CAFs formados por diferentes velocidades entre o óleo e a água (Silva *et al.*, 2014).

3.2. Equação Geral da Conservação

A maioria dos modelos utilizados na engenharia, sejam físicos ou computacionais, parte de uma lei física que visa a preservação da integridade de uma dada grandeza de fluxo ao longo de um processo. Esta lei, em forma de equação, é denominada de equação geral da conservação de uma variável geral de processo Φ (massa, movimento, energia) que, em um volume de controle finito, pode ser expressa como um balanço entre os vários processos tendendo a incrementá-la ou diminuí-la (Bird *et al.*, 2006; Versteeg; Malalasekera, 2007).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varphi) + \nabla \cdot (\rho\vec{V}\varphi) = \nabla \cdot J + S \quad (1)$$

$$J = -\rho\lambda\nabla\varphi \quad (2)$$

Sendo φ a grandeza a ser transportada (escalar ou vetorial); $\nabla \cdot$ é operador diferencial que representa o divergente e ρ é a densidade da grandeza φ . As variáveis J e S estão relacionadas à difusão e a fontes/sumidouros relativos ao transporte de φ (Rosa, 2012). Pelo balanço:

$$\text{Saída} - \text{Entrada} + \text{Acúmulo} = \text{Geração}$$

Tem-se que:

$$\iint_A (\rho \vec{V} \varphi + J) dA + \iiint_V \frac{\partial}{\partial t} (\rho \varphi) dV = \iiint_V S dV \quad (3)$$

Aplicando o **Teorema de Gauss-Ostrogadski**, transforma-se uma integral de área em uma integral de volume:

$$\iint_A \vec{n} \cdot \vec{V} dA = \iiint_V \nabla \cdot \vec{V} dV \quad (4)$$

$$\iiint_V \nabla \cdot (\rho \vec{V} \varphi + J) dV + \iiint_V \frac{\partial}{\partial t} (\rho \varphi) dV = \iiint_V S dV \quad (5)$$

$$\iiint_V \left[\nabla \cdot (\rho \vec{V} \varphi + J) + \frac{\partial}{\partial t} (\rho \varphi) - S \right] dV = 0 \quad (6)$$

Logo, é possível então apresentar a equação (7):

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varphi) + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \varphi) = \nabla \cdot J + S \quad (7)$$

O primeiro termo do lado esquerdo representa o acúmulo e o segundo termo representa o transporte convectivo. O primeiro termo do lado direito representa o transporte difusivo e o segundo termo representa sua produção ou consumo. As equações de conservação que regem os fenômenos de transporte geram sistemas de equações diferenciais parciais que, na grande

maioria das vezes, não possuem soluções analíticas. Por meio de métodos numéricos que são apresentados nos tópicos seguintes, as equações diferenciais são reduzidas a um sistema de equações algébricas e resolvidas em elementos de volume, que representam um volume total à ser estudado, trazendo resultados aproximados ao resultado real.

3.3. Escoamento Multifásico

3.3.1. Modelos de Dois Fluidos

O ponto de partida para modelar um sistema multifásico é considerar as variáveis locais instantâneas para cada fase, uma interface e as transferências entre estas fases. Obter uma solução para esta formulação é impossível na prática. Uma saída é calcular médias para se obter equações macroscópicas que podem ser resolvidas (Ishii, 2011).

Para a formulação básica de um sistema multifásico, os efeitos da configuração das fases devido a efeitos viscosos de fricção, a transferência de massa e calor e os demais efeitos interfásicos são bem conhecidos em termos de variação com o tempo. As transferências de quantidade de movimento e forças de pressão através da interface devem ser consideradas. Desprezar estes efeitos simplifica a formulação para, geralmente, um fluxo estratificado puro (Soo, 1990).

Grandes dificuldades são encontradas em formulações locais instantâneas, como:

- Interfaces móveis com deformidades múltiplas causadas por transferências desconhecidas.
- Variáveis com flutuações provocadas por fenômenos turbulentos e movimentos da interface.
- Significantes descontinuidades das propriedades na interface.

Dependendo dos conceitos físicos básicos utilizados para formular o fluxo multifásico, processos de média podem ser classificados em 3 grupos principais (Manninen *et. al*, 1996):

- **Euleriano**: consiste em três partes essenciais: derivação das equações de conservação, equações constitutivas e condições interfaciais.
- **Lagrangeano**: trata a fase fluido como um contínuo e a média no tempo é formulada para acompanhar a trajetória de uma partícula sólida e observá-la em um intervalo determinado. Esta modelagem é popular para se observar a dinâmica de uma suspensão diluída.
- **Boltzmann**: para sistemas gás-particulado onde é aplicada uma teoria cinética da função de distribuição para uma simples partícula.

3.3.2. Formulação Básica

As equações médias para fluxo multifásico podem ser escritas de inúmeras formas. Podem ser derivados pela média do tempo, espaço ou uma combinação de ambas. Porém, as equações resultantes contêm basicamente os mesmos termos. A principal diferença são os tensores-tensão gerados pelos diferentes tipos de média utilizados na derivação das equações. A Figura 9 demonstra o processo lógico envolvido para a formulação básica para problemas multifásicos.

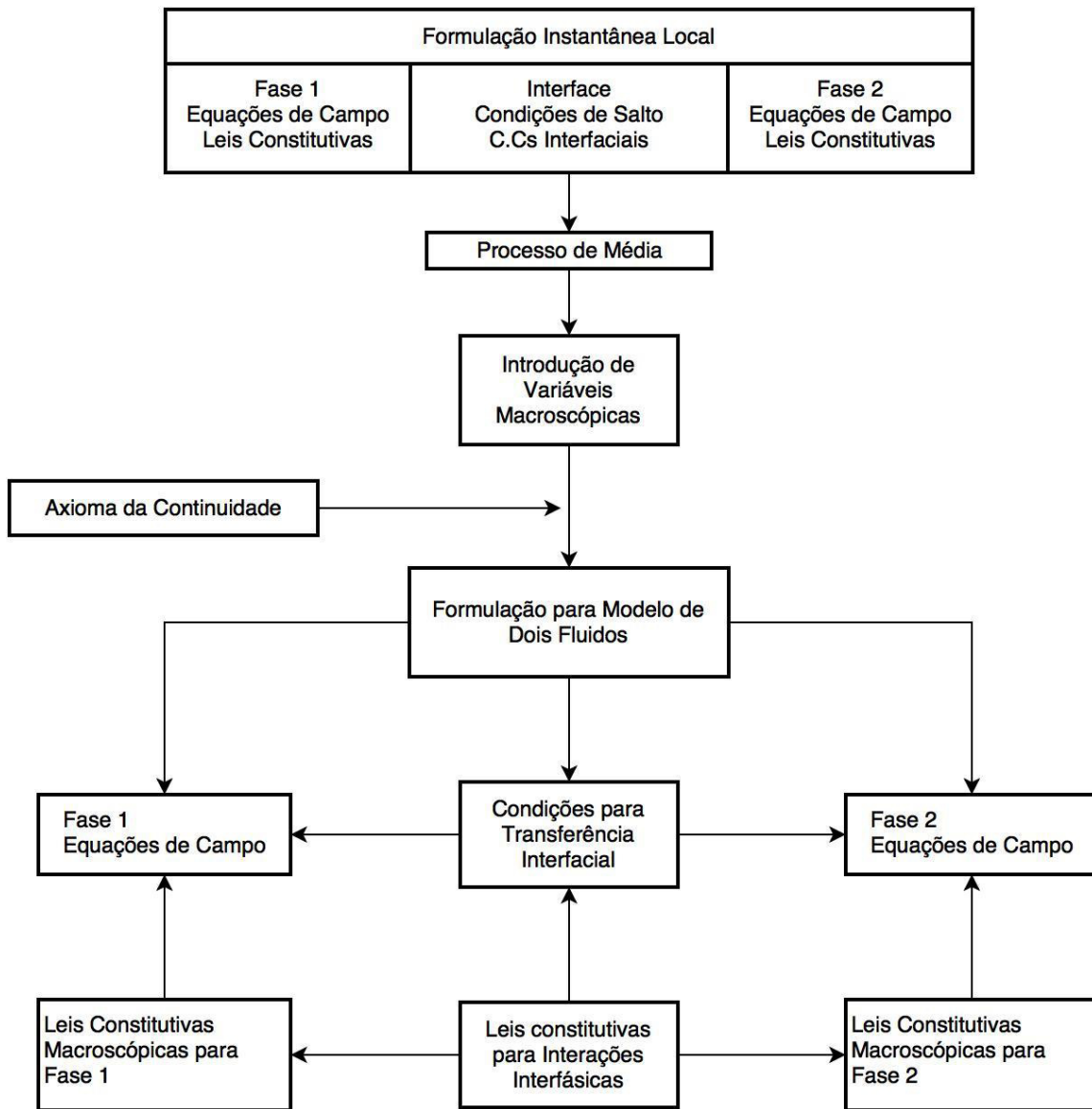


Figura 9 - Considerações para a criação do modelo multifásico Fonte: Ishii (2011).

A seguir são apresentadas as equações de balanço pelas *médias de Favre* seguindo as notações de Ishii (2011), que fazem uso de ponderação mássica.

Duas definições diferentes são comumente utilizadas na derivação das equações para fluxo multifásico. Utilizando a de ponderação mássica mencionada anteriormente, a velocidade média para uma fase k pode ser definida por $\hat{\mathbf{u}}_k = \bar{\mathbf{u}}_{I|k}$, em que:

$$\hat{\mathbf{u}}_k = \frac{\overline{\rho_{Ik} \mathbf{u}_{Ik}}}{\overline{\rho_{Ik}}} = \frac{\overline{\rho_k \mathbf{u}_k}}{\rho_k} \quad (\text{Média de Favre}) \quad (8)$$

As equações de balanço (continuidade e transp. de quantidade de movimento) então se apresentam seguindo a notação de Ishii (2011). A equação da continuidade se torna:

$$\frac{\partial \alpha_k \overline{\rho_k}}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_k \overline{\rho_k} \hat{\mathbf{u}}_k) = \Gamma_k \quad (9)$$

$$\sum_{k=1}^2 \Gamma_k = 0 \quad (\text{expressa a conservação de massa interfacial}) \quad (10)$$

Para fluxo em estado estacionário tem-se:

$$\nabla \cdot (\alpha_k \overline{\rho_k} \hat{\mathbf{u}}_k) = \Gamma_k \quad (11)$$

Se cada fase é originalmente incompressível, então a densidade média $\overline{\rho_k}$ é constante. Então se chega finalmente a:

$$\frac{\partial \alpha_k}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_k \hat{\mathbf{u}}_k) = \frac{\Gamma_k}{\overline{\rho_k}} \quad (12)$$

A equação de **Transporte de Quantidade de Movimento** então é dada por:

$$\frac{\partial \alpha_k \overline{\rho_k} \hat{\mathbf{u}}_k}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_k \overline{\rho_k} \hat{\mathbf{u}}_k \hat{\mathbf{u}}_k) = -\nabla(\alpha_k \overline{\rho_k}) + \nabla \cdot [\alpha_k (\overline{\boldsymbol{\tau}}_k + \boldsymbol{\tau}_k^T)] + \alpha_k \overline{\rho_k} \hat{\mathbf{g}}_k + \mathbf{M}_k \quad (13)$$

Sendo o termo \mathbf{M}_k de transferência interfacial para cada fase que possui a forma:

$$\sum_{k=1}^2 \mathbf{M}_k = \mathbf{M}_m \quad (14)$$

O termo \mathbf{M}_m leva em conta tanto a tensão superficial média $\bar{\sigma}$ entre as duas fases quanto à curvatura média \bar{H}_{21} entre as mesmas.

$$\mathbf{M}_m = 2\bar{H}_{21} \bar{\sigma} \nabla \alpha_2 + \mathbf{M}_m^H \quad (15)$$

A equação (13), analogamente à equação de transporte para uma fase, gera um tensor tensão turbulento τ_k^T , que utilizando a média de Favre, corresponde à:

$$\tau_k^T = -\overline{\rho_{Ik} \mathbf{u}_{Fk} \mathbf{u}_{Fk}} \quad (16)$$

É possível observar que a equação (12) da continuidade, não possui um termo que descreve a difusão turbulenta devido a gradientes de concentração. Esta é uma consequência da utilização de médias ponderadas por massa, que removem todas as correlações de flutuações do tipo $\overline{\rho_{Ik} \mathbf{u}_{Fk}}$. Neste caso, todos os termos turbulentos aparecem nas equações de transporte de movimento.

3.4. Core Annular Flow: Modelagem Física e Equações Governantes

As indústrias desde 1904 possuem interesse na tecnologia de transporte de óleo pesado por meio de lubrificação com água. Isaacs & Speed lançaram a primeira patente naquele ano, na qual discutiram a proposta de estabilizar o escoamento de óleo-água por meio de *Rifling*, que seriam ranhuras helicoidais nas paredes das tubulações de forma a criar aceleração centrípeta (Joseph *et al.*, 1997), ilustradas na Figura 10.

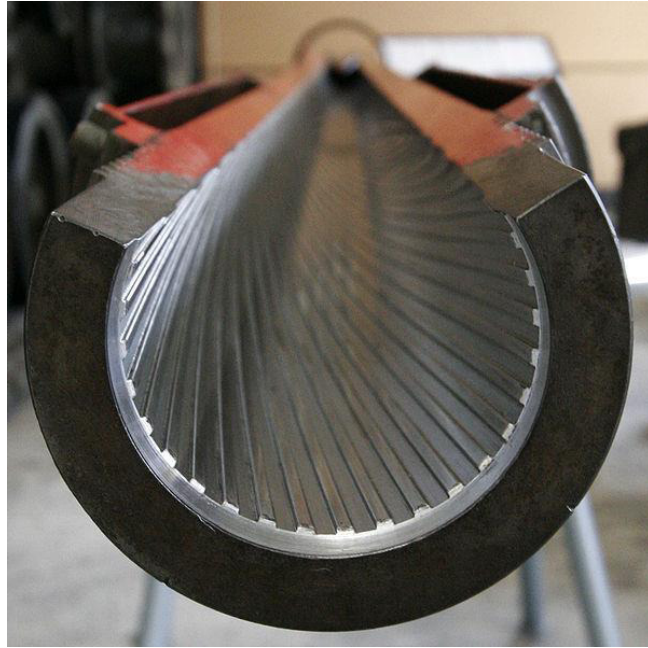


Figura 10 - Exemplo de tubulação com *Rifling*. Fonte: Autodesk Community, acessado em 22/03/2016.

A Figura 11 considera a configuração básica entre dois fluidos imiscíveis, a e b, em um posicionamento horizontal ou levemente inclinado. Considerando fluxo totalmente desenvolvido, as formas integrais das equações de transporte de movimento para o núcleo (c) e o ânulo (w) são apresentadas (Brauner, 1991).

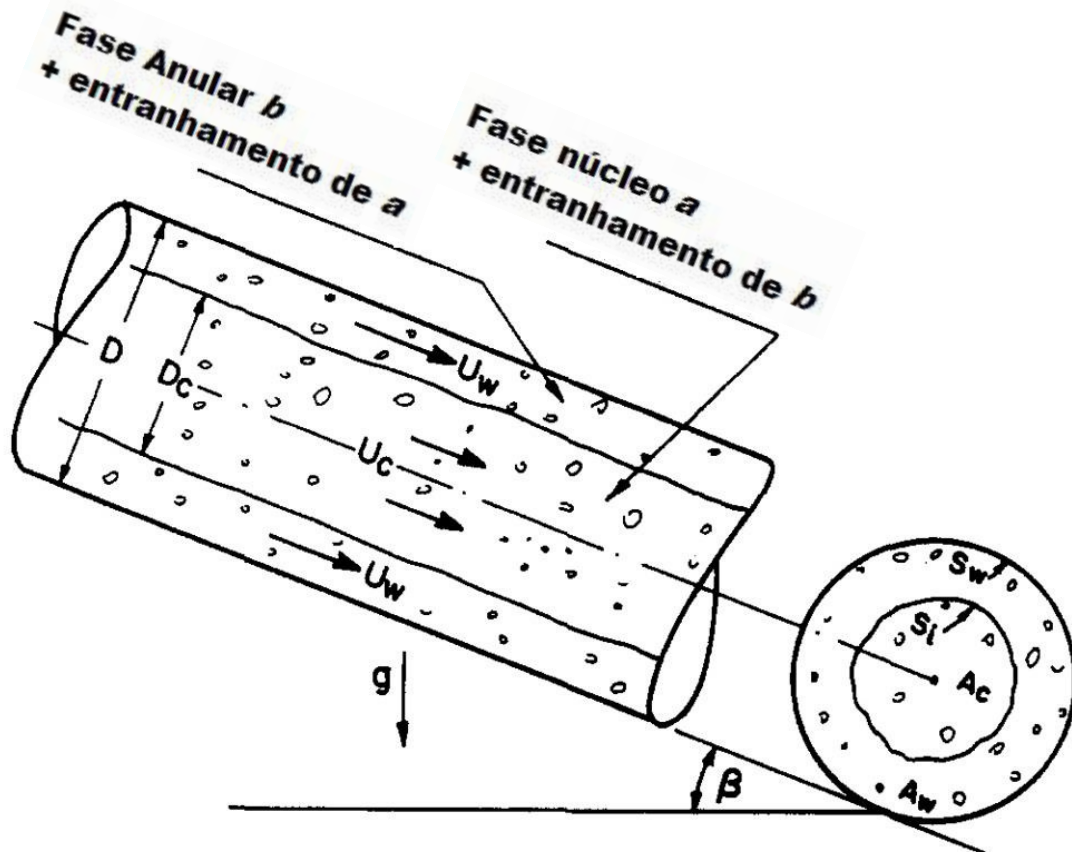


Figura 11 - Variáveis do CAF. Fonte: Brauner (1991)

$$-A_c \left(\frac{dP}{dx} \right) \pm \tau_i S_i + \rho_c A_c g \sin \beta = -A_w \left(\frac{dP}{dx} \right) - \tau_w S_w \pm \tau_i S_i + \rho_w A_w g \sin \beta \quad (17)$$

Sendo

$$\rho_c = \rho_a \alpha_c + \rho_b (1 - \alpha_c) \quad (18)$$

$$\alpha_c = \frac{A_{ac}}{A_c} \quad (19)$$

E

$$\rho_w = \rho_b \alpha_w + \rho_a (1 - \alpha_w) \quad (20)$$

$$\alpha_w = \frac{A_{bw}}{A_w} \quad (21)$$

Para o **caso de regiões** do núcleo e ânulo puros e sem entranhamento, $\alpha_c = \alpha_w = 1$. Logo, eliminando o gradiente de pressão dP/dx , tem-se:

$$-\tau_w \frac{S_w}{A_w} \pm \tau_i S_i \left(\frac{1}{A_c} + \frac{1}{A_w} \right) (\rho_w - \rho_c) \sin \beta = 0; \quad (22)$$

Sendo a tensão de cisalhamento na parede (τ_w), comumente expressa em função dos correspondentes fatores de fricção (f_w), diâmetro hidráulico do ânulo (D_w) e o correspondente número de Reynolds:

$$\tau_w = f_w \frac{\rho_w U_w^2}{2}; \quad (23)$$

$$f_w = C_w \left(\frac{D_w U_w}{\nu_w} \right)^{-n_w} \quad (24)$$

$$D_w = \frac{4A_w}{S_w} \quad (25)$$

Na Interface, a tensão de cisalhamento entre as duas fases é representada por τ_i :

$$\tau_i = f_i \frac{\rho_c (U_c - U_w)^2}{2}; \quad (26)$$

$$f_i = BC_c \left(\frac{D_c U_c}{\nu_c} \right)^{-n_c} \quad (27)$$

Em (24) e (27) as constantes C_c , C_w , n_w e n_c dependem do regime de fluxo em cada fase. As duas fases no fluxo anular podem ter configurações diferentes como laminar-laminar, laminar-turbulento, turbulento-laminar e turbulento-turbulento (Brauner *et al.*, 1991). Estas constantes teóricas podem ter os seguintes valores: $C = 16$ e $n = 1$ para fluxo laminar ou $C = 0,046$ e $n = 0,2$ para condições de fluxo turbulento. B caracteriza o aumento da tensão interfacial decorrente do surgimento de ondas na interface, porém, para sistemas líquido-líquido, na interface ocorrer longas e suaves ondas com baixa frequência B assume valor unitário.

3.4.1. Método Numérico de Discretização: Volumes Finitos

É o método mais utilizado para discretizar equações de transporte, pois ele utiliza como ponto de partida a forma integral da equação de conservação. O domínio a ser estudado é dividido em um número finito volumes de controle e o conjunto de equações é aplicado ao centróide de cada um, onde se localiza um nó computacional em que as variáveis são calculadas.

Os valores das superfícies dos volumes de controle são obtidos através da interpolação em função dos valores dos nós, e métodos de quadratura também são utilizados para aproximar integrais de volume e de superfície (Anderson, 1995).

Outro **aspecto muito atrativo do método dos volumes finitos é que as equações discretizadas possuem uma clara interpretação física**, por este motivo são as mais utilizadas por engenheiros (Versteeg; Malalasekera, 2007). As equações então discretizadas são organizadas em cada um dos pontos nodais (centros dos volumes de controle). Para VCs que são adjacentes

a limites do domínio, as equações são modificadas para incorporar as condições de contorno. O sistema resultante de equações algébrico-lineares é então resolvido para se obter a distribuição da propriedade em questão nos pontos nodais. O processo de transformação das equações diferenciais parciais em equações algébrico-lineares segue na Figura 12.

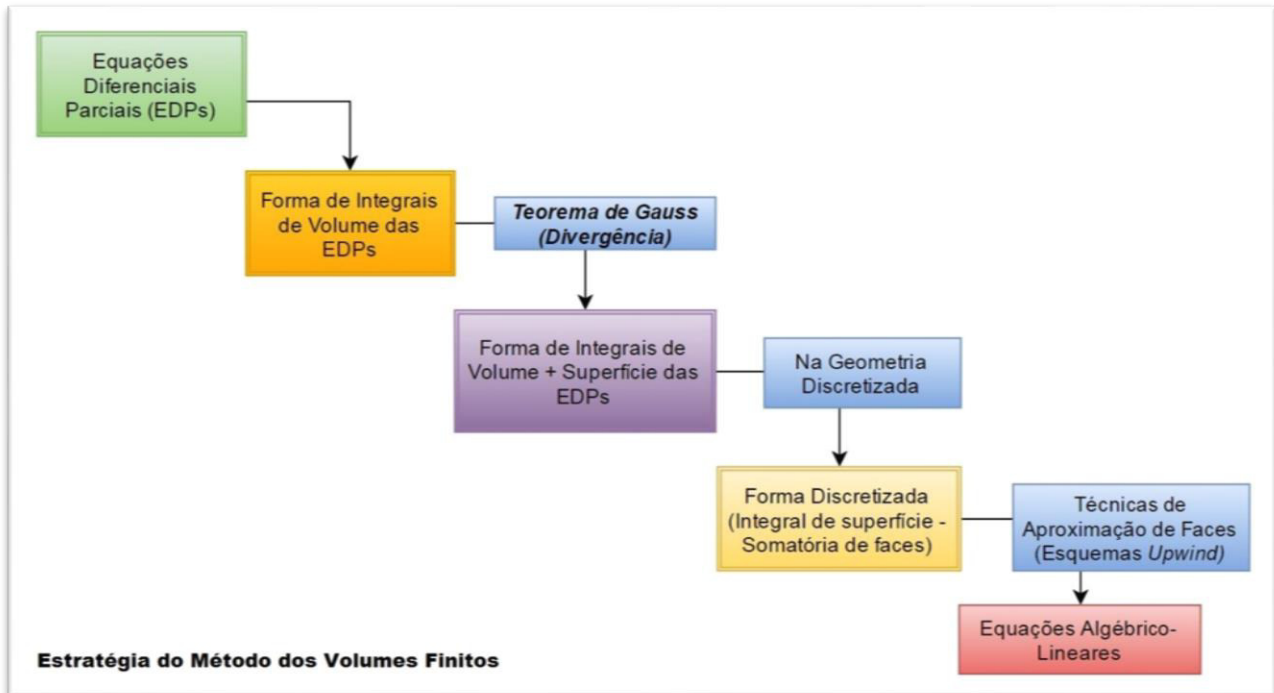


Figura 12 - Estratégia do Método dos Volumes Finitos. Fonte: Criado pelo Autor

A principal desvantagem do método dos volumes finitos em relação ao método das diferenças finitas é o fato de que métodos de ordem superior à segunda são mais difíceis de desenvolver em 3D com malhas não-estruturadas. Isto é devido ao fato do método dos volumes finitos requerer três níveis de aproximação: interpolação, diferenciabilidade e integração (Gonçalves, 2007).

O conceito de Volume de Controle se desenvolve com a possibilidade de se considerar que o domínio de interesse está fixo no espaço com o fluido se movendo por dentro dele ou que ele pode estar se movendo com o fluido em que as mesmas partículas estão sempre dentro do mesmo volume. Isto é demonstrado na Figura 13. Os princípios físicos fundamentais são aplicados ao fluido dentro do volume de controle e para o fluido que cruza a fronteira ou superfície do mesmo (Anderson, 1995).

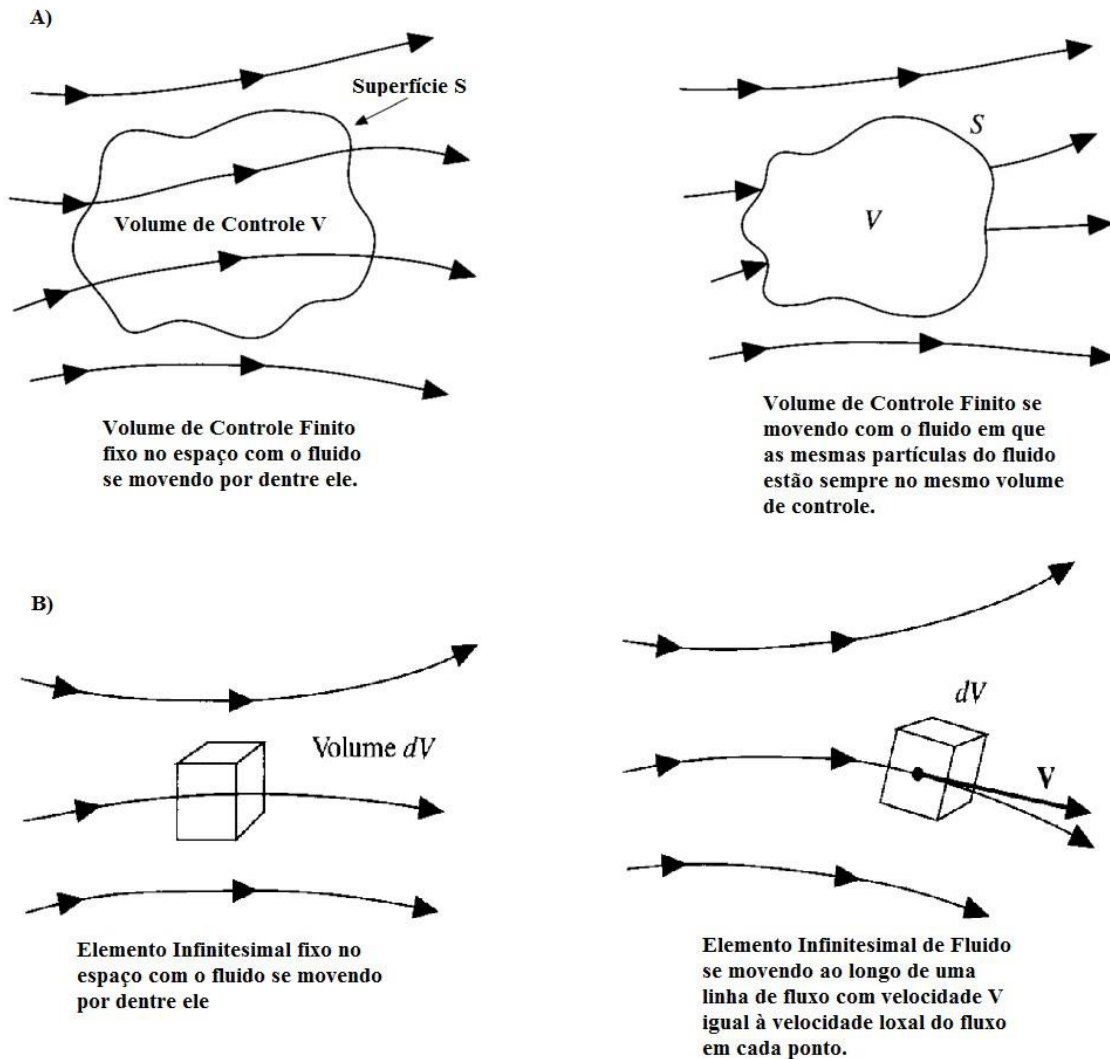


Figura 13 - A) Abordagem para volume de controle finito; B) Abordagem para elemento infinitesimal. Fonte: Anderson (1995).

3.5. Malhas

Malha é um conjunto de pontos distribuídos em um campo de cálculo para uma solução numérica de um conjunto de equações diferenciais parciais. Elas podem ser **estruturadas**, ou seja, todos os elementos possuem vizinhos em suas faces que podem ser identificados por índices de endereço ijk que permutam coerentemente em toda a malha, ou **não-estruturadas**, em que não possuem relação com as direções das coordenadas. No primeiro caso os pontos formam células retangulares em 2D, ou células hexaédricas em 3D (com lados não-planares). Malhas não-estruturadas geralmente consistem de triângulos e tetraedros em 2D e 3D, respectivamente, em sua forma mais

básica, mas pode ser feita de elementos diferentes e variados (malha híbrida) em geral (Thompson *et al.*, 1998).

3.5.1. Malhas Estruturadas e Não-Estruturadas

A geração de **malhas estruturadas** tem suas raízes nos EUA no trabalho de *Winslow e Crowley* no *Lawrence Livermore National Lab* no final da década de 1960 e na Rússia no trabalho de Godunov e Prokopov mais ou menos na mesma época (Winslow; 1967).

O uso de malhas *compostas* tem sido a chave para o tratamento geral de configurações 3D com malhas estruturadas. Malhas compostas se referem ao fato de que a região física é dividida em subregiões, cada uma delas geradas por uma malha estruturada. Essas “submalhas” então podem ser “coladas” criando interfaces comuns e serem conectadas por uma malha não-estruturada ou até mesmo serem sobrepostas.

Malhas compostas em que as sub-regiões compartilham interfaces comuns são referidas como **blocos ou zonas**. O uso de “zonas” vem principalmente de aplicações do CFD, onde é possível a designação de diferentes equações-solução em diferentes regiões de fluxo (Gonçalves, 2007). Na Figura 14 é possível visualizar um exemplo deste tipo de malha.

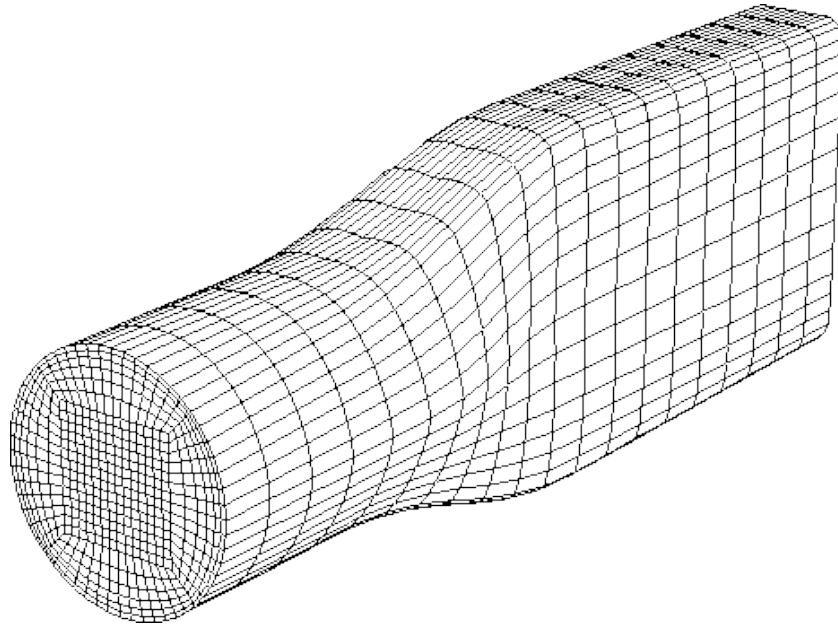


Figura 14 - Malha estruturada simples por blocagem.

As malhas estruturadas por blocos abriram a porta para o mundo real do CFD no final dos anos 80 e muitas aplicações práticas ainda são baseadas nestas malhas (Thompson *et al.*, 1998). Embora a malha seja logicamente retangular em cada bloco, o mesmo se encaixa de uma maneira não-estruturada, permitindo manter a completa continuidade entre blocos.

A criação de **malhas não-estruturadas** tem suas raízes no mundo da modelagem de estruturas por elementos finitos. As primeiras introduções para a comunidade de CFD vieram nos anos 80 primariamente de *Baker, Weatherill e Lohner* (Thompson *et al.*, 1998). Malhas não-estruturadas possuem uma inerente simplicidade de construção em que, por definição, nenhuma estrutura é requerida. Também não é inerentemente necessário haver comunicação entre o gerador de malha e a topologia. Tradicionalmente, malhas não-estruturadas têm sido utilizadas com o método dos elementos finitos e existem muitos métodos para gerá-las.

3.5.2. Malhas Ortogonais e Não-Ortogonais

Existem dois tipos de sistemas de coordenadas em que as malhas podem ser geradas

- Malhas **ortogonais com coordenadas cartesianas e curvilíneas**: as linhas da malha são sempre perpendiculares em intersecções

- Malhas **não-ortogonais**: as linhas da malha não se interceptam necessariamente em ângulos de 90° .

Nos dois tipos de malha, todos os limites dos domínios coincidem com linhas de coordenadas, logo, os detalhes geométricos podem ser incorporados com maior precisão sem a necessidade de uma aproximação gradual (Versteeg; Malalasekera, 2007). As Figura 15 e Figura 16 demonstram respectivamente o conceito de malhas ortogonais e não-ortogonais.

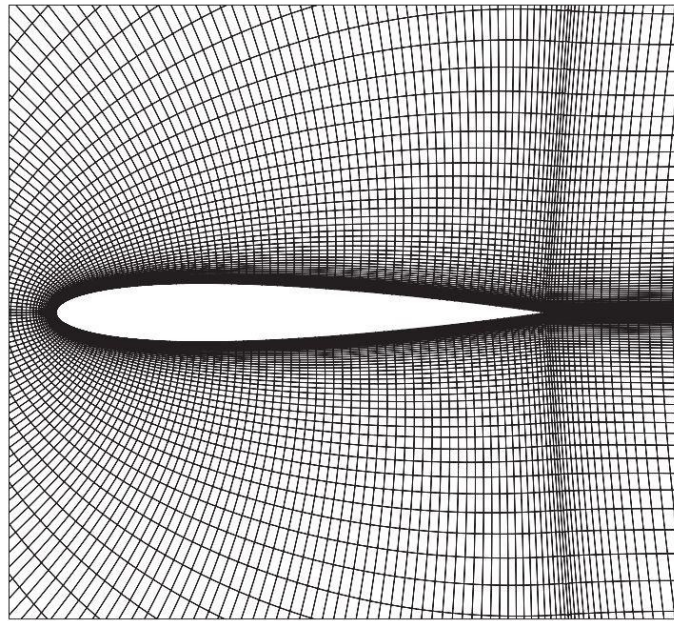


Figura 15 - Exemplo de malha ortogonal curvilínea. Fonte: Versteeg & Malalasekera (2007)

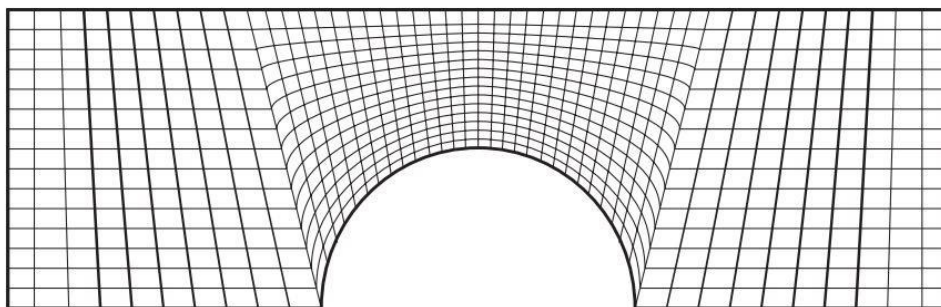


Figura 16 - Exemplo de malha não-ortogonal. Fonte: Versteeg & Malalasekera (2007)

3.6. Fluidodinâmica Computacional - CFD

Fluidodinâmica computacional é a análise de sistemas envolvendo escoamento, transferência de calor, e fenômenos associados (reações químicas) por meio de simulações computacionais (Versteeg; Malalasekera, 2007). É uma ferramenta numérica que resolve as equações gerais de conservação de grandezas físicas assim podendo prever o comportamento de fluidos escoando através de equipamentos e obstáculos.

Uma das vantagens do CFD é que o usuário tem possibilidades de escolha quase ilimitadas do nível de detalhe de seus resultados, porém, o propósito da computação é a compreensão que é possível conseguir sobre os fenômenos de transporte que ocorrem em determinado equipamento e não os valores numéricos em si. Muitas vantagens substanciais e concretas podem ser observadas com a aplicação da ferramenta, dentre elas:

- Redução do tempo e do custo de projetos e novos *designs*.
- Habilidade de estudar sistemas onde experimentos controlados são difíceis ou impossíveis de serem conduzidos.
- Possibilidade de estudar sistemas que possuem condições que apresentam alto risco e até maiores que seus limites normais de operação (por exemplo, estudos de segurança ou até cenários de acidentes)

3.6.1. Modelos Multifásicos para CFD

O *solver* utilizado neste trabalho é o *ANSYS FLUENT*. O *software* entende como escoamento multifásico quando em uma mesma célula, materiais diferentes estão presentes ou formam uma interface distinguível entre si.

O programa apresenta diversos modelos multifásicos, para abordagens Eulerianas e Lagrangeanas, são eles: **VOF** (*Volume Of Fluid*), **Mistura** e **Euleriano**. Cada um destes demonstrando ainda a possibilidade de ser acoplado com métodos distintos de reprodução da interface formada entre os dois fluidos.

3.6.1.1. Volumes de Fluido

Fluidos imiscíveis são comumente encontrados na natureza e também na indústria. As aplicações incluem processos envolvendo separação, extração, mistura e reações químicas. Uma simulação detalhada de escoamentos multifásicos envolvendo fluidos imiscíveis busca fornecer uma representação precisa da interface formada pelos dois fluidos. Estes problemas ainda podem incluir fenômenos como coalescência e ruptura que denota o aumento da necessidade por uma precisa e definida interface. É um modelo homogêneo relativamente moderno, datando de 1981, que é relativamente dispendioso por causa do seu elevado custo computacional (Hirt; Nichols, 1981).

O modelo dos volumes de fluido foi criado especificamente para escoamentos onde há interfaces acentuadas, contínuas e bem definidas, podendo ser intermitentes ou não (Gopala; Van Wachem, 2008). Em cada célula de uma malha é usual a utilização de somente um valor para cada variável dependente, definindo o estado do fluido além de agregar um conceito de volume fracionado do mesmo (Hirt; Nichols, 1981). De acordo com a Figura 17, é possível entender a implementação do modelo por meio da adição de um fator α às equações da continuidade (28) e transporte de movimento (29) além de incluir no conjunto de equações, uma equação de indicação de fase (30).

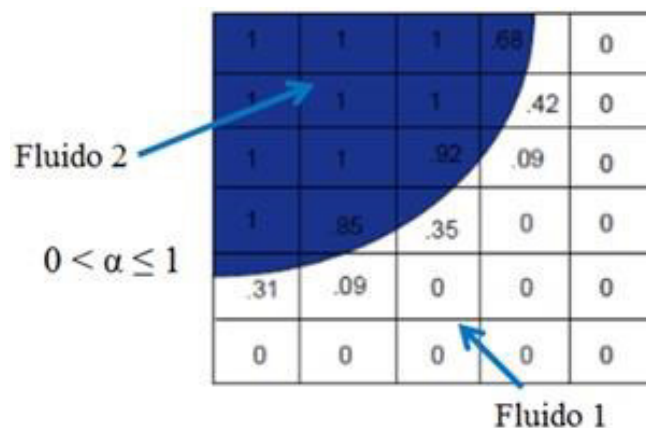


Figura 17 - Representação do método VOF. Fonte: Manual de Teoria ANSYS (2014)

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho}u) = 0 \quad (28)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} u}{\partial t} + \nabla(\bar{\rho} u u) = -\nabla P + \nabla \tau + \partial \bar{\rho} g + S = 0 \quad (29)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla(\alpha u) = 0 \quad (30)$$

Sendo que $\bar{\rho} = \sum \alpha_k \rho_k$. O subscrito se refere às propriedades de mistura

No entanto, a aplicabilidade deste método e dos demais modelos multifásicos é específica e limitada. É necessário conhecer o funcionamento detalhado e o nível de representatividade de cada um, pois, em conjunto com um modelo de turbulência, características de fluxo podem ser ressaltadas ou depreciadas. Adiante é discutida a influência dos modelos de turbulência nos modelos multifásicos e quais os mais apropriados para representar o fenômeno em estudo. Abaixo são citadas algumas limitações do modelo VOF (Bestion, 2012; Gopala; Van Wachem, 2008; Hirt; Nichols, 1981):

- Para representação precisa de uma interface fina e com alta (ou mesmo baixa) frequência de variações espaciais, é necessário alto refino de malha para que o efeito seja observado. Muitas vezes, limitações computacionais podem ser cruciais para a reprodução destes fenômenos.
- Todos os volumes de controle devem estar preenchidos ou com um único fluido ou com uma combinação das duas fases. O modelo não permite a existência de vazios.
- Somente uma das fases pode ser definida como um gás compressível. Não há limitação para a utilização de líquidos compressíveis.
- Esquemas de segunda ordem implícitos para o tempo não podem ser utilizados com o VOF.
- Somente é possível utilizar um *solver* baseado em **pressão**. O *solver* baseado em **densidade** não está disponível com o VOF, pelo fato da possibilidade de coexistir dois ou mais fluidos com densidades diferentes na mesma célula.

3.6.1.1.1. Interpolação próxima da interface

O método *Volume of Fluid* possui um tratamento de interface distinto de outros modelos. Pelo fato de a formulação dos volumes de controle do ANSYS Fluent necessitar que os fluxos de difusão e convecção sejam computados e balanceados com os termos fonte dentro do próprio volume de controle, existem dois esquemas para representar a interface e os efeitos dos fluxos nela, o esquema de **Reconstrução Geométrica** e o esquema de **Doador-Receptor**. A Figura 18 demonstra o funcionamento dos esquemas de interface.



Figura 18 - Esquemas de interpolação na interface. Fonte: Manual de teoria ANSYS (2014)

3.6.1.2. Modelo de Mistura

O modelo de mistura é um modelo simplificado heterogêneo de escorregamento que pode ser usado de diversas maneiras. Pode ser utilizado para modelar fluxos multifásicos onde as fases se movem em diferentes velocidades, mas podem adotar equilíbrio local durante o escoamento. O modelo de mistura pode modelar n fases (fluidos ou partículas), resolvendo as equações de movimento, continuidade e energia para a mistura, as equações de fração volumétrica para a fase secundária e expressões algébricas para as velocidades relativas, onde pode haver escorregamento (*Slip Velocity*).

O modelo de mistura é um bom substituto para o modelo Euleriano completo em diversos casos. Um modelo multifásico completo pode não ser viável quando existe uma grande distribuição de uma fase particulada, quando as interações entre as fases são desconhecidas ou sua confiabilidade é questionável para o problema. Um modelo mais simples, como o modelo de mistura, pode atuar tão bem quanto um modelo multifásico completo e ainda resolvendo um menor número de variáveis que o modelo completo, principalmente quando entre as fases ocorre escorregamento (*drift*).

O modelo de mistura, como o modelo *VOF*, usa uma abordagem de fluido simples. Ele difere do *VOF* de duas formas (ANSYS, 2014):

- Permite que as fases sejam interpenetrantes. As frações volumétricas α_q e α_p para um volume de controle podem ser iguais a qualquer valor entre 0 e 1, dependendo do espaço ocupado pela fase q e a fase p .
- Permite que as fases se movam em diferentes velocidades, usando o conceito de velocidades de escorregamento. O modelo também permite que as fases eventualmente se movam na mesma velocidade, sendo reduzido a um equivalente modelo homogêneo (ANSYS, 2014).

3.6.1.3. Modelo Euleriano

O modelo multifásico Euleriano completo que está presente no *software* permite que as equações para as fases sejam calculadas separadamente, ainda que elas interajam entre si. As fases podem ser sólidas, líquidas ou gasosas, permitindo qualquer combinação destas. Com este modelo, o número de fases secundárias é somente limitado pelos requerimentos de memória e se o comportamento complexo dificulta a convergência. É um modelo que demanda muito trabalho computacional e pode ser considerado caro em relação aos métodos anteriores.

A solução adota o seguinte:

- As duas fases possuem a mesma pressão
- As equações de quantidade de movimento e continuidade são resolvidas para cada fase

- Várias funções interfásicas de arraste estão disponíveis, que são apropriadas para vários tipos de regimes multifásicos.
- Os modelos de turbulência RANS $k-\varepsilon$ e $k-\omega$ estão disponíveis para serem acoplados ao modelo Euleriano, e podem ser aplicados para cada fase individualmente ou para a mistura (ANSYS, 2014).

Este modelo possui múltiplas opções de configuração, que permitem direcioná-lo a resolver com maior precisão características específicas do escoamento, que serão abordadas nos próximos tópicos.

3.6.1.3.1. Modelo de Volume Multi-Fluídico

O modelo VOF acoplável ao modelo Euleriano permite que se utilize os esquemas de interpolação próxima da interface, que deve ser ativado somente para casos que requerem uma reprodução precisa da interface entre as fases. Esta ferramenta pode ajudar a solucionar limitações que o modelo *VOF* pode oferecer por causa de sua formulação que envolve velocidade e temperatura compartilhadas entre as duas fases. Este esquema é apresentado na forma explícita, o que torna mais desafiadora a convergência por problemas de estabilidade.

3.6.2. Modelos de Turbulência

Descrever o fenômeno da turbulência é uma tarefa complexa e imprecisa pelo fato de haver mais fatores desconhecidos do que equações ou experimentos para explaná-los.

O problema de fechamento da turbulência nasce da não-linearidade presente nas equações de Navier-Stokes que corresponde ao termo do tensor tensão de Reynolds, este que representa as flutuações heterogêneas de velocidade (Shu-tang; Yu-lu, 1995). A não existência de uma lei de distribuição estatística precisa para representar este termo tornam necessárias relações de equações algébricas ou diferenciais. Estas relações sempre se demonstram de ordem superior à variável desconhecida inicialmente. Se ϕ é um escalar, então $\overline{\phi u_j}$ é um vetor, se ϕ é um vetor, então $\overline{\phi u_j}$ é um tensor de segunda ordem (Hanjalic, 2004). Este fato aumenta significativamente a complexidade do

problema e o tempo computacional, dependendo diretamente do tipo da resolução necessária. O tipo e o número de equações auxiliares define o nível de fechamento.

No campo da mecânica dos fluidos, turbulência é um fenômeno inerentemente tridimensional e dependente do tempo em que movimentos irregulares são realizados por gases ou líquidos quando estes enfrentam obstáculos sólidos ou mesmo quando correntes vizinhas do mesmo fluido escoam entre si (Wilcox, 1993). No entanto, a discussão apresentada acima não se propõe a explicar inteiramente este tópico complexo.

Em engenharia, praticamente todos os fluxos de interesse são turbulentos e serão abordadas técnicas diferentes para representar estes fenômenos. Para o presente trabalho, modelos do tipo RANS e resoluções do tipo LES foram utilizadas. O nível de resolução de cada tipo de modelo demonstrado na Figura 19.

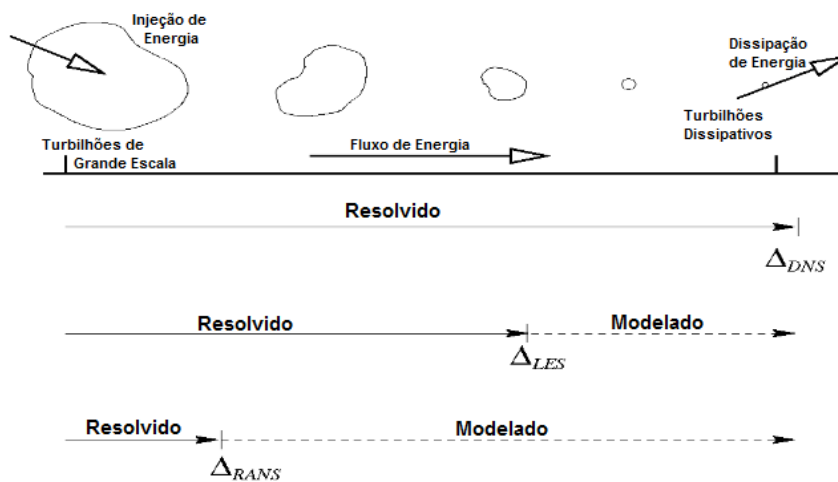


Figura 19 - Nível de resolução para turbulência em CFD. Fonte: Adaptado de Visavale (2016), Manual de introdução à turbulência.

3.6.2.1. Modelos *RANS*

Para introduzir este tipo de modelagem, conceitos abordados por Reynolds em 1895 são apresentados. As médias de Reynolds no geral assumem uma variedade de formas envolvendo tanto uma integral como uma somatória. As três formas mais pertinentes de modelagem de turbulência são as **médias temporais**, as **médias espaciais** e as **médias de conjunto**.

- As **médias temporais** são apropriadas para a **turbulência estacionária**. Um escoamento que, em média, não varia com o tempo.
- As **médias espaciais** são apropriadas para **turbulência homogênea** que, em média, é uniforme em todas as direções.
- As **médias de conjuntura** são os tipos mais genéricos de média. Idealizando um exemplo, em termos de medições de N experimentos idênticos, onde $f(\mathbf{x}, t) = f_n(\mathbf{x}, t)$.

Para casos que a turbulência que é tanto estacionária quanto homogênea, é possível assumir que essas três médias são iguais. Essa hipótese é conhecida como **hipótese ergódica**. No entanto, todos os problemas de engenharia envolvem **turbulência heterogênea**, então a hipótese anterior praticamente não é válida. A média no tempo é a forma mais apropriada de se aplicar as médias de Reynolds (Wilcox, 1993). Equacionando a ideia antes apresentada, se expressa a velocidade instantânea, como uma soma de uma média e uma parte flutuante:

$$u_i(\mathbf{x}, t) = U_i(\mathbf{x}) + u'_i(\mathbf{x}, t) \quad (31)$$

A média da velocidade $U_i(\mathbf{x})$ é a velocidade definida por:

$$U_i(\mathbf{x}) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_t^{t+T} u_i(\mathbf{x}, t) dt \quad (32)$$

A média no tempo da velocidade média novamente é o mesmo valor em uma média temporal:

$$\overline{U}_i(\mathbf{x}) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_t^{t+T} U_i(\mathbf{x}) dt = U_i(\mathbf{x}) \quad (33)$$

Existem fluxos em que o escoamento médio apresenta pequenas variações no tempo que não são turbulentas por natureza e para acomodar tais afirmações, as equações (31) e (32) são modificadas para:

$$U_i(\mathbf{x}, t) = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} u_i(\mathbf{x}, t) dt, \quad T_1 \ll T \ll T_2 \quad (34)$$

Em que T_2 é a escala de tempo característica das pequenas variações do fluxo que não é considerada pertencente à turbulência. A Figura 20 representa uma média espacial para flutuações temporais em um escoamento no eixo x .

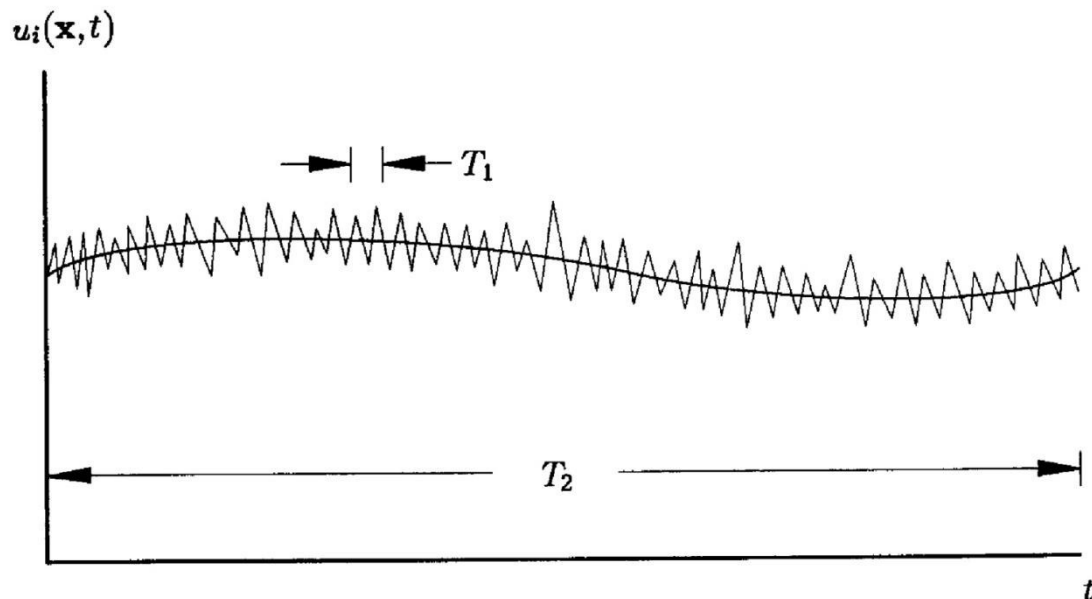


Figura 20 - Média no tempo para turbulência não estacionária (Tennekes, Lumley, 1972).

Para fluxos periódicos, é recomendada a utilização de **Médias de Fase**, porém não é um método muito preciso. Para uma representação mais rigorosa, é recomendada a utilização de métodos como o **LES**.

Partindo da equação de conservação de massa e movimento, temos:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (35)$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho \frac{\partial \tau_{ji}}{\partial x_j} \quad (36)$$

Tal que os vetores u_i e x_i são velocidade e posição respectivamente, t é o tempo, p é pressão, ρ é a densidade e τ_{ij} é o tensor tensão definido por:

$$\tau_{ij} = 2\mu s_{ij} \quad (37)$$

Sendo μ a viscosidade molecular e s_{ij} é o *tensor deformação*:

$$s_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (38)$$

Simplificando o processo de média no tempo, o termo convectivo é reescrito na forma conservativa:

$$u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j u_i) - \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j u_i) \quad (39)$$

Combinando as equações (36) à (39) então temos a *Equação de Navier-Stokes* em sua forma conservativa:

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} = 0 \quad (40)$$

$$\rho \frac{\partial U_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial}{\partial x_j} (U_j U_i + \overline{u'_j u'_i}) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (2\mu S_{ji}) \quad (41)$$

Como é possível observar, além da substituição de variáveis instantâneas por valores médios, a única diferença entre as equações instantâneas e as equações de média, é o aparecimento da correlação $\overline{u_j' u_i'}$. Esta que é uma chave fundamental para o problema da turbulência para engenharia. A equação (41) então é reescrita em sua forma canônica para modelagem de turbulência:

$$\rho \frac{\partial U_i}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (2\mu S_{ji} - \overline{\rho u_j' u_i'}) \quad (42)$$

A equação (42) é denominada de *Equações de Navier-Stokes por Médias de Reynolds* ou **RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes Equation)** (Wilcox, 1993).

3.6.2.1.1. Modelo *k-epsilon*

É um modelo de turbulência de duas equações, uma para o K (energia cinética turbulenta) e outra para o ε (taxa de dissipação de K). Consolidado em meados dos anos setenta por Launder & Spalding (1972), é um modelo bastante utilizado por seu relativo baixo custo computacional e confiável reprodutibilidade numérica de escoamentos turbulentos desenvolvidos. Leva como fundamento o conceito de viscosidade turbulenta proposto por Boussinesq, que foi o primeiro que considerou que a transferência de quantidade de movimento molecular e turbulento são análogas (Versteeg; Malalasekera, 2007). A viscosidade turbulenta é definida como:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (43)$$

Sendo C_μ uma constante adimensional. O modelo $k-\varepsilon$ usa as equações de transporte (44) e (45) para o k e ε :

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k U) = \text{div} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \text{grad } k \right] + 2\mu_t S_{ij} \cdot S_{ij} - \rho \varepsilon \quad (44)$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho\varepsilon U) = \text{div} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \text{grad } \varepsilon \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t S_{ij} \cdot S_{ij} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (45)$$

Os termos das equações representam individualmente:

Taxa de mudança para k ou ε	+	Transporte de k ou ε por convecção	=	Transporte de k ou ε por difusão	+	Taxa de produção de k ou ε	-	Taxa de desaparecimento de k ou ε
---	---	--	---	--	---	--	---	---

A indústria possui muitos problemas de escoamento para serem resolvidos e que não aguardarão por uma concepção universal de um modelo de turbulência muito abrangente e computacionalmente viável para rápidas resoluções. O modelo k - ε ainda é amplamente utilizado em aplicações industriais e produz resultados úteis apesar de sua abrangência relativamente limitada a escoamentos muito turbulentos. Muitos setores da indústria estão especificamente interessados em uma classe limitada de escoamentos, como por exemplo, escoamentos em tubulações, turbinas e equipamentos que apresentam escoamentos essencialmente turbulentos. Os modelos RANS de viscosidade turbulenta são:

- Simples, devido à consideração de uma viscosidade turbulenta isotrópica.
- São estáveis, devido a estabilidade promovida no escoamento médio pelos gradientes de segunda ordem.
- Funcionam razoavelmente bem em um grande número de aplicações de engenharia.
- Por serem isotrópicos, podem não conseguir uma boa previsão das tensões normais.
- Possuem grandes dificuldades em computar efeitos de curvatura e recirculações.

3.6.2.1.2. Modelo *RSM* (*Reynolds Stress Model*)

Um modelo que poderá ser representativo para este estudo é o *Reynolds Stress Model*. Este modelo possui abordagem de média como o modelo K- ϵ ou o K- ω , porém, sua principal diferença se destaca pelo fato de não se basear em uma abordagem que se apoia na hipótese de Boussinesq.

A grande vantagem da hipótese de Boussinesq é o baixo custo computacional associado com a utilização do conceito de viscosidade turbulenta μ_t . A sua maior desvantagem, significativa para este estudo, é o fato de os modelos assumirem que μ_t é uma **quantidade escalar isotrópica**. Isto significa que as quantidades turbulentas médias possuem o mesmo valor em todas as suas direções, causando em uma invariância em fenômenos rotacionais (Escue; Cui, 2009).

O modelo *RSM* modela equações de transporte para cada um dos termos do tensor tensão de Reynolds, junto com uma equação para a taxa de dissipação. **O RSM inclui os efeitos anisotrópicos da turbulência**, o que o torna superior a modelos baseados na hipótese de Boussinesq quando utilizado para simular escoamentos que apresentam rotação e correntes secundárias. A precisão do RSM é limitada pelas premissas de fechamento ao modelar vários termos nas equações de transporte que seguem (Escue; Cui, 2009):

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial}{\partial t} (\rho \overline{u'_i u'_j}) + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k \overline{u'_i u'_j}) \\
 = - \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho \overline{u'_i u'_j u'_k} + p (\delta_{kj} u'_i + \delta_{ik} u'_j)) + \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\mu \frac{\partial}{\partial x_k} (\overline{u'_i u'_j}) \right] \\
 - \rho \left(\overline{u'_i u'_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u'_j u'_k} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) + p \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right) - 2\mu \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \frac{\partial u'_j}{\partial x_k} \\
 - \mathbf{2\rho\Omega_k} (\overline{u'_j u'_m} \epsilon_{ikm} + \overline{u'_i u'_m} \epsilon_{jkm})
 \end{aligned} \tag{46}$$

Sendo o último termo da equação em negrito o termo de produção por rotação gerada pelo sistema.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \epsilon U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} P_{ii} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \tag{47}$$

3.6.2.2. Modelos do tipo *LES (Large Eddy Simulation)*

Uma simulação do tipo *LES (Large Eddy Simulation)* ou “Simulação de Grandes Turbilhões” é um método computacional para resolução de problemas de CFD que consiste em resolver turbilhões de grandes escalas e modelar os de pequenas escalas (Pope, 2000). A premissa principal deste método é que os grandes turbilhões são diretamente afetados pelas condições de contorno e precisam ser computados (Pope, 2000). Por outro lado, pequenos turbilhões são praticamente isotrópicos (possuem qualitativamente as mesmas propriedades físicas em todas as direções) e são convenientemente modelados para amenizar o custo computacional.

Os pequenos turbilhões que são modelados são maiores que a escala de Kolmogorov, por esse motivo, passos de tempo muito maiores podem ser utilizados e escoamentos com grandes números de Reynolds também podem ser computados. Um conceito fundamental deste tipo de modelagem é a de **filtragem**. Os diversos tipos de filtro fornecem uma definição formal para o processo de média e separam as **escalas determináveis** das **escalas isotrópicas** (modeladas).

O Fluxo convectivo da equação de *Navier-Stokes* é dividido em 3 tensores que representam escalas de energia diferentes. O **Leonard stress**, o **Cross-term stress** e o **SGS (subgrid scale) Reynolds stress**. Os dois primeiros, por removerem considerável energia dos grandes turbilhões, podem ser computados diretamente. O problema fundamental está em modelar as menores escalas, que o **SGS Reynolds Stress** representa que constituem quantitativamente entre 20 e 30% do espectro de turbulência.

Smagorinsky (1963) foi o primeiro a postular um modelo para os tensores **subgrid**. É assumido que os tensores seguem um processo de gradiente para difusão, similar ao movimento molecular. O tensor τ_{ij} é dado por:

$$\tau_{ij} = 2\mu_t S_{ij}, \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (48)$$

Onde a **viscosidade turbulenta de Smagorinsky** é:

$$\mu_t = \rho(C_s\Delta)^2 \sqrt{S_{ij}S_{ij}} \quad (49)$$

Sendo C_s , o coeficiente de Smagorinsky. Em uma tentativa de reproduzir o fenômeno da **retrodifusão** (pequenos turbilhões perdem energia para grandes turbilhões), Lilly (1966) assume que:

$$\mu_T = \rho C_L \Delta q \quad (50)$$

Sendo C_L um coeficiente de fechamento e q^2 é a energia cinética SGS. O método *LES* é uma promessa moderna, uma ferramenta de design que evoluirá paralelamente com o progresso dos recursos computacionais de memória e velocidade. Esforços contínuos são depositados no desenvolvimento de um modelo satisfatório do **SGS**. Apesar de ser um método caro, pode ajudar outros modelos de turbulência mais simplórios a evoluir.

4. Artigos Analisados

4.1. *Simulation of core annular downflow through CFD – A comprehensive study.* (Ghosh; et al., 2010).

O Transporte de óleo pesado possui grande importância experimental, numérica e analítica devido à grande fatia representativa na indústria. Por este motivo, experimentos numéricos foram conduzidos para representar por meio de CFD o escoamento descendente anular água-óleo. Pelo fato de existirem muitas lacunas na literatura sobre este tipo de escoamento, a premissa inicial foi de reproduzir os experimentos de bancada realizados por *Bai et al.* (1992), que formaram um grupo experiente em conduzir estudos sobre o CAF óleo-água. Foi utilizado o *software ANSYS Fluent* na versão 6.3.26 para modelar o CAF descendente escoando por uma tubulação de 0,012 metros de diâmetro. O modelo é então validado com resultados experimentais obtidos pelos autores em perda de carga e espessura do núcleo.

Um modelo tridimensional foi considerado para estudar o CAF descendente. Os cálculos foram feitos para um regime transiente para se observar o desenvolvimento inicial do CAF. as considerações iniciais são de os líquidos imiscíveis com propriedades constantes e entrada faceada para contato normal entre as duas fases.

Os dois fluidos apresentam experimentalmente uma interface bem definida e em sua grande parte contínua, por este motivo, uma abordagem Euler-Euler para as duas fases foi escolhida. Utilizando inicialmente um modelo VOF (*Volume of Fluid*), uma única equação de transporte de movimento é resolvida e compartilhada pelas duas fases e a localização de cada fluido é obtida através de uma função marcadora em que a fração volumétrica de cada volume finito é obtida para cada fase.

No presente caso, é considerado que o fluxo de óleo no núcleo é sempre laminar devido à sua altíssima viscosidade e levada em comparação com a água, em que o fluxo anular é turbulento. No entanto, o modelo $k-\epsilon$ padrão foi utilizado.

Para a parede, foi considerado o não-deslizamento e o ângulo de contato com a parede é de 27° . É o ângulo de contato entre a água e o vidro (material da tubulação), medido por um goniômetro nos experimentos físicos. As velocidades foram variadas entre as fases para se estudar o comportamento da formação da interface.

Foram criadas malhas estruturadas através do *software* GAMBIT para capturar a hidrodinâmica da interface, com refino de elementos na região que abrangia a interface do que no filme da parede. Para checar a independência dos resultados, um estudo de malha foi realizado.

Devido ao comportamento dinâmico de um escoamento bifásico imiscível, o passo no tempo (*time step*) escolhido foi de 0,0001 s. A equação da continuidade foi discretizada pelo método PRESTO. Esquemas de primeira ordem *upwind* foram usados para discretizar a equação de transporte de movimento apesar de apresentar certo grau de difusão numérica. O acoplamento pressão-velocidade foi calculado pelo PISO.

Os resultados são considerados convergidos quando os resíduos das diferentes variáveis decrescem até três ordens de magnitude. Uma observação importante é que é possível observar que a simulação não captura a ondulação da interface entre as duas fases apropriadamente. O motivo principal da representação incerta da simulação é que o modelo VOF reconstrói a interface baseado na fração volumétrica *in situ* de cada volume de controle. No entanto, este modelo não é capaz de reconstruir a interface em uma cadeia contínua. Este modelo é apropriado para pequenas curvaturas e esse esquema não consegue capturar adequadamente a ondulação de baixa frequência gerada pelos dois fluidos.

Após variar as velocidades entre as fases, foi possível observar que diferentes velocidades entre elas criam perfis de escoamentos distintos que geraram interfaces diferentes. A espessura da interface nas simulações foi comparada com a espessura obtida experimentalmente por meio de fotografias. Os desvios não foram maiores que $\pm 10\%$. Nas Figura 21 e Figura 22, são apresentados diferentes tipos de regime de interface e também a diferença de espessura destas para as fotos obtidas experimentalmente.

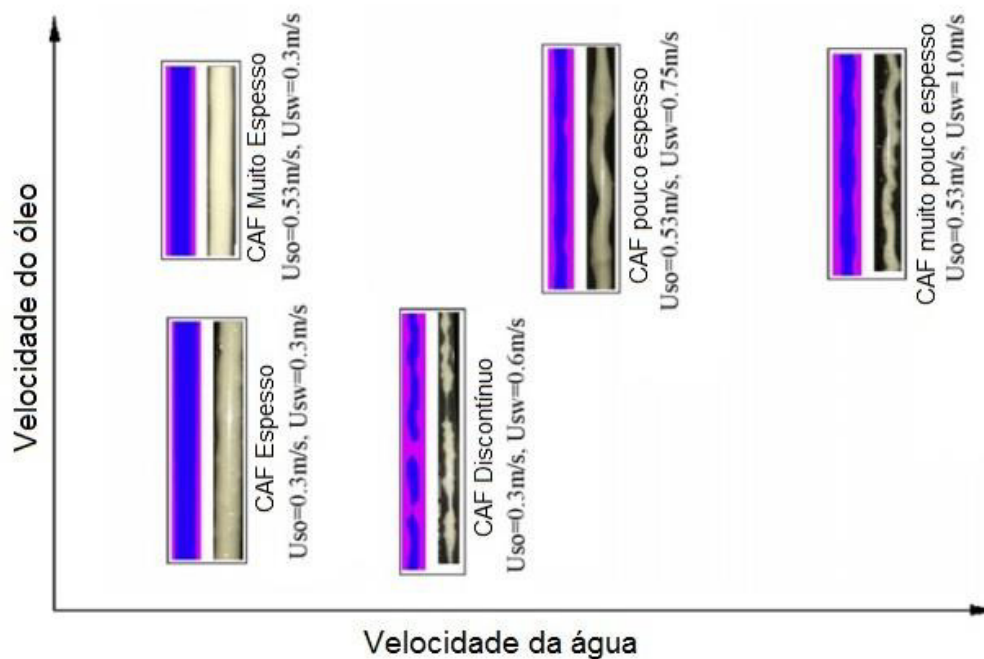


Figura 21 - Perfis de interface gerados pela simulação. Fonte: Ghosh *et al.*, (2010).

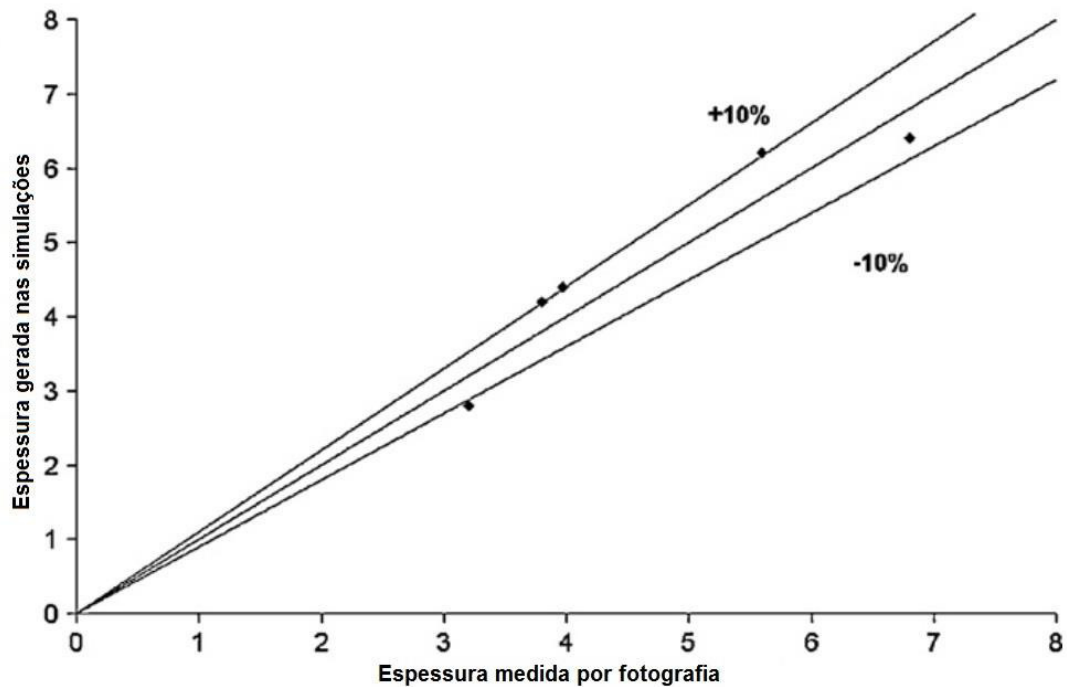


Figura 22 - Desvio de espessura das simulações com a medida experimentalmente. Fonte: Ghosh *et al.*, (2010).

As simulações que realizadas para analisar o CAF em fluxo descendente de óleo viscoso e água foram validadas com os experimentos apresentados por *Bai et al* (1996). Dentre as observações se destacam:

- Uma mudança abrupta no gradiente da velocidade radial é observada na interface e essa mudança se torna proeminente quando o fluxo se propaga até a saída.
- O gradiente de pressão aumenta com a velocidade superficial entre o óleo e a água.

4.2. *Assessment of a hybrid CFD model for simulation of complex vertical upward gas-liquid churn flow (Vieira et al., 2015).*

O artigo trata a simulação de um escoamento bifásico (gás-líquido) de fluxo ascendente em batedeira e o pacote *ANSYS Fluent 15.0*. Uma abordagem Euler-Euler foi utilizada para modelar o fenômeno. Mais especificamente o modelo Euleriano completo, que calcula modelos de turbulência e equações da continuidade e transporte de movimento também parciais para cada fase.

Para melhorar a precisão da representação da superfície entre os dois fluidos, um modelo do tipo *VOF* foi acoplado ao modelo Euleriano, o *Multi-Fluid VOF Model*, que permite adicionar duas fases contínuas e calcular a interface entre elas por meio de rastreamento baseado em fração volumétrica. Uma unidade experimental foi utilizada para se obter parâmetros de comparação e condições de contorno correspondentes foram utilizadas nas simulações.

Um modelo euleriano *VOF* puro não poderia ser utilizado pois aparentemente na literatura, o uso desta abordagem é restrito apenas à tubulações de pequenos diâmetros ou fluxos com baixas velocidades superficiais. Este modelo falha quase que coercitivamente em representar a interface entre duas fases por causa de seu conceito embutido de transporte de movimento acoplado em que somente um set de equações de transporte de movimento é calculado para ambas as fases, excluindo efeitos de escorregamento que podem acontecer na interface dependendo do tipo de fluxo.

O acoplamento entre esses dois modelos resulta na prevenção do surgimento de difusão numérica na interface. Relembrando que modelos *VOF* são apropriados para fluxos onde surgem grande escalas interfaciais (normalmente maiores que o tamanho dos elementos da malha). A geometria do problema dos autores também é uma curva que se dispõe da seguinte forma apresentada na Figura 23.

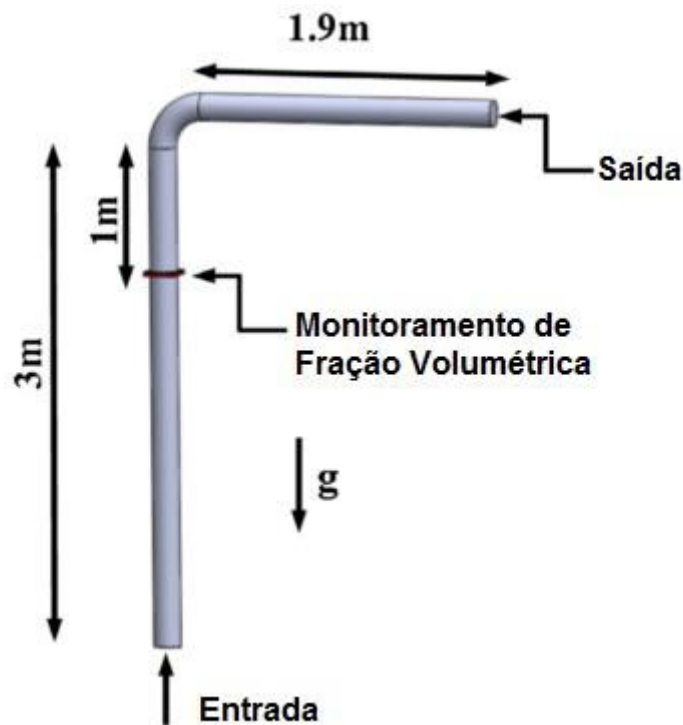


Figura 23 - Disposição da geometria de estudo. Fonte: Vieira *et al.*, (2015).

Para a geração da malha, foram utilizadas três estruturadas (Malhas 1 e 2) e uma não estruturada (Malha 3) que são as presentes na Figura 24 abaixo.

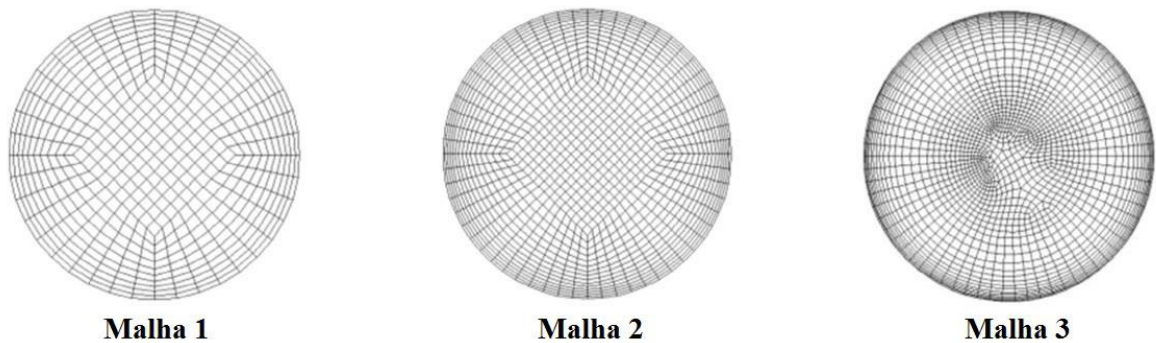


Figura 24 - Seção transversal das Malhas 1, 2 e 3. A Malha 4 não é mostrada pois sua seção transversal é idêntica à Malha 3. Todas as malhas tiveram sua face de entradas "varridas" por todo o domínio computacional. Fonte: Vieira *et al.*, (2015).

As simulações transientes tridimensionais foram feitas considerando gravidade. Ambas as fases incompressíveis sem transferência de massa entre as mesmas. A turbulência foi modelada utilizando principalmente os modelos RNG- $k\epsilon$ e o SST- $k\omega$. O método SIMPLE foi utilizado para o acoplamento pressão-velocidade.

O esquema Compressivo foi utilizado para a equação de fração volumétrica. O método de segunda ordem implícito foi utilizado para a discretização temporal. O passo de tempo e o número de iterações por passo de tempo foram ajustados para 1×10^{-3} s e 100 respectivamente. O critério de convergência foi de resíduo máximo de 1×10^{-3} .

Resultados quantitativos e qualitativos foram apresentados comparados com os perfis de fração volumétrica capturados pelo *Wire Mesh Sensor (WMS)* como apresentados na Figura 25.

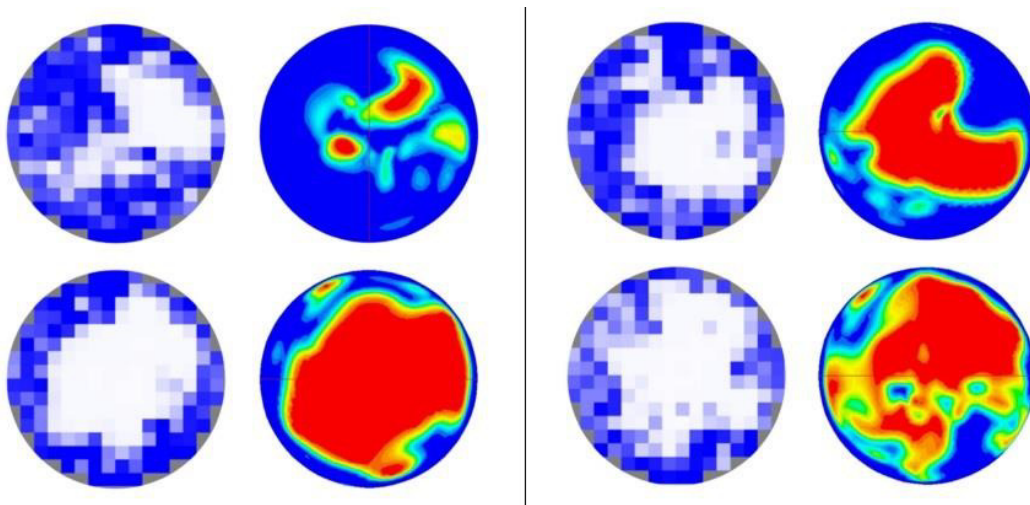


Figura 25 - Comparação qualitativa entre os dados do *WMS* e os gerados por CFD. As cores branca (*WMS*) e vermelha (CFD) indicam a presença de gás respectivamente. Fonte: Vieira *et al.*, (2015).

A partir dos resultados apresentados, é possível concluir que:

- O modelo Euleriano híbrido foi capaz de as estruturas interfaciais periódicas de diferentes escalas de comprimento tanto quanto o comportamento do filme líquido da parede.
- Os perfis fração volumétrica média obtidos por CFD estão de acordo com os de *WMS*.
- Os modelos de turbulência conseguiram representar os valores obtidos por *WMS* com uma diferença significativamente mínima.

4.3. Thermo-Hydrodynamics of Core-Annular Flow of Water, Heavy Oil and Air Using CFX (José et al., 2013).

Neste artigo os transporte de óleo pesado por CAF foi tratado, porém, com a inclusão de uma terceira fase, ar, injetada na mesma face de entrada do óleo com uma fração volumétrica pré-determinada. Foi utilizado software ANSYS CFX.

O domínio computacional estudado consiste de um tubo reto de 3 metros de comprimento e 2,84 centímetros de diâmetro na seção transversal. O anel de espaço anular entre a parede do tubo e o núcleo de óleo tem uma espessura de 1,7 milímetros, pode ser visto na Figura 26.

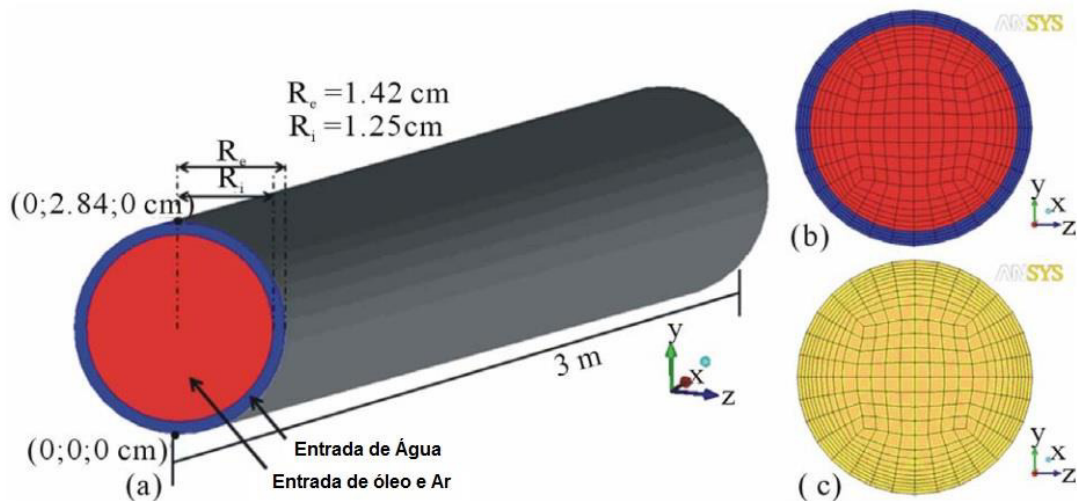


Figura 26 - Esquema da geometria e malha utilizada para as simulações. Fonte: José et al., (2013).

O modelo matemático para o escoamento trifásico considera: fluxo incompressível e estacionário, sem reações químicas, presença de forças gravitacionais e arraste interfacial, viscosidades dos fluidos em função da temperatura e sem transferência de massa entre as três fases. O modelo de turbulência escolhido foi o k- ϵ padrão. O critério de convergência da simulação foi um resíduo *RMS (Root Mean Square)* igual a 1×10^{-7} kg/s. Foram obtidos os perfis de velocidade para o óleo e para a água nos fluxos bifásico e trifásico, como é possível observar na Figura 27.

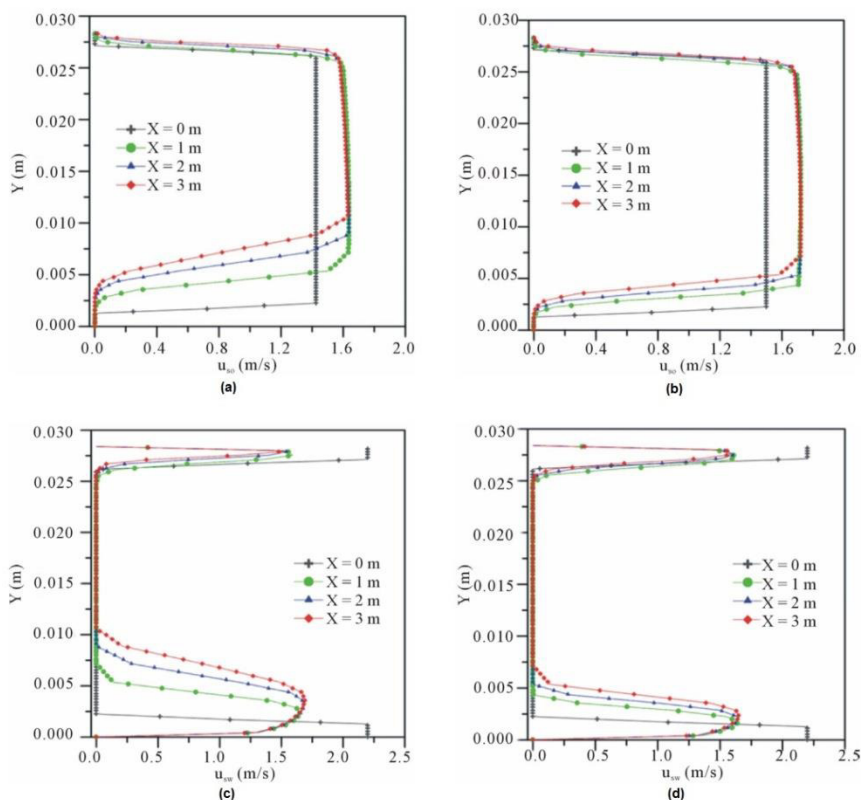


Figura 27 - Perfis de velocidade superficial: (a) trifásico e (b) bifásico para o óleo; (c) trifásico e (d) bifásico para a água. Fonte: José *et al.*, (2013).

A fração volumétrica de óleo também foi observada na seção transversal de acordo com a Figura 28:

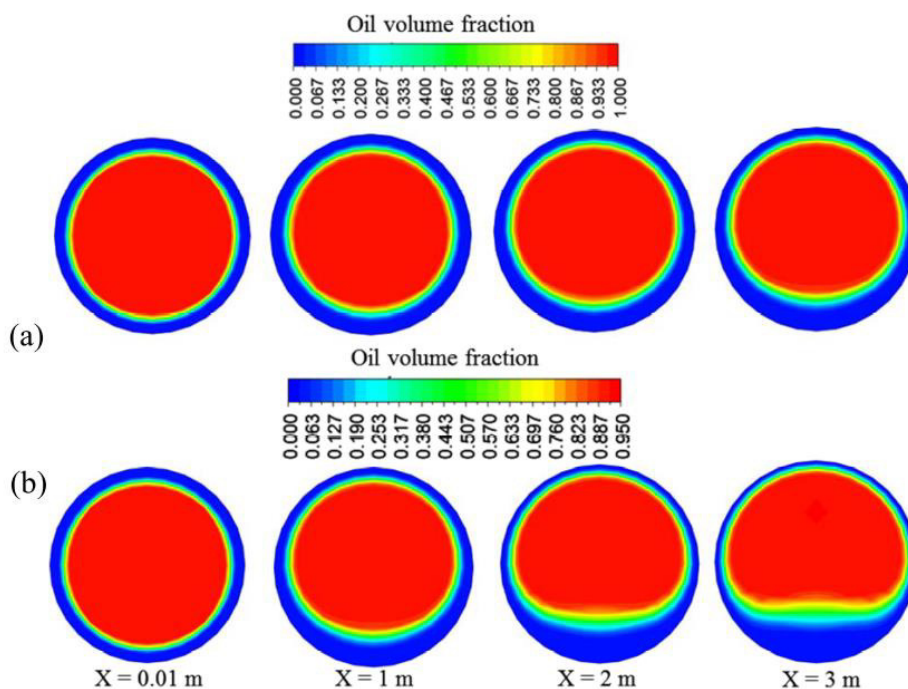


Figura 28 - Fração volumétrica de óleo na seção transversal em diferentes planos YZ ao longo do tubo; (a) para fluxo bifásico e (b) para fluxo trifásico. Fonte: José *et al.*, (2013).

É possível concluir por meio destes resultados parciais que o modelo do autor:

- Conseguiu prever o comportamento do escoamento não-isotérmico e trifásico em um tubo horizontal.

- Demonstrou que a presença de ar afeta significativamente os perfis de velocidade das duas fases predominantes.

- Manteve o padrão de fluxo *CAF* e o seu núcleo de óleo e ar tende para a estratificação devido sua excentricidade criada pelo consistente filme de água.

4.4. *CFD Modeling Of Flow Profiles And Interfacial Phenomena In Two-Phase Flow In Pipes (Ghorai; Nigam, 2006).*

Modelagem multifásica em CFD de escoamento gás-líquido estratificado é o núcleo do trabalho. As principais variáveis estudadas incluem: velocidade do gás, fração volumétrica de líquido e rugosidade interfacial. A velocidade do gás variou de 1,2 a 12,5 m/s e a do líquido variou de 6×10^{-3} a 1×10^{-1} . Os resultados numéricos foram validados a partir de dados experimentais da literatura. As previsões das características do perfil de fluxo se apresentaram dentro de um erro médio de $\pm 10\%$. O autor ressalta que as principais dificuldades de um solver para casos multifásicos seriam que as leis de fechamento das equações governantes são muito complexas, fluxos multifásicos apresentam comportamento inerentemente oscilatório, requerendo a utilização de algoritmos para soluções transientes.

A geometria utilizada pelo autor corresponde à utilizada por Lopez (1994) que é uma tubulação de 25 metros de comprimento e 9,85 cm de diâmetro interno. O esquema de injeção dos dois fluidos pode ser visualizado na Figura 29.

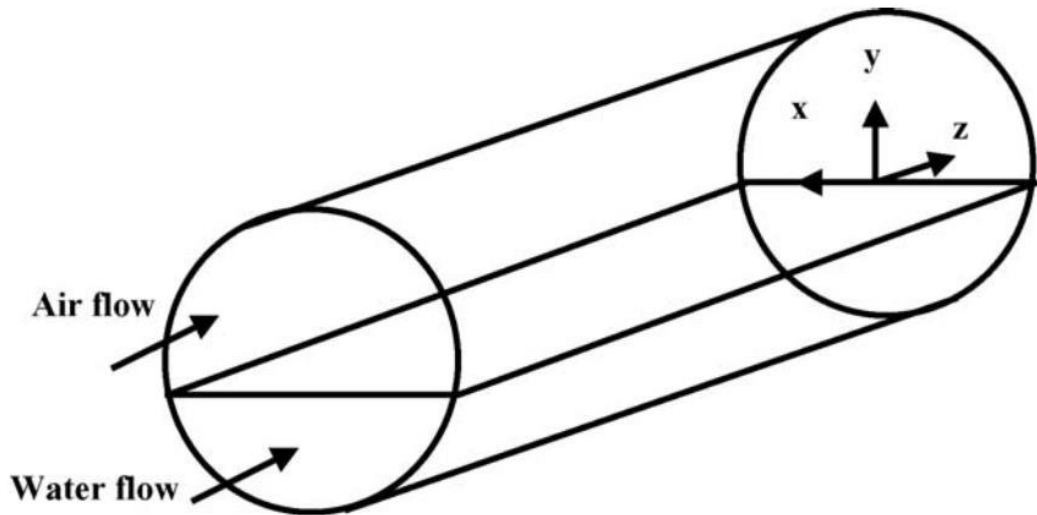


Figura 29 - Geometria utilizada nas simulações. Fonte: Ghorai; Nigam, (2006).

A modelagem do problema realizada para a malha Euleriana fixa considerou o VOF como modelo multifásico com um esquema de reconstrução geométrica que interpola linearmente a posição da interface em cada elemento, e então, quanto maior o refino da malha em regiões de interface melhor a resolução e mais suave a mesma se apresenta. A Figura 30 demonstra o funcionamento do esquema.

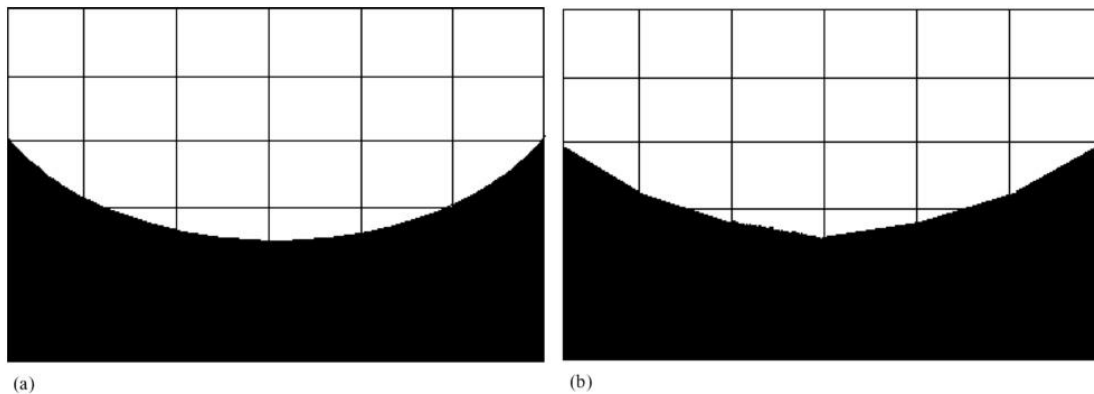


Figura 30 - Representação do cálculo da interface: (a) formato real da interface e (b) formato calculado pelo VOF com esquema de reconstrução geométrica. Fonte: Ghorai; Nigam, (2006).

O modelo de turbulência utilizado é da família *RANS* variável em que a turbulência foi modelada pelo uso tanto de um modelo $k-\epsilon$ de baixo número de Reynolds ($Re_\eta < 200$, para capturar efeitos de parede) quanto um modelo $RNG-k-\epsilon$ (renormalizado, para $Re_\eta > 200$). Sendo η , a altura normal da primeira célula à parede da tubulação.

Ressaltou-se que é comum tratar a interface entre os dois fluidos como uma parede móvel, onde condições de contorno apropriadas são impostas em tal parede. No caso de uma interface com alta frequência de ondulações, é muitas vezes sugerido que a interface se comporte como uma parede rugosa.

Uma malha hexaédrica não estruturada foi utilizada com um número de elementos que variou de 55 mil elementos à 150 mil elementos. Também foi criada uma malha de 800 mil elementos, que demonstrou resultados com diferenças negligentes de uma malha mais grosseira, provando a independência de malha dos resultados. Na Figura 31 é possível observar o tipo de malha que foi varrida sobre todo o domínio.

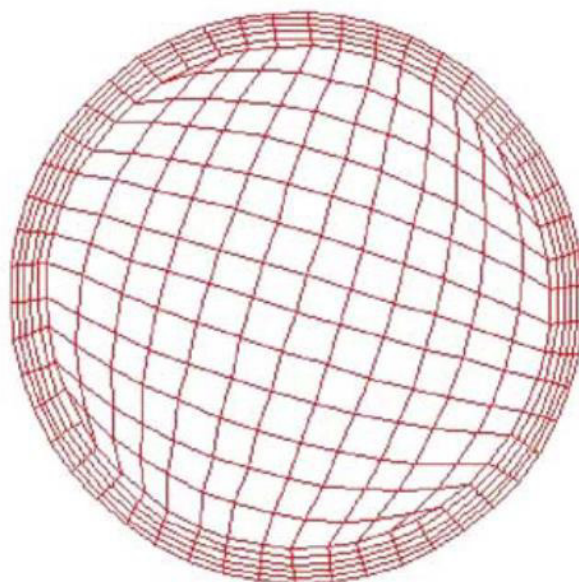


Figura 31 - Face transversal do tubo varrida por todo o domínio computacional. Fonte: Ghorai; Nigam, (2006).

Para as equações de transporte de movimento, um esquema de segunda ordem foi utilizado, enquanto esquemas de primeira ordem foram utilizados para os modelos multifásicos e de turbulência. O critério de convergência de 1×10^{-3} para os valores residuais. Para o acoplamento pressão-velocidade o algoritmo PISO foi utilizado para diminuir a difusão numérica do modelo multifásico. Para acelerar a convergência, os fatores de relaxação foram alterados utilizando 0,3 para pressão, 0,9 para temperatura e 0,5 para a velocidade na direção i .

Para a validação dos resultados, foram utilizadas comparações entre a perda de carga calculada por CFD e a apresentada por dados experimentais de Lopez (1994), além de perfis de velocidade axial da fase gasosa como é possível observar as Figura 32 e Figura 33.

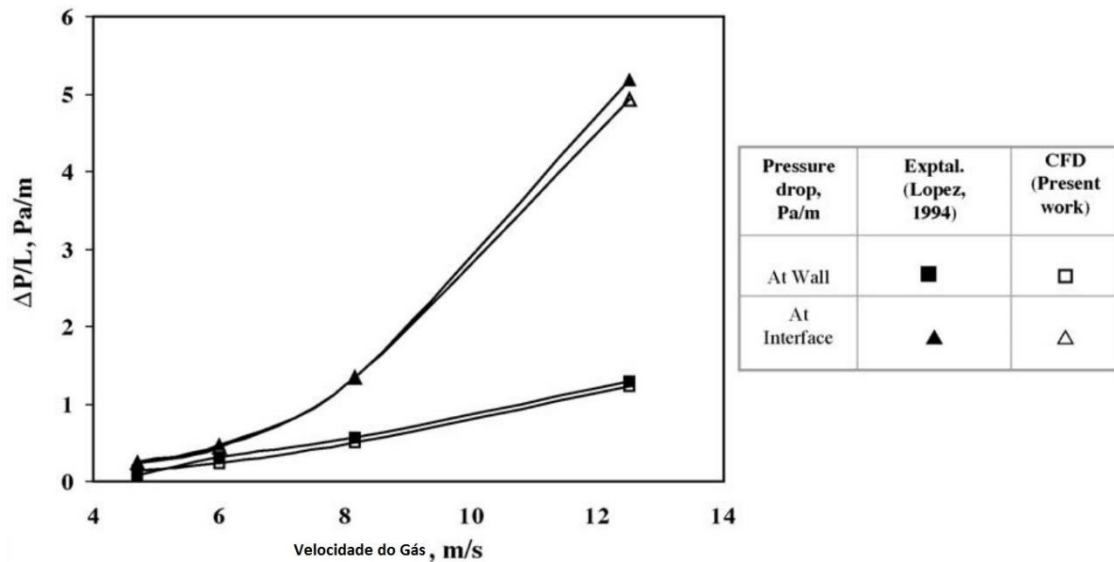


Figura 32 – Perda de carga do gás na parede e na interface. Fonte: Ghorai; Nigam, (2006).

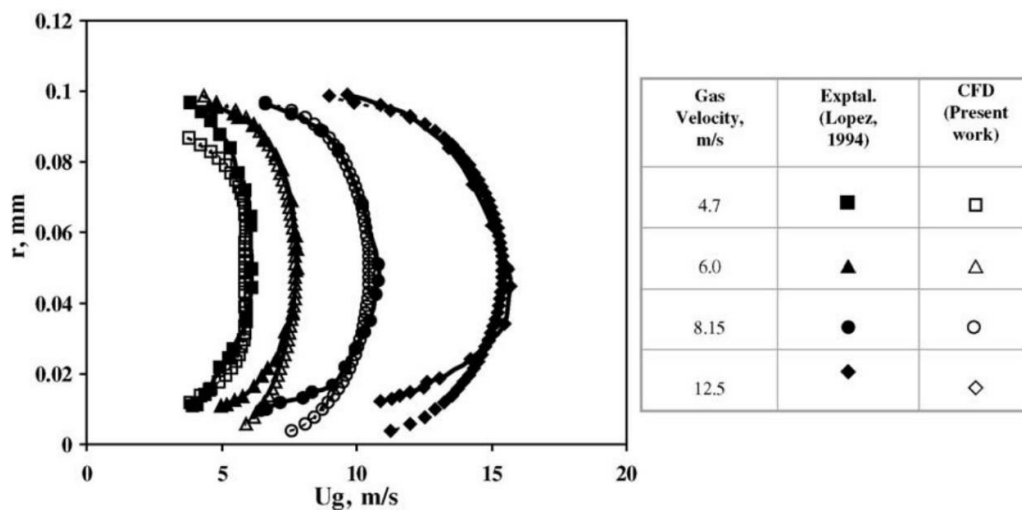


Figura 33 - Perfis de velocidade axiais para diferentes velocidades da fase gasosa. Fonte: Ghorai; Nigam, (2006).

Foi possível concluir que a concordância entre o modelo de CFD e os dados experimentais é satisfatória. Apesar da demanda de muito tempo computacional, devido ao grande refinamento de malha requerido pelo modelo multifásico, a técnica CFD aplicada possui confiabilidade para ser aplicada em fluxos líquido-líquido estratificados.

4.5. Lubricated Transport of Highly Viscous Non-Newtonian Fluid as Core-Annular Flow: A CFD Study (Tripathi et al., 2015).

Este trabalho aborda sobre o CAF, mas o comportamento do óleo é representado como sendo o de um fluido não newtoniano, seguindo a correlação de *Ostwald-de Waele*:

$$\tau = K \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^n \quad (51)$$

Onde n , com valor unitário demonstraria um fluido newtoniano, com valor menor que 1,0 seria um pseudoplástico e com valor acima de 1,0, se refere a um comportamento de dilatante. A geometria considera como sendo eixo-simétrico e os dois fluidos como imiscíveis. O fluido do núcleo é não-newtoniano enquanto água flui na região do ânulo. O fluxo é considerado como sendo totalmente desenvolvido com velocidade radial e azimutal iguais a zero. As condições de contorno são:

- $\tau_{rz}^o = \tau_{rz}^a$ na interface
- $\tau_z^o = \tau_z^a$ na interface
- $\tau_z^a = 0$ na parede

Alguns estudos realizados anteriormente para o caso em que os dois fluidos são representados por lei de potência e com os mesmos índices de comportamento. Neste caso o autor considera que os dois fluidos com índices diferentes sendo o da água igual à um.

Um modelo bidimensional, eixo-simétrico e transiente foi desenvolvido no software ANSYS Fluent 14,5 para estudar o CAF. Uma tubulação com diâmetro de 0.003 m e comprimento de 0,025 m foi considerada para análise. O óleo é introduzido no núcleo com o índice de comportamento igual a 1,2 e viscosidade de 10^5 Pa.s, enquanto a água com viscosidade de 1×10^{-3} Pa.s é introduzida no ânulo por uma injeção normal à parede do plano. Como a interação dos dois fluidos produz uma interface contínua e definida, uma abordagem Euler-Euler baseada em *Volume of Fluid* foi utilizada.

As velocidades do óleo e da água foram ajustadas para respectivamente 0,03 m/s e 0,02 m/s. Na parede foi considerado o não-escorregamento da água. Esquemas de primeira ordem foram selecionados para discretizar a equação de transporte de movimento e o algoritmo PISO foi selecionado para o acoplamento pressão-velocidade. Foi utilizada malha hexaédrica com inicialmente 25 elementos de espessura da seção.

As Figura 34 e Figura 35 apresentam os perfis de fração volumétrica, perda de carga e velocidade axial.

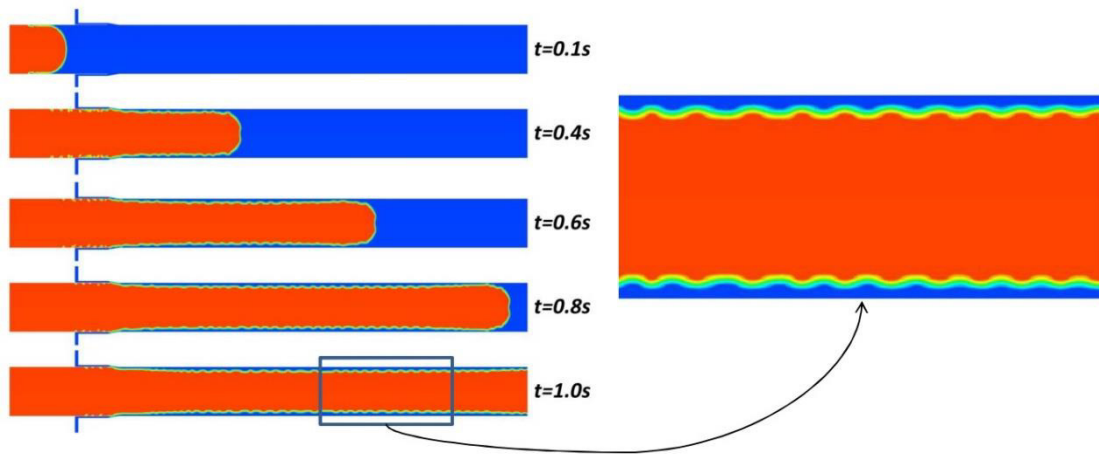


Figura 34 - Contornos de fração volumétrica em diferentes instantes de tempo. Fonte: Tripathi et al., (2015).

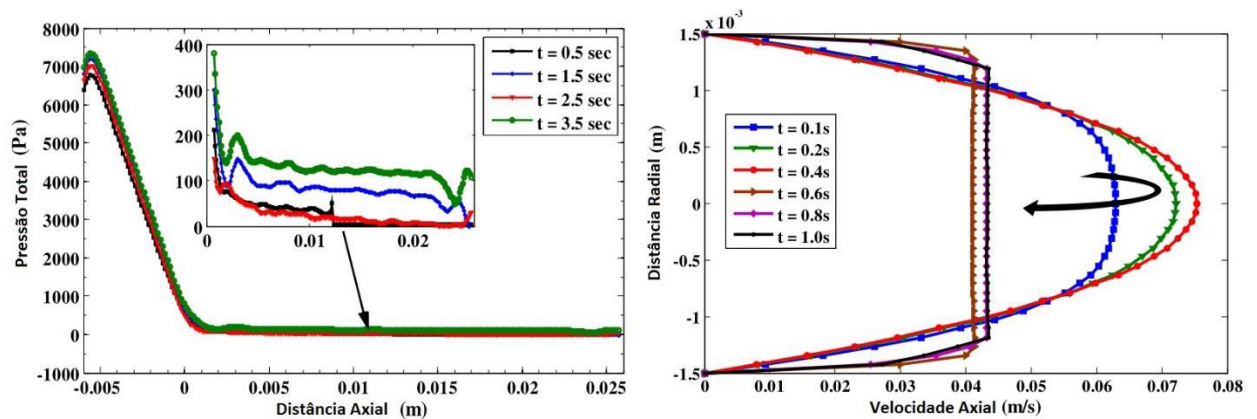


Figura 35 - Perfis de Pressão e Velocidade com suas variações ao longo do tempo. Fonte: Tripathi et al., (2015).

Foram realizados testes de convergência de malha e para as malhas mais refinadas não houve variações nos resultados dos perfis. No entanto, o que foi observado foi que a mudança da tensão interfacial entre os dois fluidos geraram resultados diferentes na interface. Em altos valores de tensão interfacial, a interface se demonstra mais convoluta e mais ondulada, para

valores muito baixos, emulsificações ocorreram. As simulações demonstraram que para se atingir um *CAF* estável em que não ocorra estratificação, a tensão interfacial entre os dois fluidos deve, preferencialmente, ter um baixo valor.

4.6. CFD Simulation of Core Annular Flow Through Sudden Contraction and Expansion (Kaushik et al., 2012).

O estudo simulou o *CAF* água-óleo usando as mesmas especificações físico-químicas dos fluidos e mesma geometria apresentadas pelo trabalho experimental de Balakrishna et al. (2010) que estudou principalmente a instabilidade causada pelo efeito de contração e expansão ao longo do escoamento dos fluidos em uma tubulação.

O software FLUENT 6.3.26 foi utilizado para a simulação de uma tubulação de 0.012 m expandindo para 0.0254 m de diâmetro e vice versa. Como é possível visualizar na Figura 36, duas geometrias foram utilizadas.

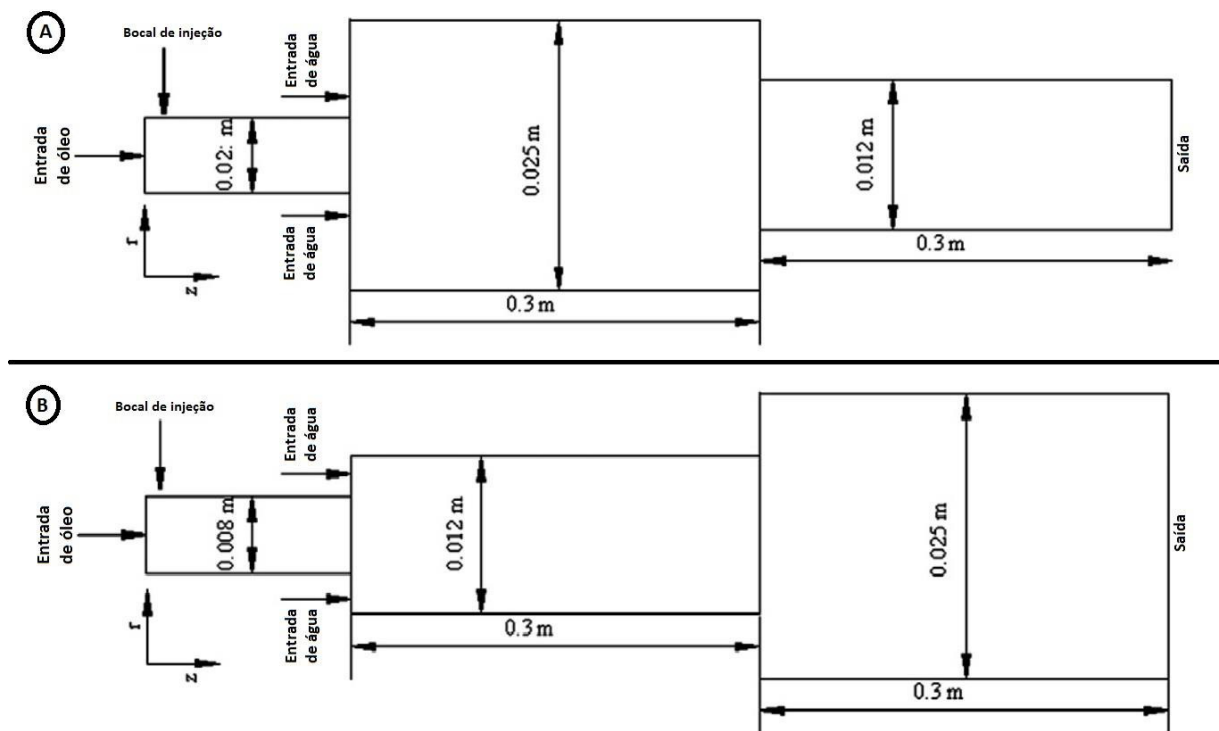


Figura 36 - Duas geometrias utilizadas para as simulações; A - Expansão e B - Contração. Fonte: Kaushik et al., (2012).

As principais considerações incluem escoamento não-estacionário, fluidos imiscíveis, propriedades constantes e injeção coaxial normal dos líquidos por meio de bocais. Pelo fato de o escoamento visualmente apresentar uma interface bem definida e contínua, a abordagem Euler-Euler por meio de *VOF* foi escolhida. Apesar de esta técnica calcular somente um set de equações de transporte de movimento para as duas fases, a interface é rastreada por meio de fração volumétrica nas células e as respectivas forças interfaciais são simplificadamente consideradas.

O modelo $k-\varepsilon$ padrão foi escolhido para simular as condições de escoamento. Contornos de viscosidade turbulenta gerados em qualquer corte da seção transversal da tubulação demonstra que no núcleo, a viscosidade turbulenta é muito próxima da viscosidade molecular do óleo. Por outro lado, a viscosidade na região anular é maior que a viscosidade molecular da água. Isto indica que o modelo de turbulência está mantendo características de fluxo laminar no núcleo e turbulento na região anular. Fisicamente sabemos que o *CAF* está em concordância com estas características. Esta observação é importante, pois demonstra a preocupação do autor em justificar o uso de que estaria resolvendo modelos de turbulência para todo o domínio de escoamento sendo que parte dele se comporta como laminar.

Diferentemente dos outros autores, foram utilizadas malhas tetraédricas não-estruturadas para as simulações, com número de elementos variando de 4×10^4 à 8×10^4 . Como principal efeito de interface, o modelo de tensão superficial também foi ativado para as simulações, de acordo com a equação 52:

$$P_2 - P_1 = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (52)$$

As simulações foram inicializadas pela entrada de óleo com velocidade de 0.6 m/s e para água 0.3 m/s de velocidade. Ajustou-se a condição sem escorregamento na parede e sem penetração de um fluido em outro. Por se tratar de um escoamento multifásico, o passo de tempo utilizado foi de $1e-04$ s

para se capturar os fenômenos interfásicos e se atingir o critério de estabilidade de *Friedrich-Lewis* com um número de Courant fixo em 0,5. A equação da continuidade foi discretizada pelo esquema PRESTO, enquanto o transporte de quantidade de movimento, de energia cinética turbulenta e dissipação viscosa por esquemas de primeira ordem. Para o acoplamento pressão-velocidade, foi utilizado o algoritmo PISO. O critério de convergência utilizado para todas as variáveis utilizado foi igual à três ordens de magnitude.

Vários perfis foram gerados e estudados com os resultados, os efeitos de contração e expansão podem ser observados respectivamente na Figura 37 que traz contornos de densidade e linhas de fluxo de velocidade.

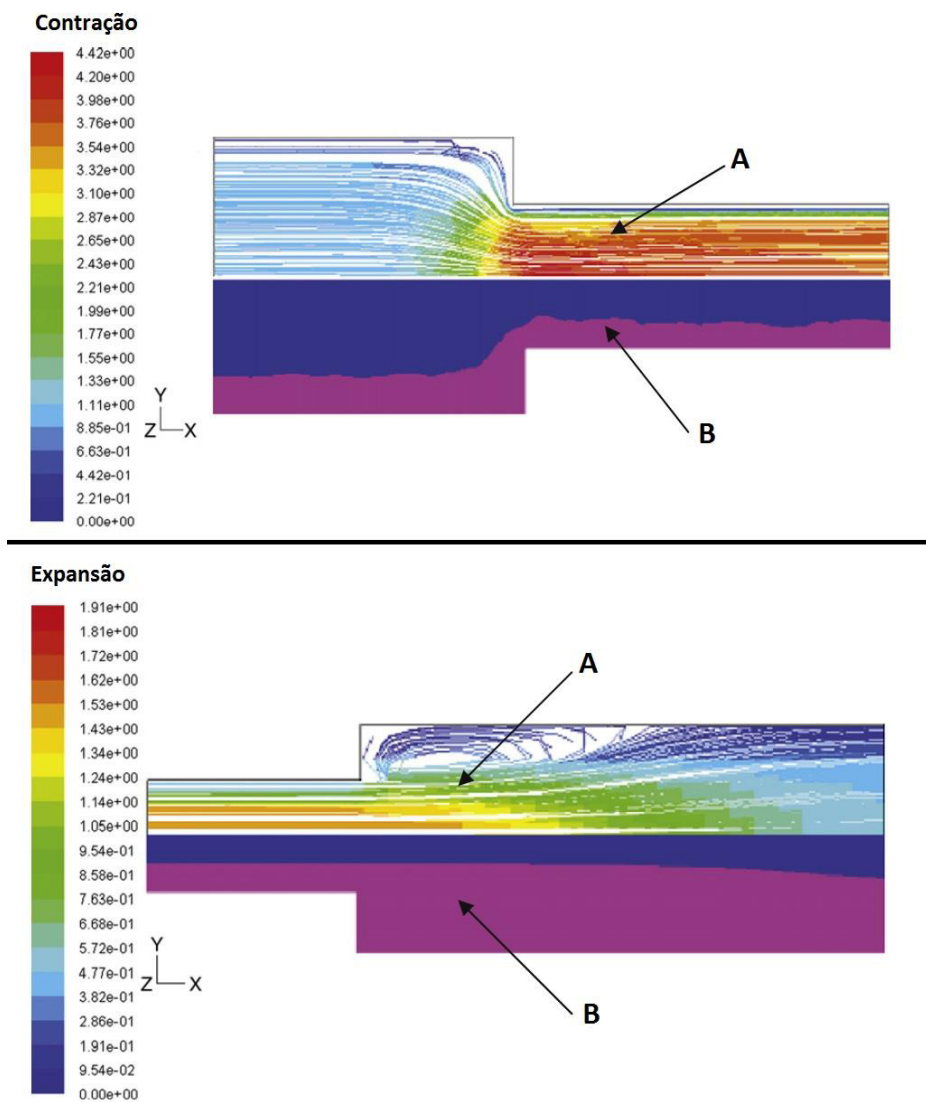


Figura 37 - Linhas de Fluxo (A) e Contornos de fração volumétrica (B). Fonte: Kaushik *et al.*, (2012).

Os modelos de CFD foram validados com os dados experimentais de Balakhrisna *et. al* (2010). Ondas interfaciais apresentaram variações tridimensionais em arranjos de contração e expansão. Velocidades assimétricas pelo plano radial são observadas. A análise demonstrou que a ferramenta CFD pode ser utilizada satisfatoriamente para prever características hidrodinâmicas deste tipo de escoamento.

5. Material e Métodos

5.1. Software

Para todas as simulações realizadas neste trabalho, o *software* ANSYS FLUENT 16.0 foi utilizado. O pacote faz uso do método dos volumes finitos para resolver os sistemas de equações diferenciais parciais resultados dos balanços de massa, quantidade de movimento e energia.

5.2. Hardware

As simulações foram realizadas em um *workstation* do grupo de pesquisa e também em um *cluster* do Departamento de Engenharia Química Poli-USP.

O **Workstation** montado pela *Apple* opera com sistema Windows 10:

- Placa mãe *Apple* Mac-F221BEC8 Chipset Intel 5220.
- 2 processadores Xeon E5645 de 6 núcleos físicos e 12 *threads* com *clock* de 2.4 Ghz cada, permitindo até 24 *threads* com 12 MB de *cache* no total. Isto permitiu rodar as simulações iniciais já em paralelo. Foram utilizados 20 *threads* para as simulações por questões de limite de licenças.
- 16 gigabytes de memória RAM do tipo DDR3 tricanal de 670 Mhz.
- Placa de vídeo dedicada AMD Radeon HD 5700 com 1 GB de memória GDDR5.
- 2 HDDs de 2 TB cada do tipo SATA-II com taxa máxima de 3 Gb/s de transferência.

O **Cluster** do departamento opera com SUSE Linux Enterprise Server 11:

- **8 Compute Nodes** contidos em 4 servidores C1104 sendo cada node configurado com:

- 12 Cores compostos por 2 sockets Intel Xeon Six-Core 5649 de 2.53-GHz, com 12MB cachê, 5.86 GT/s;

- 48-GB de memória DDR3 1333 MHz;

- 1 (um) disco de 500-GB SATA2

- **1 Compute Node** SGI C1103 configurado com:

- 12 Cores compostos por 2 sockets Intel Xeon Six-Core 5649 de 2.53-GHz, com 12MB cachê, 5.86 GT/s;

- 48-GB de memória DDR3 1333 MHz;

- 1 (um) disco de 500-GB SATA2

- **1 Master Node** SGI C2108 configurado com;

- 12 Cores compostos por 2 sockets Intel Xeon Six-Core 5650 de 2.66-GHz, com 12MB cachê, 6.4 GT/s;

- 48-GB de memória DDR3 1333 MHz;

- 8 (oito) discos de 3000-GB SATA2;

- RAID 5/6 Controller;

5.3. Parâmetros de Simulação

Um escoamento multifásico de óleo e água é estudado em uma tubulação inicialmente retilínea sendo que possuem densidades de 930,00 kg/m³ e 996,32 kg/m³ e viscosidades com comportamento newtoniano de 734 cP e 1 cP respectivamente. As geometrias foram feitas para representar as condições experimentais de um equipamento em escala de bancada existente na UNISANTA (Silva *et al.*, 2014). A tubulação onde ocorre o escoamento

multifásico consiste de tubos concêntricos, sendo o externo para a água e o interno para o óleo com respectivamente 1 polegada e 3/4 polegada de diâmetros nominais correspondendo a 1,049 e 0,824 polegadas reais. O comprimento utilizado foi de 0,5 m. Um esquema da tubulação e do método de injeção (que foi utilizado para todas as simulações) pode ser visualizado na Figura 38.

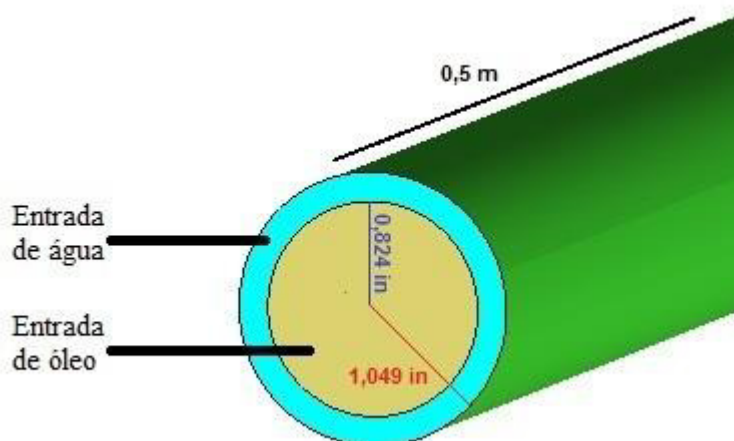


Figura 38 - Esquema de injeção de óleo e de água na face de entrada do tubo.

Para as simulações iniciais com curva de 90°, foi utilizado um raio de curvatura padronizado para 1,5 polegada. Para considerar um trecho mais longo de tubo, uma geometria com dimensões reduzidas de X e Y, respectivamente para a horizontal e para a vertical foram adotadas, a fim de reduzir o número final de elementos de malha, visto que isso não afetaria o desenvolvimento da hidrodinâmica característica deste tipo de escoamento.

5.4. Malhas

Para estas simulações foram utilizadas malhas estruturadas hexaédricas. O formato e a disposição dos elementos evoluíram conforme constatações de melhores convergências, carga residual e tempo computacional. A Figura 39 abaixo apresenta a evolução das malhas que inicialmente foram criadas no *software ANSYS Meshing*. Depois, foi substituído pelo *ICEM CFD* para criar malhas menos densas e com melhor qualidade através de método de blocagem manual por meio de "O-grid".

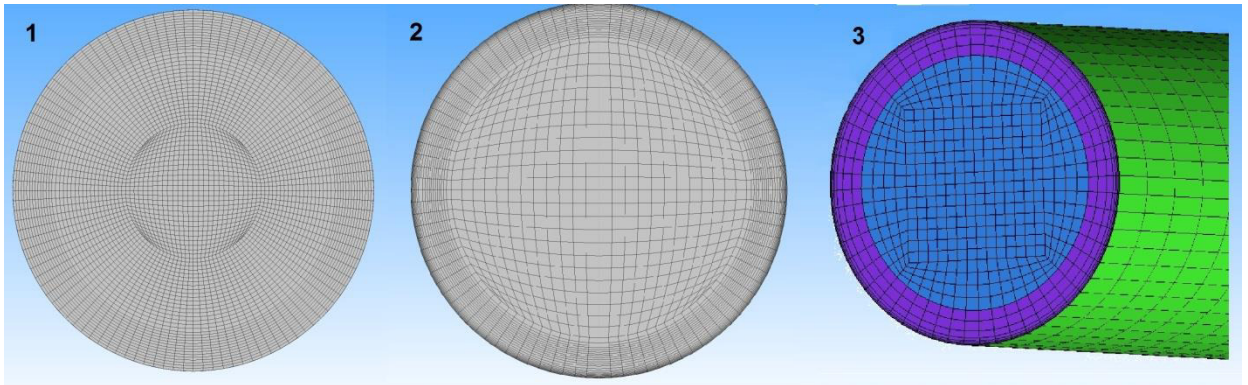


Figura 39 - Evolução dos tipos de malha utilizadas. 1 e 2 criadas no *ANSYS Meshing*. 3 Criada no *ICEM CFD* para a seção com curva.

A malha para o tubo horizontal possui 36 elementos na seção transversal e 219.520 elementos no total. Para as malhas que incluem a curva, o mesmo número de elementos na seção transversal foi mantido, mas também foi extrudado para cobrir todo o domínio, tendo no total de $1,7 \times 10^5$ a 9×10^5 elementos. As Figura 40 e Figura 41 demonstram malhas utilizadas para as simulações.

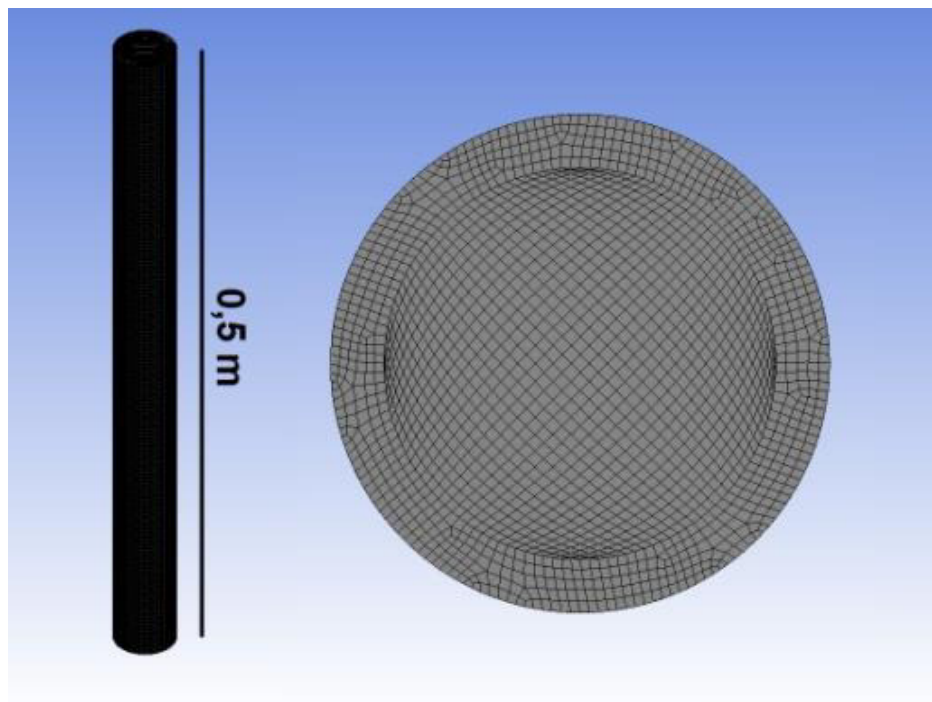


Figura 40 - Malha para geometria do trecho reto do tubo.

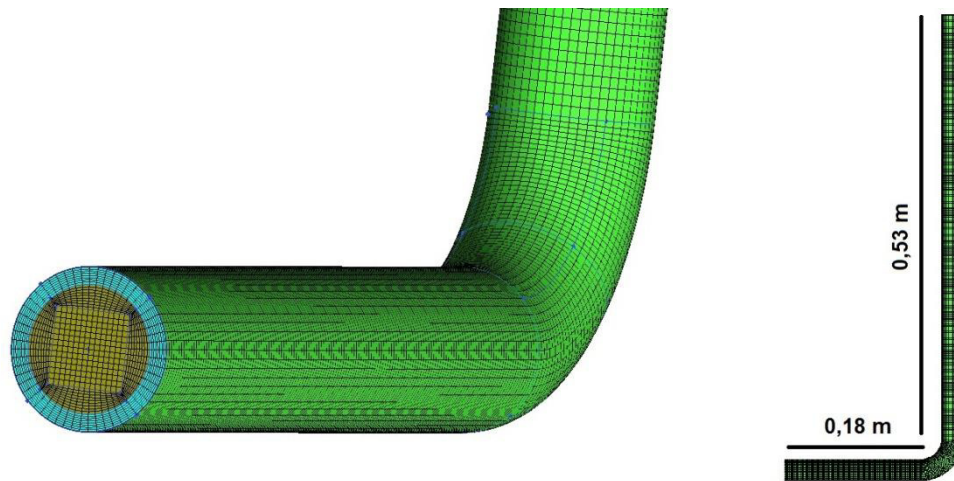


Figura 41 - Malha para geometria com curva.

Foi criado um refinamento com malha prismática adjacente à parede interna do tubo para capturar efeitos de baixo número de Reynolds da camada limite.

5.5. Modelos Utilizados

O modelo adotado para simular a turbulência foi o modelo $k-\epsilon$, visto que na bibliografia encontrada (Vieira *et al.*, 2015), apesar de ser um modelo do tipo *RANS*, foi o mais utilizado e proporcionaria dados especulativos iniciais.

Foram realizadas simulações estacionárias e transientes. Nas simulações dinâmicas foram utilizados passos de tempo fixos e variáveis de no máximo 1×10^{-3} segundos, de forma a capturar minuciosamente variações temporais da interface, evitando assim que fossem eliminadas (ou simplificadas) por um modelo *RANS*, baseado em média.

Para capturar efeitos de interface com mais precisão, o modelo *VOF* com esquema explícito e método geo-reconstrutivo foi utilizado. Ainda que este calcule somente um conjunto de equações de transporte de movimento para os dois fluidos, este se demonstrou uma escolha inicialmente coerente para as simulações.

5.4. Condições de Contorno

A alimentação na unidade experimental é feita por tubos concêntricos. Para garantir que as vazões nas simulações e as retiradas experimentalmente (por meio de rotâmetros) fossem idênticas, as velocidades na entrada foram obtidas através das seguintes equações:

$$V_{\text{entrada de água}} = \frac{\dot{V}_{\text{rotâmetro}} * A_{\text{sec.transversal água}}}{A_{\text{entrada de água}}} \quad (53)$$

$$V_{\text{entrada de óleo}} = \frac{\dot{V}_{\text{óleo}}}{A_{\text{sec.transversal água}}} \quad (54)$$

As injeções foram ajustadas para entradas de velocidade, ressaltando que a área de entrada do óleo não mudou na região limítrofe de contato entre os dois fluidos. De acordo com os dados de vazão retirados da unidade experimental, as velocidades resultantes de injeção foram 0,5826 m/s(óleo) e 1,700 m/s (água); 0,8834 m/s(óleo) e 3,2920 m/s(água). Para a parede, a condição *no slip* foi adotada. A saída foi ajustada como saída de pressão e, para evitar fluxo reverso, foram fornecidos dados de intensidade turbulenta e diâmetro hidráulico total.

5.6. Critérios de Convergência e Relaxação Numérica

Os critérios de convergência das simulações foram a redução dos resíduos de todas as variáveis em 1×10^{-3} e o balanço de massa, que teve como objetivo reduzir a diferença entre a entrada e a saída de no máximo 0,02%. Os fatores de relaxação que foram utilizados: 0,5 para pressão, 1 para densidade, 1 para forças de corpo, 0,5 para transporte de movimento, 0,5 para energia cinética turbulenta e 0,5 para taxa de dissipação viscosa e 1 para viscosidade turbulenta. Estas relaxações são o resultado de uma leve modificação dos valores padrões para garantir a convergência e evitar divergência de variáveis. O conceito básico das relaxações com saltos lineares está na equação 55:

$$\omega_{\text{new}} = \omega_{\text{old}} + \alpha(\omega_{\text{new}} - \omega_{\text{old}}) \quad (55)$$

Sendo α o valor multiplicador dos passos de tempo correspondentes a valores de ω .

6. Resultados e Discussão

6.1. Simulação do Trecho Reto do Tubo e Curva com *RANS*

Inicialmente, para testar o funcionamento dos modelos e entender o comportamento da convergência, foi realizada uma simulação estacionária com água e óleo no tubo reto vertical. Uma malha de $2,2 \times 10^5$ elementos foi utilizada. A simulação convergiu com todas as variáveis tendo resíduos abaixo de 1×10^{-3} . A Tabela 1 apresenta os resíduos e a Figura 42 apresenta os perfis de velocidade, fração volumétrica e pressão.

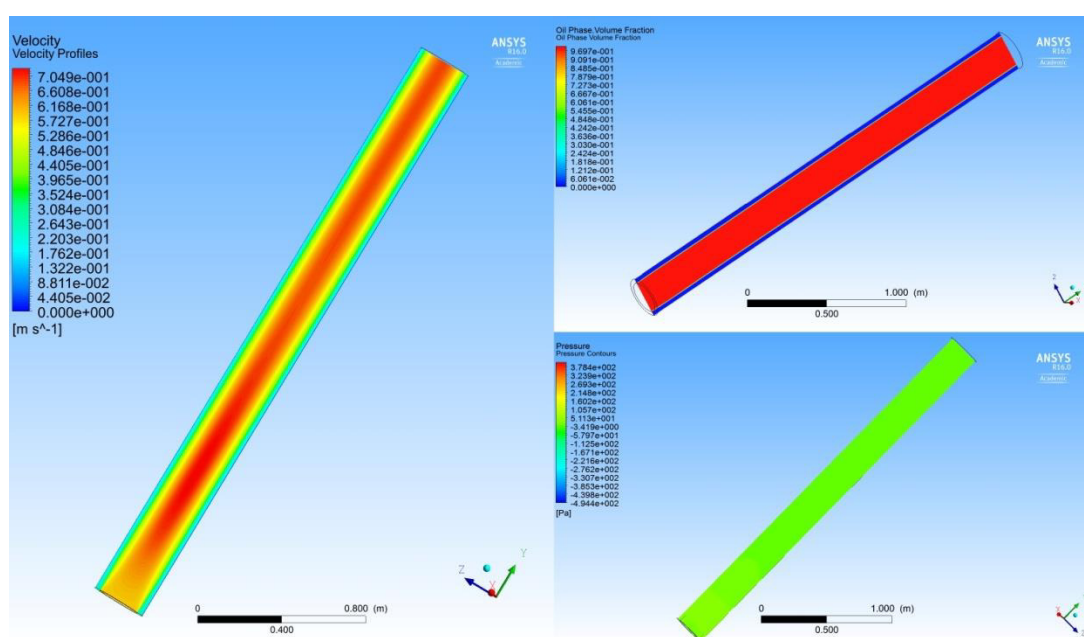


Figura 42 - Simulação realizada para tubo reto. Perfis de velocidade, fração volumétrica e pressão.

Tabela 1 - Resíduos da simulação com os modelos VOF para sistema multifásico e $k-\epsilon$ para a turbulência.

Iteração	continuity	x-velocity	y-velocity	z-velocity	K	epsilon	vf-water-p
3716	$3,3704 \cdot 10^{-4}$	$1,2605 \cdot 10^{-7}$	$2,0455 \cdot 10^{-6}$	$1,2214 \cdot 10^{-7}$	$1,9645 \cdot 10^{-6}$	$4,6140 \cdot 10^{-6}$	$5,7732 \cdot 10^{-6}$

É possível observar que a presente simulação não representa a realidade física ao se comparar com a foto da Figura 43 ou os resultados de Tripathi *et al.*(2015); mesmo que um perfil parabólico se encaixe como na Figura 44.

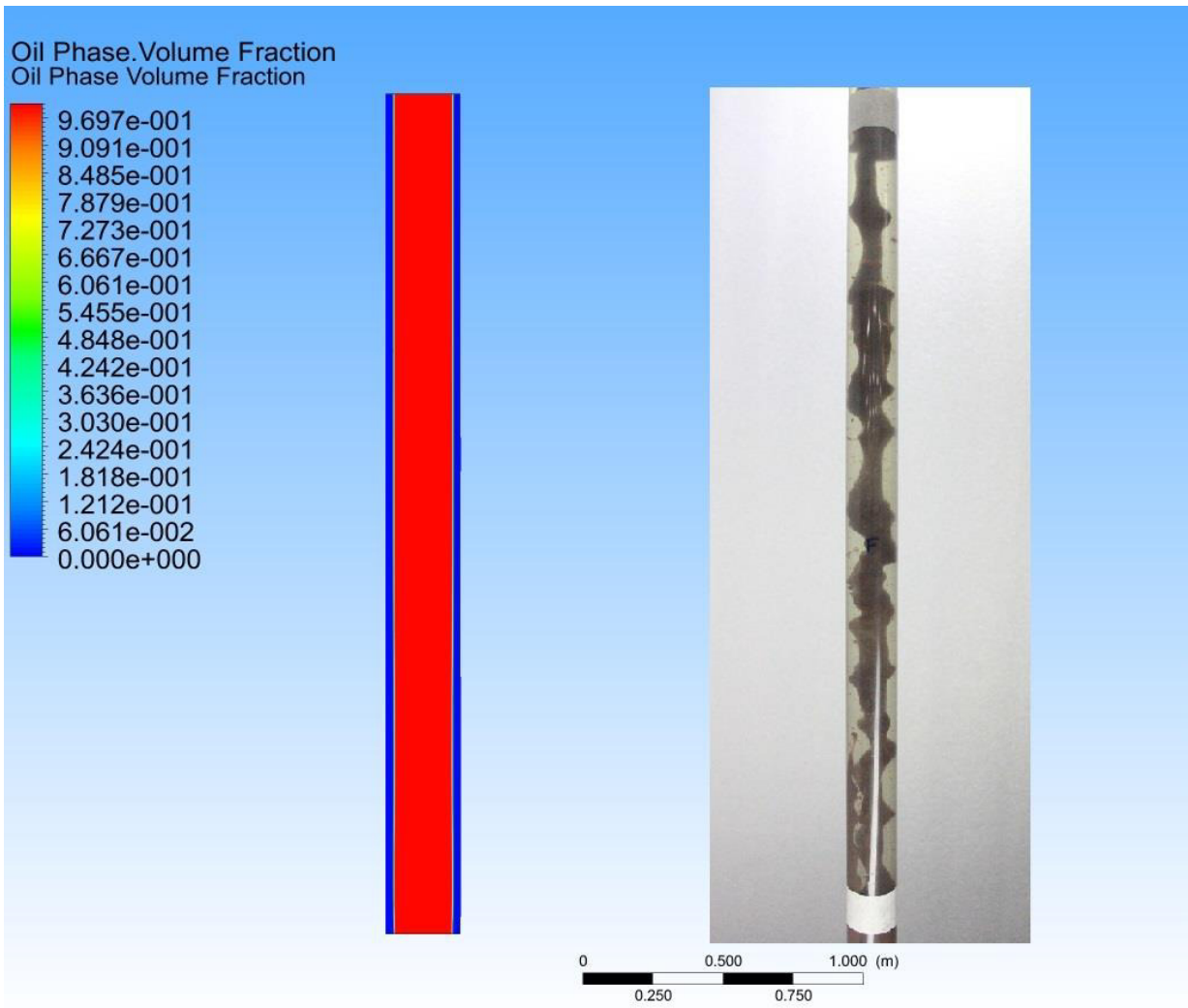


Figura 43 - Comparação entre modelo de CFD e experimento físico. Fonte: Silva *et al.*, (2014).

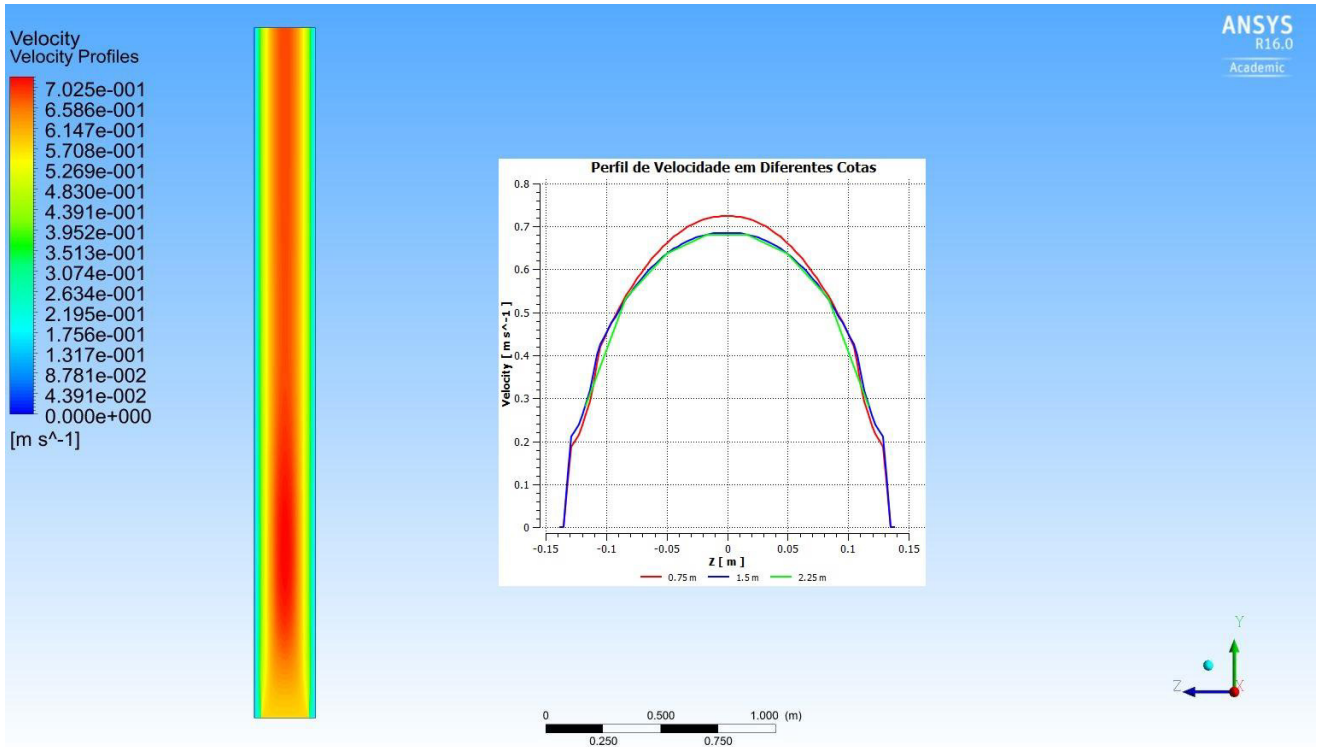


Figura 44 - Perfis de velocidade.

A inserção da curva no trajeto do escoamento provocou mudanças no perfil de velocidade e, ainda sim, mudanças sutis no perfil de fração volumétrica de óleo. Nenhuma variação característica de interface pôde ser observada. Simulações posteriores foram realizadas com diferentes densidades de malha na tentativa de capturar com maior precisão os fenômenos característicos de interface. Porém os resultados foram praticamente os mesmos. A Tabela 2 demonstra os resíduos para as simulações estacionárias realizadas, visto que um teste de convergência de malha foi realizado para se estimar a densidade de malha inicial para realizar simulações posteriores transientes. A Figura 45 apresenta os perfis de velocidade e de fração volumétrica na curva.

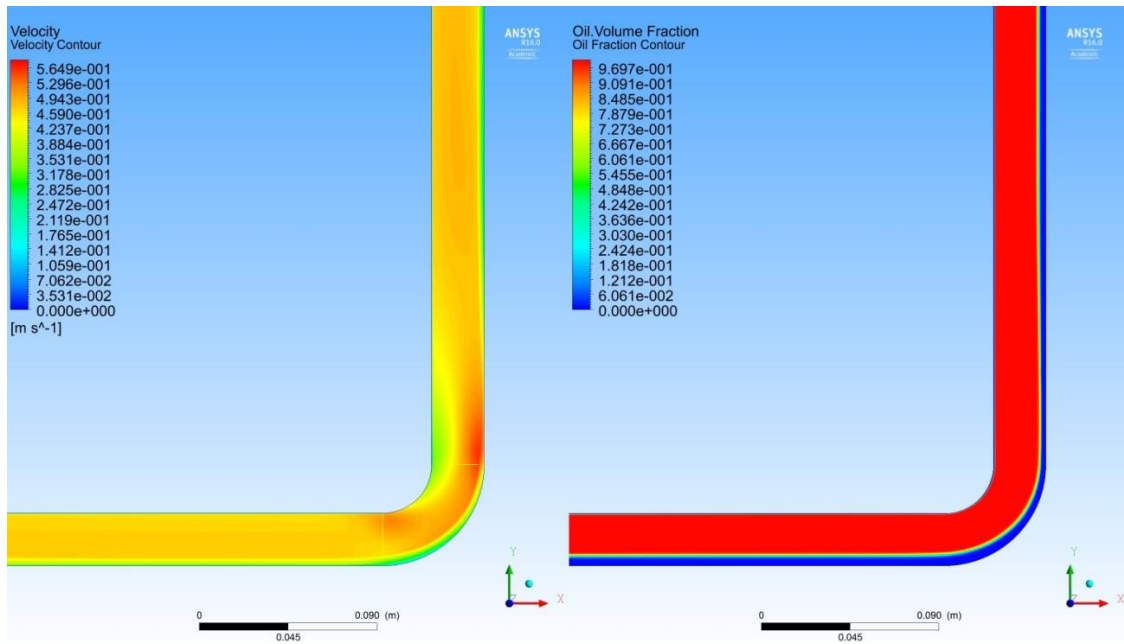


Figura 45 - Perfis de velocidade e fração volumétrica para trecho com curva.

Tabela 2 – Estudo de convergência de Malha foi realizado

Malha (nº de elementos)	Iteração	continuity	x-velocity	y-velocity	z-velocity	K	epsilon	vf-water-p
165200	2434	$1,5176 \cdot 10^{-3}$	$5,4411 \cdot 10^{-7}$	$3,3388 \cdot 10^{-6}$	$3,3180 \cdot 10^{-7}$	$2,4205 \cdot 10^{-5}$	$5,0437 \cdot 10^{-6}$	$1,3631 \cdot 10^{-5}$
436050	3021	$8,2851 \cdot 10^{-3}$	$1,7535 \cdot 10^{-6}$	$2,1464 \cdot 10^{-6}$	$5,1698 \cdot 10^{-7}$	$9,3521 \cdot 10^{-5}$	$2,0786 \cdot 10^{-5}$	$1,6067 \cdot 10^{-5}$
910080	1888	$5,0236 \cdot 10^{-3}$	$2,0233 \cdot 10^{-6}$	$3,6509 \cdot 10^{-6}$	$5,1131 \cdot 10^{-7}$	$1,2090 \cdot 10^{-4}$	$2,1713 \cdot 10^{-5}$	$3,0614 \cdot 10^{-5}$

A variação da velocidade no trecho curvo pode ser observada com as diferentes malhas de acordo com a Figura 46. Para a malha com 9×10^5 elementos, a velocidade apresentou uma maior variação e por não ser significativa a diferença entre as malhas iniciais e a malha mais refinada, foram adotados os resultados da primeira.

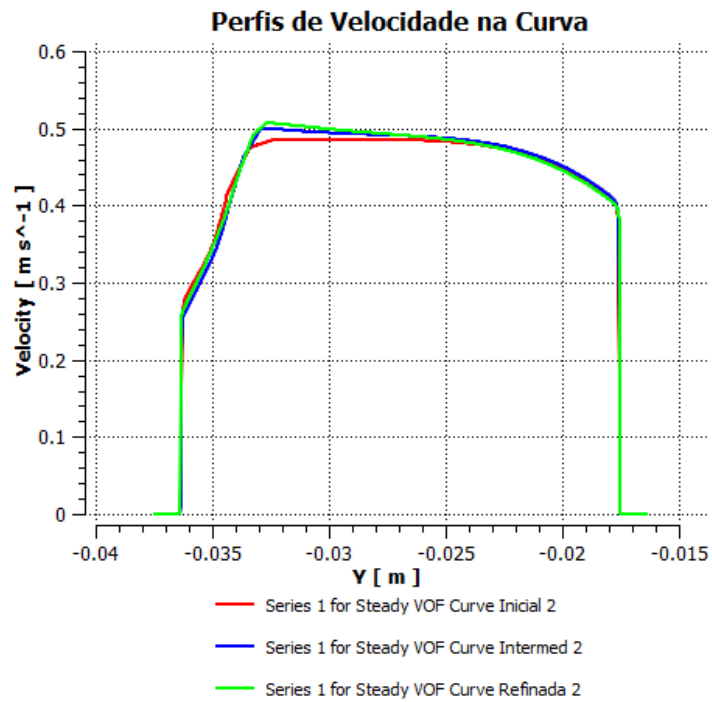


Figura 46 - Perfis de velocidade na curva

Para este estudo, foi feita uma comparação visual entre os perfis de densidade com imagens retiradas dos equipamentos experimentais de acordo com a Figura 47. No entanto, para a efetiva validação dos resultados com precisão e assertividade, seria necessária a utilização de equipamentos muito sofisticados com a capacidade de capturar campos de velocidade e representá-los com vetores ou contornos. (PIV - *Particle Image Velocimetry*).

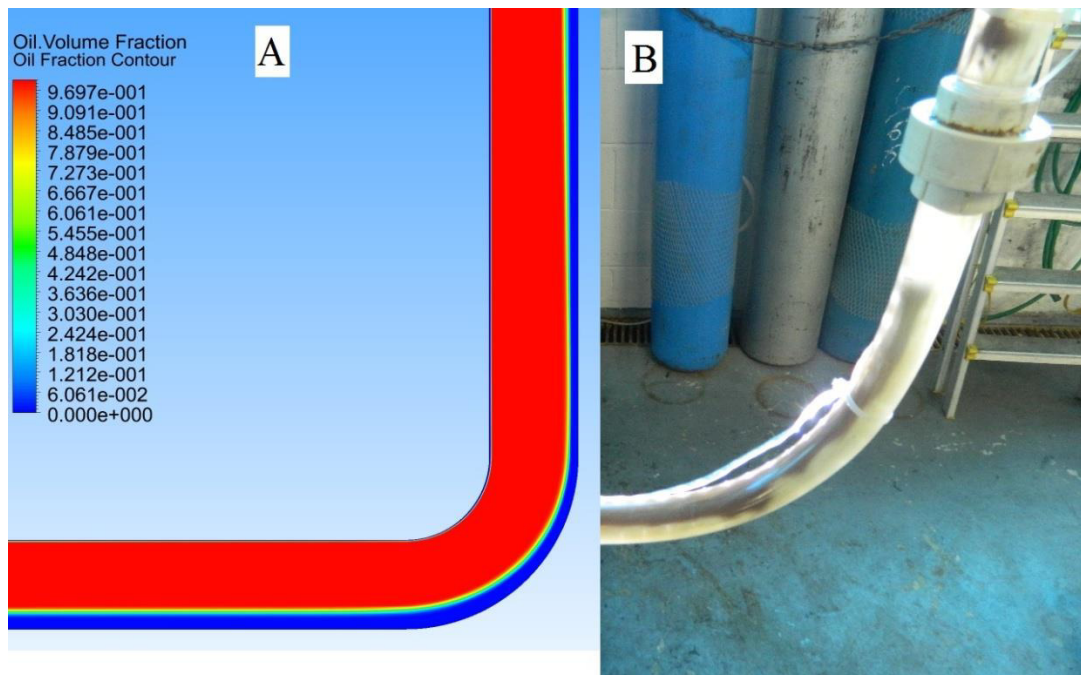


Figura 47 - Comparação do fenômeno físico (B) com modelo de CFD (A).

A literatura indica a utilização de modelos *RANS* e técnicas *VOF* para representar este tipo de escoamento. Alguns pontos foram levantados que podem justificar a representação menos precisa das simulações realizadas:

- A utilização de modelos *RANS* pode mascarar a representação de escoamentos com variações temporais de altas frequências, pois filtra todas as escalas turbulentas para predizer somente um campo de velocidade médio, quasi-estacionário. Para fluidos que compartilham superfícies livres e contínuas, um efeito difusivo pode ser observado (Bestion, 2012), como demonstra a Figura 48.

No primeiro quadro tem-se a interface real, no segundo quadro tem-se a interface com a utilização de *RANS* baseados na hipótese de *Boussinesq*, e na terceira o fluxo filtrado por uma superfície livre reconstruída.

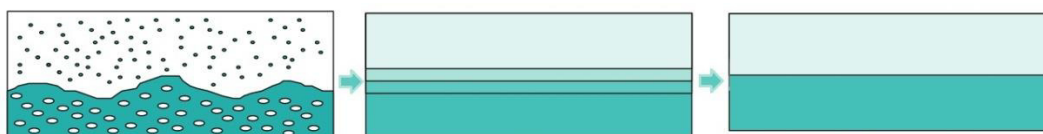


Figura 48 - Efeito da utilização de modelos *RANS* (*Boussinesq*) de turbulência para representações de interfaces com alta frequência de variação e com fenômeno de entranhamento interfásico (Bestion, 2012).

- O modelo *VOF* calcula somente um conjunto de equações de transporte de movimento para as duas fases e determina a posição da interface por meio de fração volumétrica na célula. Conforme a Figura 17, cada célula reproduz linearmente a superfície de contato entre os dois fluidos, então é necessário que a malha computacional seja refinada com muitos elementos na seção transversal da tubulação para capturar e suavizar curvaturas.
- Os fluidos são injetados com uma velocidade normal à interface. No equipamento experimental, um considerável trecho é percorrido pelos dois fluidos antes de entrarem em contato e a possibilidade da existência de velocidade tangencial pode ser a causa de efeitos rotacionais (*swirl*), observados experimentalmente. Isto pode ter grande influência na transferência de transporte de quantidade de movimento e no conseqüente no comportamento da interface.
- O fato de existir uma pequena seção de tubos concêntricos, pode influenciar na hidrodinâmica e na característica turbulenta da água de maneiras desconhecidas. Como é possível visualizar na Figura 49, a tubulação de óleo atua como um “obstáculo” para o escoamento de água.



Figura 49 - Tubo injetor de óleo na tubulação de água.

Foram realizados estudos transientes utilizando um modelo Euleriano completo, que simula modelos de turbulência parcialmente para cada fase, considerando um submodelo do tipo *VOF* para calcular a interface. Apesar da expectativa de resultados promissores, os perfis de densidade captaram somente sutis variações da interface, como é possível visualizar na Figura 50.

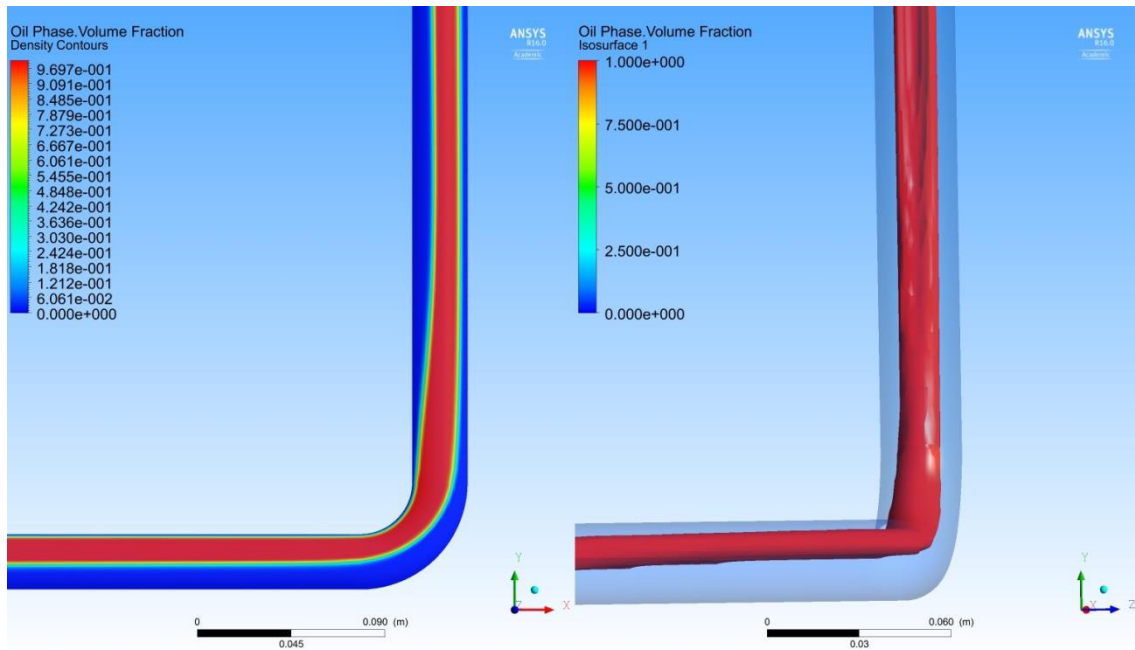


Figura 50 - Fluxo de *Core Annular Flow* com modelo Euleriano completo e *k-epsilon* para turbulência.

6.2. Modelo de Tensores de Reynolds (RSM) e Simulação de Grandes Escalas (LES).

Para compreender possíveis efeitos hidrodinâmicos causados pela presença da seção com duplo-tubo da tubulação, uma nova geometria foi idealizada e construída, diminuindo o tamanho da entrada e do escoamento vertical, porém adicionando internamente a parede da tubulação que escoar o óleo, sendo este alimentado após a curva.

A blocagem foi realizada, excluindo-se os elementos do interior da seção horizontal e associando as faces internas de cada bloco à superfície concêntrica que simulará a existência de duas paredes. Esta decisão foi tomada para que o número de elementos pudesse ser reduzido drasticamente e o tempo computacional pudesse ser diminuído uma vez considerado que o

escoamento da água era mais influente na formação de estruturas no óleo do que o contrário. A Figura 51 apresenta seções da blocagem acoplada a elementos geometria internos.

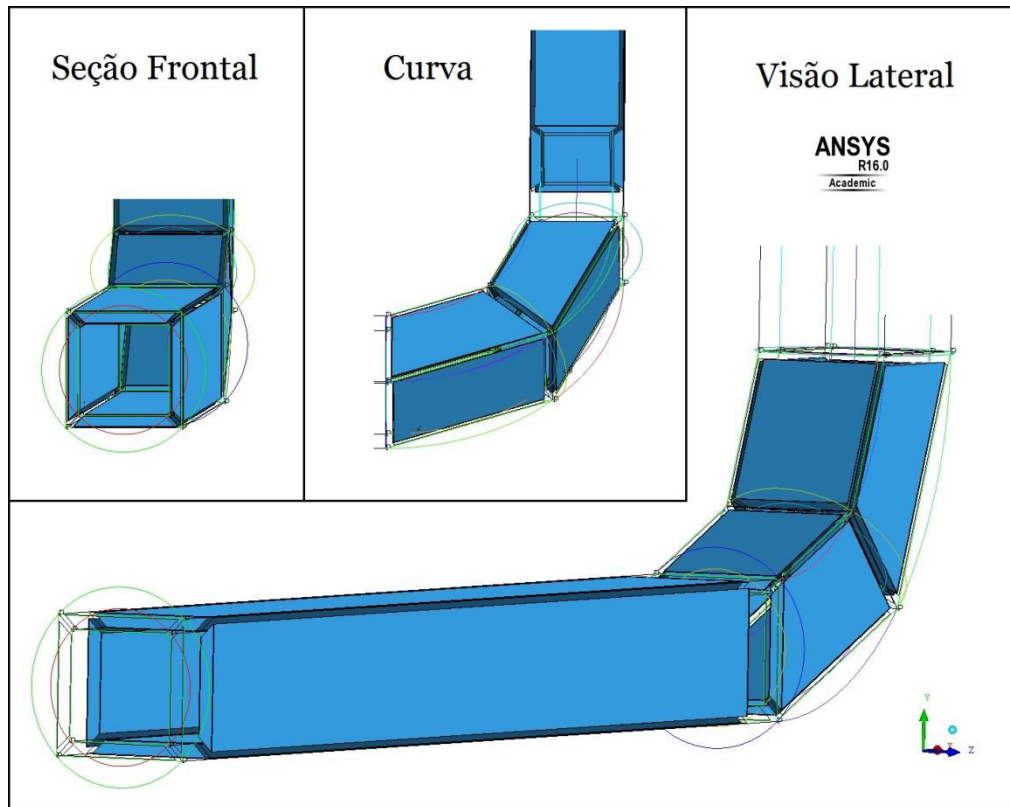


Figura 51 - Blocagem para geometria com duplo-tubo

A Figura 52 demonstra a malha utilizada na mesma geometria do problema anterior, porém com o núcleo do óleo sem preenchimento de elementos, a fim de se economizar no número de nós finais da malha e ainda assim simular corretamente a presença da parede do óleo.

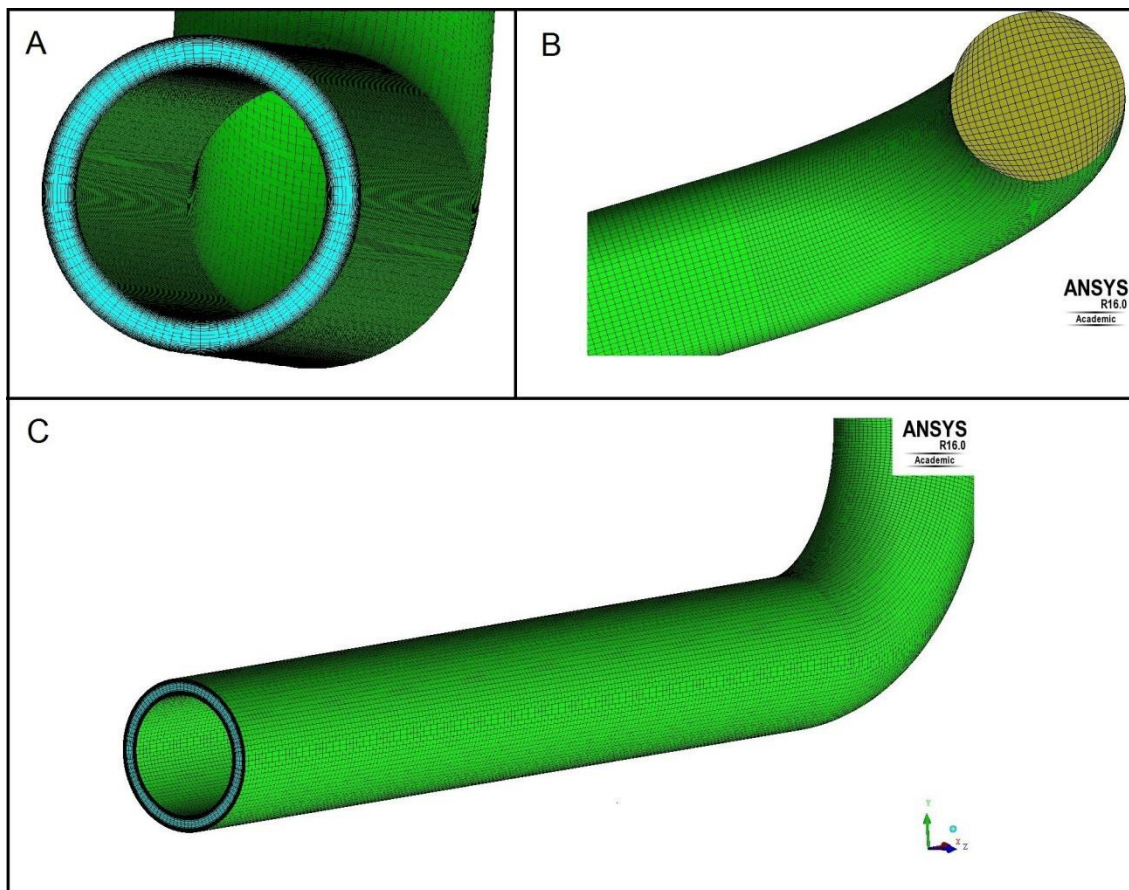


Figura 52 - Malha com Tubo-duplo. (A) Face de injeção de água, (B) Face de injeção de óleo, (C) Seção pré-injeção.

Com esta configuração, foram realizados testes com o modelo *RSM* de turbulência, que tenderia a captar movimentos rotacionais com mais facilidade devido a sua abordagem anisotrópica em relação aos outros modelos RANS. Fenômenos de *swirl* foram capturados mais facilmente, favorecendo trocas das quantidades turbulentas entre os fluidos e conseqüentemente gerando pequenas estruturas de interface que foram observadas experimentalmente. As Figura 53 e Figura 54 apresentam os resultados para a malha duplo-tubo.

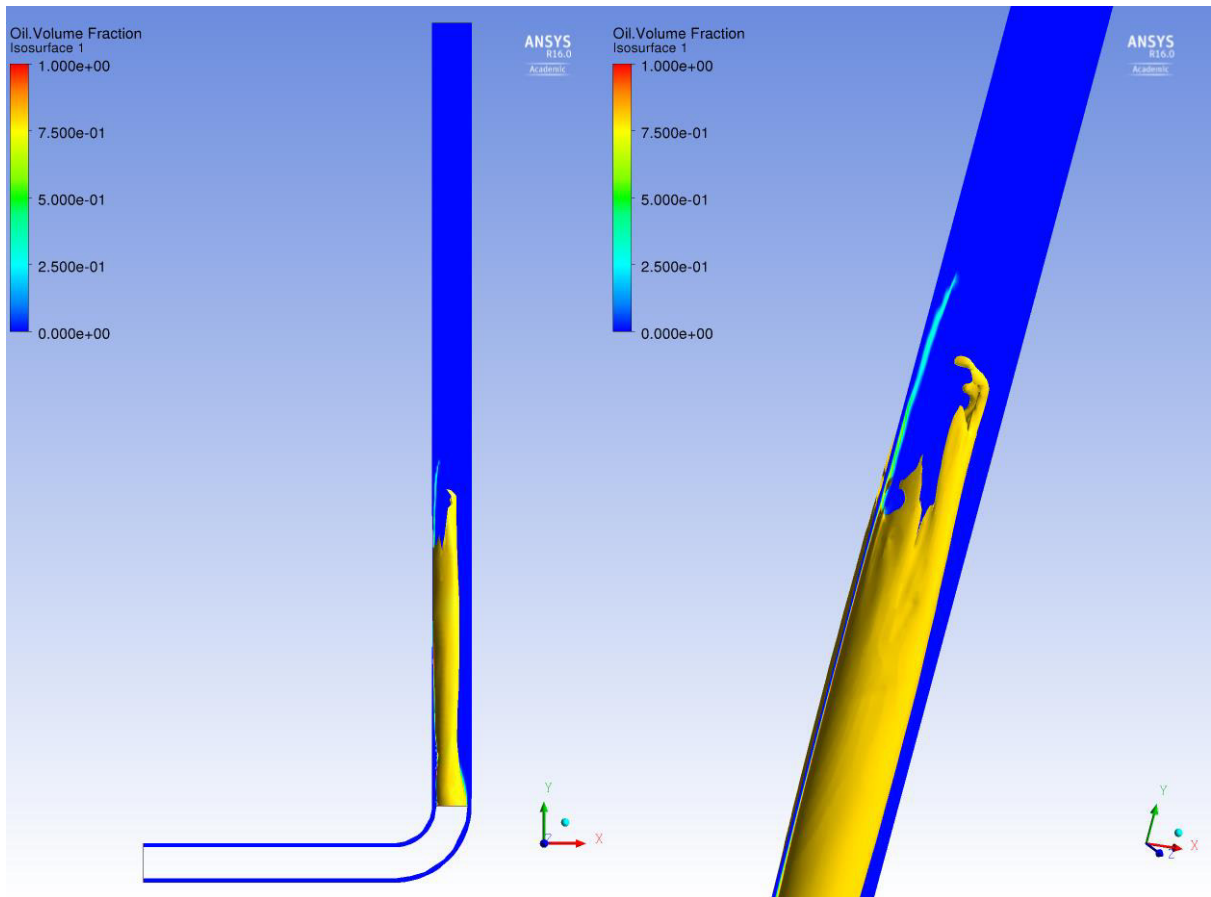


Figura 53 - Simulação com tubo-duplo, considerando *RSM* para turbulência e o *VOF* explícito para o esquema multifásico.

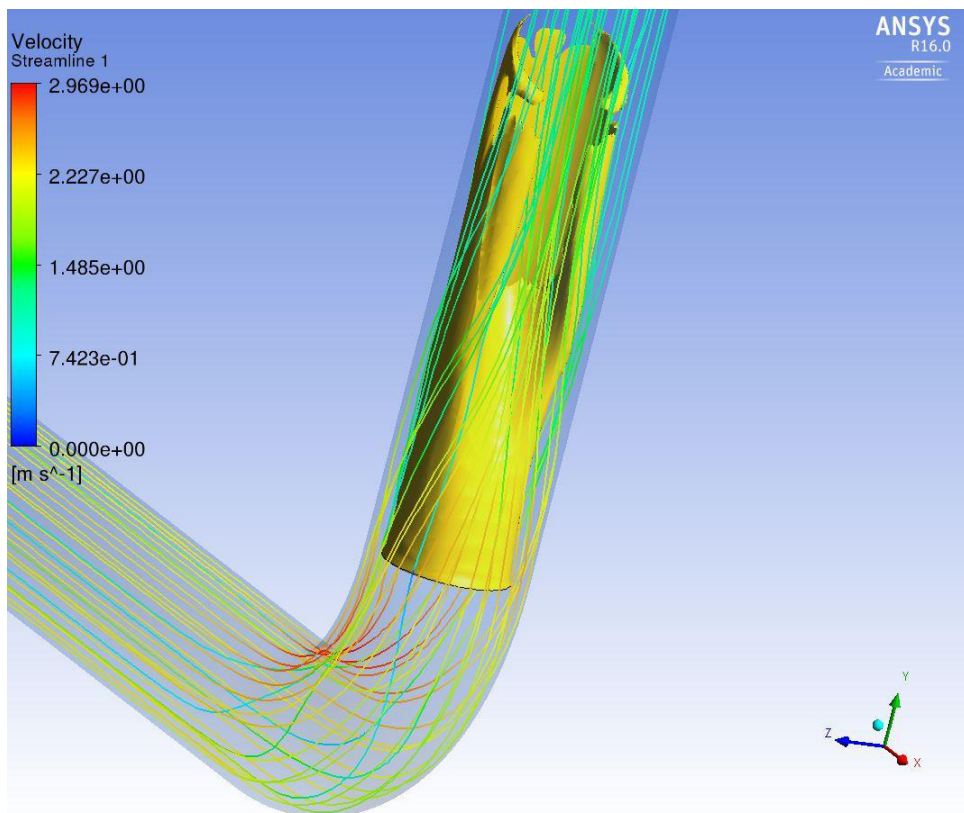


Figura 54 - *Streamlines* de velocidade da água e isosuperfície de óleo.

Foi possível observar que a inserção de uma parede interna, que representava a presença de outro tubo, teve grande influência nos resultados. O modelo RSM conseguiu capturar as estruturas de interface ainda que de forma insatisfatória, em relação ao fenômeno observado experimentalmente.

Nos estudos com simulações de grandes escalas foram realizados e através de decisões ao longo do trabalho, foram produzidos os resultados mais próximos do fenômeno físico. Pelo fato de abordagens do tipo *LES* (Smagorinsky-Lilly) resolver as maiores escalas computando suas flutuações, um verdadeiro escoamento transiente pode ser calculado sem a necessidade de passos de tempo muito pequenos, possibilitando filtrar escalas que resultam em uma reprodução próxima de ser chamada de determinística e não estatística. Uma malha com densidade de $1,2 \times 10^6$ elementos foi utilizada para o resultado da Figura 55.

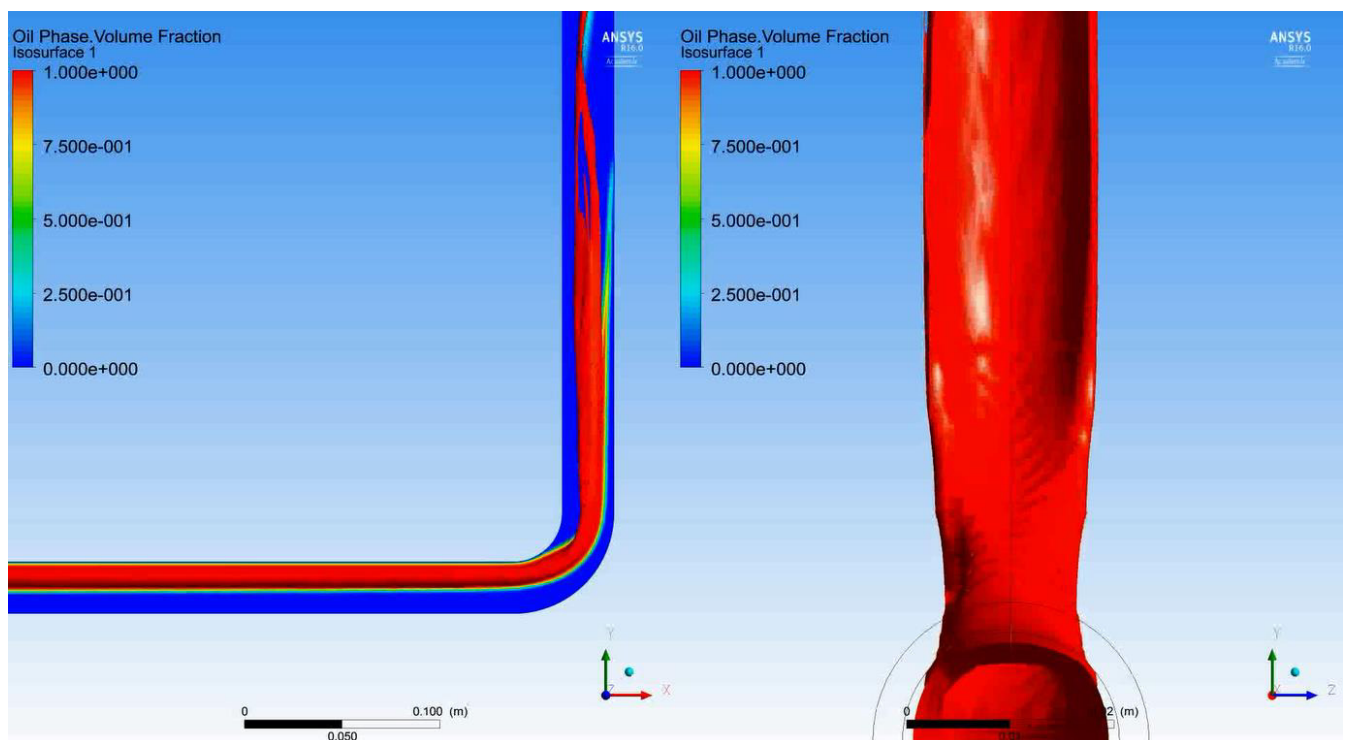


Figura 55 - *LES* combinado com *VOF* para o *Core Annular Flow*.

Após o resultado apresentado anteriormente, a nova geometria com duplo-tubo foi testada com a mesma modelagem e condições de contorno. Até este ponto, observou-se que a forma com que se tratava a turbulência

influencia drasticamente uma vez que o escoamento apresenta condições de turbulência não-ergódica (Ferrari; Flierl, 2007):

- **Não-estacionariedade:** por ser um fenômeno multifásico confinado, apresenta estruturas turbilhonares com quantidades médias variáveis com o tempo. Uma variável estacionária v é ergódica se a média no tempo de v converge para \bar{v} enquanto o intervalo de tempo se estende para o infinito.
- **Não-homogeneidade:** as quantidades médias são variáveis em qualquer translação espacial. Esta observação pode ser constatada visualmente uma vez que as estruturas formadas não são simétricas de maneira alguma.
- **Intensa Anisotropia:** as quantidades médias são variáveis em coordenadas arbitrárias de rotação.

Estes pontos observados fisicamente, certificam que *LES* é o método mais adequado para tratar a turbulência do fenômeno e então novas simulações foram realizadas. De acordo com o manual de teoria ANSYS (2014), a constante de Smagorinsky C_s foi derivada para um valor de 0,23 para turbulência isotrópica e homogênea. Para evitar um amortecimento excessivo de flutuações de grandes escalas, esta constante foi ajustada em 0,1; valor que é encontrado para uma gama maior de fluxos e conhecido por produzir melhores resultados (Meyers; Sagaut, 2006) (Vorobev; Zikanov, 2006).

De acordo com a Equação (49) do modelo submalha SGS, L_s , conhecido como comprimento de mistura, é identificado como igual à $C_s\Delta$. No *Software* ANSYS Fluent, Δ é a escala da malha local e é o principal filtro para o funcionamento do modelo que é computado de acordo com a equação (56) sendo V o volume computacional da célula:

$$\Delta = V^{1/3} \tag{56}$$

Para que estruturas turbilhonares sejam observadas no escoamento multifásico, uma malha bem refinada deve ser utilizada. Para os próximos resultados, uma malha foi escolhida após uma sequência de testes com malhas de 1,2; 1,6; 2,0; 2,4 e finalmente a de $2,8 \times 10^6$ elementos demonstrou os melhores resultados. Inicialmente foi computado o escoamento singular da água e depois foi adicionado o óleo. Os vetores de velocidade da Figura 56 demonstram que a malha consegue captar efeitos de anisotropia da água que acontecem na curva.

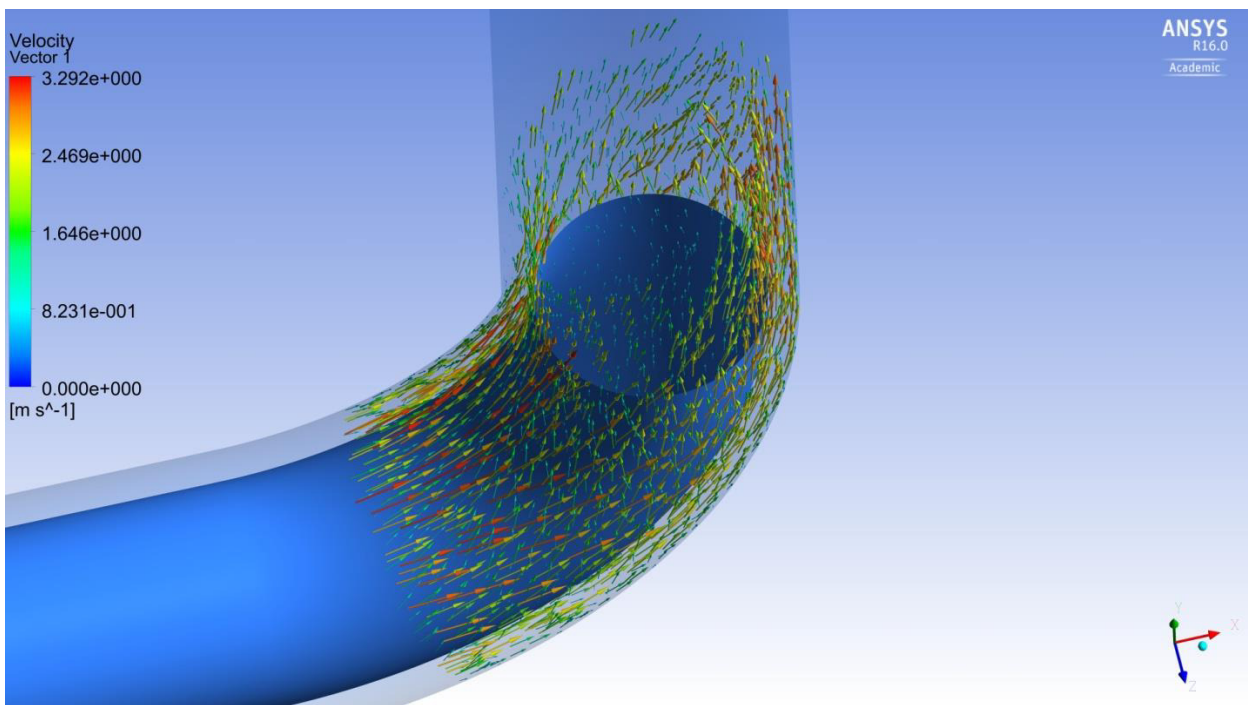


Figura 56 - Vetores de velocidade da água que escoam sozinhas em tubulação duplo-tubo.

Após a adição do óleo, observou-se que a interface conseguiu se comportar de forma assimétrica e verdadeiramente transiente, que difere da apresentada nos resultados anteriores utilizando modelos RANS, demonstrando que o fluxo apresentou flutuações não-ergódicas, equiparáveis com o observado experimentalmente como representado na Figura 57.

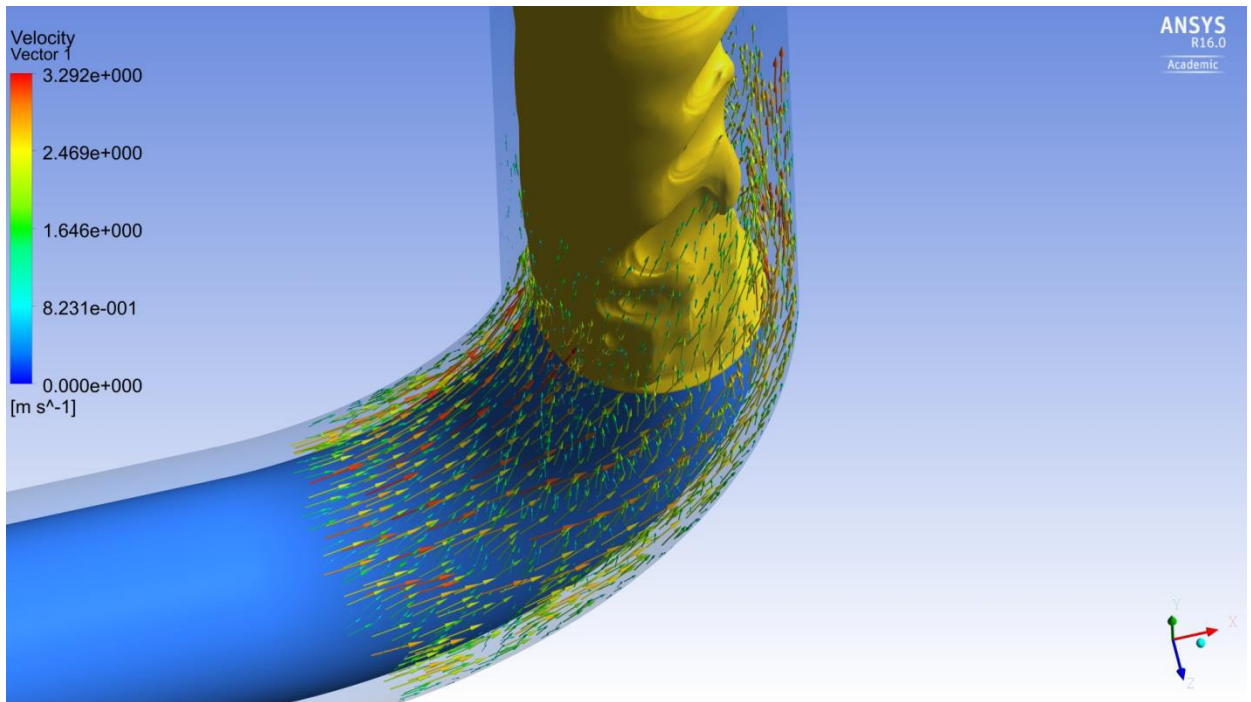


Figura 57 - Vetores de velocidade da água após a adição da fase óleo. Imagem capturada logo após a adição do óleo.

Ao se observar o escoamento transparecendo a parede externa, é possível constatar, ao longo da mudança dos passos de tempo, que as ondulações da interface foram reproduzidas em todo o domínio e que o óleo não encosta na parede em nenhum momento dos 21 segundos das simulações de acordo com as Figura 58 e Figura 59. As linhas de fluxo da água observadas na Figura 60 demonstram que a interface está sofrendo ondulações, de forma abrangente, por causa da troca de quantidade de movimento com a água.

Na visão superior oblíqua da Figura 61, pode-se observar o fenômeno de entranhamento interfásico que apesar de não estar no escopo para ser incluído no modelo, as flutuações calculadas pela técnica *LES* captaram estas estruturas no início do escoamento antes de sua estabilização, assim como ocorre experimentalmente ao se injetar o óleo.

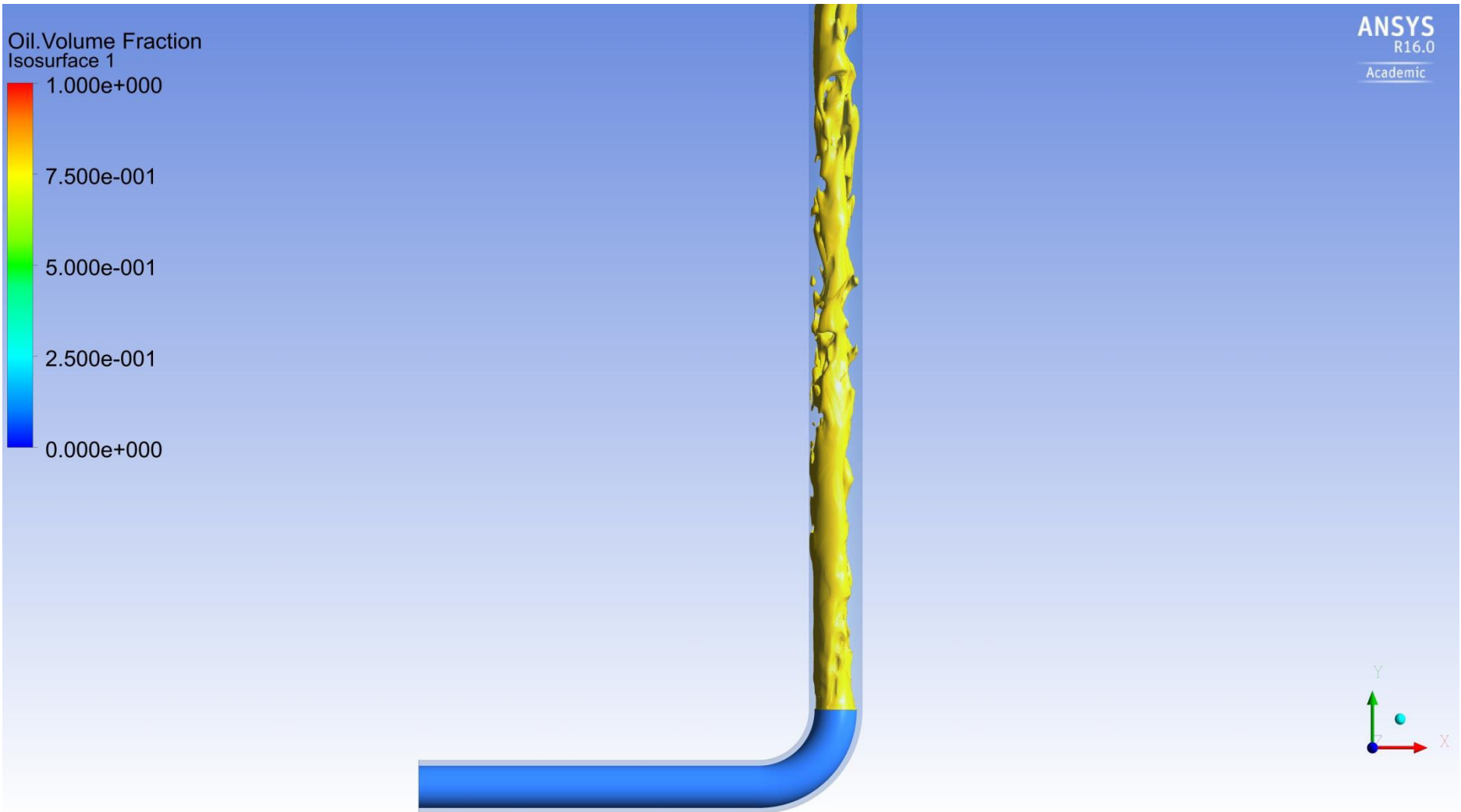


Figura 58 - Visão externa da tubulação com tubulação de água transparente. Visualização do CAF.

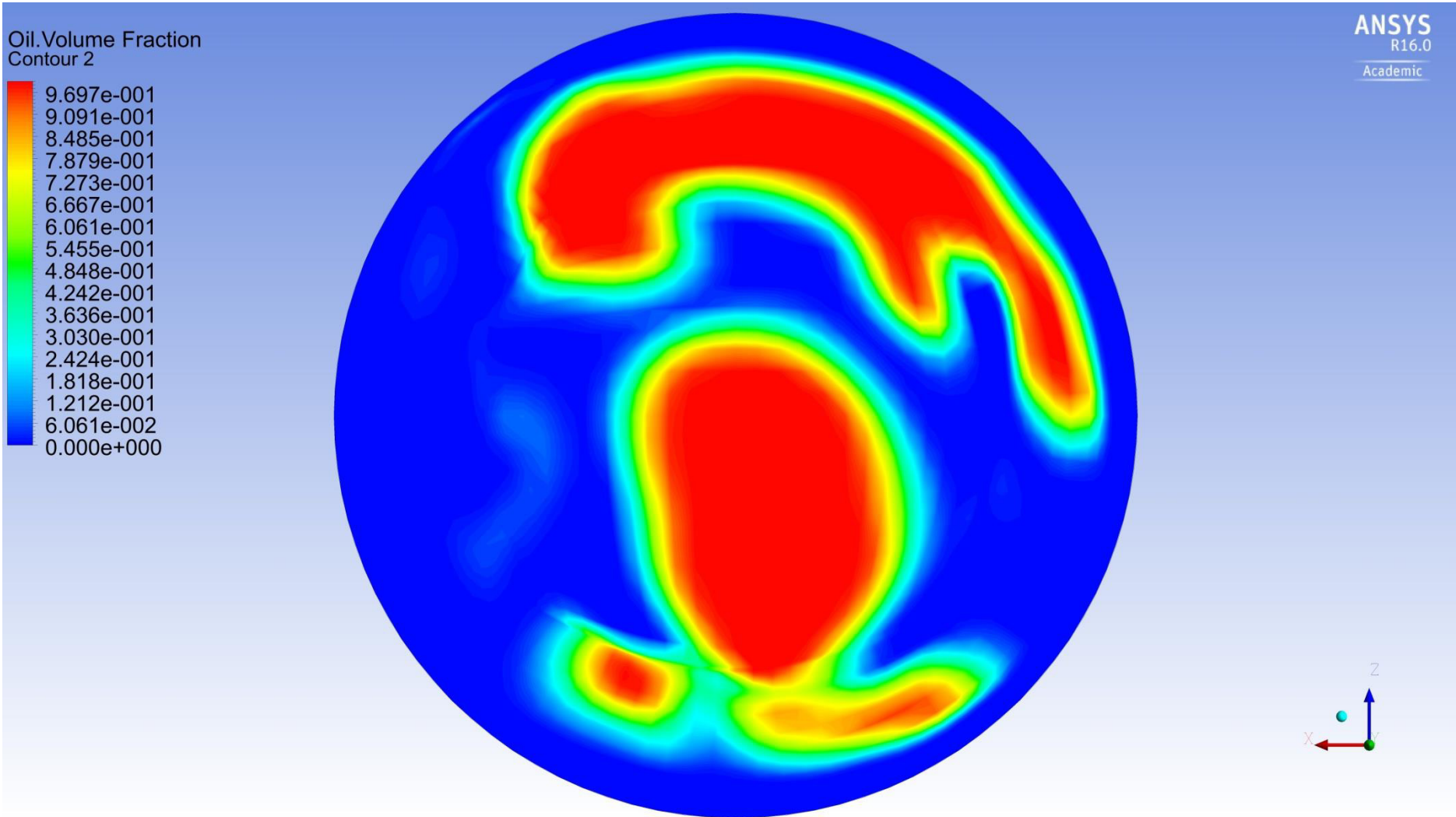


Figura 59 - Perfil de fração mássica na posição transversal da tubulação com uma altura de 20 cm.

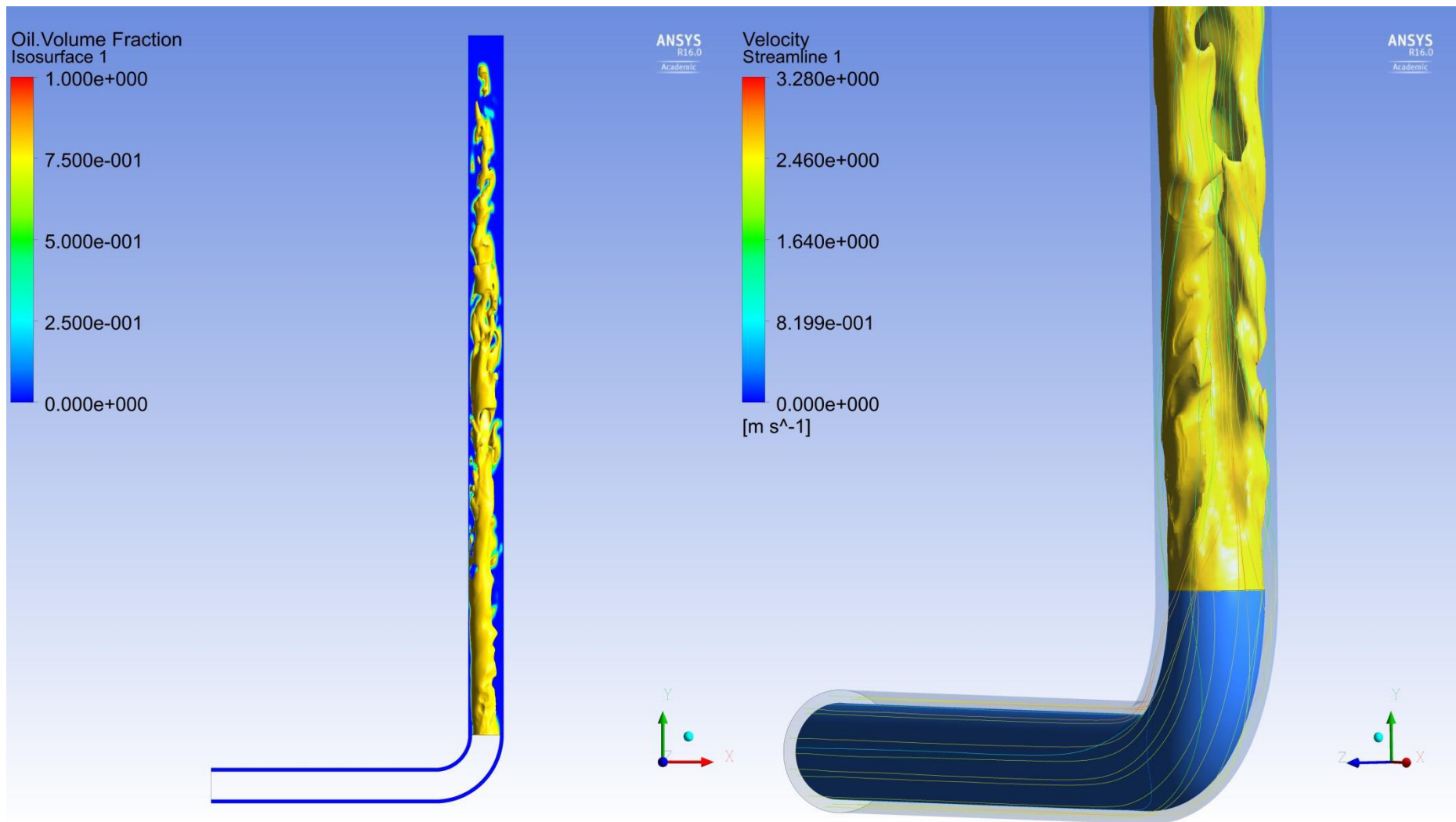


Figura 60 - Linhas de fluxo da água e sua influência na interface do óleo.

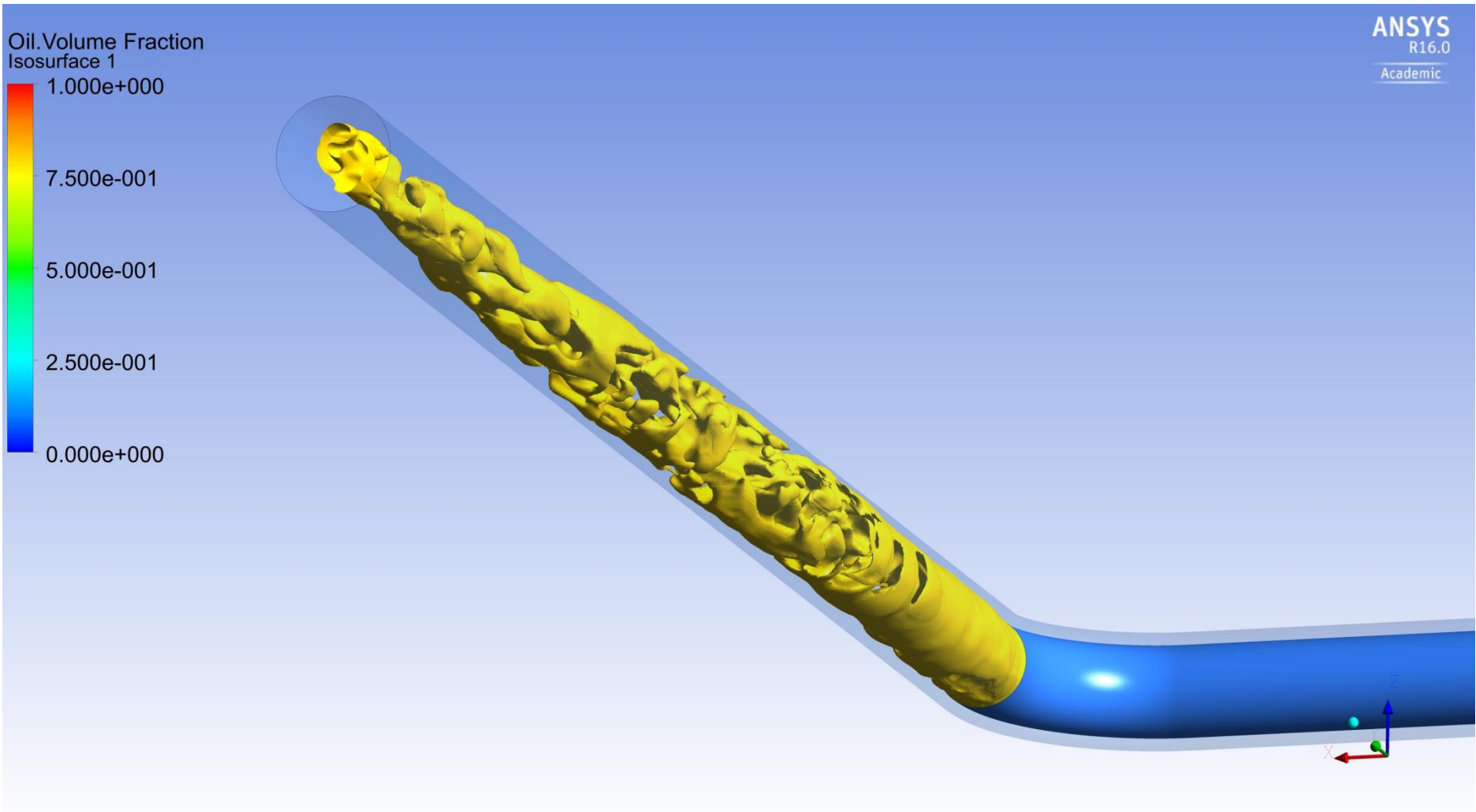


Figura 61 - Visão superior oblíqua de simulação de CAF.

7. Conclusões

- O Software atingiu convergência com resíduos abaixo de 1×10^3 e balanço de massa apresentando diferença de no máximo 0,02% entre entradas e saída.
- Malhas mais densas apresentaram resultados relativamente próximos aos das malhas grossas, porém com maior tempo computacional. As malhas mais abertas apresentaram perda de resolução do escoamento na interface.
- O *solver* conseguiu prever de uma forma satisfatória os campos de velocidade. Porém, com métodos *RANS* para turbulência, o escoamento acabou apresentando um resultado linearizado por causa do processo de média envolvido, eliminando grande parte das flutuações necessárias para a sua correta representação.
- As decisões tomadas em simplificar a geometria diminuindo suas dimensões e a de incluir uma parede interna para a seção de escoamento livre da água na horizontal foram imprescindíveis para a qualidade dos resultados finais obtidos.
- O método *LES* para simulação de grandes escalas provou ser o melhor método testado para computar a turbulência de forma a representar a interface adequadamente.
- O modelo abrangente considerado o mais adequado no presente trabalho é composto pelos seguintes sub modelos:
 - Turbulência: Simulação de Grandes Escalas com modelo submalha de Smagorinsky-Lilly.
 - Multifásico: Modelo homogêneo de Volume de Fluido.

8. Referências

- AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO – ANP **Anuário Estatístico de 2016**. Publicado no website da Agência Nacional De Petróleo publicado em ago/2016.
- ANDERSON, J. D. **Computational Fluid Dynamics: The Basics With Applications**. 1. Ed. Mcgraw Hill Mechanical Engineering Series, 1995.
- ANSYS, **FLUENT Theory Guide and User's Guide**. Ed 15.0, 2014.
- BAI R., CHEN K., JOSEPH D. D.; **Lubricated Pipelining: Stability Of Core-Annular Flow**. Journal of Fluid Mech. v. 240, p. 97–132, 1992.
- BALAKHRISNA, T.; GHOSH S.; DAS, G.; DAS, P. K.; **Oil–Water Flows Through Sudden Contraction And Expansion In A Horizontal Pipe – Phase Distribution And Pressure Drop**. Int. Journal Of Multiphase Flow v. 36, p. 13-24, 2010.
- BESTION, D. **Applicability Of Two-Phase CFD To Nuclear Reactor Thermalhydraulics And Elaboration Of Best Practice Guidelines**. Nuclear Engineering and Design, v. 253, p. 311–321, 2012.
- BIRD, R.; STEWART, W.; LIGHTFOOT, E. **Transport Phenomena** ed. 2. John Wiley & Sons, 2006.
- BRAUNER, N. **Two-Phase Liquid-Liquid Annular Flow**. International Journal Of Multiphase Flow, v. 17, n. 1, p. 59–76, 1991.
- CONSTANTINIDES, A; MOSTOUFI, N. **Numerical Methods For Chemical Engineers With Matlab Applications** ed. 1. Wiley, 1999.
- ESCUE, A.; CUI, J. **Comparison Of Turbulence Models In Simulating Swirling Pipe Flow**. Applied Mathematical Modelling, v. 34, n. 1, p. 2840-2849, 2009.
- FERRARI, R.; FLIERL, G. **Turbulence in the Ocean and Atmosphere**. Material aberto do Curso de Turbulência Oceânica e Atmosférica, Publicado em Março de 2007.

GHORAI, S.; NIGAM, K. D. P. **CFD Modeling Of Flow Profiles And Interfacial Phenomena In Two-Phase Flow In Pipes**. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, v. 45, n. 1, p. 55–65, 2006.

GHOSH, S.; DAS, G.; DAS, P. K. **Simulation Of Core Annular Downflow Through CFD - A Comprehensive Study**. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, v. 49, n. 11, p. 1222–1228, 2010.

GONÇALVES, N. D. F. **Método Dos Volumes Finitos Em Malhas Não-Estruturadas**. 2007.

GOPALA, V. R.; VAN WACHEM, B. G. M. **Volume Of Fluid Methods For Immiscible-Fluid And Free-Surface Flows**. Chemical Engineering Journal, v. 141, n. 1-3, p. 204–221, 2008.

HANJALIC, K.; **Closure Models For Incompressible Turbulent Flows**. Von Karman Institute Lecture Series (2004).

HIRT, C. W.; NICHOLS, B. D.; **Volume Of Fluid (VOF) Method For The Dynamics Of Free Boundaries**. Journal of Computational Physics, v. 39, n. 1, p. 201–225, 1981.

ISHII, M.; HIBIKI T. **Thermo-Fluid Dynamics Of Two-Phase Flow 2**. Ed. Springer, 2011.

JOSÉ, A. F. G.; GADELHA, F.; SWARNAKAR, R.; LIMA, A. G. B.; **Thermo-Hydrodynamics Of Core-Annular Flow Of Water, Heavy Oil And Air Using Cfx**. v. 2013, n. October, p. 37–45, 2013.

JOSEPH, D. D.; BAI, R.; CHEN, K. P.; RENARDY, Y. Y.; **Core-Annular Flows**. Annual Review of Fluid Mechanics, v. 29, n. January, p. 1–30, 1997.

KAUSHIK, V. V. R. GHOSH, S.; DAS, G.; DAS, P. K.; **CFD Simulation Of Core Annular Flow Through Sudden Contraction And Expansion**. Journal of Petroleum Science and Engineering, v. 86-87, p. 153–164, 2012.

KENDALL, E. A.; **An Introduction To Numerical Analysis 2**. Ed. Wiley, 1989.

LAUNDER B. E.; SPALDING D. B.; **The Numerical Computation Of Turbulent Flows**. Imperial College of Science and Technology, Department of Mechanical Engineering, 1973.

LILLY D. K.; **On The Application Of The Eddy Viscosity Concept In The Inertial Sub-Range Of Turbulence**, National Center of Atmospheric Research. Manuscript No. 123, 1966.

LOPEZ D.; **Ecoulements Diphasiques A Phases Separees A Faible Contenu De Liquide**. These de Doctorat, I.N.P. Toulouse, France, 1994.

MANNINEN, M.; TAIVASSALO, V.; KALLIO, S.; **On The Mixture Model For Multiphase Flow**. Vtt Publications, p. 1–67, 1996.

MEYERS, J.; SAGAUT, P.; **On The Model Coefficients For The Standard And The Variational Multi-Scale Smagorinsky Model**. Journal of Fluid Mech. Vol 569, pp. 287-319, 2006.

POPE, S. B. **Turbulent Flows**. Cambridge University Press, p. 558-593, 2000.

PRADA, V.; BANNWART C.; **Modeling of vertical core-annular flows and application to heavy oil production**. Journal of Energy Resources and Technology ASME;123:194– 9, 2001.

ROSA, E. S.; **Escoamento Multifásico Isotérmico: Modelos De Multifluidos E De Mistura** 1. Ed. Bookman, 2012.

SILVA, A. G.; ARAÚJO C. M.; TORNEIROS, D. L. M.; SANTOS D. T.; SOUZA L. C. F.; ASCARIZ, M. E. M. L., SILVA, M. V. B.; FONSECA P. R. S. C.; MENDES P. H. C.; FERREIRA R. C. G.; **Estudo da Aplicabilidade de Core Annular Flow em Trecho Vertical de um Escoamento Bifásico de Óleo e Água**. Trabalho de Conclusão de Curso de Bacharelado em Engenharia Química. UNISANTA, 2014.

SMAGORINSKY, J.; **General Circulation Experiments With The Primitive Equations**. Monthly Weather Review, v. 91, n. 3, 1963.

SOO, S. L.; **Multiphase Fluid Dynamics** 1. Ed. Butterworth-Heinemann, 1990.

SHU-TANG, T.; YU-LU, L. **On The Closure Problem Of Turbulence Model Theory**. Applied Mathematics and Mechanics, v. 16, p. 225-227, 1995.

TENNEKES, H.; LUMLEY, J. H. **A First Course In Turbulence**. Michigan: MIT Press, 1972.

THOMPSON, J. F.; SONI, B. K.; WEATHERILL, N. P. Truncation Error On Structured Grids. **Handbook of Grid Generation**, n. 1, p. 1136, 1998.

TRIPATHI, S.; BHATTACHARYA, A.; SINGH, R.; TABOR, R. F.; **Lubricated Transport Of Highly Viscous Non-Newtonian Fluid As Core-Annular Flow: A CFD Study**. Procedia IUTAM, v. 15, p. 278–285, 2015.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An Introduction To Computational Fluid Dynamics**. 2. ed. Prentice Hall, 2007.

VIEIRA, R. E.; TORRES, C. F.; MCLAURY, B. S.; SHIRAZI, S. A.; SCHLEICHER, E.; HAMPEL, U.; **Assessment Of A Hybrid CFD Model For Simulation Of Complex Vertical Upward Gas – Liquid Churn Flow**. Chemical Engineering Research and Design, v. 105, p. 71–84, 2015.

VISAVALÉ, G. **Introduction to Turbulence** Material from LearnCAX Course, Centre for Computational Technologies Pvt. Ltd, 2016.

VOROBEV, A.; ZIKANOV, O.; **Smagorinsky Constant In LES Modeling Of Anisotropic MHD Turbulence**. Theor. Comput. Fluid. Dyn. 2006.

WALLIS, G. B.; **One-Dimensional Two-Phase Flow**. Ed. 1. McGraw-Hill Book Company, 1969.

WILCOX, D. C.; **Turbulence Modeling for CFD**, Ed. 1, DCW Industries, Inc., 1993.

WINSLOW, A. M.; **Equipotential Zoning of Two-Dimensional Meshes**. Journal of Computational Physics, v. 1, p.167-172. 1967.

ZIENKIEWICZ, O. C.; TAYLOR R.; **The Finite Element Method: It's Basis and Fundamentals**. 6. Ed. Elsevier, 2005.