



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**



JÉSSICA LACERDA DE OLIVEIRA

**HIDRODINÂMICA DO ESCOAMENTO BIFÁSICO DE ÓLEO E ÁGUA
EM DUTOS CILÍNDRICOS DE SEÇÃO TRANSVERSAL ELÍPTICA**

**CAMPINA GRANDE – PB
Agosto, 2016**

JÉSSICA LACERDA DE OLIVEIRA

**HIDRODINÂMICA DO ESCOAMENTO BIFÁSICO DE ÓLEO E ÁGUA
EM DUTOS CILÍNDRICOS DE SEÇÃO TRANSVERSAL ELÍPTICA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Campina Grande como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientadores: Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima
Prof. Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto

CAMPINA GRANDE – PB
Agosto, 2016

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

- O48h Oliveira, Jéssica Lacerda de.
Hidrodinâmica do escoamento bifásico de óleo e água em dutos cilíndricos de seção transversal elíptica / Jéssica Lacerda de Oliveira. – Campina Grande, 2016.
55 f. : il. color.
- Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia elétrica e Informática, 2016.
"Orientação: Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima, Prof. Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto".
Referências.
1. Engenharia Mecânica. 2. Hidrodinâmica – Escoamento Bifásico. 3. Duto Elíptico. 4. Escoamento – Óleos Pesados. I. Lima, Antonio Gilson Barbosa de. II. Farias Neto, Severino Rodrigues de. III. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande (PB). IV. Título.

CDU 621(043)

“HIDRODINÂMICA DO ESCOAMENTO BIFÁSICO DE ÓLEO E ÁGUA EM DUTOS
CILÍNDRICOS DE SEÇÃO TRANSVERSAL ELÍPTICA”.

JÉSSICA LACERDA DE OLIVEIRA

Dissertação Aprovada em 17/08/2016 pela Banca Examinadora constituída dos seguintes

membros:



Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima

Orientador

PPGEM/UAEM/CCT/UFCG



Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto

Orientador

PPGEM/UAEQ/CCT/UFCG



Dr. José Nilton Silva

Examinador Externo

UAEQ/CCT/UFCG



Dr. Enivaldo Santos Barbosa

Examinador Externo

UAEM/CCT/UFCG

DEDICATÓRIA

*Aos meus pais, Simão e Gilma,
ao meu irmão Rafael e a minha avó Rita.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por iluminar o meu caminho e por me dar forças para nunca desistir.

A minha família, especialmente meus pais, Simão e Gilma, meu irmão Rafael e minha avó Rita, por todo amor, força e compreensão.

Ao meu orientador Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima, pela paciência e incentivo durante toda a trajetória.

Aos meus amigos Adailton, Jéssica, Herusca, Leylla, e Wellington, por estarem sempre próximos quando precisei.

Ao Prof. Dr. Enivaldo Santos Barbosa, pela ajuda durante a simulação numérica.

A todos do LCTF que de alguma forma contribuíram para a realização desta pesquisa.

A CAPES, FINEP, CNPq, ANP e PETROBRAS pelo suporte financeiro.

Agradeço a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desta pesquisa.

“O SENHOR é o meu pastor, nada me faltará.”

Salmos 23:1

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	01
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	03
2.1	Escoamento multifásico.....	03
2.1.1	Características gerais.....	04
2.1.2	Escoamento bifásico.....	05
2.1.2.1	Padrões de escoamento bifásico líquido-gás em dutos verticais de seção transversal circular.....	08
2.1.2.2	Padrões de escoamento bifásico líquido-gás em dutos horizontais de seção transversal circular.....	09
2.1.2.3	Padrões de escoamento em sistemas líquido-líquido (água-óleo) em dutos horizontais de seção transversal circular.....	11
2.2	Dutos circulares com seção transversal elíptica.....	13
2.3	Fluidodinâmica computacional.....	14
2.3.1	O software ANSYS CFX.....	14
2.3.1.1	Pré-processamento.....	15
2.3.1.2	Processamento (Solver)	15

2.3.1.3	Pós-processamento.....	15
2.3.2	Geração de malhas.....	16
2.4	Modelagem matemática para escoamento multifásico.....	18
2.4.1	Abordagem Euleriana-Euleriana.....	18
2.4.2	Abordagem Euleriana-Lagrangeana.....	19
3	METODOLOGIA.....	20
3.1	Modelagem matemática.....	20
3.2	Equações constituintes.....	21
3.3	O problema físico e a geometria.....	24
3.4	Condições iniciais, de contorno e propriedades dos fluidos adotadas.....	26
3.5	Casos avaliados.....	27
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	28
4.1	Validação por comparação numérico/analítico.....	28
4.2	Análise hidrodinâmica.....	30
4.2.1	Distribuição de velocidade.....	30
4.2.2	Distribuição de pressão.....	37
4.2.3	Distribuição da fração volumétrica.....	43
4.2.4	Comparação entre um duto de seção transversal circular com um de seção transversal elíptica ambos com a mesma vazão mássica.....	45
4.2.5	Influência da forma do duto na hidrodinâmica do escoamento.....	46
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	48
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	50

RESUMO

OLIVEIRA, Jéssica Lacerda de. **Hidrodinâmica do escoamento bifásico de óleo e água em dutos cilíndricos de seção transversal elíptica**. 2016. 55 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande. 2016.

O modal dutoviário consiste na principal forma de transporte da produção de fluidos multifásicos, onde os dutos cilíndricos com seção transversal circular são os responsáveis pela interligação das regiões produtoras aos centros consumidores. O aumento da produção de óleo direciona o interesse da indústria do petróleo para estudos que tratem do aumento da vazão dos fluidos nos sistemas de transporte, utilizando tecnologias que permitam uma maior eficiência nesses sistemas. Neste sentido, o objetivo deste trabalho é estudar o escoamento laminar de óleo e água em um duto com seção transversal elíptica, considerando o escoamento tridimensional, incompressível, sem transferência de calor, em regime permanente e com as propriedades físico-químicas constantes, por meio de simulação numérica. Resultados dos campos de pressão, velocidade e fração volumétrica das fases no escoamento para diferentes razões de aspecto do duto cilíndrico elíptico são apresentados e analisados. Verificou-se que quanto maior a razão de aspecto em um duto cilíndrico com seção transversal elíptica, menor será a perda de carga no duto.

Palavras Chave:

Duto Elíptico, Escoamento Bifásico, Simulação Numérica, CFX, Óleos Pesados.

ABSTRACT

OLIVEIRA, Jéssica Lacerda de. **Hydrodynamics of oil and water two-phase flow in cylindrical pipes of elliptical cross section.** 2016. 55 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande. 2016.

The modal pipeline is the main form to production transportation of multiphase fluids, where the cylindrical ducts with circular cross section are used to link the producing regions to consumer centers. Increased oil production directs the interest in the oil industry to studies that deal with the increasing flow of fluids in transportation systems, using technologies that enable greater efficiency in these systems. In this sense, the objective of this work is to study the oil and water laminar flow in a pipeline with elliptical cross section, considering three-dimensional and incompressible flow, no heat transfer, steady state regime with physicochemical properties through the numerical simulation. Results of pressure, velocity and volume fraction distributions of the phases in the flow for different aspect ratios of elliptic cylindrical duct are presented and analyzed. It has been found that when higher the aspect ratio of the a cylindrical duct with elliptical cross section, the lower the pressure loss in the duct.

Key Words:

Elliptic Pipe, Two Phase Flow, Numerical Simulation, CFX, Heavy Oils.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Desenvolvimento do perfil de velocidade.....	05
Figura 2.2 – Mapa de padrões de escoamento água-óleo.....	07
Figura 2.3 – Padrões de escoamento bifásico líquido-gás em dutos verticais.....	09
Figura 2.4 – Padrões de escoamento bifásico líquido-gás em dutos horizontais.....	10
Figura 2.5 – Padrões de escoamento água-óleo.....	12
Figura 2.6 – Duto cilíndrico com seção transversal elíptica.....	13
Figura 2.7 – Algoritmo da solução numérica de um problema utilizando o <i>software</i> CFX.....	16
Figura 2.8 – Tipos de malha.....	17
Figura 2.9 – Técnica de blocagem.....	18
Figura 3.1 – Representação da malha utilizada na simulação. a) entrada; b) lateral e c) saída.....	25
Figura 4.1 – Comparação entre os resultados analíticos e numéricos em $z = 5,92$ m (caso 1).....	29
Figura 4.2 – Perfil de velocidade do óleo sobre o plano longitudinal ZX para o caso 1.....	30
Figura 4.3 – Perfil de velocidade do óleo sobre o plano transversal XY em $z = 0,5$ m para o caso 1.....	31
Figura 4.4 – Perfil de velocidade do óleo sobre o plano transversal XY em $z = 1,5$ m para o caso 1.....	31
Figura 4.5 – Perfil de velocidade do óleo sobre o plano transversal XY em $z = 2,78$ m para o caso 1.....	32

Figura 4.6 – Perfil de velocidade do óleo sobre o plano transversal XY 1 em $z = 5,92$ m para o caso 1.....	32
Figura 4.7 – Distribuição da velocidade em $z = 5,92$ m para o caso 4. a) óleo e b) água.....	33
Figura 4.8 – Distribuição da velocidade em $z = 5,92$ m para o caso 6. a) óleo e b) água.....	34
Figura 4.9 – Comportamento da velocidade do óleo no centro do duto ao longo da posição axial para os casos 5 a 7.....	36
Figura 4.10 – Comportamento da velocidade do óleo no centro do duto ao longo da posição axial para os casos 8 a 10.....	36
Figura 4.11 – Distribuição da pressão média (na seção) ao longo do comprimento do duto. a) caso 2 e b) caso 6.....	38
Figura 4.12 – Distribuição de pressão sobre o plano longitudinal ZX para o caso 1.....	39
Figura 4.13 – Distribuição de pressão sobre o plano longitudinal ZX para o caso 2.....	39
Figura 4.14 – Distribuição de pressão sobre o plano longitudinal ZX para o caso 3.....	40
Figura 4.15 – Distribuição de pressão sobre o plano longitudinal ZX para o caso 4.....	40
Figura 4.16 – Distribuição da pressão para o caso 6. a) pressão e b) pressão total.....	42
Figura 4.17 – Distribuição da pressão para o caso 9. a) pressão e b) pressão total.....	43
Figura 4.18 – Distribuição da fração volumétrica do óleo na região próxima a entrada e saída do duto (caso 4).....	44
Figura 4.19 – Distribuição da fração volumétrica do óleo no plano transversal XY em $z = 5,92$ m (caso 4).....	44
Figura 4.20 – Distribuição da fração volumétrica da água no plano transversal XY em $z = 5,92$ m (caso 4).....	45
Figura 4.21 – Representação da seção transversal dos dutos para as razões de aspecto. a) 1,0; b) 1,5; c) 3,0 e (d) 5,0.....	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Dados geométricos do duto em estudo.....	24
Tabela 3.2 – Propriedades dos fluidos usadas na simulação.....	26
Tabela 3.3 – Condições gerais do modelo matemático e solução numérica.....	26
Tabela 3.4 – Características gerais dos casos estudados.....	27
Tabela 3.5 – Parâmetros gerais dos casos estudados.....	27
Tabela 4.1 – Comparação da variação da pressão total no duto, analítica e numérica, para o caso 1.....	29
Tabela 4.2 – Comprimento de entrada hidrodinâmico para todos os casos estudados.....	37
Tabela 4.3 – Queda de pressão no duto para todos os casos estudados.....	41
Tabela 4.4 – Comparação entre um duto de seção transversal circular com um de seção transversal elíptica.....	46
Tabela 4.5 – Parâmetros dos casos estudados para diferentes razões de aspecto.....	47

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Latinas

$A_{i\beta}$	Densidade de área interfacial	$[m^{-1}]$
A	Área da seção transversal	$[m^2]$
C_D	Coefficiente de arraste	[-]
D	Diâmetro do duto	[m]
D_h	Diâmetro hidráulico	[m]
f_i	Fração volumétrica da fase i	[-]
\hat{f}_{rd}	Coefficiente de fricção para a região completamente desenvolvida	[-]
\hat{f}_{reh}	Coefficiente de fricção aparente	[-]
L_{ceh}	Comprimento de entrada hidrodinâmico	[m]
L	Comprimento do duto	[m]
L_1	Comprimento do raio menor	[m]
L_2	Comprimento do raio maior	[m]
\vec{M}	Forças interfaciais	$[N.m^{-3}]$
\hat{P}	Perímetro da seção do duto	[m]
p	Pressão	[Pa]
Ra	Razão de aspecto	[-]

Re	Número de Reynolds	[-]
Re_{Dh}	Número de Reynolds baseado no diâmetro hidráulico	[-]
S_{Mi}	Termo fonte de momento	[N.m ⁻³]
\vec{U}	Vetor velocidade	[m.s ⁻¹]
$w_{méd}$	Velocidade média	[m.s ⁻¹]
$\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$	Componentes médias da velocidade	[m.s ⁻¹]
u', v', w'	Componentes flutuantes da velocidade	[m.s ⁻¹]

Letras Gregas

α, β	Fases envolvidas	[-]
ρ	Massa específica	[kg.m ⁻³]
∂	Derivada parcial	[-]
∇	Gradiente	[-]
τ	Tensão de cisalhamento	[N.m ⁻²]
μ	Viscosidade dinâmica	[Pa.s]

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Na indústria do petróleo, os principais meios de escoamento de produção são os oleodutos e gasodutos, que consistem em um meio econômico e seguro para o transporte de fluidos, interligando as regiões produtoras até os centros consumidores.

Na produção e transporte do petróleo, misturas imiscíveis de óleo, água e gás são conduzidas através de dutos assumindo complexos padrões de escoamento. Uma das grandes preocupações da indústria são as perdas de energia e os altos custos envolvidos (PEREIRA, 2011).

Devido às dificuldades encontradas no cenário atual na indústria de petróleo, como o transporte de óleos pesados e reservas localizadas em águas profundas, tornou-se imprescindível uma evolução tecnológica para assegurar a viabilidade econômica de todo o processo de transporte.

Os dutos utilizados para o transporte de petróleo, em sua grande maioria, são dutos cilíndricos com seção transversal circular. Porém, tubulações com seção transversal elíptica já são utilizadas na indústria alimentícia, química, petroquímica, em equipamentos como trocadores de calor, aquecedores e resfriadores de gases e ar, etc. Sua utilização se justifica devido às vantagens em relação às seções circulares, por exemplo, no caso de trocadores de

calor, onde a geometria elíptica possui uma resistência menor ao escoamento de ar devido a sua geometria aerodinâmica comparada com uma circular (ZHU et al, 2004).

Porém na literatura não existem muitos trabalhos sobre escoamento de petróleo em tubos de seção transversal elíptica. Dessa forma, o presente estudo consiste em uma contribuição para o melhor entendimento do escoamento de óleo e água em tubos de seção transversal elíptica, visando à estimação de parâmetros do fluido e predição da velocidade, pressão e fração volumétrica das fases. Assim, devido aos fatores explicitados, justifica-se um estudo detalhado via simulação numérica do comportamento do escoamento tridimensional de óleo e água quanto a sua fluidodinâmica.

Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo geral estudar o escoamento multifásico permanente, isotérmico e tridimensional de óleo e água em dutos com seção transversal elíptica, utilizando o *software Ansys CFX*.

Como objetivos específicos pode-se citar:

- a) Apresentar um modelo matemático tridimensional permanente para simular o escoamento de óleo e água em dutos de seção transversal elíptica;
- b) Simular a distribuição de pressão, fração volumétrica e velocidade das fases ao longo do duto;
- c) Analisar o efeito da velocidade, fração volumétrica das fases e forma do duto sobre a hidrodinâmica do escoamento de óleo e água;
- d) Comparar a perda de carga de um duto cilíndrico de seção transversal elíptica com um de seção transversal circular;
- e) Obter novas informações sobre escoamento de petróleo que possam ser úteis na otimização de processos produtivos, e de uma forma geral, informações que sirvam como subsídios para que estudos mais aprofundados possam ser realizados e implementados na indústria do petróleo.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Escoamento multifásico

A denominação de escoamento multifásico pode ser aplicada quando ocorre o escoamento simultâneo composto por duas ou mais fases com propriedades distintas e imiscíveis entre si, com a formação de interfaces entre as fases presentes no escoamento.

Segundo Paladino (2005), o conceito de fase não se refere a fase do ponto de vista do estado termodinâmico, mas de uma forma geral a existência de uma interface entre dois fluidos imiscíveis. Por exemplo, um sistema água-óleo, no contexto desta definição, forma um sistema bifásico.

Escoamentos multifásicos são comumente encontrados na produção e transporte de óleo e gás. Neste tipo de escoamento, as fases presentes podem escoar dispostas em diferentes configurações, denominadas de padrões de escoamento. A identificação dos padrões de escoamento é essencial para questões relacionadas ao retorno econômico do campo como, por exemplo, na medição das vazões volumétricas transportadas e determinação da queda de pressão ao longo dos dutos (PACHECO et al., 2007).

2.1.1 Características gerais

A natureza de um escoamento, isto é, se laminar ou turbulento, e sua posição relativa em uma escala de turbulência é indicada pelo número de Reynolds (Re). Para o escoamento em dutos, o número de Reynolds consiste em um número adimensional muito utilizado na mecânica dos fluidos e é definido como:

$$\text{Re} = \frac{w_m D}{\nu} = \frac{\rho w_m D}{\mu} \quad (2.1)$$

onde, w_m é a velocidade média do escoamento, D corresponde ao diâmetro característico da geometria e $\nu = \mu/\rho$ é a viscosidade cinemática do fluido.

Através das experiências realizadas por Reynolds (1883), este estabeleceu que:

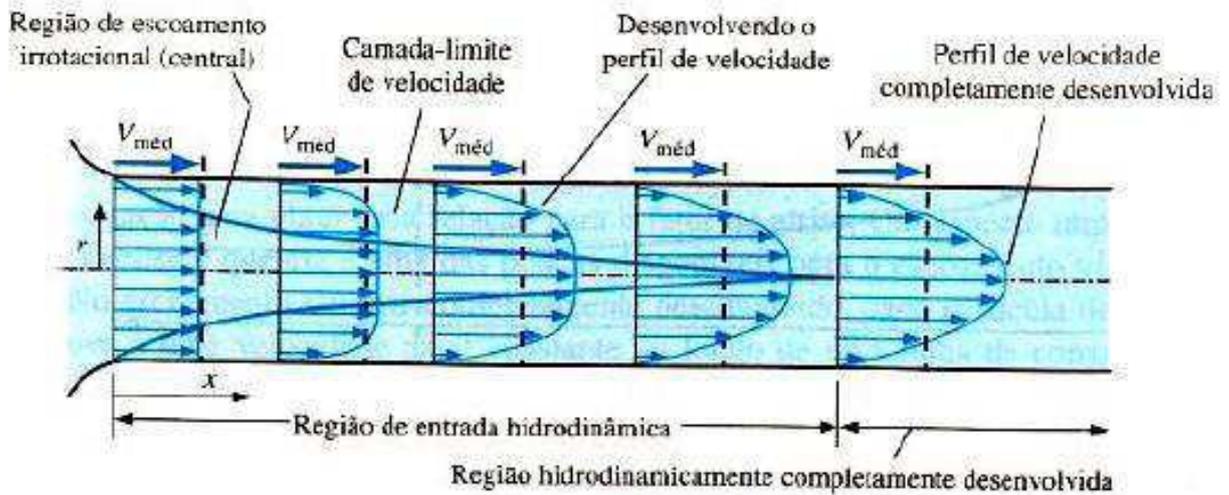
- $\text{Re} \leq 2000 \rightarrow$ tem-se o escoamento laminar;
- $2000 < \text{Re} < 2400 \rightarrow$ tem-se o escoamento de transição;
- $\text{Re} \geq 2400 \rightarrow$ tem-se o escoamento turbulento.

Segundo Whalley (1996), o regime de escoamento depende das:

- Vazões de líquido e de gás;
- Propriedades dos fluidos (massa específica, viscosidade, tensão superficial, entre outras);
- Condições de operação (pressão, temperatura, gravidade, etc.);
- Características geométricas do duto (forma, diâmetro, inclinação e rugosidade).

O campo de escoamento em dutos é melhor caracterizado de acordo com o desenvolvimento do perfil de velocidade. O escoamento sofre variações significativas de velocidade até atingir o comprimento de entrada hidrodinâmico, após esse ponto, o escoamento se encontrará na região completamente desenvolvida, onde o perfil de velocidade permanecerá sem mudanças. A região do escoamento onde os efeitos da viscosidade e variações de velocidade são significativos é denominada de camada limite (Figura 2.1). Este tipo de comportamento ocorre apenas para escoamento monofásico.

Figura 2.1 – Desenvolvimento do perfil de velocidade.



Fonte: Çengel e Cimbala (2007)

2.1.2 Escoamento bifásico

Durante a produção e o transporte de petróleo, o escoamento bifásico é frequentemente observado nas tubulações de escoamento, ocorrendo em trechos horizontais, inclinados ou verticais. Devido ao caráter complexo do escoamento multifásico diversas metodologias foram desenvolvidas com a finalidade de identificar os padrões de escoamento e estimar o gradiente de pressão. O conhecimento dessas propriedades é essencial para o dimensionamento dos dutos (PACHECO et al., 2007).

Quando duas ou mais fases escoam simultaneamente na mesma direção através de uma tubulação, o padrão de escoamento e a relação entre a vazão e a queda de pressão são complexos. A presença de uma segunda fase altera a perda de carga se comparada com aquela que resultaria caso apenas uma fase estivesse escoando com a mesma vazão mássica (COATES E PRESSBURG, 1959).

De acordo com a Mecânica dos Fluidos, a presença de uma segunda fase no escoamento irá reduzir a área transversal de escoamento disponível para o primeiro fluido. Assim, a velocidade e resistência do escoamento do primeiro fluido aumentarão como se estivesse passando por um tubo com diâmetro interno menor.

Na literatura existem vários trabalhos desenvolvidos utilizando os sistemas de escoamento bifásicos. Lockhart e Martinelli (1949) desenvolveram uma correlação que foi a primeira abordagem empírico-racional que permitiu calcular o gradiente de pressão no escoamento bifásico.

Beggs e Brill (1973) foram os primeiros a desenvolver um método com a finalidade de prever o regime de escoamento para um sistema bifásico em dutos circulares em todos os ângulos de inclinação. A correlação por eles desenvolvida é bastante utilizada na indústria de petróleo.

Silva (2006) estudou os padrões de fluxo vertical ascendente bifásico em dutos circulares em movimento. O autor concluiu que a oscilação aumenta a perda de carga nos dutos, porém, essa perda de carga terá sua maior ou menor intensidade dependendo do padrão de escoamento que estiver ocorrendo no interior do duto.

Souza (2009) comparou os gradientes de pressão no escoamento bifásico líquido-gás em tubos horizontais de seção transversal circular previstos pela correlação de Lockhart e Martinelli e pelo código ANSYS CFX 11.0. Verificou-se que com a mesma vazão mássica a perda de carga no escoamento bifásico é maior do que no escoamento monofásico.

Souza (2010) utilizou correlações clássicas de escoamento bifásico desenvolvidas por Beggs e Brill (1973) com enfoque na modelagem dinâmica simplificada e na modelagem estacionária de redes de escoamento. A principal contribuição desse trabalho foi a simulação dinâmica de redes de escoamento bifásico em dutos de seção transversal circular.

Szalinski et al. (2010) realizaram um estudo experimental comparativo entre o escoamento bifásico gás/óleo e gás/água em uma tubulação vertical de 6 metros de comprimento e 67 mm de diâmetro. Como resultado do estudo, diversos padrões de escoamento bifásico foram gerados.

Sarmento et al. (2014) estudaram o comportamento hidrodinâmico do escoamento bifásico óleo-água em um duto de 2 metros de comprimento com vazamento. Para o estudo, técnicas de CFD foram utilizadas com o objetivo de avaliar a influência do vazamento no comportamento do escoamento. Como resultado, os autores comprovaram a influência do mesmo no gradiente de pressão.

Pouraria et al. (2016) utilizaram um modelo de dinâmica dos fluidos computacional para prever os padrões de fluxo para diferentes condições. Os resultados obtidos foram comparados com dados experimentais e os autores concluíram que o modelo de CFD utilizado

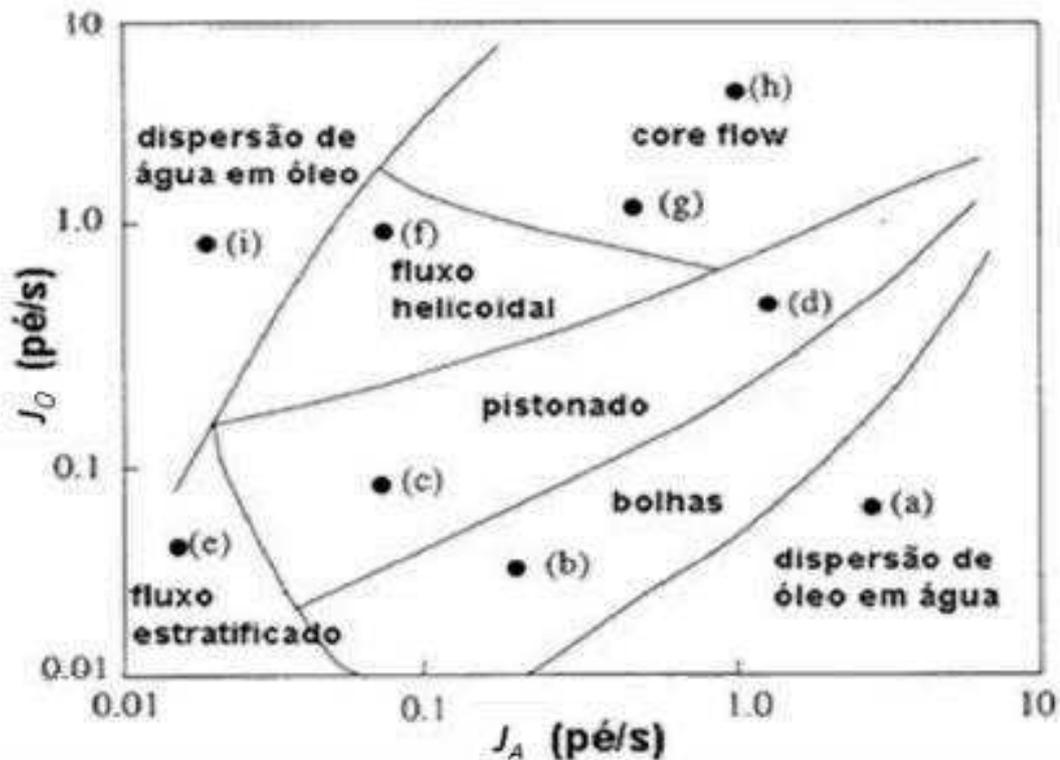
foi capaz de prever os padrões de fluxo com uma precisão razoável. Todo o estudo foi conduzido em dutos de seção transversal circular.

Para que um projeto de dutos seja confiável, é necessário um conhecimento prévio do regime de escoamento que será formado. Por isso, a realização de estudos para o desenvolvimento de modelos e mapas de escoamento tornam-se de grande importância para a indústria.

Joseph et al. (1997) obtiveram um mapa de diferentes padrões de escoamento água-óleo para uma variação das velocidades superficiais da água e do óleo. O mapa construído pelos autores encontra-se ilustrado na Fig. 2.2.

Segundo Corneliussen et al. (2005), em escoamentos multifásicos, as transições entre os padrões de escoamento dependem de fatores como: diâmetro do duto, tensão interfacial e densidade das fases. A velocidade das fases também tem papel importante na formação de diferentes padrões de escoamento.

Figura 2.2 – Mapa de padrões de escoamento água-óleo.



Fonte: Joseph et al. (1997)

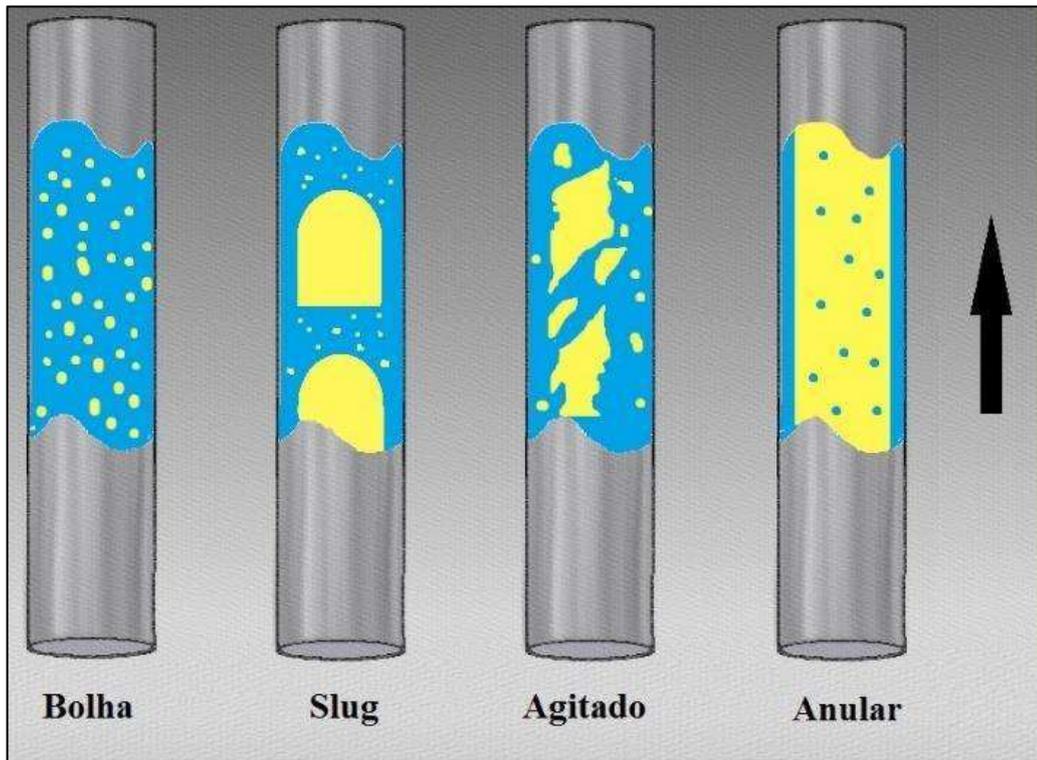
2.1.2.1 Padrões de escoamento bifásico líquido-gás em dutos verticais de seção transversal circular

Quando dois fluidos escoam juntos no interior de uma tubulação em um movimento vertical ascendente, a interface das duas fases pode assumir diferentes configurações de escoamento compatíveis com a vazão de cada fase, as propriedades dos fluidos e o diâmetro da tubulação.

São descritos a seguir, os padrões mais comumente encontrados em escoamentos de líquido e gás em dutos verticais de seção transversal circular. A Figura 2.3 ilustra os padrões citados.

- Escoamento de bolhas (*bubbly flow*): ocorre devido à baixa vazão de líquido. É caracterizado por deslizamento entre as fases. Nesta configuração, as bolhas (fase gasosa) podem apresentar vários tamanhos e formatos (esféricas ou alongadas) e se encontram distribuídas discretamente ao longo da fase contínua (líquida).
- Escoamento pistonado (golfada, *slug flow* ou *plug flow*): nesta configuração, quando a quantidade de gás no escoamento aumenta, as pequenas bolhas tendem a coalescer, formando bolhas maiores, apresentando uma forma esférica na parte superior da bolha. A maior parte do gás é localizada em grandes bolsões de gás em forma de bala denominada ‘bolha de Taylor’.
- Escoamento agitado (*churn flow*): é caracterizado por movimentos oscilatórios da fase líquida. Este regime é similar ao escoamento pistonado, porém, apresenta-se de uma forma caótica no centro do duto.
- Escoamento anular (*anular flow*): Esse padrão é caracterizado pelo escoamento de uma fina camada de líquido nas proximidades das paredes, e no centro do duto tem-se o gás escoando, sendo que ambas as fases têm escassa ou nenhuma presença de gotas ou bolhas dispersas.

Figura 2.3 – Padrões de escoamento bifásico líquido-gás em dutos verticais.



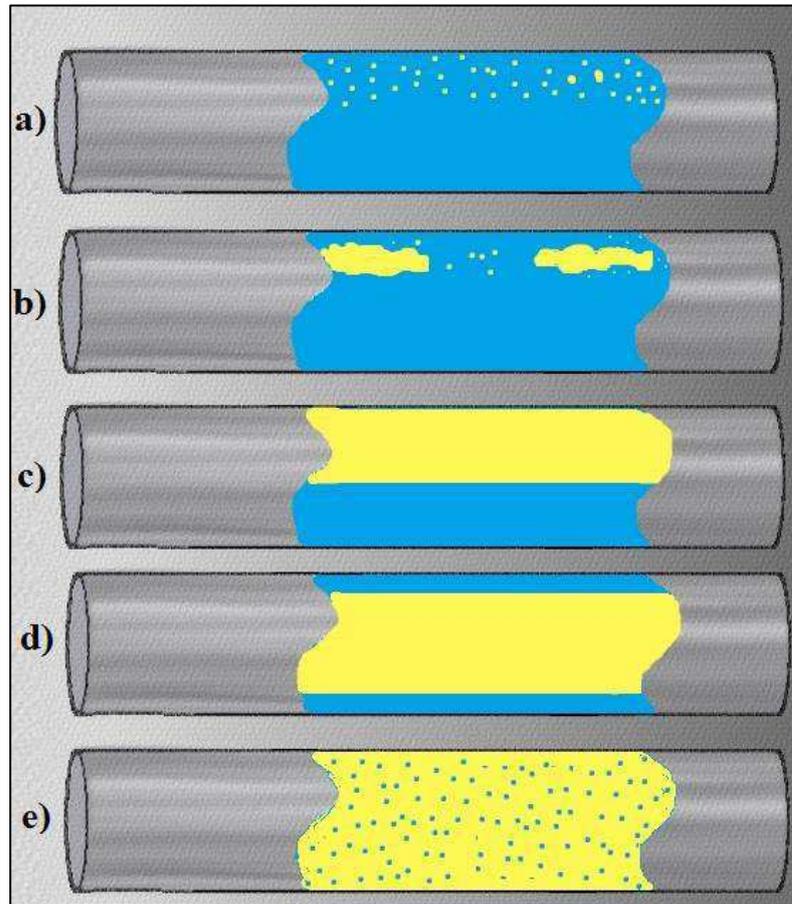
2.1.2.2 Padrões de escoamento bifásico líquido-gás em dutos horizontais de seção transversal circular

O padrão de escoamento horizontal diferencia-se do padrão de escoamento vertical devido à assimetria causada pela ação da gravidade. Desta forma, os padrões de escoamento em dutos horizontais podem ser classificados em:

- Escoamento de bolhas (*bubbly flow*): semelhante ao descrito para escoamentos em dutos verticais, porém, quando a fase dispersa é menos densa do que a contínua, as bolhas tendem a escoar na parte superior do duto. Quando as velocidades de escoamento aumentam, a fase dispersa tende a ocupar toda a seção do duto, tendo em vista que os efeitos de dispersão turbulenta começam a se tornar mais importantes que a gravidade (Figura 2.4a).
- Escoamento pistonado (*plug flow*): similar ao que ocorre em dutos verticais, entretanto, as bolhas tendem a escoar pela metade superior do duto. A condição assimétrica é mantida independentemente da velocidade do escoamento em consequência ao maior tamanho das bolhas (Figura 2.4b).

- Escoamento estratificado (*stratified flow*): as fases presentes fluem separadas por uma interface relativamente lisa, com o gás na parte superior e o líquido na parte inferior do tubo. Esse padrão ocorre a baixas velocidades dos dois fluidos e não é comum ocorrer. É subdividido em estratificado suave, cuja interface gás-líquido é suave; e estratificado ondulado, ocorrendo em vazões relativamente mais altas, formando ondas estáveis na interface (Figura 2.4c).
- Escoamento anular (*annular flow*): ocorre quando a vazão de gás em um escoamento estratificado é aumentada. Devido à alta velocidade, a fase gasosa flui para o núcleo e o líquido flui para um fino filme ao redor da parede do tubo, resultando em uma interface altamente ondulada (Figura 2.4d).
- Escoamento disperso em gotas (*drop flow*): caracterizado por baixas frações de líquido e velocidades de escoamento altas. A fase gasosa escoava de forma contínua e o líquido na forma de gotas dispersas. Este regime pode ser encontrado no escoamento de gás com presença de condensados em gasodutos (Figura 2.4e).

Figura 2.4 – Padrões de escoamento bifásico líquido-gás em dutos horizontais.



2.1.2.3 Padrões de escoamento em sistemas líquido-líquido (água-óleo) em dutos horizontais de seção transversal circular

Como o foco deste trabalho consiste na modelagem do escoamento bifásico de óleo e água em dutos, serão descritas nesse tópico, algumas configurações encontradas nesses sistemas.

Vários pesquisadores têm investigado os padrões de escoamento e a perda de pressão em fluxos em dutos horizontais. Dependendo de qual seja a fase contínua, são divididos em padrões baseados em óleo (*oilbased*) em que o óleo é a fase contínua ou padrões baseados em água (*waterbased*) tendo a água como fase contínua (PALADINO, 2005).

Russell e Charles (1959) introduziram água em um fluxo de óleo viscoso e observaram a ocorrência de fluxo anular no interior do duto, além de uma redução no gradiente de pressão.

Charles e Redberger (1962) também estudaram o gradiente de pressão de escoamentos de óleo e água, variando a viscosidade do óleo entre 4 a 1500 centipoises, e concluíram que ocorre uma redução considerável no gradiente de pressão em dutos de óleo com a adição de água.

Lovick e Angeli (2004) por sua vez, estudaram os padrões de escoamento durante o fluxo de óleo e água em dutos horizontais e observaram que, com a variação das frações volumétricas do óleo na entrada, o padrão de fluxo varia entre estratificado e disperso. Em todos os casos por eles estudados a adição de água no óleo resultou em um gradiente de pressão menor do que no fluxo contendo somente óleo.

Rodriguez e Oliemans (2005) estudaram o escoamento bifásico óleo-água em dutos horizontais e levemente inclinados com 15 metros de comprimento, e identificaram um padrão de fluxo estratificado ondulado sem mistura com a interface.

Para escoamentos água-óleo em dutos verticais, Zavareh et al. (1988) realizaram um estudo experimental e verificaram que neste tipo de escoamento, sem considerar os padrões estratificados, existe apenas padrões dispersos sendo a fase contínua água ou óleo.

De acordo com Trallero (1995), os padrões de escoamento água-óleo em dutos horizontais são classificados em duas categorias: estratificado ou disperso. A classificação é apresentada a seguir:

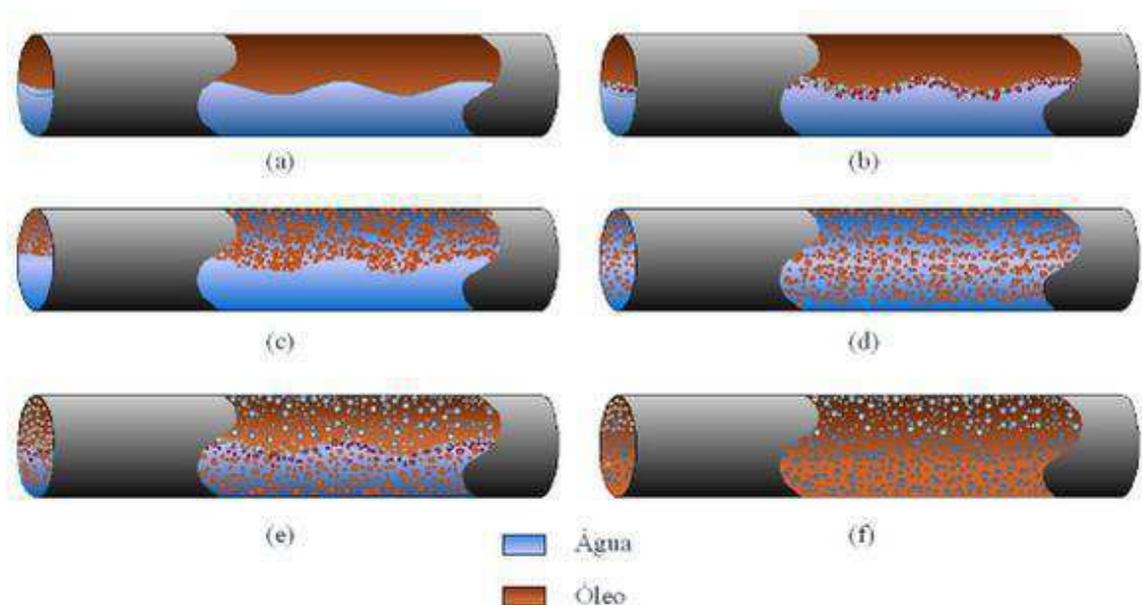
- Estratificado com óleo sobre água, exceto para óleo com massa específica maior que a da água (Figura 2.5a);

- Estratificado com mistura na interface (Figura 2.5b);
- Dispersão de óleo em água sobre água, onde a água escoou na parte inferior do duto, e há uma mistura de gotas de óleo dispersas na água (Figura 2.5c);
- Dispersão de óleo em água, com a água sendo a fase contínua e o óleo encontra-se disperso em gotas (Figura 2.5d);
- Dispersão de óleo em água e água em óleo, onde ambas as fases ocupam toda a seção transversal do duto, porém, na parte superior a fase contínua é o óleo e água apresenta-se dispersa. Já na parte inferior do duto, a fase contínua é a água e o óleo encontra-se disperso. (Figura 2.5e);
- Dispersão de água em óleo, onde o óleo é a fase contínua e a água está dispersa na forma de gotas (Figura 2.5f).

Além das configurações apresentadas por Trallero (1995), pode-se citar o padrão anular, também conhecido como *core anular flow* ou *coreflow*. A técnica do *coreflow* consiste em injetar pequenas quantidades de água a uma vazão inferior à do óleo fazendo com que o óleo pesado seja envolvido por uma camada de água e escoou no centro do tubo sem tocar a parede interna do tubo, estabelecendo, assim, um padrão anular (ANDRADE, 2008).

A técnica *coreflow* permite transportar petróleo de alta viscosidade de forma simples e econômica, reduzindo a perda de carga durante o escoamento por meio da formação de um filme de água nas proximidades da parede do duto, que funciona como um lubrificante.

Figura 2.5 – Padrões de escoamento água-óleo.

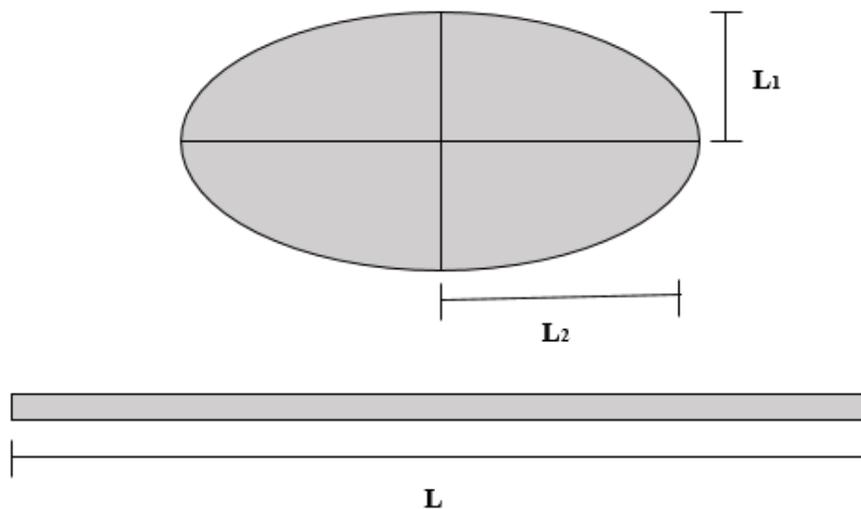


2.2 Escoamento em dutos circulares com seção transversal elíptica

Duto é a designação da ligação de tubos destinados ao transporte de petróleo, seus derivados ou gás natural. Eles são classificados em oleodutos, quando transportam líquidos, ou seja, petróleo e seus derivados e em gasodutos quando transportam gases.

A Figura 2.6 representa um duto cilíndrico com seção transversal elíptica com os seus parâmetros característicos.

Figura 2.6 – Duto cilíndrico com seção transversal elíptica.



A razão de aspecto é dada por:

$$R_a = \frac{L_2}{L_1} \quad (2.2)$$

onde, R_a , L_1 e L_2 correspondem à razão de aspecto, raio menor e raio maior da elipse.

Alguns estudos envolvendo dutos elípticos são apresentados a seguir:

Cadé (2003) desenvolveu um modelo matemático para descrever o escoamento tridimensional de gás natural em um duto com seção transversal elíptica sem transferência de calor. A partir dos resultados obtidos, foi comprovado que o duto de seção circular possui uma perda de carga maior se comparado com um duto de seção transversal elíptica para as condições estudadas.

Mattiusi et al. (2007) estudaram, via simulação numérica, o escoamento laminar de um fluido não-newtoniano através de um tubo de seção transversal elíptica. Foram analisados os efeitos dos parâmetros geométricos e cinemáticos, comparando os perfis de velocidade ao longo do eixo maior e menor da elipse com os do tubo de seção circular, bem como a determinação da perda de carga em função do comprimento do tubo, da área transversal e da vazão volumétrica. Os resultados obtidos apresentaram uma excelente concordância com a solução analítica para o perfil de velocidade e para o fator de atrito de Fanning.

No estudo realizado por Flor (2008) avaliou-se a distribuição de velocidade e pressão no escoamento turbulento de gás natural em dutos elípticos. O autor concluiu que o fluxo de massa no duto elíptico é menor em relação ao duto circular, devido às maiores perdas de carga apresentadas, porém, os dutos de seção elíptica podem apresentar resultados que evidenciem vantagens significativas com relação aos tubos de seção circular, no que diz respeito à transferência de calor, o que justificaria a sua utilização para outros fins.

Sajadi et al. (2014) realizaram um estudo numérico e experimental sobre a transferência de calor e a resistência ao fluxo de tubos elípticos. Os resultados mostraram que os dutos elípticos apresentaram um melhor desempenho em relação a transferência de calor se comparados com o duto circular. Foi constatado também que a queda de pressão no duto elíptico foi maior do que em no duto circular.

Mota (2015) estudou o escoamento turbulento de gás natural em dutos com seção transversal elíptica com vazamento por meio de simulação numérica. Para isto, foram utilizados nove dutos com diâmetros distintos. Os resultados do comportamento do perfil de pressão e velocidade para todos os casos foram apresentados e analisados.

2.3 Fluidodinâmica computacional

A fluidodinâmica computacional é a área que estuda métodos computacionais para simulação de fenômenos que envolvem fluidos em movimento com ou sem troca de calor. O princípio básico de funcionamento consiste na resolução numérica das equações que regem o escoamento dos fluidos sobre uma região de interesse, desde que sejam conhecidas as condições de fronteiras do sistema (FORTUNA, 2012; MIGUEZ, 2008).

2.3.1 O software ANSYS CFX

O *software* CFX é um programa de Fluidodinâmica Computacional (CFD) que tem por finalidade a resolução numérica de problemas envolvendo Mecânica dos Fluidos e Transferência de Calor.

O pacote CFX possui três módulos principais: pré-processamento, processamento (Solver) e pós- processamento.

2.3.1.1 Pré-processamento

Nessa etapa são definidas as condições físicas do problema, como: seleção do fenômeno físico e/ou químico a ser modelado (definição do modelo de turbulência, transferência de calor, combustão, etc.); definição das características do fluido (condições iniciais de escoamento e propriedades do fluido) e especificação das condições de contorno do domínio de solução (SANTOS, 2008).

2.3.1.2 Processamento (Solver)

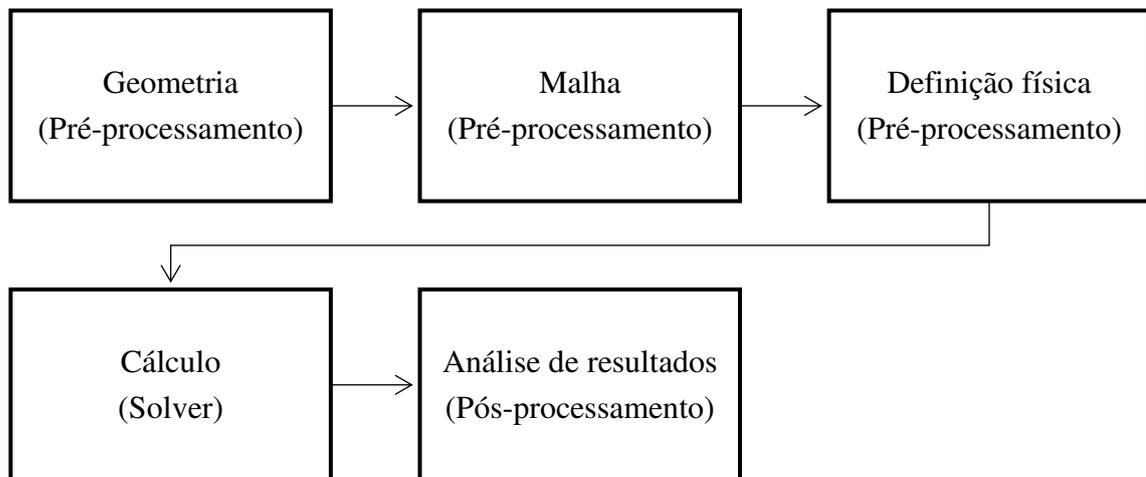
O arquivo inicial gerado no pré-processamento é carregado no Solver, que é responsável pela solução iterativa do sistema de equações algébricas resultantes. A solução é obtida a partir de três algoritmos: integração das equações de transporte sobre todos os volumes de controle do domínio da solução; discretização das equações de transporte (transformação de uma equação diferencial parcial em uma equação algébrica) e por fim, a solução das equações algébricas por métodos iterativos (SANTOS, 2008; SILVA, 2011).

2.3.1.3 Pós- processamento

Nesta etapa, pode-se visualizar e interpretar os resultados obtidos da simulação, como: cálculo dos valores médios das variáveis de interesse (velocidade, pressão, temperatura, tensão de cisalhamento, etc.); representação dos perfis destas variáveis por meio de gráficos e superfícies de contorno; visualização de campos vetoriais, linhas de corrente e animações (PORCIÚNCULA, 2007).

A Figura 2.7 a seguir apresenta um resumo do procedimento para a solução numérica de um problema utilizando o *software* CFX:

Figura 2.7 – Algoritmo da solução numérica de um problema utilizando o *software* CFX.



Fonte – Adaptado de Santos (2010)

2.3.2 Geração de malhas

A primeira etapa de uma solução de um problema utilizando a fluidodinâmica computacional é a geração de uma malha que defina, em todo o domínio computacional, as células nas quais as variáveis de escoamento são calculadas. A precisão da solução em um problema de CFD depende do refinamento da malha. Este refinamento deve ser definido de forma a assegurar que resultados numéricos não sofram influência da malha, bem como garantir um custo computacional adequado. Por isso a geração da malha tem se tornado a etapa mais importante e que demanda mais tempo na análise de CFD (SANTOS, 2010).

As malhas podem ser classificadas em estruturadas, não estruturadas ou híbridas (Figura 2.8).

a) Malha estruturada

Na malha estruturada cada elemento sempre possui o mesmo número de elementos vizinhos. Estes elementos podem ser bidimensionais e tridimensionais, que são quadriláteros e hexaédricos, respectivamente.

A construção da malha estruturada pode ser feita utilizando a técnica de blocagem. Nesta técnica existem dois ou mais níveis de subdivisão do domínio de solução. No nível mais grosseiro existem blocos lógicos com regiões relativamente largas do domínio. Em níveis mais finos (dentro de cada bloco) é criada uma malha estruturada. Neste tipo de malhas é necessário um tratamento especial nas interfaces dos blocos (GONÇALVES, 2007).

A desvantagem da utilização de uma malha estruturada é a falta de flexibilidade da adaptação da malha a geometrias complexas. A Figura 2.9 representa a técnica de blocagem.

b) Malha não-estruturada

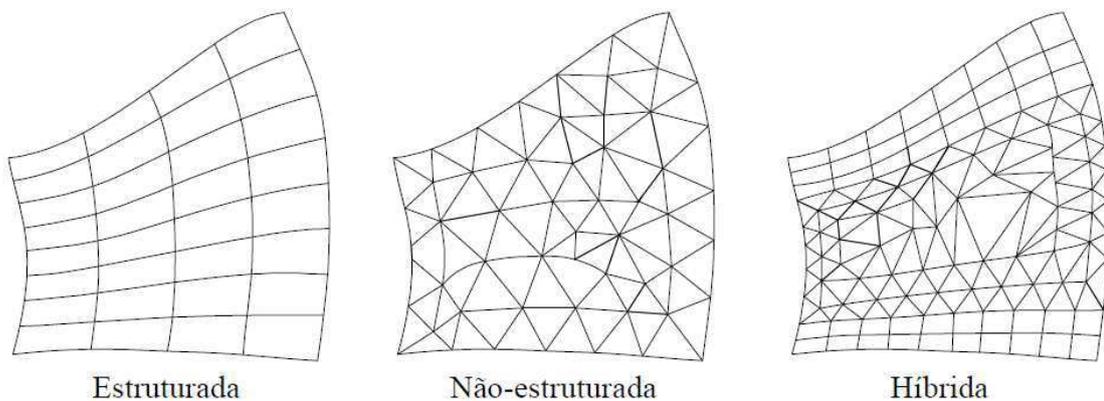
Na malha não-estruturada não há restrição na quantidade de elementos vizinhos. Os elementos podem assumir diversas formas, como hexaedros, tetraedros, primas e pirâmides.

A grande vantagem é a flexibilidade em se ajustar a geometrias complexas. Porém a utilização de uma malha não-estruturada demanda uma maior capacidade de armazenamento.

c) Malha híbrida

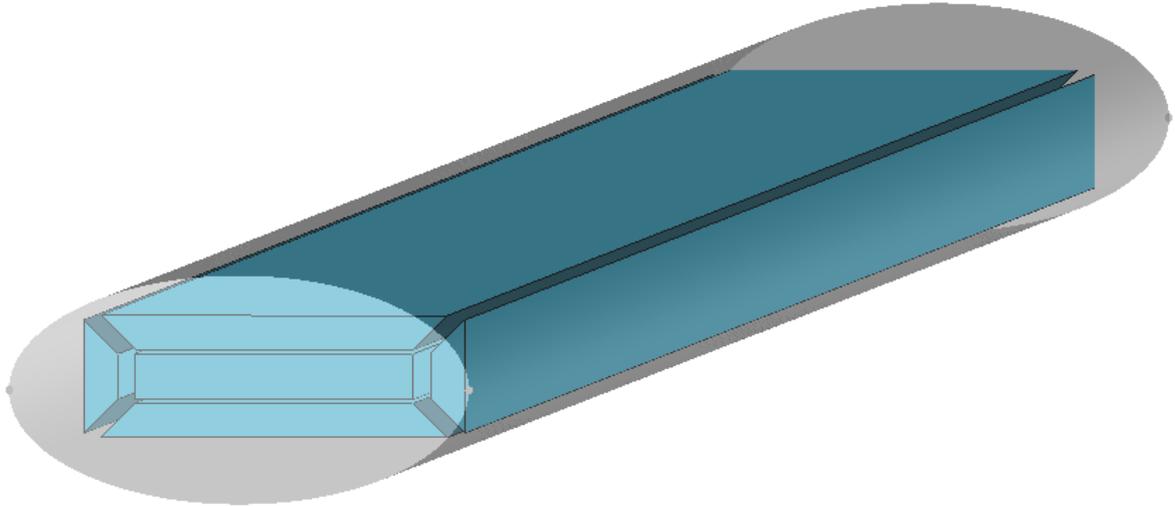
A malha híbrida consiste na utilização simultânea das malhas estruturadas e não-estruturadas. A vantagem do uso desta malha é a possibilidade de utilizar a malha não estruturada em regiões de mais detalhamento e a utilização da malha estruturada onde o perfil a ser analisado for de menor interesse.

Figura 2.8 – Tipos de malha



Fonte – Santos (2010)

Figura 2.9 – Técnica de blocagem



2.4 Modelagem matemática para escoamento multifásico

Para escoamentos multifásicos, o modelo matemático é composto pelas equações de conservação da massa, energia e quantidade de movimento, condições iniciais e de contorno, por uma equação constitutiva mecânica que estabeleça a relação entre o campo de tensões e o campo de velocidades no escoamento. (ANDRADE, 2011).

Na literatura, encontram-se diversas abordagens para a modelagem do escoamento multifásico. Uma das mais utilizadas classifica o modelo em duas abordagens: Euleriana-Euleriana e Euleriana-Lagrangeana.

2.4.1 Abordagem Euleriana-Euleriana

De acordo com Santos (2014), a abordagem Euleriana-Euleriana é o método adequado para escoamentos onde as fases estão misturadas e as velocidades relativas entre as fases são consideradas, pois tanto a fase contínua quanto a fase dispersa são consideradas como meios contínuos. Neste caso, as equações de quantidade de movimento são resolvidas para cada uma das fases presentes (contínua e dispersa).

A abordagem Euleriana-Euleriana pode ser subdividida em dois modelos:

- a) Modelo homogêneo

Este modelo considera um único campo de velocidade para todas as fases. É indicado apenas para dispersões muito finas de partículas, onde a fase dispersa é arrastada com a mesma velocidade que a fase contínua (PALADINO, 2005)

b) Modelo não homogêneo

Assume que cada fase possui seu próprio campo de velocidade e seu próprio campo de solução. As fases interagem por meio de transferência interfacial, que é dependente da área superficial de contato entre as duas fases presentes no escoamento. Pode ser modelado utilizando o modelo de partícula ou o modelo de mistura. O modelo de partícula assume que uma das fases é contínua (fase α) e a outra fase é dispersa (fase β). A área superficial é calculada assumindo que a fase dispersa está presente na forma de partículas esféricas de diâmetro principal d_{β} . Já o modelo de mistura é mais simples pois considera que ambas as fases α e β possuem forma simétrica (ANSYS CFX, 2013).

2.4.2 Abordagem Euleriana-Lagrangeana

Na abordagem Euleriana-Lagrangeana é assumido que o transporte da fase dispersa é realizado pela fase contínua. As equações de quantidade de movimento são calculadas para a fase contínua, e com os campos de velocidade obtidos para essa fase, são calculadas as forças sobre as partículas dispersas. A desvantagem deste modelo é o fato dele ser restrito a escoamentos dispersos e com baixas frações volumétricas das fases dispersas, pois serão necessárias tantas equações quanto o número de partículas presentes no domínio. (BARBOSA, 2011; PALADINO, 2005).

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

3.1 Modelagem matemática

Para a modelagem matemática e solução numérica as considerações adotadas foram:

- Domínio tridimensional;
- Regime permanente;
- Escoamento isotérmico;
- Fluidos incompressíveis com propriedades físico-químicas constantes;
- Escoamento laminar;
- Modelo matemático com abordagem Euleriana-Euleriana;
- Modelo contínuo-disperso.

Com base nessas considerações, as equações governantes do modelo utilizado são:

- Equação da conservação da massa

$$\nabla \cdot (f_i \rho_i \vec{U}_i) = 0 \quad (3.1)$$

onde i corresponde a cada fase presente no escoamento, f é a fração volumétrica, ρ é a densidade e $\vec{U} = (u, v, w)$ corresponde ao vetor velocidade.

- Equação da quantidade de movimento

$$\nabla \cdot [f_i (\rho_i \vec{U}_i \otimes \vec{U}_i)] - f_i \nabla p_i + \nabla \cdot \left\{ f_i \mu_i \left[\nabla \vec{U}_i + (\nabla \vec{U}_i)^T \right] \right\} = \vec{S}_{Mi} + \vec{M}_i \quad (3.2)$$

onde μ_i representa a viscosidade efetiva da fase i , \vec{S}_{Mi} descreve as forças de momento devido às forças externas e \vec{M}_i corresponde às forças interfaciais (força de arraste).

A força interfacial entre as fases i (contínua) e β (dispersa) é dada por:

$$\vec{M}_i = \frac{1}{8} C_D \rho_\alpha A_{i\beta} |\vec{U}_\beta - \vec{U}_i| (\vec{U}_\beta - \vec{U}_i) \quad (3.3)$$

onde C_D e $A_{i\beta}$ correspondem ao coeficiente de arraste e a densidade da área interfacial.

O coeficiente de arraste foi modelado de acordo com o modelo de *Schiller-Naumann*:

$$C_D = \frac{24}{Re} (1 + 0,15 Re^{0,687}) \quad (3.4)$$

3.2 Equações constituintes

Para validação dos resultados optou-se por utilizar a metodologia proposta por Kakaç et al. (1987), onde definiram que na região completamente desenvolvida, o perfil de velocidade para um escoamento monofásico em regime laminar em um duto de seção transversal elíptica é dado por:

$$w(x, y) = \frac{1}{2\mu} \left(-\frac{dp}{dz} \right) \frac{L_1^2 L_2^2}{L_1^2 + L_2^2} \left(1 - \frac{y^2}{L_1^2} - \frac{x^2}{L_2^2} \right) \quad (3.5)$$

ou ainda,

$$\frac{w}{w_m} = 2 \left(1 - \frac{x^2}{L_2^2} - \frac{y^2}{L_1^2} \right) \quad (3.6)$$

com

$$w_m = -\frac{1}{4\mu} \frac{dp}{dz} \left(\frac{L_1^2}{1 + \left(\frac{L_1}{L_2} \right)^2} \right) \quad (3.7)$$

onde w_m é a velocidade média do escoamento.

A área da seção transversal de um duto com seção transversal elíptica, o perímetro e o diâmetro hidráulico são dados por (KAKAÇ et al., 1987; ROHSENOW et al., 1998):

$$A = \pi L_1 L_2 \quad (3.8)$$

$$\hat{P} = 4L_2 E \left[1 - \left(\frac{L_1}{L_2} \right)^2 \right] \quad (3.9)$$

$$D_h = \frac{\pi L_1}{E \left[1 - \left(\frac{L_1}{L_2} \right)^2 \right]} \quad (3.10)$$

onde L_1, L_2 e E representam o raio menor, raio maior e a integral elíptica completa de 2ª ordem, respectivamente (WOLFRAM, 2003).

Segundo Kakaç et al. (1987), o comprimento de entrada hidrodinâmico (L_{ceh}) e o coeficiente de fricção para a região com o regime laminar completamente desenvolvido são dados por:

$$L_{ceh} = \frac{0.5132}{\left[1 + \left(\frac{L_1}{L_2}\right)^2\right]} \left\{ \frac{E \left[1 - \left(\frac{L_1}{L_2}\right)^2\right]}{\pi} \right\}^2 D_h \text{Re}_{Dh} \quad (3.11)$$

$$\hat{f}_{rcd} \text{Re}_{Dh} = 2 \left[1 + \left(\frac{L_1}{L_2}\right)^2\right] \left\{ \frac{\pi}{E \left[1 - \left(\frac{L_1}{L_2}\right)^2\right]} \right\}^2 \quad (3.12)$$

onde Re_{Dh} é o número de Reynolds baseado no diâmetro hidráulico.

Na região de entrada hidrodinâmica, o fator de fricção aparente é dado a partir da queda de pressão total axial desde a entrada do duto até o ponto de interesse (KAKAÇ et al., 1987), como segue:

$$\Delta p_{reh}^* = \frac{p_{z=0} - p}{\rho w_m^2 / 2} = \hat{f}_{reh} \frac{4z}{D_h} \quad (3.13)$$

O fator de fricção aparente pode ser expresso como (ROHSENOW et al., 1998):

$$\hat{f}_{reh} \text{Re}_{Dh} = \frac{\Delta p_{reh}^*}{\left(\frac{2z}{D_h \text{Re}_{Dh}}\right)} \quad (3.14)$$

sendo

$$\Delta p_{reh}^* = \frac{2(1-\eta)(1+3\eta) - (1+\eta)^2 \ln \eta^3}{3(1+\eta)^2} \quad (3.15)$$

onde o termo η é obtido a partir da seguinte equação:

$$16 \left[1 + \left(\frac{L_1}{L_2} \right)^2 \right] \left\{ \frac{\pi}{E \left[1 - \left(\frac{L_1}{L_2} \right)^2 \right]} \right\}^2 \frac{z}{D_h \text{Re}_{Dh}} = \eta^2 - 1 - \ln \eta^2 \quad (3.16)$$

A pressão total é dada por:

$$\Delta p_{total} = \Delta p_{reh} + \Delta p_{rcd} \quad (3.17)$$

3.3 O problema físico e a geometria

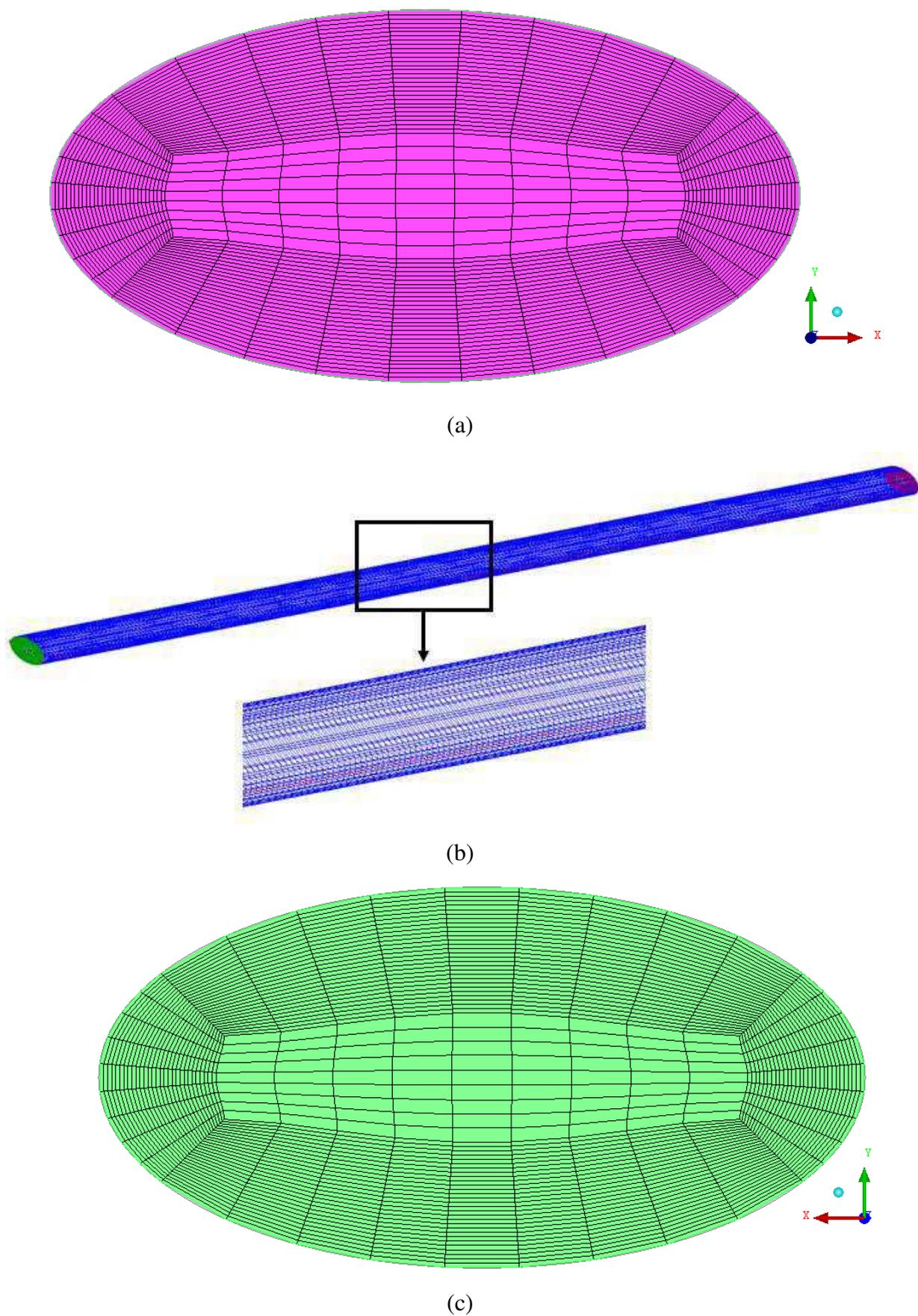
O problema físico em estudo consiste em um escoamento bifásico água-óleo em um duto com seção transversal elíptica com 10 metros de comprimento. A Tabela 3.1 apresenta os dados geométricos do duto em estudo.

Inicialmente, a geometria foi construída no Autodesk Inventor Professional 2015 e posteriormente, exportada para o ICEM CFD 15.0, onde utilizou-se para a geração da malha, o método estruturado, que é baseado na estratégia de blocagem. A Figura 3.1 representa a malha utilizada na simulação, constituída de 581.661 elementos.

Tabela 3.1– Dados geométricos do duto em estudo

Parâmetros	Valor
Comprimento do eixo maior (L_2) (m)	0,2
Comprimento do eixo menor (L_1) (m)	0,1
Comprimento do duto (L) (m)	10,0
Razão de aspecto (L_2/L_1)	2,0
Diâmetro hidráulico (D_h) (m)	0,2594

Figura 3.1 – Representação da malha utilizada na simulação. a) entrada; b) lateral e c) saída



3.4 Condições iniciais, de contorno e propriedades dos fluidos adotadas

Foi considerado que o escoamento bifásico ocorre tendo o óleo como fase contínua e a água como fase dispersa. As condições de contorno foram:

- a) Na seção de entrada considerou-se que o óleo e a água são introduzidos com um valor prescrito e não nulo para a componente velocidade e para as frações volumétricas.
- b) Na parede do duto foi considerada a condição de não deslizamento, ou seja, $u = v = w = 0$ m/s.
- c) Na seção de saída foi prescrito uma pressão estática igual a 0,98 atm.

As propriedades dos fluidos utilizadas na simulação estão descritas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Propriedades dos fluidos usadas na simulação

Propriedades físicas	Água	Óleo
Densidade (kg/m ³)	997,0	905,0
Viscosidade dinâmica (Pa.s)	$8,89 \times 10^{-4}$	4,0
Tensão superficial (mN/m)	0,072	
Diâmetro da partícula (m)	5×10^{-5}	-

A Tabela 3.3 apresenta um resumo sobre as condições do modelo matemático e a solução numérica adotada.

Tabela 3.3 – Condições gerais do modelo matemático e solução numérica

Tipo de escoamento	Bifásico
Regime de fluxo	Permanente e laminar
Modelo	Não homogêneo
Modelo de transferência interfacial	Modelo de partícula
Esquema de interpolação para a pressão	Trilinear
Esquema de interpolação para a velocidade	Trilinear
Esquema de advecção	High Resolution
Critério de convergência	Resíduo médio quadrático igual a 10^{-8}

3.5 Casos avaliados

O estudo do comportamento do escoamento de óleo e água em dutos com seção transversal elíptica foi desenvolvido no Laboratório Computacional em Térmica e Fluidos (LCTF) da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica, do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande.

A Tabela 3.4 apresenta os diferentes casos avaliados nesta pesquisa.

Tabela 3.4 – Características gerais dos casos estudados

Caso	Fração volumétrica		Velocidade (m/s)		Efeito da gravidade	Duto
	óleo	água	óleo	água		
1	0,99	0,01	3,0	3,0	não	horizontal
2	0,95	0,05	3,0	3,0	não	horizontal
3	0,92	0,08	3,0	3,0	não	horizontal
4	0,90	0,10	3,0	3,0	não	horizontal
5	0,95	0,05	0,5	3,0	sim	horizontal
6	0,95	0,05	3,0	3,0	sim	horizontal
7	0,95	0,05	5,0	3,0	sim	horizontal
8	0,95	0,05	3,0	0,5	sim	horizontal
9	0,95	0,05	3,0	3,0	sim	vertical
10	0,95	0,05	3,0	5,0	sim	horizontal

Além dos casos apresentados acima, foram estudados também quatro dutos com razões de aspecto distintas. A Tabela 3.5 apresenta os casos estudados.

Tabela 3.5 – Parâmetros gerais dos casos estudados

Duto	L ₁ (m)	L ₂ (m)	L (m)	w _o = w _a (m/s)
A	0,10	0,10	10,0	3,0
B	0,10	0,15	10,0	3,0
C	0,10	0,30	10,0	3,0
D	0,10	0,50	10,0	3,0

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Validação por comparação numérico/analítico

Para a validação da metodologia utilizada neste trabalho, foram comparados os resultados analíticos com os resultados numéricos obtidos a partir do perfil de velocidade da fase óleo na seção transversal do duto cilíndrico de seção transversal elíptica com $L_2/L_1 = 2,0$, em $z = 5,92$ m, onde o escoamento encontra-se completamente desenvolvido (caso 1). A Figura 4.1 apresenta esta comparação. Foi verificado um excelente ajuste entre os resultados obtidos. O erro máximo foi de 0,39% em $y=0$. A comparação foi possível pois a fração volumétrica de água é próxima de zero, o que leva a um escoamento monofásico de óleo, aproximadamente.

A Tabela 4.1 ilustra a comparação entre os resultados obtidos para a queda de pressão analítica e numérica, modificando apenas o valor para o comprimento de entrada hidrodinâmico (teórico, dado pela equação 3.11, ou numérico, obtido do campo de velocidade da fase óleo a partir dos resultados da simulação com o *software* Ansys CFX) para o caso 1. O erro obtido foi de 2,5 % para ambos os casos.

Figura 4.1 – Comparação entre os resultados analíticos e numéricos em $z = 5,92$ m (caso 1).

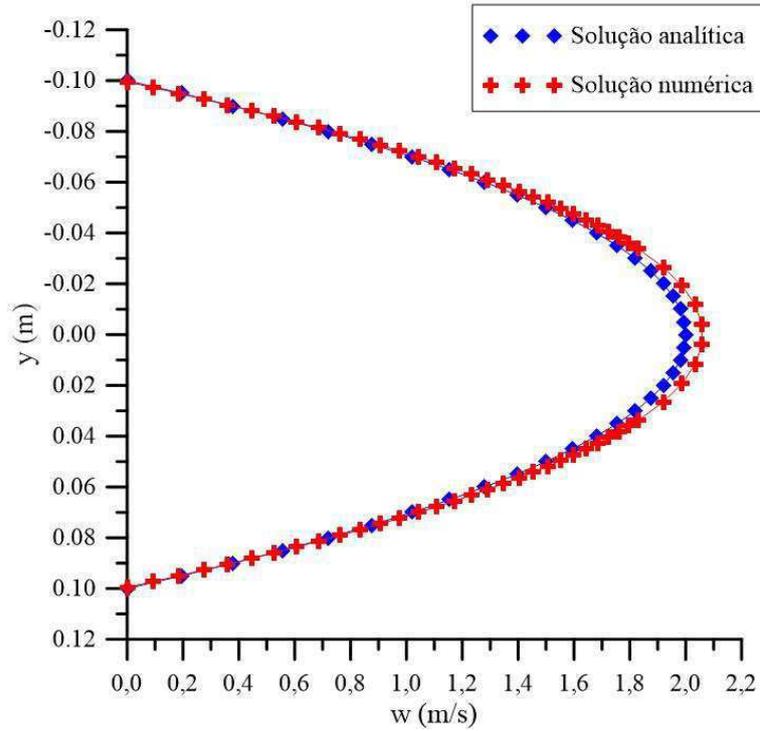


Tabela 4.1 – Comparação da variação da pressão total no duto, analítica e numérica, para o caso 1.

Parâmetro	Valor	Método de determinação
L_{ceh} (m)	2,7866	Analítico (Equação 3.11)
Δp_{reh} (kPa)	21,470	
Δp_{rcd} (kPa)	43,279	
Δp_{total} (kPa)	64,749	
Δp_{total} num. (kPa)	66,373	Numérico (Ansys CFX)
Erro (%)	2,5	
L_{ceh} (m)	5,9183	Numérico (Ansys CFX)
Δp_{reh} (kPa)	40,271	Analítico (Equação 3.11)
Δp_{rcd} (kPa)	24,480	
Δp_{total} (kPa)	64,751	
Δp_{total} num. (kPa)	66,373	Numérico (Ansys CFX)
Erro (%)	2,5	

4.2 Análise hidrodinâmica

4.2.1 Distribuição de velocidade

O comportamento do perfil de velocidade no plano longitudinal ($y = 0$) para o caso 1 encontra-se ilustrado na Figura 4.2. Observa-se que no centro do duto a velocidade é máxima, já nas paredes do duto a velocidade é nula, devido a condição de não escorregamento. Como este efeito é transmitido a todas as camadas de fluidos adjacentes, ocorre a formação da camada limite.

Nas Figuras 4.3 a 4.6 estão representados os campos de velocidade da fase óleo sobre o plano XY, para o caso 1, em diferentes posições axiais z. Assim como na Figura 4.2, pode-se observar que no centro do duto a velocidade é máxima, já nas paredes a velocidade é nula devido a condição de não escorregamento. É possível observar também o surgimento da camada limite até a sua estabilização atingindo a região completamente desenvolvida em $z = 5,92$ m, onde o perfil de velocidade praticamente não muda, comprovando que o escoamento se encontra completamente desenvolvido.

Figura 4.2 – Perfil de velocidade do óleo sobre o plano longitudinal ZX para o caso 1.

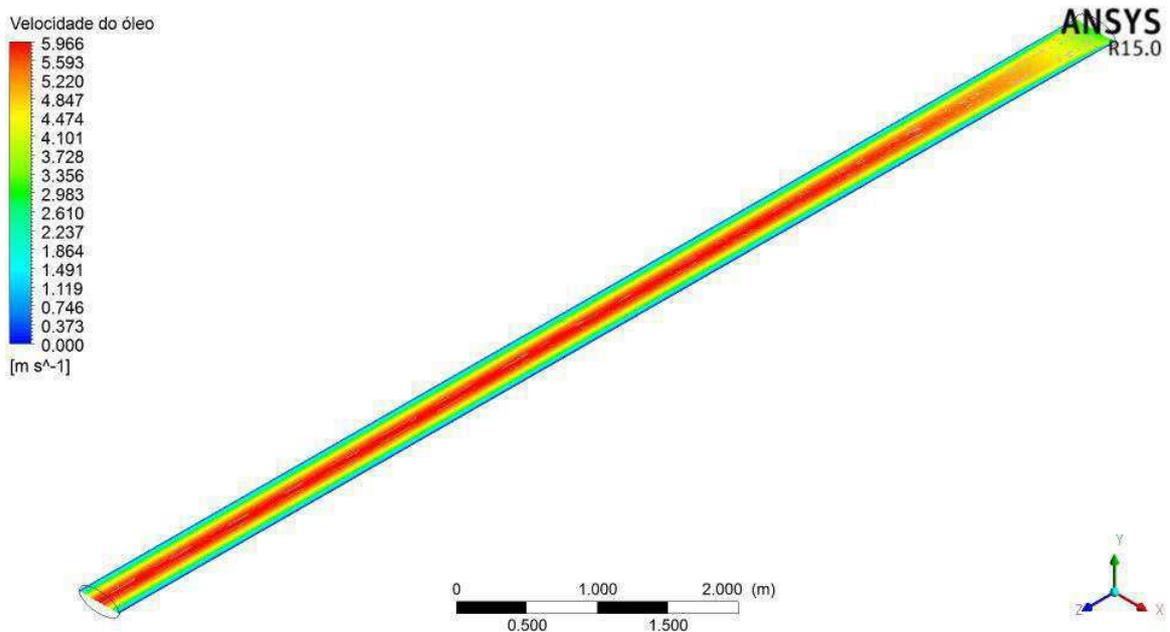


Figura 4.3 – Perfil de velocidade do óleo sobre o plano transversal XY em $z = 0,5$ m para o caso 1.

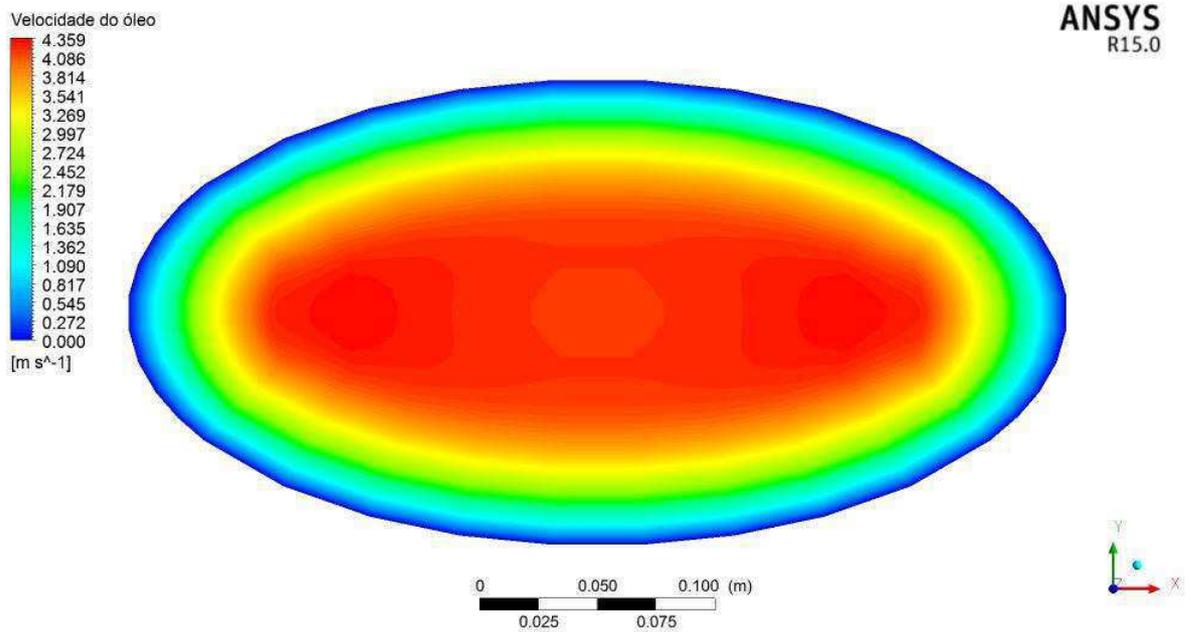


Figura 4.4 – Perfil de velocidade do óleo sobre o plano transversal XY em $z = 1,5$ m para o caso 1.

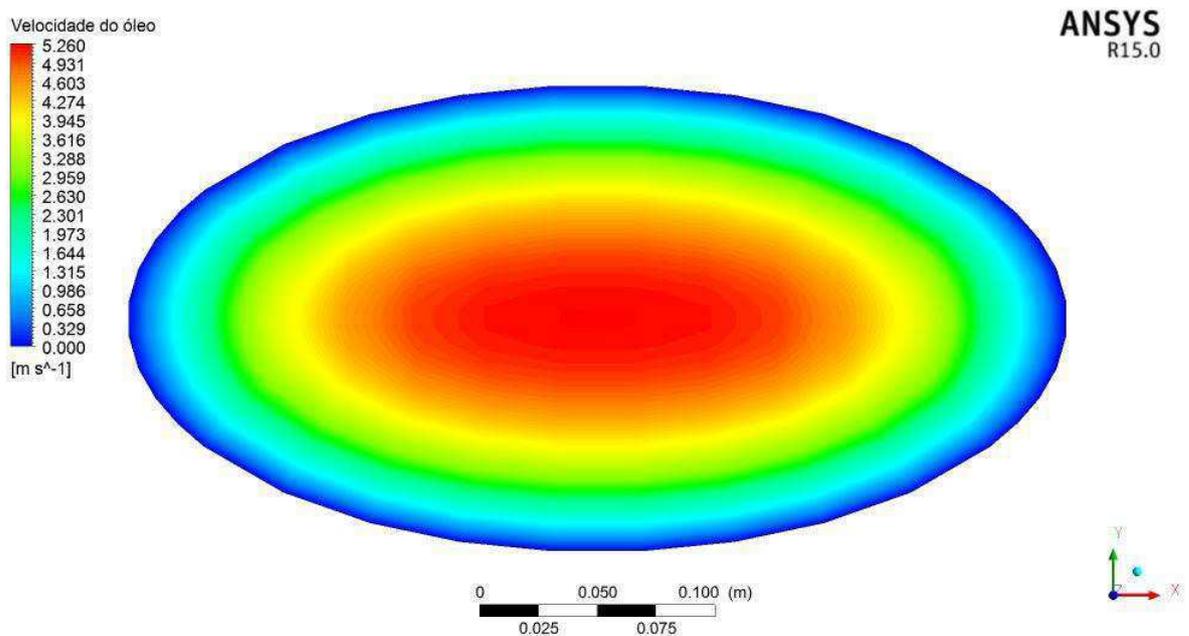


Figura 4.5 – Perfil de velocidade do óleo sobre o plano transversal XY em $z = 2,78$ m para o caso 1.

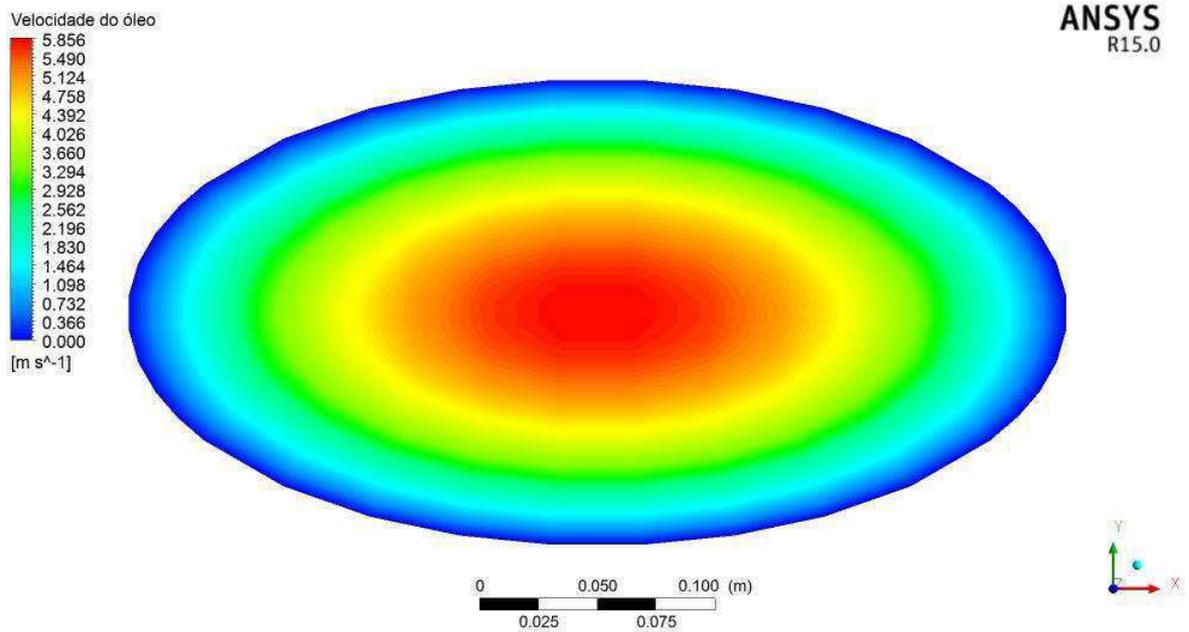
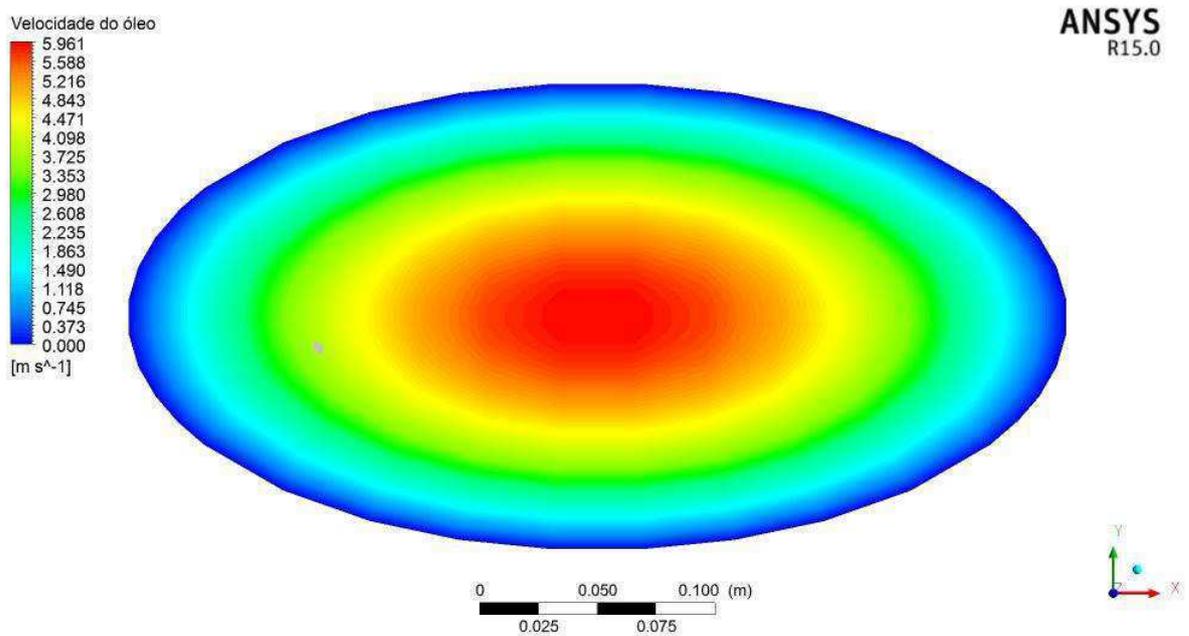
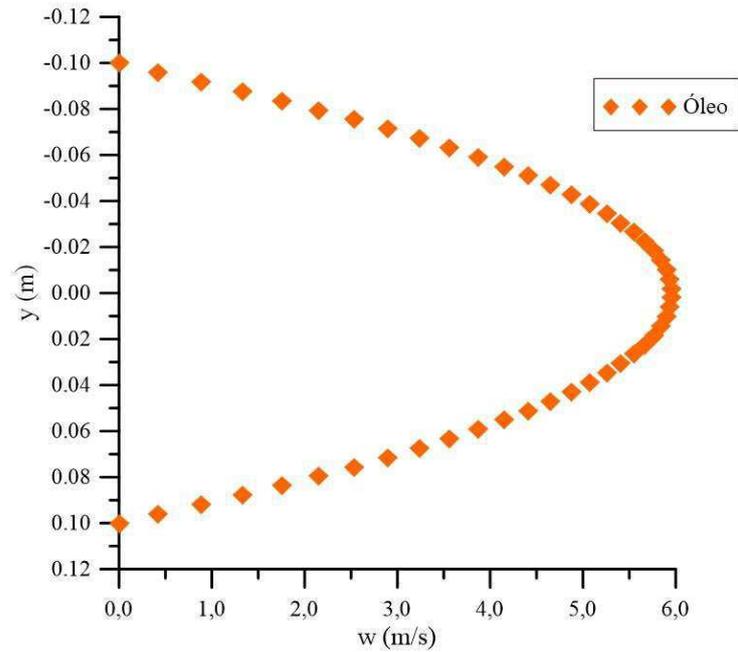


Figura 4.6 – Perfil de velocidade do óleo sobre o plano transversal XY 1 em $z = 5,92$ m para o caso 1.

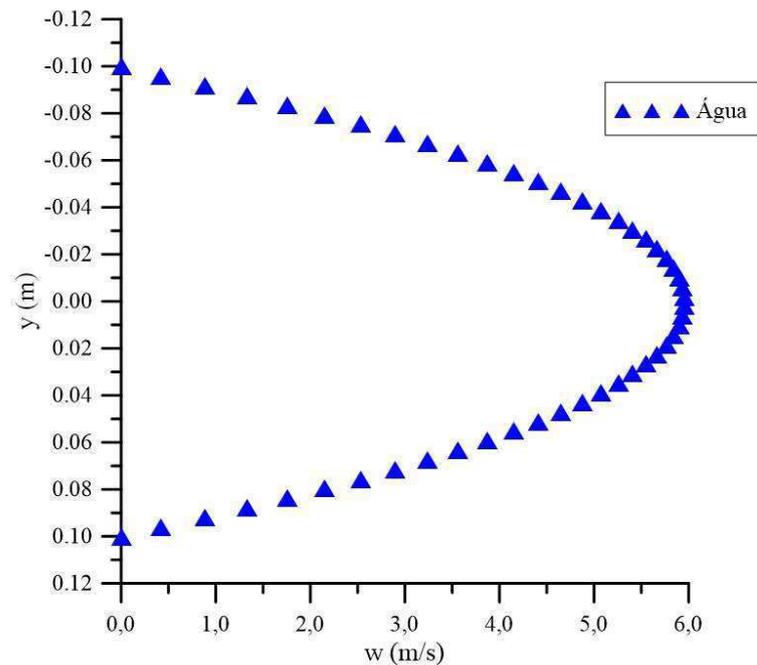


Nas Figuras 4.7 e 4.8 estão representadas as distribuições de velocidade para as fases óleo e água sobre o eixo menor (L_1) na região completamente desenvolvida para os casos 4 e 6, respectivamente. Observa-se que as maiores velocidades se encontram no centro e vão reduzindo em direção as paredes do duto, chegando ao valor zero.

Figura 4.7 – Distribuição da velocidade em $z = 5,92\text{m}$ para o caso 4. (a) óleo e b) água



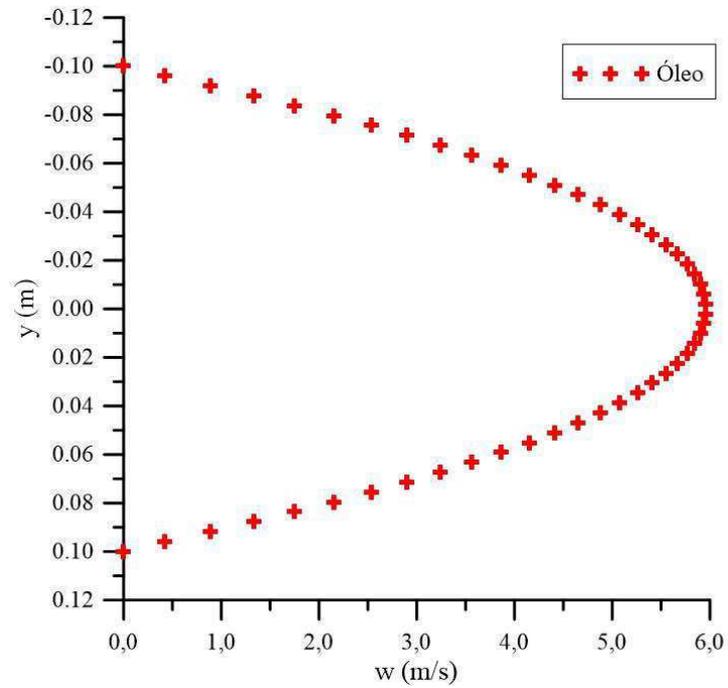
(a)



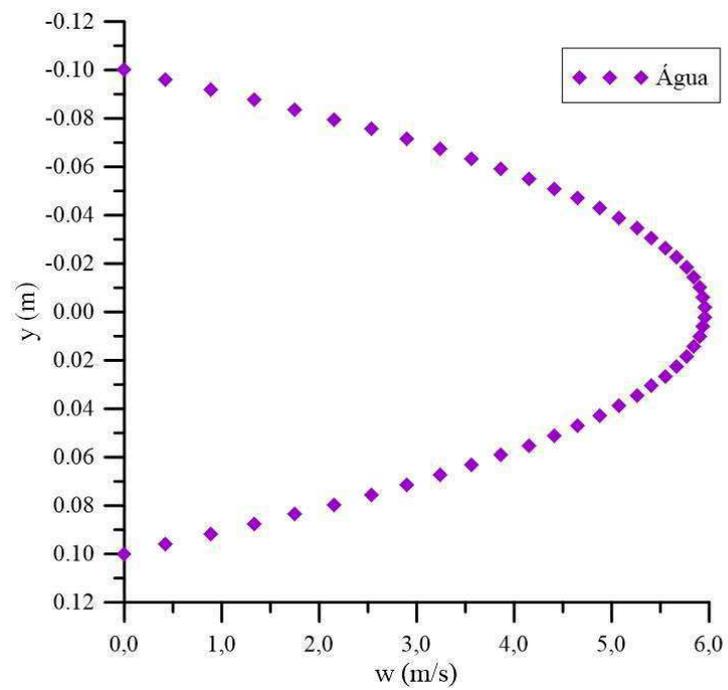
(b)

Verifica-se ainda que, devido à baixa fração volumétrica da fase água, esta é transportada pela fase óleo, deslocando-se com igual velocidade.

Figura 4.8 – Distribuição da velocidade em $z = 5,92\text{m}$ para o caso 6. a) óleo e b) água



(a)



(b)

Nas Figuras 4.9 e 4.10 estão representados o comportamento da velocidade do óleo no centro do duto ao longo da posição axial para os casos 5 a 10. Estas figuras ilustram claramente dois comportamentos diferentes: para os casos 5 a 7, onde a velocidade de entrada do óleo variou e a da água permaneceu constante, é possível observar que a velocidade de entrada do óleo apresentou uma influência bastante significativa no perfil de velocidade. Isto se justifica pelo fato de que o escoamento possui uma maior fração de óleo (95%), logo, modificações nos parâmetros que envolvam o óleo apresentarão resultados mais significativos se comparados aos resultados obtidos com a modificação da fração volumétrica de água. Para os casos 8 a 10, onde a velocidade de entrada do óleo permaneceu constante e a velocidade da água variou, o perfil de velocidade sofreu pequenas variações devido à menor fração volumétrica de água presente no escoamento, comprovando a hipótese anterior.

A Tabela 4.2 apresenta o valor do comprimento de entrada hidrodinâmico para todos os casos estudados. Observa-se que, para os casos 1 a 4, quanto maior a fração volumétrica da água, maior o valor do comprimento de entrada hidrodinâmico. Este fato se justifica pela redução da viscosidade do escoamento em consequência da presença da água. Para os casos 5 a 10, pode-se observar que quanto maior a velocidade de entrada do fluido (óleo ou água), maior será o comprimento de entrada hidrodinâmico. De acordo com os casos 2, 6 e 9, o comprimento de entrada hidrodinâmico não apresentou modificações em relação à consideração do efeito da gravidade e da posição do duto (horizontal ou vertical), mantendo-se constante para ambos os casos.

O comprimento de entrada hidrodinâmico teórico para todos os casos estudados também é apresentado na Tabela 4.2. A equação utilizada para cálculo do L_{ceh} teórico (Equação 3.11) leva em consideração um escoamento monofásico. O caso 1 pode ser considerado um escoamento monofásico de óleo, pois a fração volumétrica de água é pequena, e mesmo assim, o L_{ceh} numérico apresentou um valor 2,12 vezes maior que o L_{ceh} teórico, indicando, assim, que a equação utilizada para o cálculo do L_{ceh} apresenta pouca precisão. Para o caso 4, que apresenta a maior fração volumétrica de água (10%), o L_{ceh} numérico foi 2,34 vezes maior que o L_{ceh} teórico. O caso que apresentou um maior erro foi o caso 5, onde o L_{ceh} numérico foi 3,07 vezes maior que o L_{ceh} teórico.

Figura 4.9 – Comportamento da velocidade do óleo no centro do duto ao longo da posição axial para os casos 5 a 7

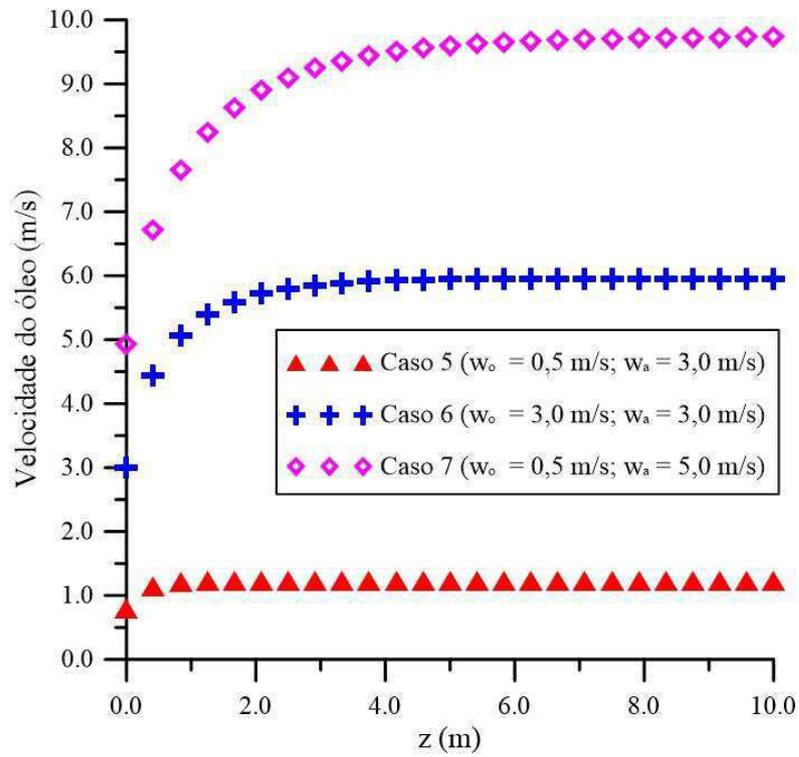


Figura 4.10 – Comportamento da velocidade do óleo no centro do duto ao longo da posição axial para os casos 8 a 10

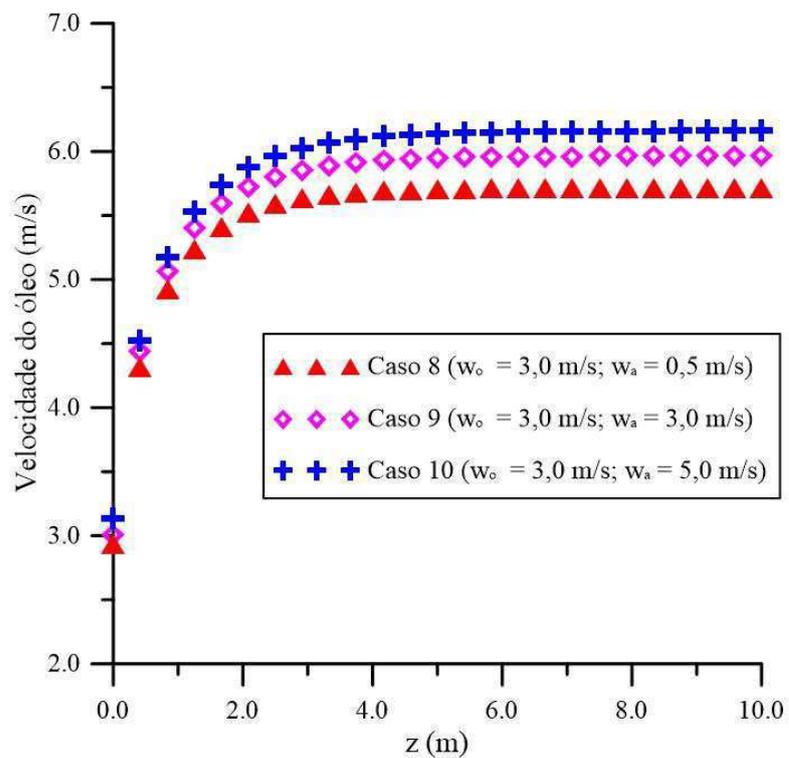


Tabela 4.2 – Comprimento de entrada hidrodinâmico para todos os casos estudados

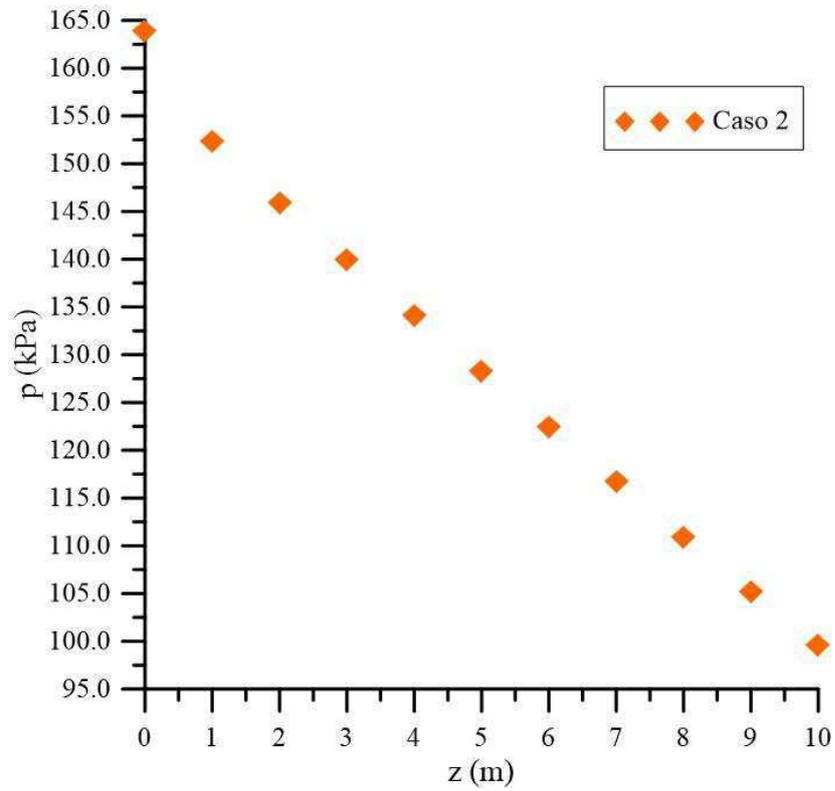
Caso	f_o	f_a	w_o (m/s)	w_a (m/s)	L_{ceh} (m) (numérico)	L_{ceh} (m) (teórico)
1	0,99	0,01	3,0	3,0	5,9183	2,7866
2	0,95	0,05	3,0	3,0	6,1224	2,7866
3	0,92	0,08	3,0	3,0	6,3265	2,7866
4	0,90	0,10	3,0	3,0	6,5306	2,7866
5	0,95	0,05	0,5	3,0	1,4285	0,4644
6	0,95	0,05	3,0	3,0	6,1224	2,7866
7	0,95	0,05	5,0	3,0	8,9795	4,6444
8	0,95	0,05	3,0	0,5	5,3061	2,7866
9	0,95	0,05	3,0	3,0	6,1224	2,7866
10	0,95	0,05	3,0	5,0	6,9387	2,7866

4.2.2 Distribuição de pressão

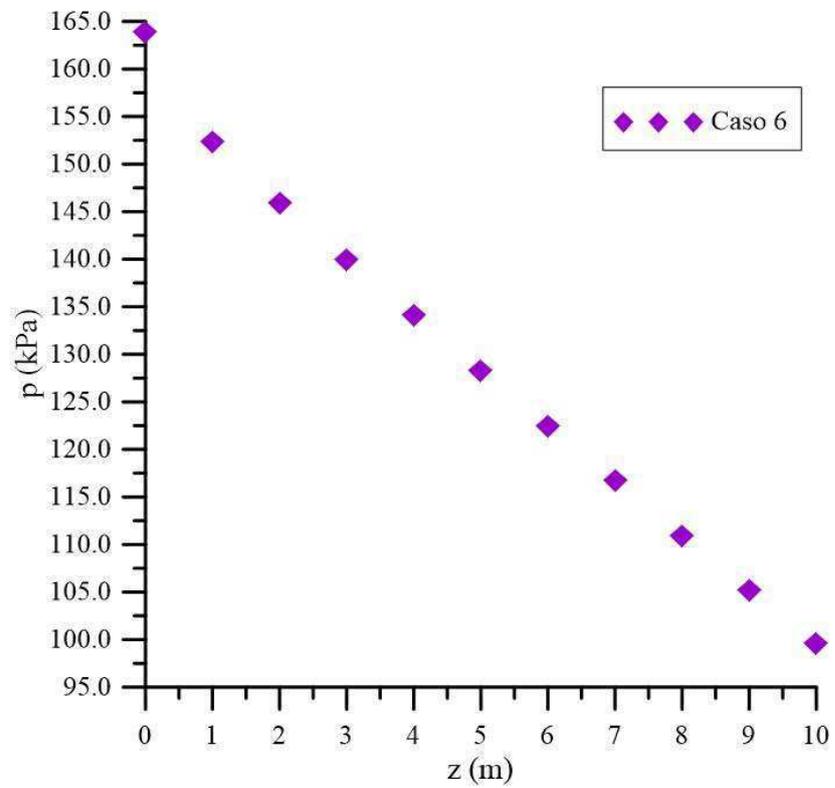
A Figura 4.11 ilustra a pressão média na seção ao longo do duto para os casos 2 e 6. Para que o escoamento seja garantido, é necessária uma diferença de pressão entre o ponto inicial e final do escoamento. Como esperado, ocorre uma diminuição da pressão ao longo do duto, favorecendo o deslocamento do fluido. Essa diminuição é consequência da atuação das forças viscosas sobre os fluidos e sobre a parede do duto.

Analisando os resultados obtidos a partir dos perfis dos campos de pressão no duto para os casos 1 a 4 (Figuras 4.12 a 4.15), pode-se observar que à medida que a fração volumétrica do óleo aumenta, a diferença de pressão entre a entrada e saída do duto aumenta. Isso ocorre devido ao aumento do atrito em consequência da presença de uma maior fração volumétrica do óleo. Os valores obtidos para todos os casos estudados são apresentados na Tabela 4.3.

Figura 4.11 – Distribuição da pressão média (na seção) ao longo do comprimento do duto. a) caso 2 e b) caso 6.



(a)



(b)

Figura 4.12 – Distribuição de pressão sobre o plano longitudinal ZX para o caso 1.

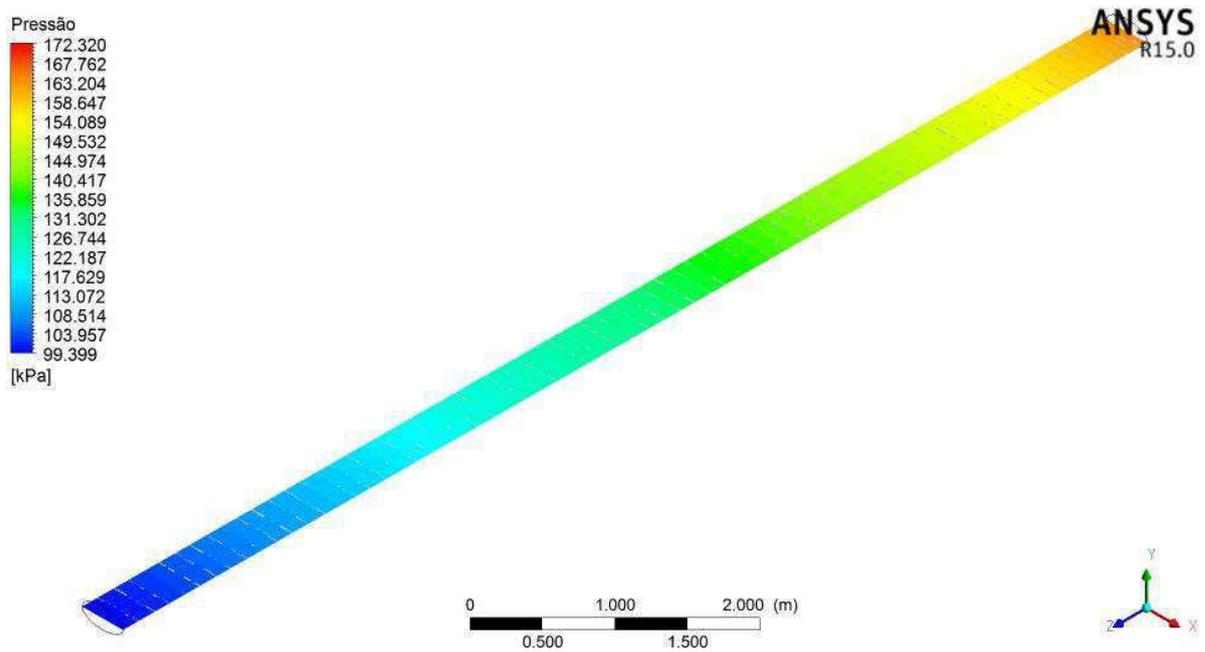


Figura 4.13 – Distribuição de pressão sobre o plano longitudinal ZX para o caso 2.

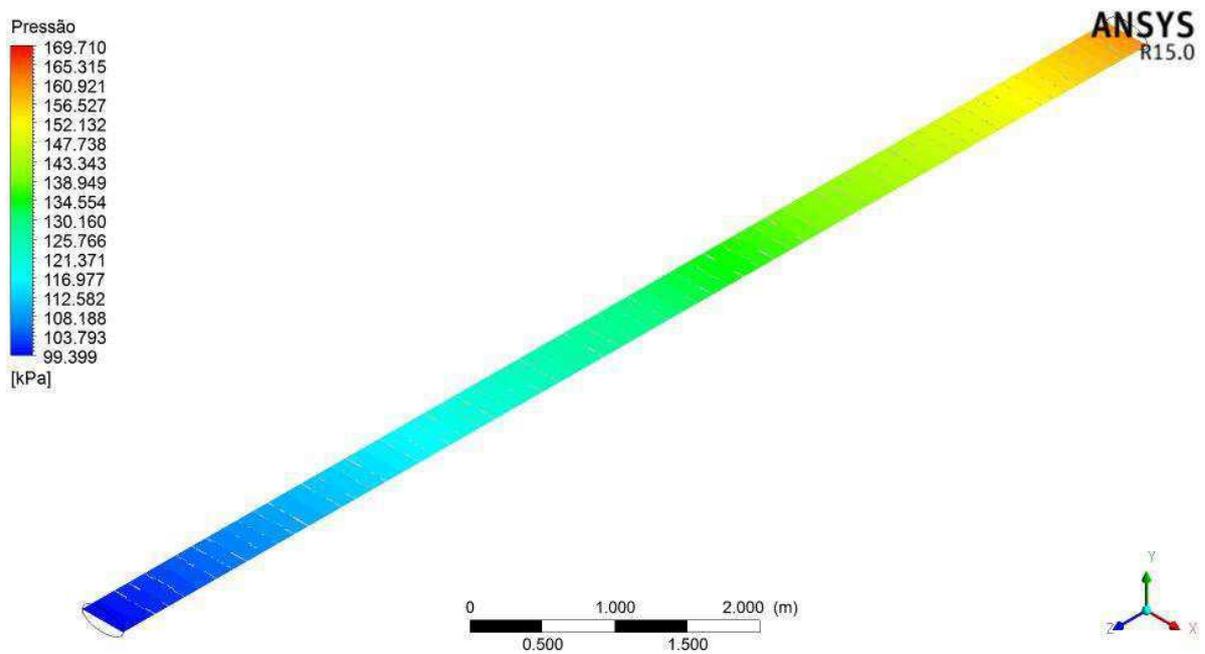


Figura 4.14 – Distribuição de pressão sobre o plano longitudinal ZX para o caso 3.

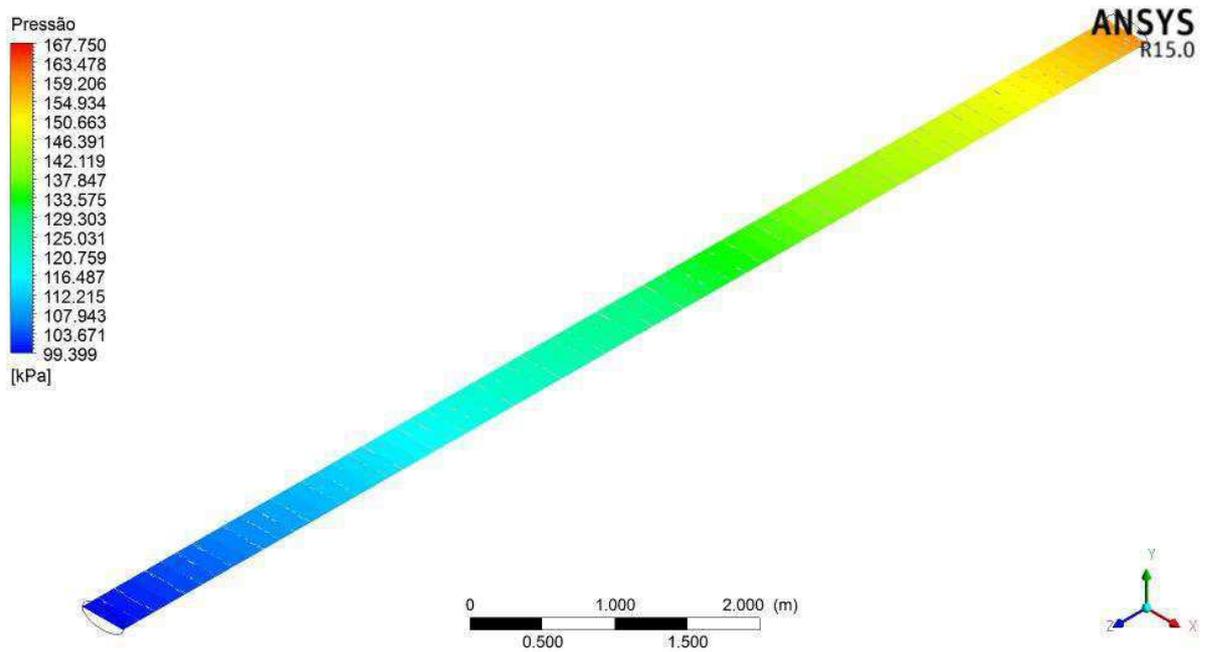


Figura 4.15 – Distribuição de pressão sobre o plano longitudinal ZX para o caso 4.

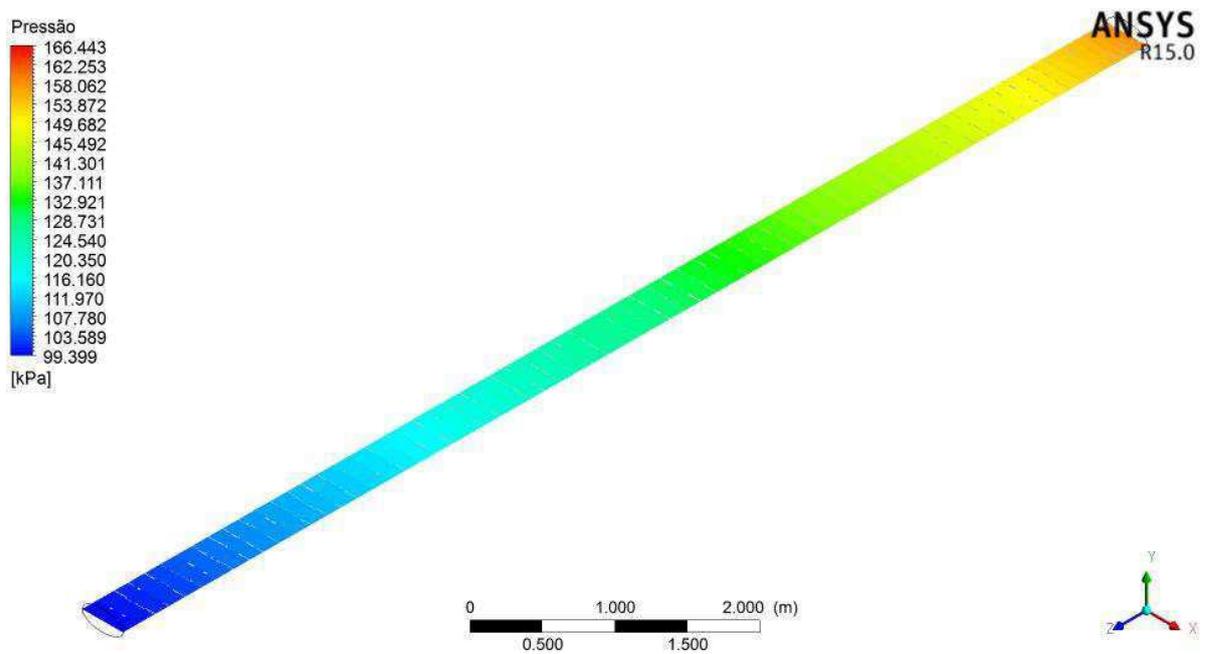


Tabela 4.3 – Queda de pressão no duto para todos os casos estudados.

Casos	Fração volumétrica		Velocidade (m/s)		Consideração da gravidade	Duto	Δp (kPa)
	óleo	água	óleo	água			
1	0,99	0,01	3,0	3,0	não	horizontal	72,921
2	0,95	0,05	3,0	3,0	não	horizontal	70,311
3	0,92	0,08	3,0	3,0	não	horizontal	68,350
4	0,9	0,1	3,0	3,0	não	horizontal	67,043
5	0,95	0,05	0,5	3,0	sim	horizontal	10,501
6	0,95	0,05	3,0	3,0	sim	horizontal	70,313
7	0,95	0,05	5,0	3,0	sim	horizontal	124,201
8	0,95	0,05	3,0	0,5	sim	horizontal	69,411
9	0,95	0,05	3,0	3,0	sim	vertical	70,762
10	0,95	0,05	3,0	5,0	sim	horizontal	70,673

Fazendo a análise da queda de pressão para os casos 2 e 6, onde os parâmetros fração volumétrica, velocidade e posição do duto (horizontal), foram mantidos constantes, exceto a consideração do efeito da gravidade, tem-se valores para a queda de pressão de 70,311 kPa e 70,313 kPa, respectivamente. Vê-se que a variação da pressão não apresentou diferenças significativas em relação a consideração ou não do efeito da gravidade.

Comparando o campo de pressão obtido para o caso 5 com o campo de pressão obtido para o caso 7, pode-se observar que, para o duto do caso 5, a diferença de pressão entre a seção de entrada e de saída foi igual a 10,514 kPa, enquanto que para o caso 7, a diferença de pressão foi igual a 124,201 kPa. Isto significa que quanto maior a velocidade do óleo, maior a queda de pressão observada.

Para os casos 8 e 10, a diferença de pressão entre o ponto inicial e final do escoamento apresentou uma menor discrepância se comparada com os casos 5 e 7, devido a menor fração volumétrica da água presente no escoamento. Vale salientar que os casos 5, 7, 8 e 10 possuem a mesma fração volumétrica das fases presentes no escoamento, dutos horizontais e o efeito da gravidade foi considerado.

A queda de pressão para o caso 6 foi 70,313 kPa enquanto para o caso 9 foi 70,762 kPa, uma diferença de 0,449 kPa, o que mostra o efeito da posição do duto, horizontal ou vertical, na queda de pressão. É importante destacar que a pressão hidrostática não foi considerada nesta análise (duto vertical)

As Figuras 4.16 e 4.17 apresentam o comportamento da pressão e pressão total para os casos 6 e 9, que correspondem a um duto horizontal e vertical, respectivamente. A distribuição dos perfis de pressão e pressão total apresentam-se de formas diferentes, pois a pressão total leva em consideração tanto a pressão estática quanto a pressão dinâmica.

Figura 4.16 – Distribuição da pressão para o caso 6. a) pressão e b) pressão total

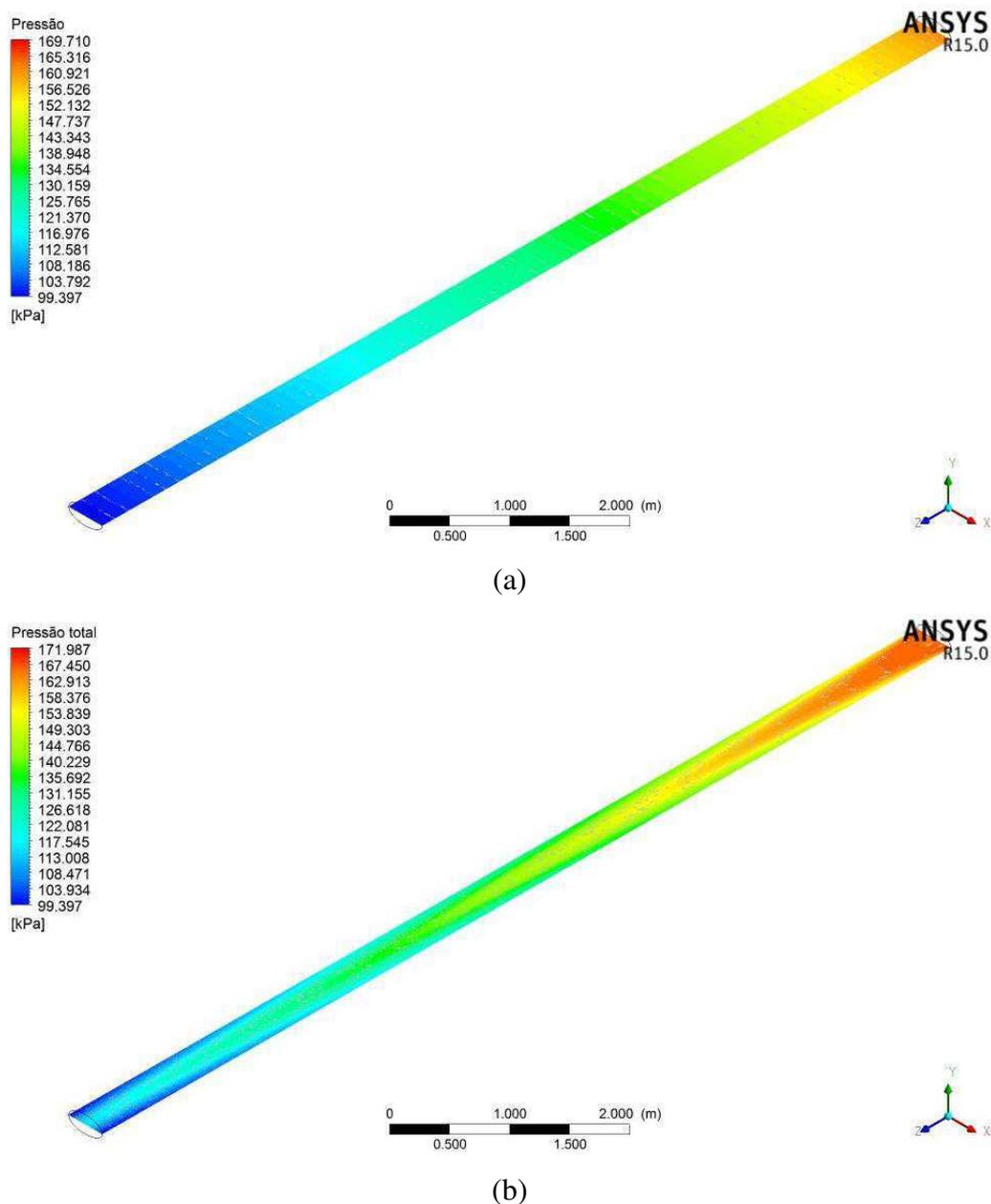
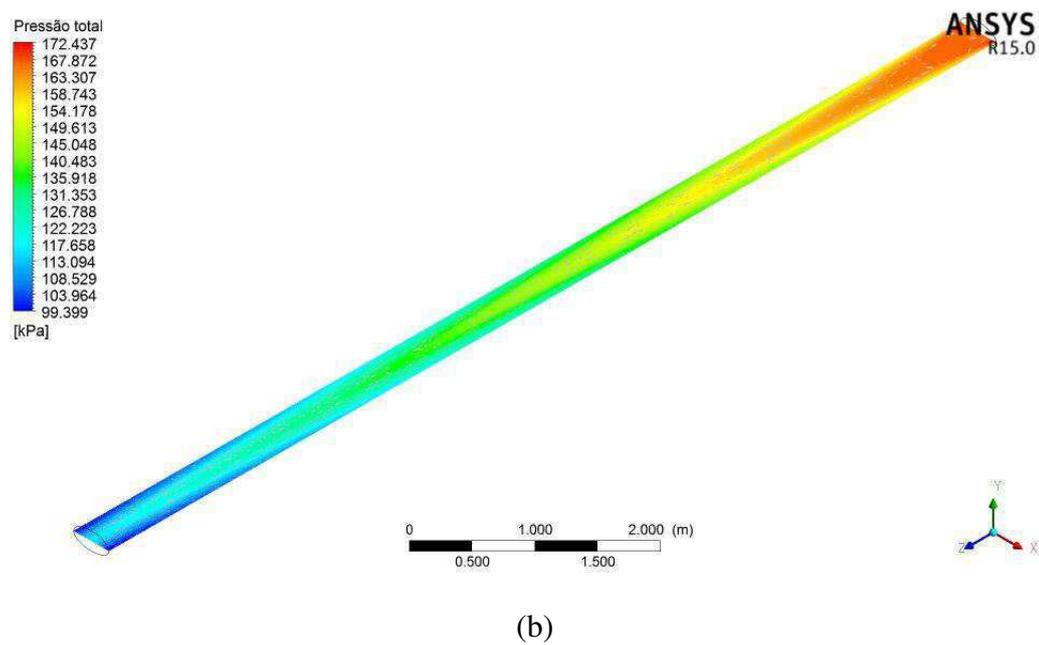
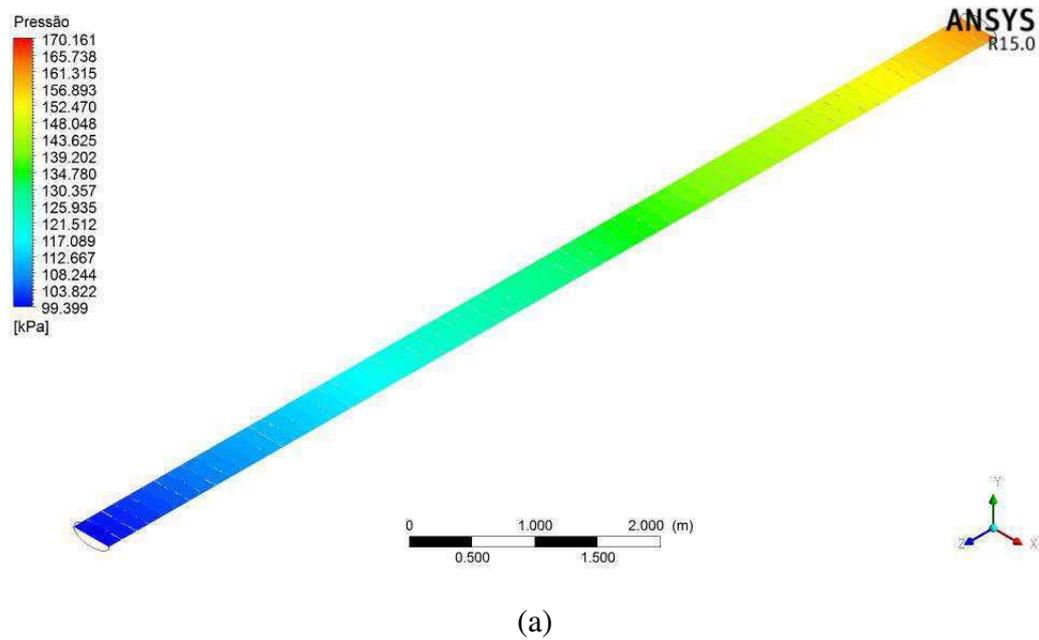


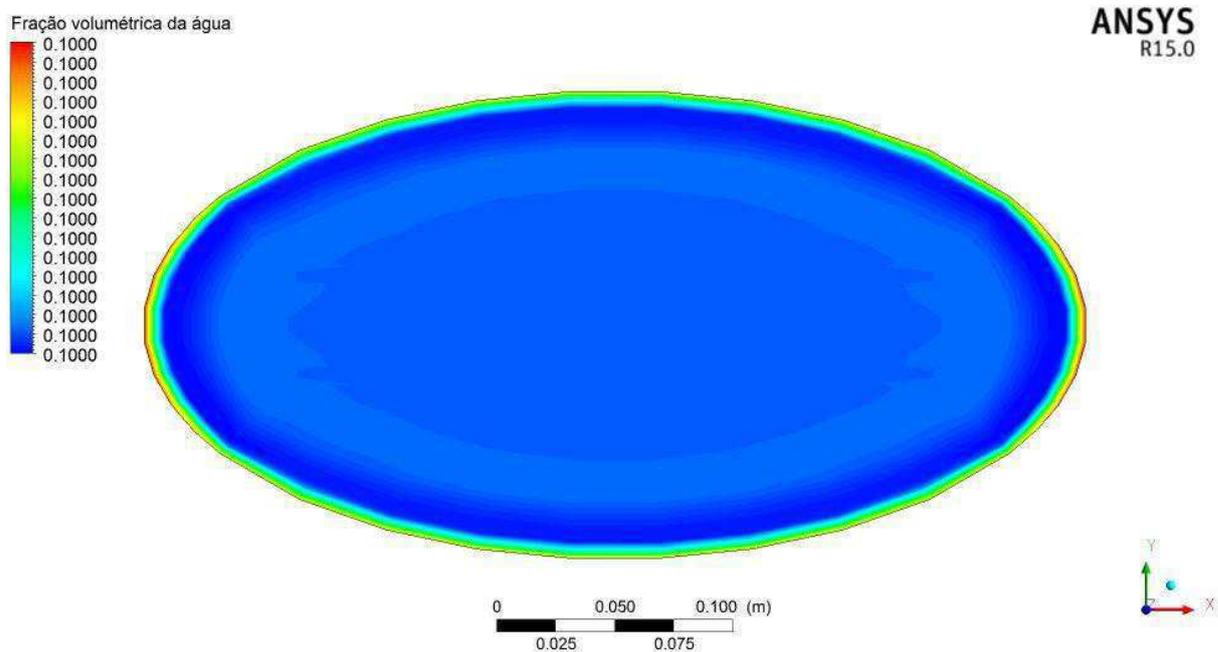
Figura 4.17 – Distribuição da pressão para o caso 9. a) pressão e b) pressão total.



4.2.3 Distribuição da fração volumétrica

A partir das Figuras 4.18 a 4.20 pode-se observar que a água se encontra completamente dispersa na fase contínua (óleo), formando assim, o padrão de escoamento denominado dispersão de água em óleo.

Figura 4.20 – Distribuição da fração volumétrica da água no plano transversal XY em $z=5,92$ m (caso 4)



4.2.4 Comparação entre um duto de seção transversal circular com um de seção transversal elíptica ambos com a mesma vazão mássica

Para a comparação entre um duto de seção transversal elíptica e um duto de seção transversal circular, foi usado um duto circular ($L_1 = L_2 = 0,141421$ m) com a mesma área da seção transversal do duto elíptico ($L_1 = 0,1$ m e $L_2 = 0,2$ m). Foi utilizada a mesma velocidade de entrada do óleo para ambos os casos (3 m/s). Assim, como os dutos possuem a mesma área de seção transversal e a mesma velocidade de entrada, possuem também a mesma vazão mássica. Comparando a variação de pressão obtida para o duto circular com a variação de pressão obtida para o duto elíptico, pode-se observar que a variação de pressão para o duto elíptico é 22,7 % maior que a do duto circular. Portanto, para as mesmas condições operacionais e mesma área transversal, o duto circular mostrou-se mais eficiente se comparado ao duto elíptico. A comparação é apresentada na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Comparação entre um duto de seção transversal circular com um de seção transversal elíptica

Duto	L ₁ (m)	L ₂ (m)	w _o = w _a (m/s)	Δp (kPa)
Seção transversal circular	0,141421	0,141421	3,0	52,750
Seção transversal elíptica	0,100000	0,200000	3,0	64,749

4.2.5 Influência da forma do duto na hidrodinâmica do escoamento

Para a análise da influência da razão de aspecto no cálculo da perda de carga analítica foram utilizados quatro dutos com a mesma velocidade de entrada para o óleo e para a água, e com razões de aspecto distintas, como mostrado na Figura 4.21. Neste caso usou-se $f_o = 0,99$ e $f_a = 0,01$.

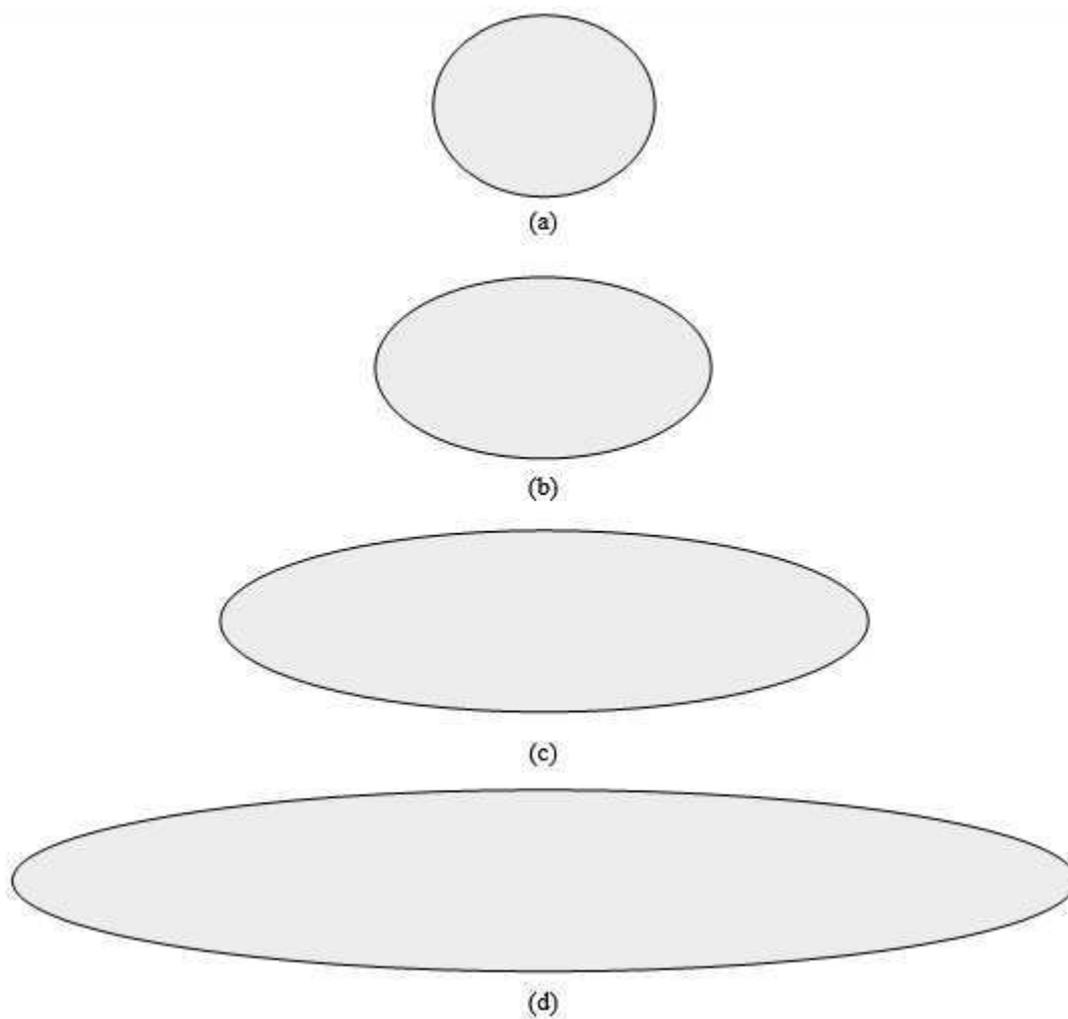
Com os resultados obtidos (Tabela 4.5), é possível observar que o duto elíptico com razão de aspecto maior (duto D) apresentou uma queda de pressão menor se comparado aos demais casos. Isto ocorre devido à queda de pressão ser inversamente proporcional ao diâmetro hidráulico, ou seja, quanto maior a razão de aspecto, maior será o diâmetro hidráulico e menor será a queda de pressão. Este comportamento está de acordo com Kakaç et al (1987) e White (1991). Vê-se também que, com o aumento da razão de aspecto, o valor para a vazão mássica também aumenta, devido à área da seção transversal do duto ser maior.

Comparando os dutos A (circular) e D (elíptico) percebe-se que, com o aumento da razão de aspecto e mantida a velocidade constante, a vazão mássica no duto D foi igual a 477,677 kg/s comparada à vazão mássica no duto A de 89,533 kg/s, um aumento de 433 %. Além disso, a perda de carga no duto D foi menor que no duto A, apresentando, assim, uma eficiência maior em relação ao duto circular, para as mesmas condições impostas.

Tabela 4.5 – Parâmetros dos casos estudados para diferentes razões de aspecto

Duto	L ₁ (m)	L ₂ (m)	C (m)	w _o = w _a (m/s)	D _h (m)	Δp _{analítico} (kPa)	Vazão mássica (kg/s)
A	0,10	0,10	10,0	3,0	0,2000	100,749	89,535
B	0,10	0,15	10,0	3,0	0,2376	74,083	134,303
C	0,10	0,30	10,0	3,0	0,2820	58,083	268,606
D	0,10	0,50	10,0	3,0	0,2990	54,670	477,677

Figura 4.21 – Representação da seção transversal dos dutos para as razões de aspecto. a) 1,0; b) 1,5; c) 3,0 e d) 5,0.



CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

A partir dos resultados obtidos pode-se concluir que:

- O modelo matemático proposto mostrou-se eficaz na avaliação dos campos de pressão, fração volumétrica e velocidade obtidos para o escoamento de óleo e água em dutos elípticos;
- Os perfis de velocidade obtidos numericamente apresentaram-se aproximados aos perfis de velocidade analíticos, para a condição de escoamento monofásico, validando-se assim, a metodologia utilizada no presente trabalho;
- A perda de carga no duto mostrou-se influenciada pela velocidade de entrada do óleo e da água. Quanto maior a velocidade da fase óleo, maior a queda de pressão;
- O aumento da fração volumétrica do óleo no escoamento provocou um aumento na perda de carga no duto de seção transversal elíptica;
- Foi observado o padrão dispersão de água em óleo durante o escoamento;
- A comparação realizada entre um duto de seção transversal circular e um duto de seção transversal elíptica, ambos com a mesma vazão mássica, comprovou que o duto elíptico possui uma perda de carga 22,7 % maior do que o duto de seção transversal circular, que confere ao duto com seção transversal circular uma melhor eficiência;

- A comparação realizada com entre dutos elípticos com diferentes razões de aspecto, ambos com a mesma velocidade de entrada para o óleo e água, comprovou que o duto elíptico com razão de aspecto igual a 5,0 possui uma perda de carga 84,2% menor que o duto circular (razão de aspecto igual a 1,0).

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestões para trabalhos futuros podem-se citar:

- Estudar o escoamento de água e óleo em dutos com seção transversal elíptica no regime turbulento;
- Estudar o escoamento de água e óleo em dutos elípticos com transferência de calor;
- Estudar o escoamento da água e óleo em dutos elípticos com frações volumétricas da fase água maiores que 10%;
- Estudar o padrão de escoamento do tipo *core-flow* em dutos elípticos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, T. H. F. **Estudo numérico do transporte de óleos pesados em tubos lubrificados por água.** 2008. 61 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande. 2008.

ANDRADE, T. H. F.; SILVA, F. N.; NETO, S. R. F.; LIMA, A. G. B. **Escoamento anular água-óleo pesado tipo core-flow em conexões T.** X Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica. Porto. Portugal. 2011.

ANSYS CFX 13, **Solver theory guide**, 2013.

BARBOSA, E. S. **Aspectos geométricos e hidrodinâmicos de um hidrociclone no processo de separação de sistemas multifásicos: aplicação na indústria do petróleo.** 2011. 192 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande. 2011.

BEGGS, H.D., BRILL, J.P. **Two-phase flow in pipes**, 4. ed. University of Tulsa Printer, USA, 1982.

CADÉ, M. A. **Simulação numérica do escoamento de gás natural em duto cilíndrico elíptico.** 2003. 77 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande. 2003.

ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos fluidos: fundamentos e aplicações**, 1 ed. São Paulo: McGraw – Hill, 2007.

CHARLES, M.E.; REDBERGER, P. J. **The reduction of pressure gradients in oil pipelines by the addition of water: numerical analysis of stratified flow**. The Canadian Journal of Chemical Engineering, Apr, 1962.

COATES, J.; PRESSBURG, B. S. **How to analyse two-phase flow**. Chemical Engineering, set. 1959.

CORNELIUSSEN, S. et al. **Handbook of multiphase flow metering**. The Norwegian Society for Oil and Gas Measurement, Revision 2, 2005.

FLOR, D. A. S. B. **Escoamento turbulento do gás natural em duto cilíndrico de seção transversal elíptica**, Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2008.

FORTUNA, A. O. **Técnicas computacionais para a dinâmica dos fluidos**, 2ªed. – São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2012.

GONÇALVES, N. D. F. **Método dos volumes finitos em malhas não-estruturadas**. 2007. 71 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Matemática) - Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. 2007.

JOSEPH, D. D.; BAI, R.; CHEN, K. P.; RENARDY, Y. Y. **Core-annular flows**. Annual Reviews Fluid Mechanical, v. 29, p. 65–90, 1997.

KAKAÇ, S.; SHAH, R. K.; AUNG, W. **Handbook of single-phase convective heat transfer**. John Wiley&Sons, 1987.

LOCKHART, R. W.; MARTINELLI, R.C. **Proposed correlation of data for isothermal two-phase, two component flow in pipes**. Chemical Engineering Progress, n.1, v. 45, p. 39-48, 1949.

LOVICK, J.; ANGELI, P. **Experimental studies on the dual continuous flow pattern in oil–water flows.** International Journal of Multiphase Flow, n. 2, v. 30, p. 139–157, 2004.

MATTIUSI, E. M. **Escoamento laminar de fluidos não-newtonianos em tubos de seção transversal elíptica.** 2007. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba. 2007.

MIGUEZ, M. F. **Estudo em CFD do escoamento de líquido e da geração de área efetiva em recheios estruturados.** 2008. 53 f. Monografia (Trabalho de conclusão de curso) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2008.

MOTA, C. A. A. **Hidrodinâmica do escoamento turbulento de gás natural em dutos cilíndrico elíptico com vazamento.** 2015. 81 f. Monografia (Trabalho de conclusão de curso) – Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande. 2015.

PACHECO, F; CAVALCANTE, C. C. P.; MENDES, J. R. P. M.; BANNWART, A. C., SERAPIÃO, A. B. S. **Identificação de padrões de escoamento multifásico e determinação da perda de carga com o auxílio de redes neurais.** IV Congresso Brasileiro de Petróleo e Gás, Campinas, São Paulo, 2007.

PALADINO, E. E. **Estudo do escoamento multifásico em medidores de vazão do tipo pressão diferencial.** 2005. 263 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina. 2005.

PEREIRA, C. C. **Estudo experimental e modelagem do escoamento estratificado ondulado óleo-água.** 2011. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de São Paulo. São Carlos. 2011.

PORCIÚNCULA, C. B. **Simulação fluidodinâmica computacional de processos de processos de separação por membranas.** 2007. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2007.

POURARIA, H.; SEO, J. K.; PAIK, J. K. **Numerical modelling of two-phase oil-water flow patterns in a subsea pipeline**, Elsevier, Ocean Engineering, v. 115, p. 135-148, 2016.

RODRIGUEZ, O. M. H.; OLIEMANS, R.V.A. **Experimental study on oil–water flow in horizontal and slightly inclined pipes**. International Journal of Multiphase Flow, n. 3, v. 32, p. 323-343, 2006.

ROHSENOW, W. M.; HARTNETT, J. P.; CHO, Y. I. **Handbook of heat transfer**. Mc Graw-Hill, 1998.

RUSSELL, T. W. F., CHARLES, M. E. **The effect of the less viscous liquid in the laminar flow of two immiscible liquids**. The Canadian Journal of Chemical Engineering, n. 1, v. 37, p. 18–24, 1959.

SAJADI, A. R. **Analytical and numerical studies of separated laminar two-phase flow in elliptical ducts of arbitrary axis ratio**. International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 77, p. 124-130, 2014.

SANTOS, A. A. C. **Modelagem numérica com validação experimental de escoamento através do bocal inferior de um elemento combustível nuclear**. 2008. 164 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2008.

SANTOS, M. M. **Simulação numérica do escoamento bifásico óleo-água em tubos**. 2010. 81 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Itajubá. Itajubá. 2010.

SANTOS, W. R. G. **Escoamento multifásico em duto vertical com vazamento: avaliação físico/geométrica do duto na hidrodinâmica do escoamento**. 2014. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande. 2014.

SARMENTO, L. R. B.; LEITE, B. E.; NETO, S. R. F.; LIMA, A. G. B. **Hydrodynamics of oil-water with leakage by CFD**. Defect and Diffusion Forum, v. 348, p. 58-63, 2014.

SILVA, E. S. **Estudo do escoamento bifásico em risers em movimento na produção marítima de petróleo em águas profundas**. 2006. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Petróleo) – Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 2006.

SILVA, J. L. **Investigação do escoamento bifásico gás-líquido em uma coluna de bolhas retangular por meio da técnica CFD**. 2011. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Estadual de Campinas. 2011

SOUZA, J. N. M. **Modelagem e simulação de escoamento multifásico em dutos de produção de óleo e gás natural**. 2010. 265 f. Tese (Doutorado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2010.

SOUZA, R. G. S. **Escoamento bifásico líquido-gás: previsão de gradiente de pressão com a correlação de Lockhart e Martinelli e fluidodinâmica computacional**. 2009. 74 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2009.

SZALINSKI, L.; ABDULKAREEM, L. A.; SILVA, M. J.; THIELE, S.; BEYER, M.; LUCAS, D.; PEREZ, V. H.; HAMPEL, U.; AZZOPARDI, B. J. **Comparative study of gas-oil and gas-water two-phase flow in a vertical pipe**, Chemical Engineering Science, v.65, n. 12, p.3836-3848, 2010.

TRALLERO, J. L. **Oil-water flow patterns in horizontal pipes**, 1995. Ph.D. Thesis, University of Tulsa, Tulsa. 1995.

WHALLEY, P.B, **Two-phase flow and heat transfer**, Oxford University Press, 1996.

WHITE, F. M. **Viscous fluid flow**. McGraw Hill, INC, 1991.

WOLFRAM, S. **The mathematica book**. Wolfram Research, Inc, Champaign, USA, 2003.

ZAVAREH, F., HILL, A. D., PODIO, A. L. **Flow regimes in vertical and inclined oil/water flow in pipes.** SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, Houston, Texas, 1988.

ZHU, Y. D.; SHU, C.; QIU, J.; TANI, J. **Numerical simulation of natural convection between two elliptical cylinders using DQ method.** International Journal of Heat and Mass Transfer, n. 4, v. 47, p. 797–808, 2004.