



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



**RENATA PEREIRA RAMOS**

**HIDRODINÂMICA DO ESCOAMENTO TRIFÁSICO DE ÓLEO,  
ÁGUA E GÁS EM DUTOS CILÍNDRICOS DE SEÇÃO  
TRANSVERSAL ELÍPTICA**

**CAMPINA GRANDE – PB  
2019**

**RENATA PEREIRA RAMOS**

**HIDRODINÂMICA DO ESCOAMENTO TRIFÁSICO DE ÓLEO,  
ÁGUA E GÁS 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

CAMPINA GRANDE – PB  
2019

R1751h Ramos, Renata Pereira.

Hidrodinâmica do escoamento trifásico de óleo, água e gás em dutos cilíndricos de seção transversal elíptica / Renata Pereira Ramos. – Campina Grande, 2019.

70 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2019.

"Orientação: Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima".

Referências.

1. Hidrodinâmica – Escoamento Trifásico. 2. Duto Elíptico. 3. Dutos Cilíndricos – Óleo, Água e Gás. 4. Engenharia Mecânica. 5. Simulação Numérica. I. Lima, Antonio Gilson Barbosa de. II. Título.

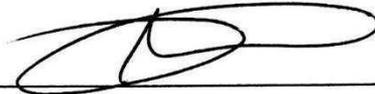
CDU 532.533:621(043)

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECÁRIA SEVERINA SUELI DA SILVA OLIVEIRA CRB-15/225

HIDRODINÂMICA DO ESCOAMENTO TRIFÁSICO DE ÓLEO, ÁGUA E GÁS EM DUTOS  
CILÍNDRICOS DE SEÇÃO TRANSVERSAL ELÍPTICA

**RENATA PEREIRA RAMOS**

Dissertação Aprovada em 27/02/2019 pela Banca Examinadora constituída dos seguintes  
membros:



---

**Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima**

Orientador

PPGEM/UAEM/CCT/UFCG

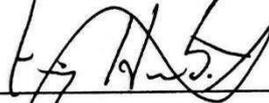


---

**Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto**

Examinador Interno

PPGEM/UAEM/CCT/UFCG



---

**Dr. Tony Herbert Freire de Andrade**

Examinador Externo

UAEPetro/CCT/UFCG

## DEDICATÓRIA

*A Deus e à minha família por todo o carinho e incentivo.  
Ao meu pai Marcelo (em memória).*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, que sempre esteve e está comigo, me guiando, iluminando e dando forças nesta caminhada tão difícil, mas gratificante de minha vida profissional. Aos meus pais que me incentivaram e me motivaram. Aos meus familiares (tios e irmãos). Ao meu marido Franklin Medeiros Ramos (meu maior incentivador) que sempre esteve ao meu lado me apoiando e ajudando.

Ao meu orientador Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima, pela disponibilidade e paciência de me orientar durante este trabalho.

Aos colegas e amigos que fazem parte do LCTF/UAEM/UFCG, em especial a Túlio e Jéssica, que sempre estiveram ao meu lado colaborando com esta pesquisa.

A todos os colegas e amigos da Pós-Graduação e aos professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica que me ajudaram a trilhar este caminho.

À banca examinadora desta dissertação pelas discussões, comentários e sugestões a respeito deste trabalho.

Ao Laboratório Computacional em Térmica e Fluidos, LCTF/UAEM/UFCG, que colocaram à minha disposição os recursos necessários para o desenvolvimento deste trabalho.

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

*Educar é semear com  
sabedoria e colher com paciência.*

*(Augusto Cury)*

## RESUMO

RAMOS, Renata Pereira. **Hidrodinâmica do escoamento trifásico de óleo, água e gás em dutos cilíndricos de seção transversal elíptica**. 2019. 70f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande. 2019.

O meio mais econômico e seguro de movimentação de fluidos da indústria do petróleo são os dutos, por isso, estes são considerados um dos meios mais eficientes de escoamento de produção entre regiões produtoras, plataformas, refinarias, terminais marítimos, parques de estocagem e centros consumidores. No cenário da indústria do petróleo, principalmente na exploração em águas profundas, surge a preocupação com respeito aos custos operacionais envolvidos no transporte desses fluidos e a necessidade do aumento da capacidade de produção. Nessas atividades, onde frequentemente altas vazões volumétricas são utilizadas, as perdas hidrodinâmicas são traduzidas em uma quantidade significativa de energia. Diante disto, este trabalho tem por objetivo estudar numericamente o escoamento trifásico de óleo, água e gás em dutos cilíndricos de seção transversal elíptica. Para isso adotou-se um escoamento tridimensional, isotérmico, laminar, incompressível e com propriedades físico-químicas constantes. Para a solução numérica das equações governantes utilizou-se o *software* Ansys FLUENT. Os resultados de distribuição de velocidade, pressão e fração volumétrica possibilitaram a avaliação do comportamento do escoamento no interior do duto. Observou-se que quanto maior a velocidade e a fração volumétrica do óleo maior será a perda de pressão no interior do duto. Verificou-se também que o duto com seção transversal circular apresenta uma melhor eficiência quando comparado ao duto com seção transversal elíptica nas mesmas condições operacionais.

**Palavras-chave:** Duto elíptico, escoamento trifásico, Fluent, simulação numérica.

## ABSTRACT

RAMOS, Renata Pereira. **Hydrodynamics of oil, water and gas three-phase flow in cylindrical pipes of elliptical cross section.** 2019. 70f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande. 2019.

The most economical and safe means of fluid movement in the petroleum industry are the pipelines, which is why they are considered one of the most efficient means of production flow between producing regions, platforms, refineries, marine terminals, storage parks and consumer centers . In the oil industry scenario, especially in deepwater exploration, there is concern regarding the operational costs involved in the transportation of these fluids and the need to increase production capacity. In these activities where high volumetric flow rates are often used, hydrodynamic losses are translated into a significant amount of energy. In view of this, this work aims to numerically study the three - phase flow of oil, water and gas in cylindrical ducts of elliptical cross section. For this, a three-dimensional, isothermal, laminar, incompressible flow with constant physicochemical properties was adopted. For the numerical solution of the governing equations the Ansys FLUENT software was used. The results of velocity, pressure and volumetric fraction distribution allowed the evaluation of the flow behavior inside the duct. It was observed that the higher the velocity and the volumetric fraction of the oil the greater the pressure drop inside the duct. It was also verified that the duct with circular cross section presents a better efficiency when compared to the duct with elliptical cross-section under the same operating conditions.

**Keywords:** Elliptical pipe, Three-phase Flow, Fluent, Numerical Simulation.

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 3.1-</b> Dados geométricos do duto em estudo.....	19
<b>Tabela 3.2-</b> Condições de contorno utilizadas nas simulações.....	24
<b>Tabela 3.3-</b> Propriedades dos fluidos utilizados na simulação.....	24
<b>Tabela 3.4-</b> Condições gerais do modelo matemático e solução numérica.....	25
<b>Tabela 3.5-</b> Casos simulados na presente pesquisa .....	28
<b>Tabela 4.1-</b> Comparação da variação da pressão no duto, analítica e numérica para o caso 1 ( $f_o = 0,98$ ; $f_a = 0,01$ ; $f_g = 0,01$ ; $w_o = w_a = w_g = 1,0$ m/s).....	30
<b>Tabela 4.2-</b> Comprimento de entrada hidrodinâmica para todos os casos simulados.....	35
<b>Tabela 4.3-</b> Queda de pressão no duto para todos os casos simulados.....	38
<b>Tabela 4.4-</b> Comparação entre um duto com seção transversal circular com um de seção transversal elíptica. a) comparativo 1 b) comparativo 2 e c) comparativo 3.....	42

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2.1</b> -Padrões de escoamento trifásico em tubulação horizontal .....	6
<b>Figura 2.2</b> -Padrões de escoamento trifásico em tubulação vertical .....	7
<b>Figura 2.3</b> -Duto cilíndrico com seção transversal elíptica .....	12
<b>Figura 2.4</b> -Resumo das etapas para obtenção da resolução numérica.....	14
<b>Figura 2.5</b> -Tipos de malhas computacionais: a) estruturada e b) não estruturada .....	18
<b>Figura 3.1</b> -Representação da malha utilizada na simulação. a) entrada b) saída e c) parede.....	20
<b>Figura 4.1</b> -Comparação entre os resultados analíticos e numéricos em $z = 4,0\text{m}$ caso 1 ( $f_o = 0,98$ ; $f_a = 0,01$ ; $f_g = 0,01$ ; $w_o = w_a = w_g = 1,0\text{ m/s}$ ).....	29
<b>Figura 4.2</b> -Perfil de Velocidade do óleo ao longo da tubulação no plano YZ, para o caso 1 ( $f_o = 0,98$ ; $f_a = 0,01$ ; $f_g = 0,01$ ; $w_o = w_a = w_g = 1,0\text{ m/s}$ ).....	31
<b>Figura 4.3</b> - Distribuição de velocidade das fases óleo, água e gás no plano XY, para o caso 1 na posição $z = 0,5\text{ m}$ .....	32
<b>Figura 4.4</b> - Distribuição de velocidade das fases óleo, água e gás no plano XY, para o caso 1 na posição $z = 2,0\text{ m}$ .....	33
<b>Figura 4.5</b> - Distribuição de velocidade das fases óleo, água e gás no plano XY, para o caso 1 na posição $z = 3,54\text{ m}$ .....	33
<b>Figura 4.6</b> - Perfil da velocidade da fase óleo, água e gás na posição axial $z = 8\text{ m}$ para o caso 9.....	34
<b>Figura 4.7</b> -Potência de bombeamento da fase óleo.....	36
<b>Figura 4.8</b> -Potência de bombeamento da fase água.....	36
<b>Figura 4.9</b> -Potência de bombeamento da fase gás.....	37
<b>Figura 4.10</b> -Distribuição de pressão da mistura fluida sobre o plano longitudinal ZX, para o caso 2 ( $f_o = 0,96$ ; $f_a = 0,02$ ; $f_g = 0,02$ ; $w_o = w_a = w = 2,0\text{ m/s}$ ).....	38
<b>Figura 4.11</b> -Distribuição de pressão da mistura fluida sobre o plano longitudinal ZX, para o caso 3 ( $f_o = 0,96$ ; $f_a = 0,02$ ; $f_g = 0,02$ ; $w_o = w_a = w = 2,0\text{ m/s}$ ).....	39
<b>Figura 4.12</b> -Distribuição de pressão da mistura fluida sobre o plano longitudinal ZX, para o caso 4 ( $f_o = 0,96$ ; $f_a = 0,02$ ; $f_g = 0,02$ ; $w_o = w_a = w = 2,0\text{ m/s}$ ).....	39
<b>Figura 4.13</b> -Perfil da pressão média na seção ao longo do duto para os casos 3, 7 e 8.....	40
<b>Figura 4.14</b> - Distribuição da fração volumétrica do óleo no plano XY, para o caso 4 em $z = 8\text{ m}$ .....	41

## LISTA DE SÍMBOLOS

### *Letras Latinas*

$A$	Área da seção transversal	$[m^2]$
$D$	Diâmetro do duto	$[m]$
$D_h$	Diâmetro hidráulico	$[m]$
$f_o$	Fração volumétrica da fase óleo	$[-]$
$f_a$	Fração volumétrica da fase água	$[-]$
$f_g$	Fração volumétrica da fase gás	$[-]$
$f_{drag}$	Força de arraste	$[-]$
$\hat{f}_{rd}$	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	$[m]$
$\hat{P}$	Perímetro da seção do duto	$[m]$
$p$	Pressão	$[Pa]$
$Q$	Vazão volumétrica	$[m^3/s]$
$Ra$	Razão de aspecto	$[-]$
$Re$	Número de Reynolds	$[-]$
$Re_{Dh}$	Número de Reynolds baseado no diâmetro hidráulico	$[-]$
$\vec{U}$	Vetor velocidade	$[m.s^{-1}]$
$\vec{V}_{pq}$	Velocidade relativa	$[m.s^{-1}]$
$\dot{W}$	Potência de Bombeamento	$[W]$
$w_{méd}$	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***

$\alpha, \beta$	Fases envolvidas	[-]
$\rho$	Massa específica	[kg.m <sup>-3</sup> ]
$\partial$	Derivada parcial	[-]
$\nabla$	Gradiente	[-]
$\mu$	Viscosidade dinâmica	[kg/m-s]

## SUMÁRIO

1	Introdução.....	1
1.1	Objetivos.....	2
1.1.1	Objetivo geral .....	2
1.1.2	Objetivos específicos.....	2
2	Revisão da literatura.....	3
2.1	Escoamento multifásico .....	3
2.1.1	Escoamento trifásico líquido-líquido-gás em dutos circulares.....	4
2.1.2	Modelagem matemática para escoamentos multifásicos.....	9
2.1.2.1	Abordagem Euleriana-Lagrangiana.....	9
2.1.2.2	Abordagem Euleriana-Euleriana.....	9
2.2	Escoamento de dutos cilíndricos com seção transversal elíptica.....	10
2.3	Fluidodinâmica computacional .....	12
2.3.1	Procedimentos de solução em fluidodinâmica computacional.....	14
2.3.1.1	Pré-processador.....	14
2.3.1.2	Solver.....	15
2.3.1.3	Pós-processador.....	15
2.3.2	Software Fluent.....	15
2.3.2.1	Modelo de Volume de Fluido (VOF).....	16
2.3.2.2	Modelo Euleriano.....	16
2.3.2.3	Modelo de Mistura.....	17
2.3.3	Geração de malhas computacionais.....	17
3	Metodologia .....	19
3.1	Problema físico e a geometria .....	19
3.2	Modelagem matemática .....	21
3.3	Condições de contorno e propriedades dos fluidos adotados.....	23
3.4	Comparação da solução numérica com a solução analítica .....	25
3.5	Casos estudados .....	28
4	Resultados e Discussões.....	29
4.1	Validação.....	29
4.2	Análise hidrodinâmica dos casos estudados .....	31
4.2.1	Distribuição de velocidade .....	31

4.2.2	Distribuição de pressão.....	37
4.2.3	Distribuição da fração volumétrica.....	41
4.2.4	Comparação entre dutos de seção transversal circular com dutos de seção transversal elíptica.....	41
5	Conclusões e Sugestões para trabalhos futuros.....	43
5.1	Conclusões.....	43
5.2	Sugestões futuras .....	44
6	Referências.....	45

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

O estudo sobre escoamento multifásico tem despertado grande interesse de vários setores da indústria, uma vez que este tipo de escoamento está presente, nas indústrias química, alimentícia, de sistema de conversão de energia, processamento de materiais e a de petróleo e gás. O escoamento multifásico consiste em uma fase fluida e uma fase particulada ou dispersa de qualquer número de componentes químicos, podendo a fase contínua se tratar de um meio líquido ou gasoso e a fase dispersa de partículas sólidas, bolhas de gás ou gotas de líquido. Mas, a definição mais usual é a que considera um sistema multifásico como aquele em que os fluidos componentes são imiscíveis e distinguidos por interfaces.

O escoamento trifásico (óleo-água-gás), que surge, por exemplo, como produto bruto dos poços de petróleo brasileiros e em boa parte dos poços petrolíferos mundiais, possui em sua grande maioria uma característica muito comum, que é a presença de óleo pesado como fase principal. Este tipo de escoamento apresenta uma complexidade elevada associada à existência de arranjos diferentes das fases presentes e como consequência, a necessidade de uma modelagem diferenciada para os fenômenos de transferência interfacial dependendo do padrão de escoamento, evidenciando ainda mais a sua importância uma vez que até então a maioria dos estudos sobre escoamento multifásico se restringem ao escoamento bifásico.

A indústria do petróleo trabalha com atividades diversificadas, atuando desde a identificação de uma região petrolífera, perfuração do poço, até o refino e entrega do produto acabado. Durante todo o processo, o petróleo está sendo transportado através de tubulações. O fluxo de petróleo que ocorre nas tubulações caracteriza o escoamento multifásico devido à mistura de hidrocarbonetos e a formação de emulsões, a partir da coexistência de óleo, água e gás e muitas vezes areia.

Na atividade de perfuração de poços de petróleo comumente se trabalha com geometrias anulares circulares e por vezes elípticas. A geometria elíptica refere-se à ovalização do poço, causada pela passagem e oscilações da broca de perfuração.

Tubulações de seção transversal elíptica são utilizadas em diversos campos da engenharia e seu uso se justifica por apresentar condições favoráveis em relação às seções

circulares, por exemplo, no caso de trocadores de calor aletados, onde a geometria elíptica possui uma resistência externa menor ao escoamento de ar devido a sua forma aerodinâmica comparada com uma circular (ZHU *et al.*, 2004).

Nesse contexto, a proposta desta pesquisa visa dar uma contribuição no estudo do escoamento trifásico em dutos com seção transversal elíptica e auxiliar na compreensão dos fenômenos empregando a fluidodinâmica computacional como ferramenta de estudo. Observa-se, no entanto, que na literatura não existe trabalhos relacionados ao escoamento trifásico em dutos com seção transversal elíptica, o que torna esta pesquisa inédita na forma como será abordada.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo geral**

Estudar a hidrodinâmica do escoamento trifásico de óleo, água e gás em dutos cilíndricos de seção transversal elíptica utilizando a fluidodinâmica computacional (CFD). (Ansys CFX).

### **1.1.2 Objetivos específicos**

- Aplicar uma modelagem matemática para prever o comportamento da hidrodinâmica do escoamento trifásico de óleo, água e gás em dutos de seção transversal elíptica;
- Avaliar o comportamento da distribuição de pressão, velocidade e fração volumétrica de óleo, água e gás durante o escoamento no interior do duto sob diferentes condições operacionais;
- Comparar os resultados obtidos para os perfis de velocidade, queda de pressão com os dados reportados na literatura para o escoamento de fluidos em dutos circulares;
- Obter informações sobre a Potência de Bombeamento para cada fase em cada caso simulado.

# CAPÍTULO 2

## REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 Escoamento multifásico

Escoamentos multifásicos ocorrem comumente em diversas áreas das ciências e tecnologias. O controle e o monitoramento dos processos que regem o funcionamento das indústrias de processamento, alimentícia, de conversão de energia e de transporte de fluidos são de suma importância para a qualidade dos serviços e de ações de caráter preventivo no que concerne a intempéries que possam vir a acontecer, e com isso, protegendo a segurança dos trabalhadores e a eficiência dos processos (SELLI, 2007).

A denominação escoamento multifásico aplica-se quando mais de uma fase está escoando simultaneamente. Consiste em uma região do espaço onde coexistem dois ou mais fluidos imiscíveis separados por uma interface e escoando. Pode ser classificado segundo suas fases constituintes em escoamento monofásico (sólido, líquido ou gasoso), em escoamento bifásico (gás-sólido, gás-líquido, líquido-sólido, líquido-líquido) e escoamento trifásico (sólido-líquido-gás, líquido-líquido-gás, e outras variações) (SANTOS, 2014).

Para Vieira (2004), o escoamento é multifásico quando existe deslocamento simultâneo de fluidos que se apresentam em mais de uma fase. Por exemplo, água e ar, escoando através de uma tubulação, formam uma mistura bifásica, com uma fase líquida e uma fase gasosa.

Escoamentos multifásicos são comumente encontrados na produção, transporte e refino de petróleo e gás natural. Nesse 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 Escoamento trifásico líquido-líquido-gás em dutos circulares

Os escoamentos trifásicos ocorrem frequentemente na indústria do petróleo, por exemplo, na produção de hidrocarbonetos *onshore* e *offshore*. Algumas das razões para que isso ocorra são expostas por Bannwart *et al.* (2009).

- A água está comumente presente nos reservatórios e acompanha a produção de óleo e gás natural, a qual sobe naturalmente desde o reservatório, através dos poços produtores;
- A água é produzida devido à injeção de água ao reservatório no momento da produção;
- A mudança das condições pressão, volume e temperatura na extração dos hidrocarbonetos pode fazer com que os fluidos passem de sua fase líquida à fase gasosa.

O trabalho de Bannwart *et al.* (2004) é um dos estudos mais detalhados sobre os padrões de escoamento que podem ocorrer num escoamento trifásico em tubulação horizontal. Os padrões observados em tubulação horizontal por aqueles autores estão ilustrados na Figura 2.1. Este estudo foi feito numa tubulação horizontal de vidro de 2,84 cm de diâmetro interno. Os autores usam a nomenclatura seguinte: B- bolhas dispersas, A- anular, S- estratificadas e I- intermitentes. A descrição dos nove padrões de escoamento horizontal observados pelos autores é dada a seguir:

a) Bolhas de gás - Bolhas de óleo (Figura 2.1.a). Bolhas esféricas de óleo estão dispersas através da seção transversal do tubo. Essas bolhas seguem o perfil de velocidades da água (em velocidades altas perto do centro do tubo e em velocidades mais baixas perto das paredes dos tubos). A fase gasosa é também constituída por bolhas, embora localizadas na parte superior da seção transversal da tubulação, isto devido à menor densidade do gás.

b) Gás em bolhas – Óleo anular (Figura 2.1.b). A fase óleo é contínua e forma um corpo no centro do tubo com a água fluindo perto das paredes. O gás flui na mesma forma descrita no padrão anterior, mas também pode aparecer entre as ondas interfaciais do óleo, para baixas vazões de água.

c) Gás em bolhas – Óleo intermitente (Figura 2.1.c). A fase óleo apresenta-se como bolhas de tamanhos maiores que se fundiram para formar bolhas alongadas, escoando através da porção superior do tubo.

d) Gás em bolhas – Óleo estratificado (Figura 2.1.d). A fase óleo é estratificada e contínua, embora neste caso o óleo escoe muito perto da parte superior, devido à segregação gravitacional. No entanto, a água forma uma fina película entre o óleo e a parede da tubulação. A fase gasosa se apresenta como bolhas entre a fase óleo e a parede da tubulação.

e) Gás intermitente – Óleo em bolhas (Figura 2.1.e). O gás apresenta-se como bolhas grandes que muitas vezes ocupam quase toda seção transversal, com exceção de uma pequena fração de líquido. Estas bolhas de gás alongadas causam agitação forte na fase líquida, composta por uma fase de água contínua com bolhas de óleo dispersas.

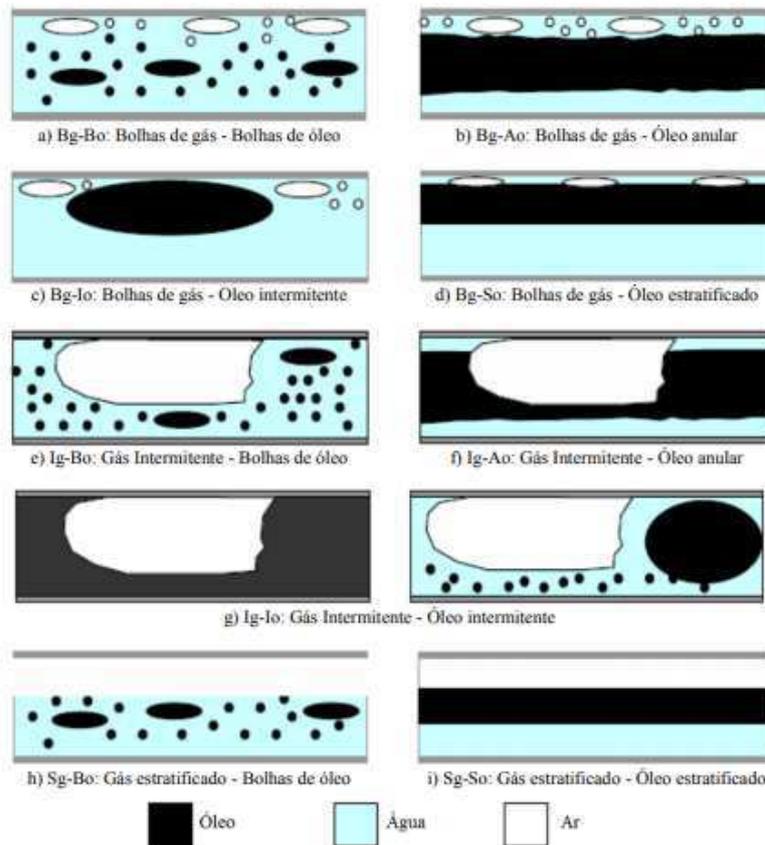
f) Gás intermitente- Óleo anular (Figura 2.1.f). A configuração dos líquidos neste padrão consistiu-se de uma fase de óleo contínua lubrificada por uma película de água ao redor, mesmo quando se tem a passagem de uma bolha de gás alongada.

g) Gás intermitente – Óleo intermitente (Figura 2.1.g). A fase líquida neste padrão está composta de uma fase de água contínua, que se mantém em contato com a parede do tubo, e óleo em bolhas alongadas. Também se apresenta como emulsão de pequenas gotículas de óleo na água.

h) Gás estratificado – Óleo em bolhas (Figura 2.1.h). A fase gasosa é contínua e estratificada na parte superior do tubo. A fase óleo tem bolhas esféricas que escoam na parte superior de uma fase contínua de água. Em alguns casos apresenta-se como uma interface ondulada.

i) Gás estratificado – Óleo estratificado (Figura 2.1.i). Este padrão de escoamento exhibe uma segregação por gravidade de três fases contínuas e ocorreu para baixas vazões de água, óleo e gás.

**Figura 2.1**-Padrões de escoamento trifásico em tubulação horizontal.



**Fonte:** Bannwart *et al.* (2004)

Para tubo vertical, pode-se citar o artigo de Bannwart *et al.* (2005). Eles continuam usando a água como a fase contínua e os nomes são dados aos padrões tendo essa fase como referência. O trabalho visualiza seis tipos de escoamentos (Figura 2.2). Os escoamentos tratados são:

a) Gás em bolhas - Óleo anular (Figura 2.2.a). Este padrão é semelhante ao escoamento óleo-água anular, com exceção de que aqui as bolhas de gás são vistas na fase de água. A interface óleo-água é tipicamente ondulada.

b) Gás intermitente - Óleo anular (Figura 2.2.b). A fase gás forma bolhas de grandes dimensões que rodeiam parcialmente um núcleo oleoso ainda contínuo.

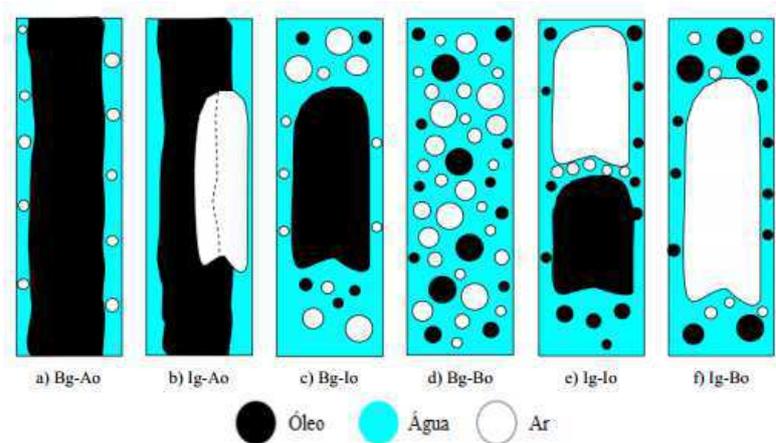
c) Gás em bolhas - Óleo intermitente (Figura 2.2.c). O gás forma pequenas bolhas e o óleo forma bolhas de grandes dimensões.

d) Gás em bolhas - Óleo em bolhas (Figura 2.2.d). Este padrão foi observado para gás e óleo com baixas velocidades, mas a água com velocidade suficientemente alta para manter o óleo separado em pequenas bolhas.

e) Gás intermitente - Óleo intermitente (Figura 2.2.e). Para o gás e o óleo se formam grandes bolhas que estão muito próximas uns das outras. Uma observação detalhada mostra que a bolha de óleo é sugada pela esteira deixada pela bolha de gás.

f) Gás intermitente - Óleo em bolhas (Figura 2.2.f). O gás forma bolhas grandes, de alta velocidade e o óleo é disperso em pequenas bolhas. Este padrão é tipicamente pulsante, indicando uma transição para o escoamento anular gás-líquido.

**Figura 2.2-**Padrões de escoamento trifásico em tubulação vertical.



**Fonte:** Bannwart *et al.* (2005).

De acordo com Belém (2009), o escoamento trifásico (gás-óleo-água) apresenta uma complexidade elevada associada à existência de arranjos diferentes das fases presentes. Como consequência, tem-se a necessidade de uma modelagem diferenciada para os fenômenos de transferência interfacial, dependendo do padrão de escoamento, evidenciando ainda mais a sua importância, uma vez que, até então, a maioria dos estudos sobre escoamento multifásico se restringem a escoamento bifásico.

Na literatura existem poucos trabalhos relacionados a escoamentos trifásicos (líquido-líquido-gás), abaixo são apresentados alguns trabalhos.

Barbosa (2012) analisou o escoamento não-isotérmico trifásico (água, óleo, gás) em duto circular vertical de 7 metros com vazamento, observando a influência de parâmetros

como viscosidade, velocidade inicial e efeitos da magnitude do vazamento sobre o escoamento. Dessa forma, verificou que o transiente de pressão é sensível às características termohidrodinâmicas do fluido.

Tavares (2012) propôs estudar numericamente, em um domínio tridimensional, a termofluidodinâmica do escoamento trifásico (óleo-água-gás) no interior de uma tubulação circular horizontal com presença de vazamento. A autora utilizou como ferramenta de estudo o Ansys CFX Versão 12. Foram avaliados os efeitos de fração volumétrica de água, óleo e gás na hidrodinâmica do escoamento para diferentes posições de vazamento. A autora concluiu que a posição do orifício de vazamento no tubo (superior, lateral e inferior) afetou o comportamento da evolução temporal da pressão total e da queda de pressão total para os escoamentos bifásico (óleo-água) e trifásico (óleo-água-gás). A análise do comportamento dinâmico das fases óleo, água e gás indicou uma tendência da estratificação do escoamento dos fluidos no tubo posicionado na horizontal: a água tendendo a escoar na região inferior do tubo, o gás no topo e o óleo na região central.

Santos (2014) propôs estudar o escoamento multifásico transiente, não-isotérmico e tridimensional de óleo, água e gás em dutos circulares verticais com e sem vazamento por meio de simulação numérica, utilizando o *software* Ansys CFX. Comprimento da tubulação, diâmetro de vazamento, temperatura de entrada foram os efeitos avaliados pela autora. Foi possível concluir que, quanto menor o diâmetro do furo, menor a variação da pressão e pressão total, dificultando a detecção de um vazamento. Para a velocidade superficial das fases, viu-se que, quanto maior a temperatura de entrada da mistura, maior o pico de velocidade superficial atingido ao longo do comprimento da tubulação para a fase gás; para as fases óleo e água não houve diferenças significativas da velocidade superficial próximo ao vazamento ao longo do comprimento do duto nas condições analisadas

Sarmiento *et al.* (2014b) realizaram uma análise numérica para investigar o comportamento de um escoamento multifásico (óleo pesado – água – gás) não isotérmico em dutos circulares tipo catenária através de simulação utilizando o CFX 11.0. Foi verificado que a maior fração de gás natural influencia diretamente na queda de pressão e transferência de calor.

Tavares *et al.* (2014) estudaram o escoamento trifásico (óleo, água e gás) em tubo horizontal (10 metros de comprimento) onde foi analisada a influência de um vazamento (diâmetro do vazamento = 16 mm) em diferentes posições (parte superior, lateral e inferior) da tubulação e verificou que o comportamento da queda de pressão sofre influência do posicionamento do vazamento.

## **2.1.2 Modelagem matemática para escoamentos multifásicos**

Dos diversos métodos matemáticos existentes para se estudar o escoamento multifásico, os mais utilizados são as abordagens Euleriana-Euleriana e o Euleriana-Lagrangeana. Estas se diferenciam conforme a consideração da fase dispersa. Para o modelo Euleriano-Euleriano tanto a fase contínua quanto a fase dispersa são consideradas meios contínuos. Já o modelo Euleriana-Lagrangeana é utilizado em sistemas dispersos (BARBOSA, 2012).

### **2.1.2.1 Abordagem Euleriana-Lagrangeana**

Na abordagem Euleriana-Lagrangeana, a fase líquida é tratada como contínua e resolvida através das equações de Navier-Stokes nas médias temporais; a fase dispersa é resolvida através do acompanhamento da trajetória de um grande número de partículas através do campo de escoamento contínuo, ou seja, para cada partícula resolve-se uma equação da conservação da quantidade de movimento em um sistema de referência que se movimenta com a partícula. O acompanhamento das partículas é realizado através da formação de um conjunto de equações diferenciais ordinárias no tempo, para cada partícula, e levam em consideração a posição, velocidade, temperatura e massa das mesmas (TAVARES, 2012).

A abordagem Euleriana-Lagrangeana resolve um sistema de equações de conservação (massa, quantidade de movimento, energia, etc.) para a fase contínua e, com os campos de velocidades desta fase, são calculadas as forças exercidas sobre as partículas dispersas (bolhas, gotas ou partículas sólidas). A partir das equações são calculadas as trajetórias destas partículas. A principal limitação deste modelo é que este é restrito a escoamentos dispersos e, com baixas frações volumétricas das fases dispersas, já que serão necessárias tantas equações quanto o número de partículas presentes no domínio (PALADINO, 2005).

### **2.1.2.2 Abordagem Euleriana-Euleriana**

A abordagem Euleriana-Euleriana caracteriza-se por considerar as diferentes fases do sistema como contínuas e interpenetrantes. Uma vez que o volume de uma fase não pode ser ocupado pela outra, surge o conceito de fração volumétrica das fases. As frações

volumétricas são consideradas como funções contínuas no espaço e no tempo cuja soma é igual a 1. Forma-se então um conjunto de equações de conservação da massa, quantidade de movimento e energia, para cada uma das fases. Essas equações são completadas através de relações constitutivas que são obtidas a partir de informações empíricas (SANTOS, 2010).

A abordagem Euleriana-Euleriana é útil e computacionalmente eficiente, quando as frações volumétricas das fases são comparáveis, ou quando as forças de campo, como gravidade, atuam na separação das fases, ou quando a interação entre as fases desempenha um papel significativo na determinação da hidrodinâmica do sistema (MASSAH; OSHINOWO, 2000).

## **2.2 Escoamento em dutos cilíndricos com seção transversal elíptica**

O meio mais econômico e seguro de movimentação de fluidos da indústria do petróleo são os dutos, por isso, estes são considerados um dos meios mais eficientes de escoamento de produção entre regiões produtoras, plataformas, refinarias, terminais marítimos, parques de estocagem e centros consumidores.

Alguns trabalhos envolvendo dutos elípticos são descritos a seguir:

Silva *et al.* (1999) verificaram o comportamento da variação de pressão e a eficiência térmica em dutos curvados de seção transversal elíptica e retangular para escoamento em regime laminar. Em geometrias elípticas, a queda de pressão não foi influenciada pela razão de aspecto. A eficiência térmica na seção curvada mostrou-se ser influenciada pela razão de aspecto e sendo afetada pelo escoamento secundário.

Matos (2003) comparou dutos elípticos utilizados em trocadores de calor com dutos de seção circular. Verificou-se que os dutos elípticos são mais eficientes energeticamente, possuindo uma área superficial maior, assim como, um fluxo mássico superior devido a sua maior área de seção transversal.

Voronova *et al.* (2006) analisaram o escoamento turbulento em dutos de seção elíptica com razão de aspecto de 1,5 para um número de Reynolds de 4000. Foi verificado o movimento do fluido na seção transversal, se deslocando a partir do centro ao longo do semi-eixo maior e retornando ao longo do semi-eixo menor. A velocidade máxima do fluxo secundário é cerca de 1,2% da média de velocidade, mostrando contribuição para distribuição de velocidade do escoamento.

Cadé *et al.* (2010) estudaram o escoamento interno de gás natural em regime laminar em dutos de seção elíptica, verificando a influência da razão de aspecto na hidrodinâmica do escoamento. Quando analisada a queda de pressão em dutos de mesma de área transversal e mesma vazão volumétrica, os dutos de seção circular apresentaram uma perda de pressão carga 50% menor que o duto de seção elíptica. Quando comparado um duto seção elíptica com razão de aspecto de 1,5, a queda de pressão no duto circular com diâmetro de 0,1 m foi 27,09% maior em função do aumento da vazão mássica de gás transportada. Logo, dutos elípticos podem se mostrar interessantes para o uso, dependendo da região onde se desejam transportar gás natural.

Lasode *et al.* (2013) analisaram o transporte de gás liquefeito de petróleo em dutos de seção transversal elíptica variando a razão de aspecto e a percentagem de butano e propano. O comportamento verificado por Cadé *et al.* (2010) se repetiu para os dutos de seção elíptica. Por outro lado, a queda de pressão apresentou um comportamento diretamente proporcional à percentagem de butano, isto é, quanto maior a fracção de butano na composição química do GLP, maior a perda de carga.

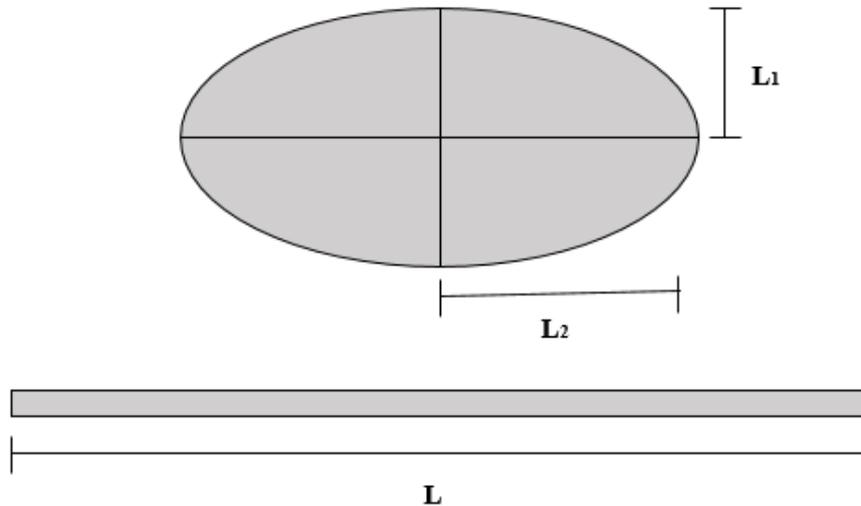
Sajadi *et al.* (2014) realizaram um estudo numérico e experimental sobre a transferência de calor e a resistência ao fluxo de tubos elípticos. Os resultados mostraram que os dutos elípticos apresentaram um melhor desempenho em relação a transferência de calor se comparados com o duto circular. Foi constatado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

Mota (2015) realizou um estudo sobre o escoamento turbulento de gás natural em duto de seção elíptica em regime transiente com e sem vazamento por meio da simulação numérica, adotando o modelo de turbulência k-epsilon. De acordo com o autor, a queda de pressão no duto mostrou-se influenciada pela velocidade de entrada, sendo este o comportamento esperado.

Oliveira (2016) analisou o escoamento laminar de óleo e água em um duto com seção transversal elíptica. Verificou-se que, quanto maior a razão de aspecto do duto cilíndrico com seção transversal elíptica, menor será a perda de carga no duto.

A Figura 2.3 representa um duto com seção transversal elíptica com suas características.

**Figura 2.3-**Duto cilíndrico com seção transversal elíptica



**Fonte:** Oliveira (2016)

A razão de aspecto é dada por:

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

onde,  $R_a$  é a razão de aspecto e  $L_1$  e  $L_2$  são respectivamente o semi-eixo menor e o semi-eixo maior da elipse.

### 2.3 Fluidodinâmica computacional

A Fluidodinâmica Computacional (ou CFD- do inglês, Computational Fluid Dynamics) é uma ferramenta computacional capaz de analisar sistemas que envolvem escoamento de fluidos, transferência de calor e outros fenômenos associados tais como dissipação, difusão, convecção, ondas de choque, superfícies deslizantes, camadas-limite e turbulência (LOMAX *et al.*, 1999).

A Fluidodinâmica Computacional tem como objetivo entender o comportamento físico no escoamento de fluidos em um volume de controle através de simulação computacional que discretiza as equações parciais que descrevem o escoamento (FORTUNA, 2000; SANTOS, 2009).

As principais vantagens de utilização da CFD são:

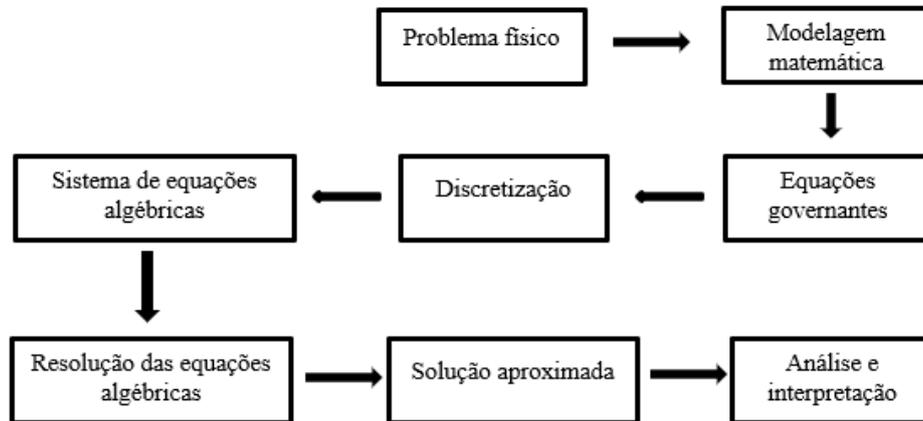
- Permite a previsão do desempenho de um novo produto antes que entre em operação ou em mercado, com vistas a evitar falhas;
- Facilidade na manipulação de diversas variáveis, o que dificilmente é possível experimentalmente;
- Desenvolvimento de estudos em condições extremas (altas pressões, altas temperaturas e toxicidade);
- Possibilidade de realizar diversas simulações alterando diferentes parâmetros em um tempo relativamente pequeno se comparado aos experimentos.

O princípio básico de funcionamento do CFD é a resolução numérica das equações que regem o escoamento dos fluidos, na forma apropriada, sobre uma região de interesse, desde que sejam conhecidas as condições fronteiras do sistema (MIGUEZ, 2008). Os modelos resultantes são expressos por equações que relacionam as grandezas relevantes entre si em um dado tempo e espaço e podem ser utilizadas para explicar ou prever o comportamento do sistema em diferentes situações (FORTUNA, 2012).

Para tratar o modelo computacional, é necessário expressar de forma adequada as equações e a região (domínio) em que elas são válidas. Inicialmente o domínio é discretizado, isto é, dividido em pontos. Ao conjunto dos pontos discretos dá-se o nome de malha. Em seguida, os termos que aparecem nas equações são escritos em função dos valores das incógnitas em pontos discretos adjacentes resultando em um conjunto de equações algébricas. Nessa etapa introduzem-se as condições de contorno do problema, condições iniciais, propriedades físicas dos fluidos envolvidos e os parâmetros de escoamento e, dessa forma, são resolvidas fornecendo a solução do problema (FORTUNA, 2012).

As etapas para resolução de um problema físico estão resumidas na Figura 2.4 a seguir.

**Figura 2.4**-Resumo das etapas para obtenção da resolução numérica.



**Fonte:** Adaptado de Fortuna (2012)

### 2.3.1 Procedimentos de solução em fluidodinâmica computacional

De modo a fornecer um meio mais fácil de resolver e analisar problemas de escoamentos de fluidos, o processo de simulação através da Dinâmica dos Fluidos Computacional pode ser dividido em três etapas importantes (VERTEEG; MALALASEKERA, 2007).

- a) Pré-processador;
- b) Solver;
- c) Pós-processador.

#### 2.3.1.1 Pré-processador

Este é o primeiro passo na construção e análise de um modelo de escoamento. O pré-processamento envolve as seguintes etapas:

Definição da geometria da região de interesse: domínio computacional;

- a) Geração da malha: subdivisão do domínio em um número menor de volumes;
- b) Seleção dos fenômenos físicos e químicos que serão modelados e simulados;
- c) Definição das propriedades dos fluidos, como massa específica, viscosidade, etc;

- d) Especificação das condições de contorno apropriadas nos elementos da malha associados ao contorno do domínio.

#### 2.3.1.2 Solver

O solver implementa as técnicas numéricas de solução e seus parâmetros para resolver os problemas físicos de modo apropriado. Resumidamente, os métodos numéricos que formam a base do solver passam pelos seguintes passos:

- a) Integração das equações de conservação em todos os volumes de controle do domínio;
- b) Discretização: Conversão das equações integrais resultantes em um sistema de equações algébricas;
- c) Solução das equações algébricas.

#### 2.3.1.3 Pós-processador

Envolve a organização e interpretação dos dados do campo de escoamento previsto, a produção de imagens, gráficos e animações para facilitar a análise dos resultados. Conseguimos visualizar:

- Visualização da geometria e da malha;
- Visualização de linhas de corrente;
- Visualização da trajetória das partículas;
- Saída gráfica colorida;
- Gráficos de contornos;
- Gráficos de vetores.

### 2.3.2 *Software fluent*

O Ansys FLUENT é um programa de computador de última geração para modelagem de fluxo de fluidos, transferência de calor e reações químicas em geometrias complexas. Ele está escrito na linguagem de computador C, permitindo aproveitar ao máximo a flexibilidade e a potência oferecida pela linguagem.

O *software* FLUENT compreende uma série de opções para a modelagem de uma vasta gama de problemas como, escoamento laminares ou turbulentos, de fluidos compressíveis ou incompressíveis, no estado estacionário ou transiente e com ou sem

mudança de fase. Assim sendo é necessário que o *software* recorra a modelos matemáticos para modelar os fenômenos físicos (OLIVEIRA 2012).

O FLUENT disponibiliza três modelos diferentes para sistemas multifásicos: o Modelo de Volume de Fluido (VOF), o Modelo de Mistura e o Modelo Euleriano, descritos sucintamente a seguir, de acordo com FLUENT.

### **2.3.2.1 Modelo de volume de fluido (VOF)**

O modelo VOF é indicado para sistemas compostos por dois ou mais fluidos imiscíveis em que a posição da interface entre os fluidos é de interesse. Neste modelo, um único conjunto de equações de transporte é compartilhado pelos fluidos, e a fração volumétrica de cada fase é obtida em cada volume de controle do domínio de cálculo. O modelo VOF resolve apenas equações para a mistura como um todo, acarretando em limitações quando aplicado a sistemas com diferença de velocidade marcante entre as fases. O modelo é aplicável a escoamentos de superfícies livres, movimento de bolhas grandes e problemas estacionários ou transientes envolvendo interface líquido-gás.

Abaixo são apresentadas algumas limitações do modelo VOF segundo Bestion (2012).

- a) 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;
- b) Somente uma das fases pode ser definida como um gás compressível. Não há limitação para utilização de líquidos compressíveis;
- c) Somente é possível utilizar o solver baseado em pressão. O solver baseado em densidade não está disponível com o VOF.

### **2.3.2.2 Modelo Euleriano**

O Modelo Euleriano é o mais complexo dos modelos multifásicos. Este modelo resolve um conjunto de equações que incluem a quantidade de movimento e conservação da massa para cada fase. O acoplamento da pressão é conseguido através dos coeficientes da troca entre as fases. A maneira de garantir este acoplamento depende do tipo de fases

envolvidas, por exemplo, escoamentos granulares (líquido-sólido) são tratados de maneira diferente dos escoamentos não-granulares (líquido-líquido)(SANTOS, 2008).

Para escoamento granular, as propriedades são obtidas pela aplicação da teoria cinética. A troca de quantidade de movimento entre as fases depende também do tipo de mistura que está sendo modelada. Aplicações do Modelo Euleriano incluem escoamentos em colunas de bolhas, risers, suspensão de partículas, leitos fluidizados, entre outros (SANTOS, 2008).

### **2.3.2.3 Modelo de mistura**

O modelo de mistura é um modelo multifásico usado para modelar fluxos multifásicos onde as fases se movem em velocidades diferentes, mas assumem o equilíbrio local em escalas curtas de comprimento espacial.

Este modelo é aplicado a sistemas com duas ou mais fases (fluido ou partícula), sendo as fases tratadas como contínuas. O modelo de mistura pode ser obtido a partir do modelo Euleriano quando as equações de conservação de quantidade de movimento e de energia para as fases são somadas, obtendo-se uma equação de conservação das mesmas grandezas para a mistura como um todo. Este modelo resolve a equação de quantidade de movimento aplicada à mistura e prescreve a velocidades relativas das fases dispersas. O modelo é aplicável em partículas com baixo carregamento, escoamento com bolhas, sedimentação e separação em ciclones (SANTOS, 2010).

### **2.3.3 Geração de malhas computacionais**

Uma malha computacional é constituída por linhas e pontos. Os pontos são considerados onde essas linhas se interceptam e servem de orientação para o cálculo de propriedades físicas baseado num modelo matemático. Uma malha computacional nada mais é que uma representação ou a “discretização” do plano físico utilizado na simulação numérica (DEL FRARI, 2009).

Bortoli (2000) classifica as malhas computacionais em dois tipos: malhas estruturadas onde cada volume interno tem sempre o mesmo número de vizinhos e a numeração dos mesmos tem uma sequência natural, e a malha não estruturada, quando tem-se o número de vizinhos variando de volume para volume, ficando difícil estabelecer uma regra de ordenação. Existe ainda outro tipo de classificação, as malhas híbridas, que

consiste na utilização simultânea de malhas estruturadas e não-estruturadas. Os tipos de malhas estão representadas na Figura 2.5.

a) Malha estruturada

A malha estruturada se caracteriza por ter sempre o mesmo número de elementos vizinhos (apresentam uma linha de orientação dos elementos). Para sua construção exige-se procedimentos especiais que podem ser bastante trabalhosos.

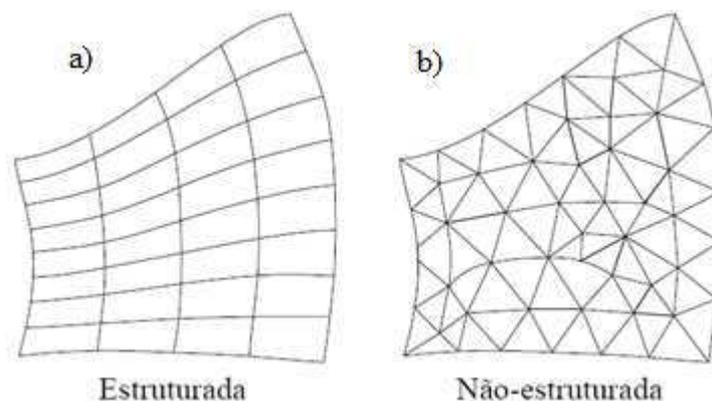
A construção de malhas estruturadas pode ser feita através da técnica de multibloco, que tem como base a associação de blocos com diferentes subdomínios geométricos (SOUZA, 2011).

Em comparação com as malhas não-estruturadas, a elaboração da malha estruturada demanda maior tempo, porém, estas malhas geram menor número de células e conseqüentemente requer menor capacidade de armazenamento computacional.

b) Malha não-estruturada

As malhas não-estruturadas podem ter, para cada elemento, número e formato distinto dos vizinhos e por isso não apresenta uma clara lei de formação para seus elementos. Diante desta versatilidade, é um tipo de malha que tem maior capacidade de adaptação a geometrias mais robustas possibilitando a discretização de domínios complexos mais facilmente.

**Figura 2.5**-Tipos de malhas computacionais: a) estruturada e b) não estruturada.



**Fonte:** Santos (2010)

# CAPÍTULO 3

## METODOLOGIA

As atividades foram desenvolvidas 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 (CCT/UFCG).

### 3.1 Problema físico e a geometria

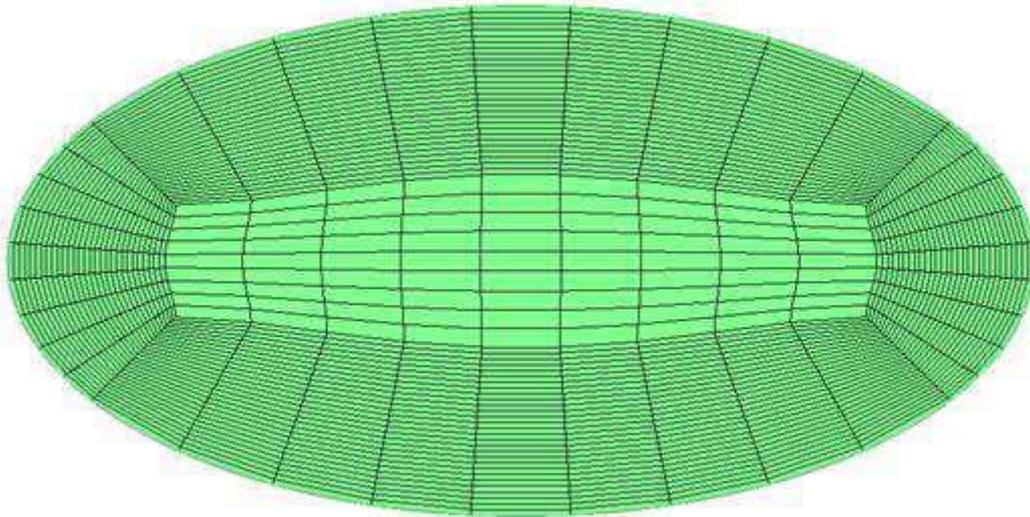
O problema em estudo consiste na análise hidrodinâmica do escoamento trifásico água, óleo e gás em uma tubulação com seção transversal elíptica com comprimento de 10 metros. A Tabela 3.1 apresenta todas as características da tubulação utilizada.

**Tabela 3.1**-Dados geométricos do duto em estudo.

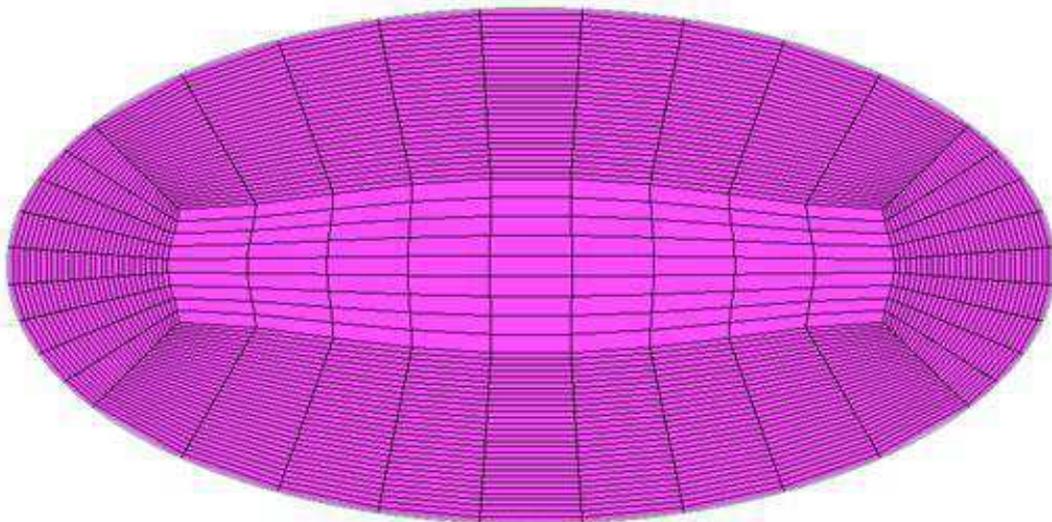
Parâmetros	Valor
Comprimento do eixo maior ( $L_2$ )	0,2 m
Comprimento do eixo menor ( $L_1$ )	0,1 m
Comprimento do duto ( $L$ )	10,0 m
Razão de aspecto( $L_2/L_1$ )	2,0 m
Diâmetro hidráulico ( $D_h$ )	0,2594 m

A geometria e a malha foram geradas no *software* ANSYS ICEM CFD. A geometria é composta por uma entrada, uma saída e a parede do duto. A malha construída é constituída por 721941 elementos. Na Figura 3.1 é apresentado as regiões de entrada, saída e a parede do duto.

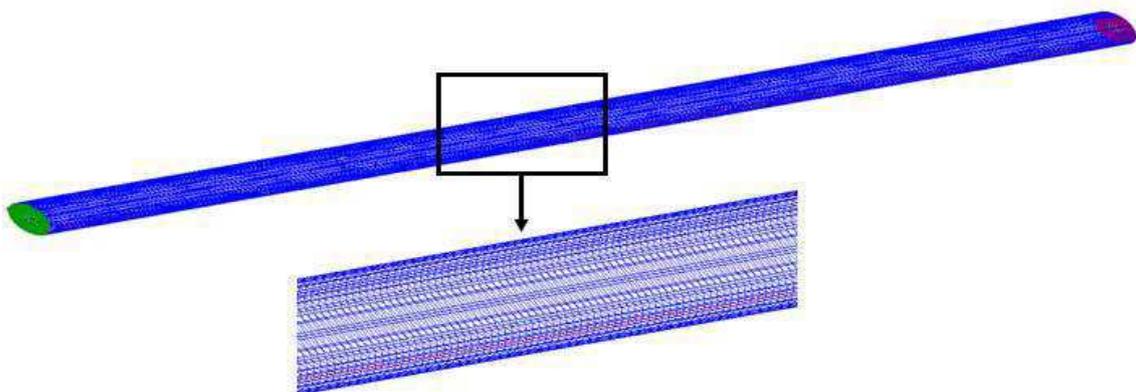
**Figura 3.1**-Representação da malha utilizada na simulação. a) entrada b) saída e c) parede



a)



b)



c)

### 3.2 Modelagem matemática

A modelagem matemática de escoamentos multifásicos de fluidos imiscíveis é fundamentada nas equações básicas da mecânica dos fluidos. Tais equações são expressas pelas leis de conservação da massa, da quantidade de movimento e da energia.

No presente trabalho, foi estudado o caso específico de um escoamento trifásico óleo-água-gás incompressível, isotérmico e sem transferência de massa entre as fases, através do duto. Como se trata de um escoamento isotérmico, as equações governantes foram expressas pelas equações da continuidade e da quantidade de movimento.

Para a modelagem do escoamento óleo-água-gás foi aplicado o modelo de mistura. Este modelo adota a hipótese do contínuo, o qual considera as fases como contínua e interpenetrante, sendo que a fração volumétrica é a variável que quantifica cada fase. A hipótese do contínuo considera que toda matéria é contínua, ou seja, não existem vazios no interior do fluido e a interpenetrabilidade das fases considera que ambas as fases podem ocupar o mesmo volume de controle, não tendo porém um espaço definido para cada uma.

Para analisar o escoamento trifásico água-óleo-gás foram adotadas as seguintes considerações:

- Escoamento isotérmico;
- Domínio tridimensional;
- Regime permanente;
- Escoamento laminar;
- Propriedades físico-químicas dos fluidos constantes;

As equações que compõe o modelo matemático são as seguintes:

a) Equação da Continuidade

A equação da continuidade para a mistura é dada pela Equação (3.1), como refere:

$$\nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m) = 0 \quad (3.1)$$

na qual  $\vec{v}_m$  é a velocidade média em massa da mistura, sendo dada por:

$$\vec{V}_m = \frac{\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{v}_k}{\rho_m} \quad (3.2)$$

onde,  $\alpha_k$  é a fração volumétrica para cada fase  $k$  de um número  $n$  de fases. A massa específica  $\rho_m$  da mistura é obtida pela Equação (3.3), dado por:

$$\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \quad (3.3)$$

b) Equação da quantidade de movimento

A equação da quantidade de movimento para a mistura, representada pela Equação (3.4), pode ser obtida pela soma das equações da quantidade de movimento individuais para todas as fases. Assim pode-se escrever:

$$\nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m \vec{v}_m) = -\nabla p + \nabla \cdot \left[ \mu_m (\nabla \vec{v}_m + \nabla \vec{v}_m^T) \right] + \rho_m \vec{g} + \vec{F} + \nabla \cdot \left( \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{v}_{dr,k} \vec{v}_{dr,k} \right) \quad (3.4)$$

onde  $\vec{F}$  é força de corpo,  $\vec{g}$  é a aceleração da gravidade,  $p$  é a pressão manométrica,  $\vec{v}_{dr,k}$  é a diferença de velocidade de uma fase  $k$  com relação a velocidade média da mistura que é representada pela Equação (3.5).

$$\vec{v}_{dr,k} = \vec{v}_k - \vec{v}_m \quad (3.5)$$

A viscosidade da mistura  $\mu_m$  é obtida pela Equação (3.6).

$$\mu_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \mu_k \quad (3.6)$$

No modelo de mistura, a força de arraste  $f_{drag}$  é definida pela Equação (3.7).

$$\vec{V}_{pq} = \frac{\tau_p}{f_{drag}} \frac{(\rho_p - \rho_m)}{\rho_p} \vec{a} \quad (3.7)$$

onde  $\vec{V}_{pq}$  é a velocidade relativa,  $\tau_p$  é o tempo de relaxamento da partícula,  $\vec{a}$  aceleração e  $\rho_p$  a densidade da fase secundária.

A velocidade relativa é definida como a velocidade de uma fase secundária (p) em relação à velocidade da fase primária (q):

$$\vec{V}_{pq} = \vec{V}_p - \vec{V}_q \quad (3.8)$$

O tempo de relaxamento da partícula é dado pela Equação (3.9).

$$\tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu_q} \quad (3.9)$$

$d_p$  é o diâmetro da partícula da fase secundária,  $\vec{a}$  é a aceleração da partícula da fase secundária.

A aceleração  $\vec{a}$  é dada por:

$$\vec{a} = \vec{g} - (\vec{V}_m \cdot \nabla) \vec{V}_m - \frac{\partial \vec{V}_m}{\partial t} \quad (3.10)$$

A força de arraste  $f_{drag}$  foi modelada de acordo com o modelo de Schiller-Naumann

$$f_{drag} = \begin{cases} 1 + 0.15Re^{0.687} & Re \leq 1000 \\ 0.0183Re & Re > 1000 \end{cases} \quad (3.11)$$

### 3.3 Condições de contorno e propriedades dos fluidos adotados

O *software* FLUENT permite selecionar diversos tipos de condições de contorno como pressão, velocidade, vazão mássica, periodicidade, simetria, entre outras.

Para as simulações realizadas neste trabalho as principais condições de contorno utilizadas foram:

- a) Condição de contorno para escoamento na entrada;
- b) Condição de contorno para escoamento na saída;
- c) Condição de contorno de escorregamento nulo na parede.

Tais condições de contorno são apresentadas na Tabela 3.2, a seguir.

**Tabela 3.2**-Condições de contorno utilizadas nas simulações.

Condições de Contorno	
Entrada	Velocidade do óleo especificada Velocidade da água especificada Velocidade do gás especificada Fração volumétrica da água especificada Fração volumétrica do gás especificada (Ver Tabela 3.5)
Parede	No <i>slip</i> (não escorregamento) $u = v = w = 0$ m/s
Saída	Pressão estática = 0,98 atm

As propriedades dos fluidos utilizados na simulação estão apresentadas na Tabela 3.3 abaixo.

**Tabela 3.3**-Propriedades dos fluidos utilizados na simulação.

Propriedades físicas	Óleo	Água	Gás
Viscosidade dinâmica (kg/m-s)	4,0 <sup>(1)</sup>	8,89 x 10 <sup>-4(1)</sup>	1,831 x 10 <sup>-5(2)</sup>
Densidade kg/m <sup>3</sup>	905,0 <sup>(1)</sup>	997,0 <sup>(1)</sup>	1,185 <sup>(2)</sup>
Diâmetro da partícula (m)	-----	9 x 10 <sup>-4</sup>	9 x 10 <sup>-4</sup>
	Água/Óleo	Água/Gás	Óleo/gás
Tensão superficial (N/m)	0,067 <sup>(3)</sup>	0,072 <sup>(3)</sup>	0,026 <sup>(3)</sup>

Fonte: <sup>(1)</sup>Oliveira (2016), <sup>(2)</sup>Banco de dados do Ansys CFX (2015), <sup>(3)</sup>Silva (2012)

Na Tabela 3.4 estão representadas as considerações adotadas para o problema físico estudado e a solução numérica.

**Tabela 3.4**-Condições gerais do modelo matemático e solução numérica.

<b>Modelo</b>	Não homogêneo
<b>Acoplamento P-V</b>	SIMPLE
<b>Discretização Espacial</b>	First Order Upwind
<b>Gradiente</b>	Least Squares Cell Based
<b>Pressão</b>	PRESTO
<b>Critério de convergência</b>	Resíduo médio quadrático igual a $10^{-8}$

### 3.4 Comparação da solução numérica com a solução analítica

Para verificar a solução numérica das equações governantes, foi realizada uma simulação para um escoamento trifásico (óleo, água e gás) com características de escoamento monofásico de óleo, assumindo uma fração volumétrica de água e gás iguais a 0,0001 e 0,0001 respectivamente, em regime permanente e isotérmico. A metodologia utilizada foi proposta por Kakaç et al. (1987), onde foi definida que na região totalmente desenvolvida, o perfil de velocidade para um fluxo de fluido monofásico em regime laminar em um duto cilíndrico com seção transversal elíptica é dado por:

$$w(x, y) = \frac{1}{2\mu} \left( -\frac{dp}{dz} \right) \frac{L_1^2 L_2^2}{L_1^2 + L_2^2} \left( 1 - \frac{y^2}{L_1^2} - \frac{x^2}{L_2^2} \right) \quad (3.12)$$

Ou ainda,

$$\frac{w}{w_m} = 2 \left( -\frac{x^2}{L_2^2} - \frac{y^2}{L_1^2} \right) \quad (3.13)$$

Com

$$w_m = -\frac{1}{4\mu} \frac{dp}{dz} \left( \frac{L_1^2}{1 + \left(\frac{L_1}{L_2}\right)^2} \right) \quad (3.14)$$

onde  $w_m$  é a velocidade média do escoamento,  $\mu$  a viscosidade,  $L_1$  e  $L_2$  o semi-eixo menor e maior respectivamente da elipse e  $p$  a pressão.

A área da seção transversal ( $A$ ), o perímetro ( $\hat{P}$ ) e o diâmetro hidráulico ( $D_h$ ) e um duto com seção transversal elíptica são dados por (KAKAÇ et al., 1987; ROHSENOW et al., 1998):

$$A = \pi L_1 L_2 \quad (3.15)$$

$$\hat{P} = 4L_2 E \left[ 1 - \left( \frac{L_1}{L_2} \right)^2 \right] \quad (3.16)$$

$$D_h = \frac{\pi L_1}{E \left[ 1 - \left( \frac{L_1}{L_2} \right)^2 \right]} \quad (3.17)$$

onde  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $E$  e  $D_h$  representam o semi-eixo menor, semi-eixo maior, a integral elíptica completa de 2ª ordem, e o diâmetro hidráulico respectivamente (WOLFRAM, 2003).

O comprimento de entrada hidrodinâmico ( $L_{ceh}$ ) e o coeficiente de fricção na região completamente desenvolvida em regime laminar ( $\hat{f}_{rcd}$ ) em um duto com seção transversal elíptica são dados por (KAKAÇ et al., 1987):

$$L_{ceh} = \frac{0.5132}{\left[ 1 + \left( \frac{L_1}{L_2} \right)^2 \right]} \left\{ \frac{E \left[ 1 - \left( \frac{L_1}{L_2} \right)^2 \right]}{\pi} \right\}^2 D_h Re_{Dh} \quad (3.18)$$

$$\hat{f}_{rcd} Re_{Dh} = 2 \left[ 1 + \left( \frac{L_1}{L_2} \right)^2 \right] \left\{ \frac{\pi}{E \left[ 1 - \left( \frac{L_1}{L_2} \right)^2 \right]} \right\}^2 \quad (3.19)$$

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:

$$\Delta p_{reh}^* = \frac{P_{z=0} - P}{\rho w_m^2 / 2} = \hat{f}_{reh} \frac{4z}{D_h} \quad (3.20)$$

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

$$\hat{f}_{reh} Re_{Dh} = \frac{\Delta p_{reh}^*}{\left(\frac{2z}{D_h Re_{Dh}}\right)} \quad (3.21)$$

sendo

$$\Delta p_{reh}^* = \frac{2(1-\eta)(1+3\eta) - (1+\eta)^2 \ln \eta^3}{3(1+\eta)^2} \quad (3.22)$$

onde  $\eta$  é obtido a partir da seguinte equação:

$$16 \left[ 1 + \left(\frac{L_1}{L_2}\right)^2 \right] \left\{ \frac{\pi}{E \left[ 1 - \left(\frac{L_1}{L_2}\right)^2 \right]} \right\}^2 \frac{z}{D_h Re_{Dh}} = \eta^2 - 1 - \ln \eta^2 \quad (3.23)$$

A queda de pressão para a região completamente desenvolvida ( $\Delta p_{rcd}$ ) é dada pela Equação (3.24), como segue:

$$\Delta p_{rcd} = \frac{32(L - L_{ceh})\mu \vec{V}}{D^2} \quad (3.24)$$

A pressão total é dada por:

$$\Delta p_{total} = \Delta p_{reh} + \Delta p_{rcd} \quad (3.25)$$

### 3.5 Casos estudados

A partir da geometria construída, simulou-se diferentes casos como mostra a Tabela 3.5, a seguir.

**Tabela 3.5**-Casos simulados na presente pesquisa.

Caso	Fração Volumétrica			Velocidade (m/s)			Efeito da Gravidade	Posição do duto
	Óleo	água	gás	óleo	água	gás		
1	0,9998	0,0001	0,0001	1,0	1,0	1,0	não	horizontal
2	0,96	0,02	0,02	2,0	2,0	2,0	não	horizontal
3	0,94	0,03	0,03	2,0	2,0	2,0	não	horizontal
4	0,90	0,05	0,05	2,0	2,0	2,0	não	horizontal
5	0,94	0,04	0,02	2,0	2,0	2,0	não	horizontal
6	0,94	0,03	0,03	4,0	2,0	2,0	não	horizontal
7	0,94	0,03	0,03	2,0	2,0	2,0	sim	horizontal
8	0,94	0,03	0,03	2,0	2,0	2,0	sim	vertical
9	0,94	0,03	0,03	4,0	2,0	2,0	sim	horizontal
10	0,94	0,03	0,03	2,0	4,0	2,0	sim	horizontal
11	0,94	0,03	0,03	2,0	2,0	4,0	sim	horizontal
12	0,94	0,03	0,03	3,0	2,0	1,0	sim	horizontal

Para o cálculo da potência de bombeamento foram utilizadas as Equações (3.26) e (3.27), dadas por:

$$Q = f \cdot v \cdot A \quad (3.26)$$

$$\dot{W} = Q \cdot \Delta p \quad (3.27)$$

onde Q é a vazão volumétrica, f a fração volumétrica, v a velocidade, A área da seção transversal do duto,  $\dot{W}$  a potência e  $\Delta p$  a diferença de pressão.

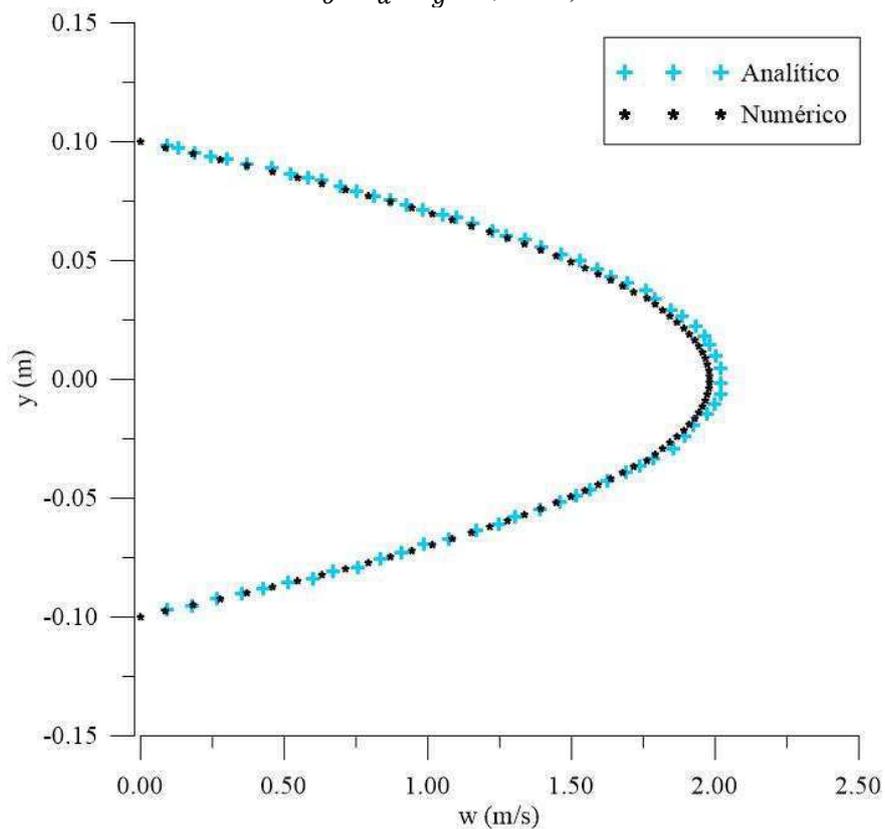
# CAPÍTULO 4

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Validação

Afim de validar a metodologia utilizada neste trabalho, realizou-se uma simulação multifásica (caso 1). Devido as frações volumétricas da água e do gás serem próximas de zero, tem-se praticamente um escoamento monofásico de óleo o que permite realizar a comparação dos resultados numéricos com os resultados analíticos, do perfil de velocidade e queda de pressão. A Figura 4.1 apresenta comparação entre os resultados analítico e numérico do perfil de velocidade da fase óleo em  $z = 4,0$  m, onde o escoamento encontra-se completamente desenvolvido hidrodinamicamente.

**Figura 4.1**-Comparação entre os resultados analíticos e numéricos do perfil de velocidade do óleo em  $z = 4,0$  m, para o caso1 ( $f_o = 0,9998$ ;  $f_a = 0,0001$ ;  $f_g = 0,0001$ ;  $w_o = w_a = w_g = 1,0$  m/s).



Analisando os perfis de velocidade, verifica-se uma boa aproximação entre os resultados numérico e analítico, indicando que o modelo matemático e a malha numérica estão coerentes conseguindo prever o escoamento no interior do duto, adequadamente.

Na comparação entre os resultados obtidos para a queda de pressão analítica e numérica ilustrada pela Tabela 4.1, modificou-se apenas o valor da variável de comprimento de entrada hidrodinâmica, onde no analítico seu valor foi de 0,928892 m e no numérico seu valor foi de 3,54 m. O erro obtido foi de 2,5%, para ambos os casos

**Tabela 4.1-** Comparação da variação da pressão no duto, analítica e numérica para o caso 1 ( $f_o = 0,9998$ ;  $f_a = 0,0001$ ;  $f_g = 0,0001$ ;  $w_o = w_a = w_g = 1,0$  m/s).

Parâmetro	Valor	Método de determinação
$L_{ceh}$ (m)	0,928892	Analítico
$\Delta p_{reh}$ (kPa)	2,38556	
$\Delta p_{rcd}$ (kPa)	18,1422	
$\Delta p_{total}$ (kPa)	20,5278	
$\Delta p_{total \text{ numérico}}$ (kPa)	21,0500	Numérico
Erro (%)	2,5	
$L_{ceh}$ (m)	3,54	Numérico
$\Delta p_{reh}$ (kPa)	7,60792	Analítico
$\Delta p_{rcd}$ (kPa)	12,9200	
$\Delta p_{total}$ (kPa)	20,5279	
$\Delta p_{total \text{ numérico}}$ (kPa)	21,0500	Numérico
Erro (%)	2,5	

Na Tabela 4.1, o erro foi calculado da seguinte forma:

$$Erro(\%) = \frac{\Delta p_{numérico} - \Delta p_{total}}{\Delta p_{total}} \times 100 \quad (4.1)$$

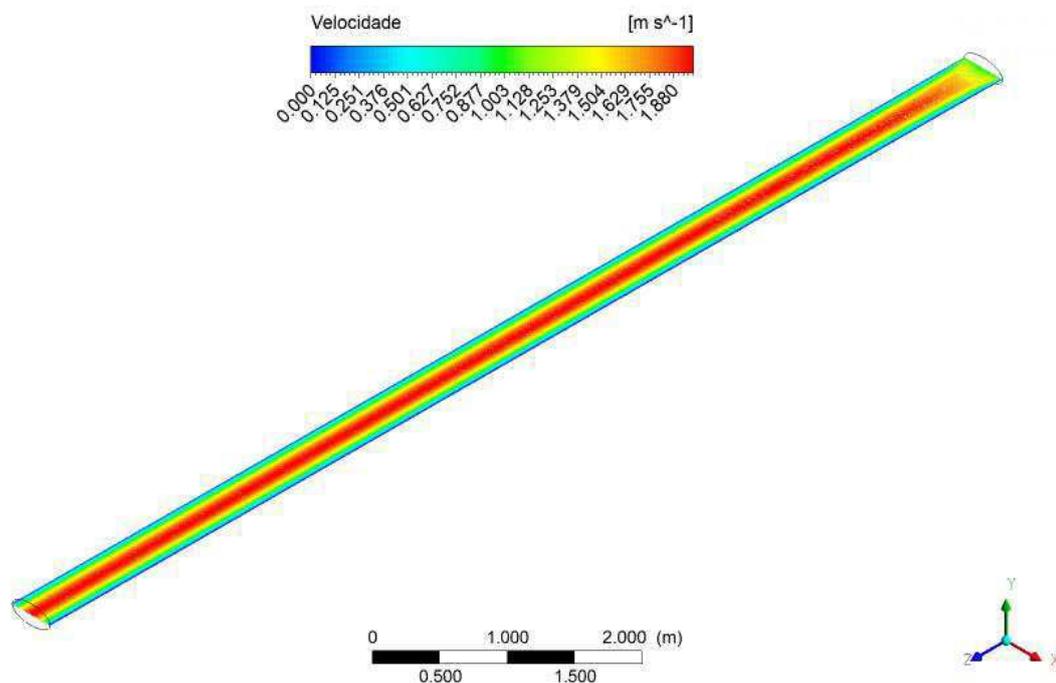
## 4.2 Análise hidrodinâmica dos casos estudados

### 4.2.1 Distribuição de velocidade

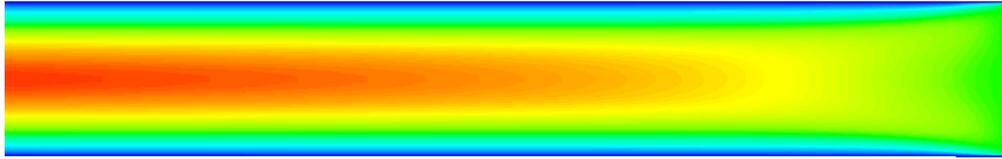
Na Figura 4.2 está representado o campo de velocidade do óleo ao longo da tubulação no plano ZX para o caso 1. Nota-se que, no centro do duto a velocidade é máxima, já nas paredes do duto a velocidade é nula, devido a condição de não escorregamento. Como este efeito é transmitido a todas as camadas de fluidos adjacentes, ocorre a formação da camada limite hidrodinâmica. A velocidade do fluido na parede do duto é nula e a mesma vai crescendo no sentido da direção do centro do duto onde, atinge um valor máximo de 1,88 m/s em  $z = 3,54$  m.

As Figuras 4.3 a 4.5 apresentam as distribuições de velocidade sobre o plano XY em diferentes posições axiais em  $z$  (0,5 m; 2,0 m e 3,54 m) para o caso 1. Pode-se observar que, por causa da condição de não escorregamento, no centro do duto a velocidade é máxima, já nas paredes do duto a velocidade é nula. Nota-se também que, na Figura 4.5 tem-se o escoamento completamente desenvolvido, ou seja, a distribuição de velocidade sobre o plano XZ não varia mais ao longo das outras posições axiais para  $z > 3,54$  m.

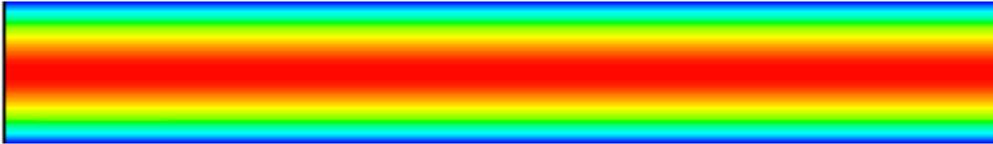
**Figura 4.2-** Campo de Velocidade do óleo ao longo da tubulação no plano ZX, para o caso 1 ( $f_o = 0,9998$ ;  $f_a = 0,0001$ ;  $f_g = 0,0001$ ;  $w_o = w_a = w_g = 1,0$  m/s)



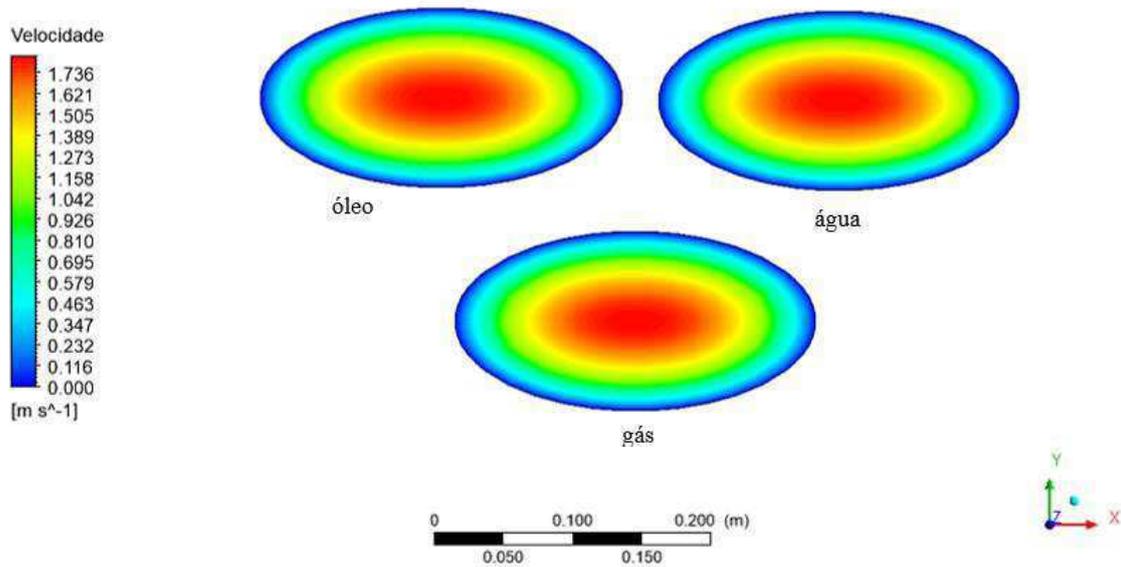
Detalhe da região de entrada



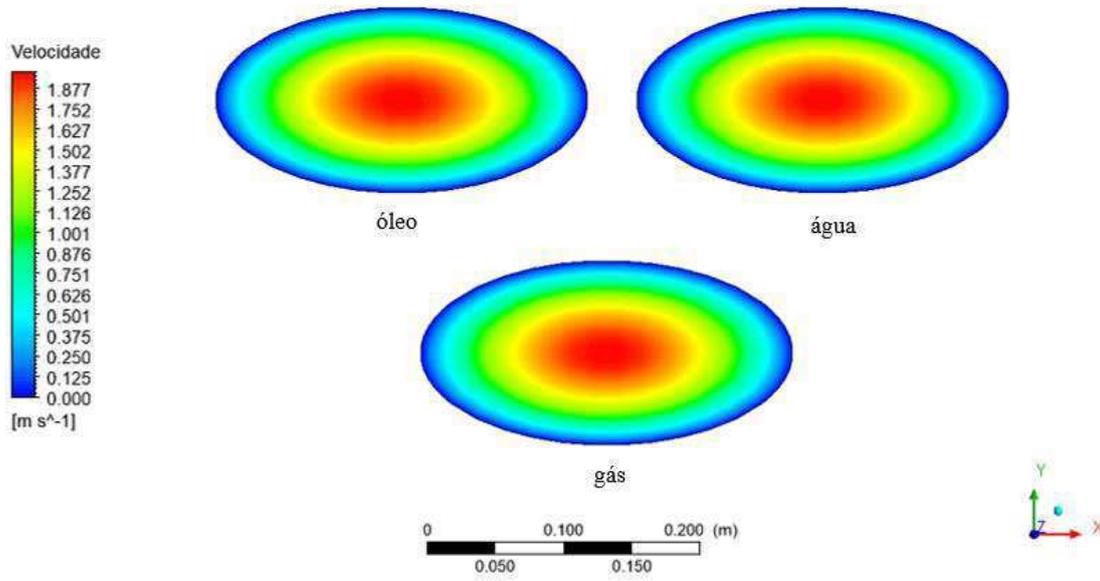
Detalhe da região de saída



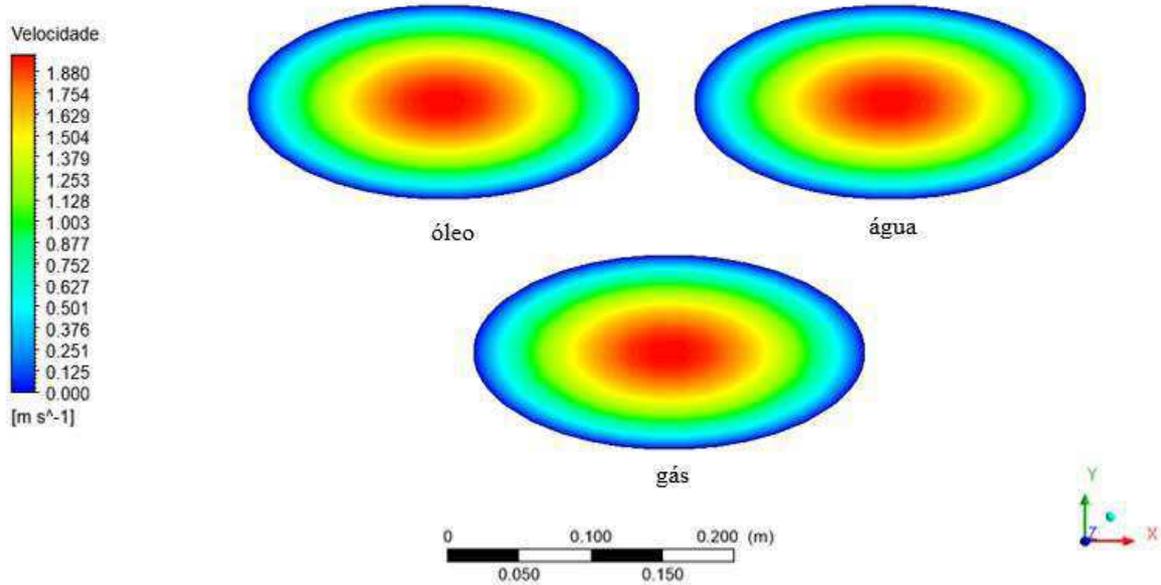
**Figura 4.3**-Distribuição de velocidade das fases óleo, água e gás no plano XY, para o caso 1 na posição  $z = 0,5$  m.



**Figura 4.4-** Distribuição de velocidade das fases óleo, água e gás no plano XY, para o caso 1 na posição  $z = 2,0$  m.

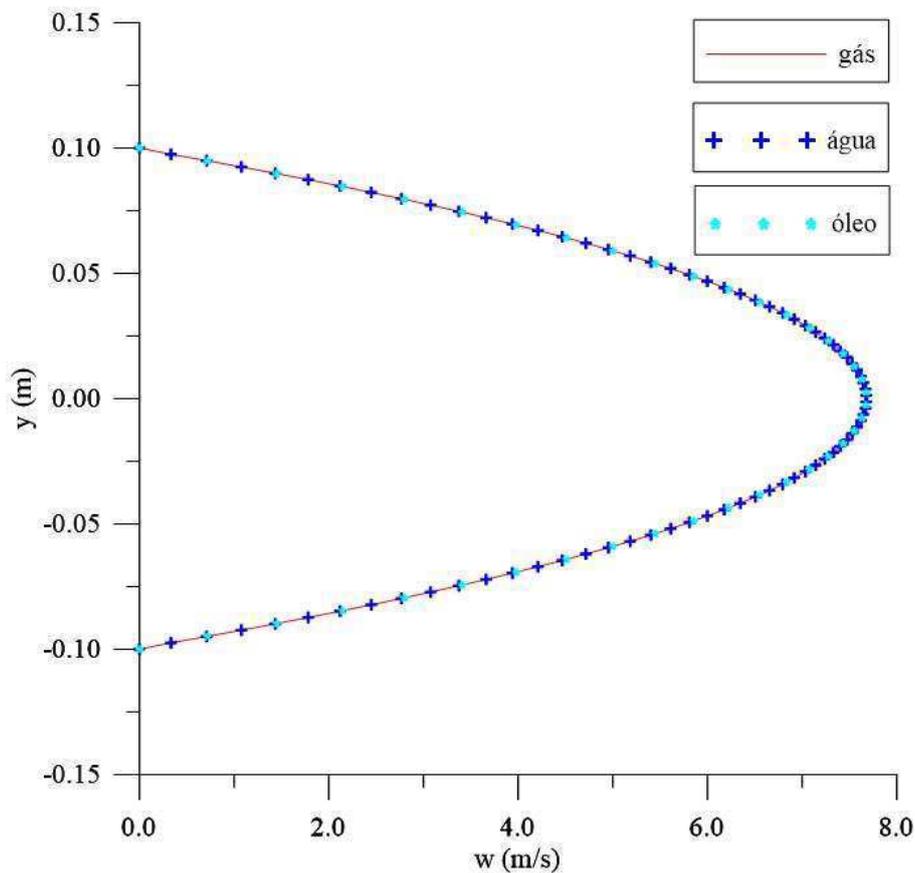


**Figura 4.5** Distribuição de velocidade das fases óleo, água e gás no plano XY, para o caso 1 na posição  $z = 3,54$  m.



A Figura 4.6 apresenta a distribuição de velocidade para as fases óleo, água e gás para o caso 9 ( $f_o = 0,94$ ;  $f_a = 0,03$ ;  $f_g = 0,03$ ;  $w_o = 4,0$  m/s;  $w_a = 2,0$  m/s e  $w_g = 2,0$  m/s), na posição axial  $z = 8$  m. Percebe-se que a água e o gás passam a se deslocar com a mesma velocidade do óleo. Isso acontece devido à força de arraste, onde a fase óleo arrasta as partículas das fases água e gás devido, as mesmas apresentarem fração volumétrica e diâmetro muito pequeno.

**Figura 4.6**-Perfil da velocidade da fase óleo, água e gás na posição axial  $z = 8$  m para o caso 9



Analisando a Tabela 4.2, onde são apresentados os valores do comprimento de entrada hidrodinâmico para cada caso simulado, observa-se que, para os casos 2, 3 e 4, a medida que a fração volumétrica do óleo diminui e, conseqüentemente, a da água e a do gás aumentam, o comprimento da entrada hidrodinâmica aumenta. Isso ocorre devido a diminuição da viscosidade da mistura fluida no escoamento devido a presença da água e pelo não surgimento de emulsões, pois segundo Windhab *et al.* (2005) para haver a formação de emulsão o diâmetro da partícula tem que ser menor que 10nm. Já os casos 3,

7 e 8 apresentaram o mesmo comprimento de entrada hidrodinâmica, portanto para estes casos o efeito da gravidade e a posição do duto (se vertical ou horizontal) não influenciou no resultado do  $L_{ceh}$ . Para os casos 7 e 9, onde a velocidade da fase óleo é diferente, verificou-se que, quanto maior a velocidade de entrada do fluido (fase óleo) maior será o comprimento de entrada hidrodinâmica.

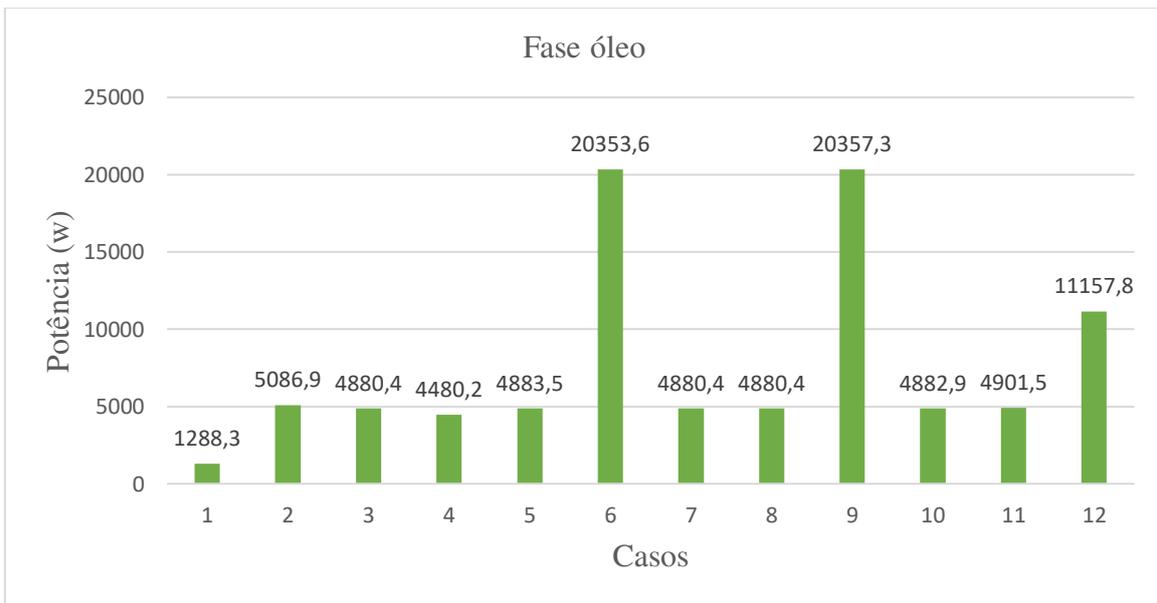
**Tabela 4.2-**Comprimento de entrada hidrodinâmica para todos os casos simulados.

Caso	Fração Volumétrica			Velocidade (m/s)			$L_{ceh}$ (m) (teórico)	$L_{ceh}$ (m) (numérico)	Re
	óleo	água	gás	óleo	água	gás			
1	0,9998	0,0001	0,0001	1,0	1,0	1,0	0,92889	3,5443	58,83
2	0,96	0,02	0,02	2,0	2,0	2,0	1,85778	6,7266	119,47
3	0,94	0,03	0,03	2,0	2,0	2,0	1,85778	6,8354	121,50
4	0,90	0,05	0,05	2,0	2,0	2,0	1,85778	7,0886	118,34
5	0,94	0,04	0,02	2,0	2,0	2,0	1,85778	6,9620	122,88
6	0,94	0,03	0,03	4,0	2,0	2,0	3,71557	8,2278	228,42
7	0,94	0,03	0,03	2,0	2,0	2,0	1,85778	6,8354	121,50
8	0,94	0,03	0,03	2,0	2,0	2,0	1,85778	6,8354	121,50
9	0,94	0,03	0,03	4,0	2,0	2,0	3,71557	7,0886	228,42
10	0,94	0,03	0,03	2,0	4,0	2,0	1,85778	5,5696	125,70
11	0,94	0,03	0,03	2,0	2,0	4,0	1,85778	5,4430	125,70
12	0,94	0,03	0,03	3,0	2,0	1,0	2,78668	7,8480	179,80

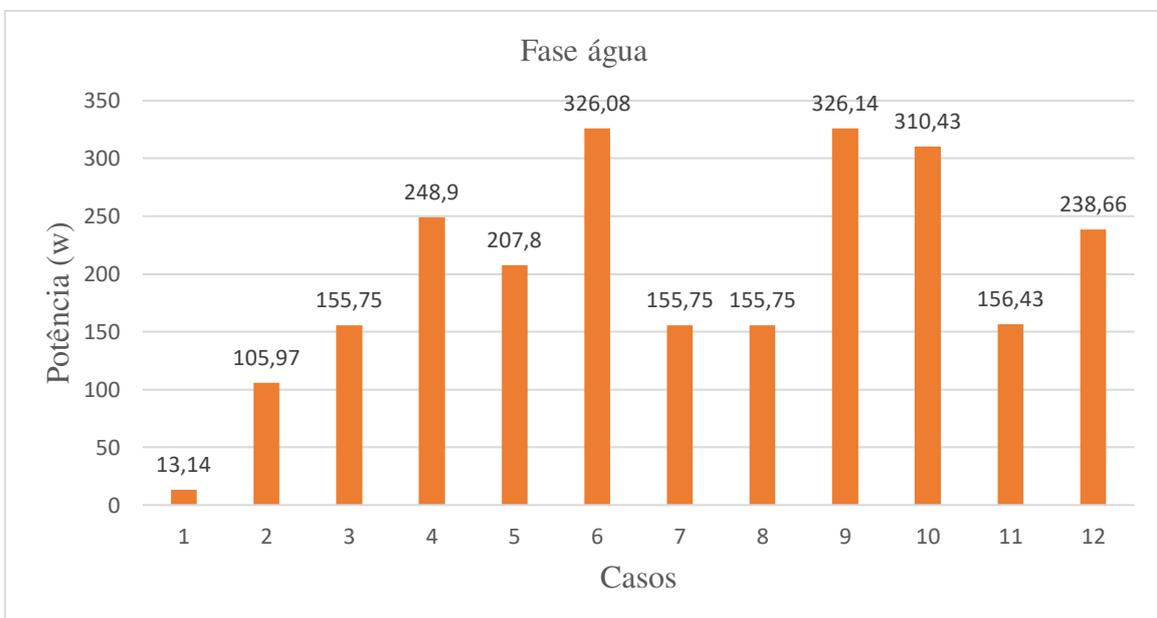
O cálculo do  $L_{ceh}$  teórico foi feito utilizando-se a Equação 3.18. Essa equação leva em consideração um escoamento monofásico. Ao refazer comparações entre os  $L_{ceh}$  teórico e o numérico, percebe-se uma discrepância entre os resultados teóricos e numéricos. Isso nos mostra que a equação utilizada para o cálculo do  $L_{ceh}$  apresenta pouca precisão, ao ser aplicado para escoamento multifásico.

As Figuras 4.7 a 4.9, apresentam os valores da potência de bombeamento para os casos simulados. Pode-se observar que os maiores valores deste parâmetro são encontrados para a fase óleo, nos casos 6 e 9. Isto ocorre devido a velocidade da fase óleo para estes casos ser alta em relação aos demais, o que dá uma vazão volumétrica maior, além de uma queda de pressão mais alta. Para o caso 6 obteve-se ( $\Delta p = 86.2664$  kPa) e caso 9 ( $\Delta p = 86.2820$  kPa). Os cálculos foram feitos em função da fração volumétrica de cada fase.

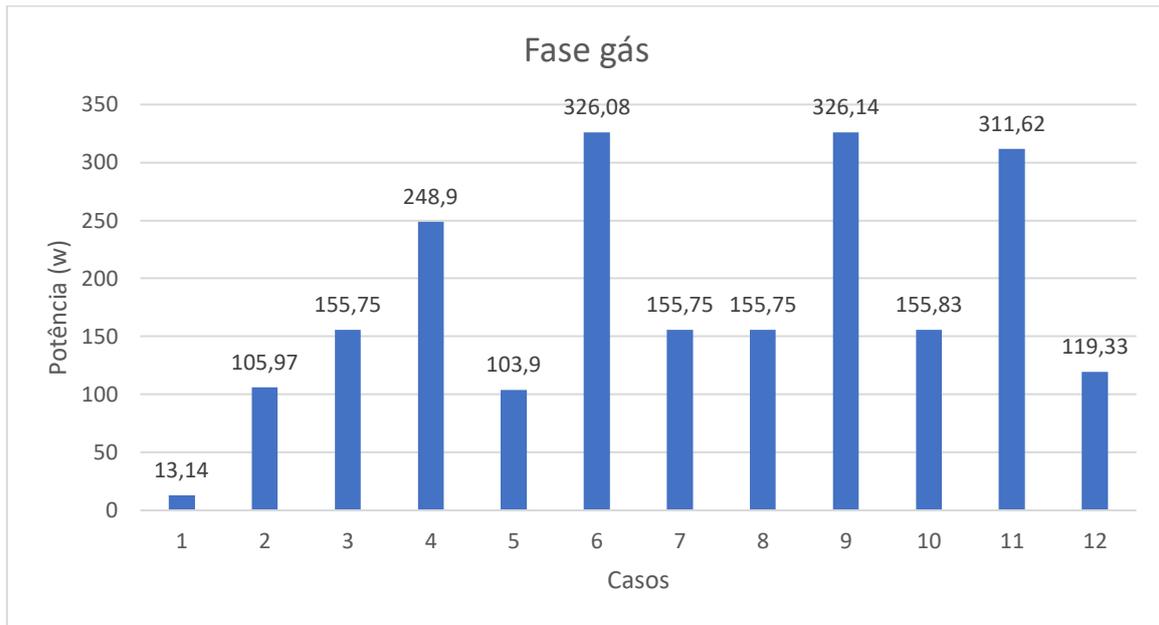
**Figura 4.7** -Potência de bombeamento da fase óleo.



**Figura 4.8** - Potência de bombeamento da fase água.



**Figura 4.9** -Potência de bombeamento da fase gás.



#### 4.2.2 Distribuição de pressão

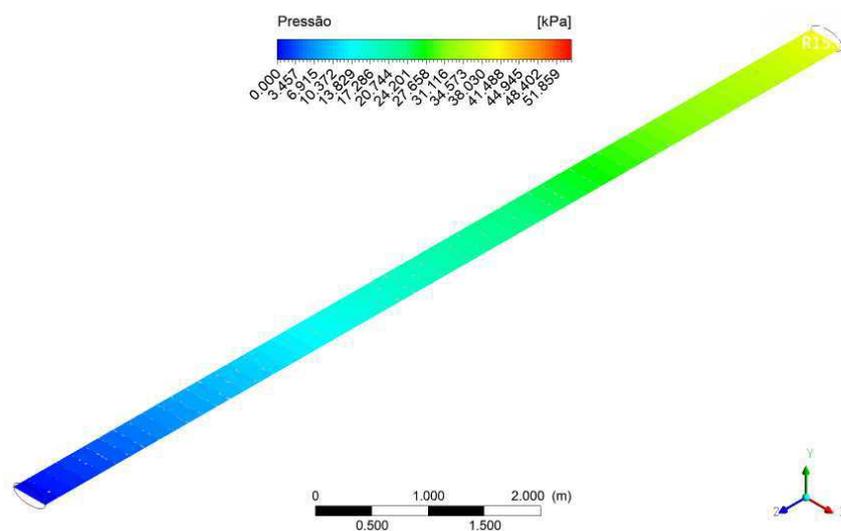
Fazendo a análise dos dados apresentados na Tabela 4.3, sobre a queda de pressão, para todos os casos simulados, observa-se que, para os casos 2, 3 e 4 (que tem seus campo de pressão ilustrados nas Figuras 4.10, 4.11, e 4.12 respectivamente), quanto menor a fração volumétrica do óleo, menor é a diferença de pressão entre a entrada e a saída do duto. Isso ocorre devido a uma diminuição do atrito decorrente de uma maior fração volumétrica de água.

Analisando os casos 7 e 9, observa-se que a velocidade da fase óleo influenciou no resultado da diferença de pressão entre a entrada e a saída do duto. Para o caso 7, a diferença de pressão foi de 41,206 kPa e para o caso 9 foi de 86,282 kPa. Portanto pode-se dizer que, com o aumento da velocidade da fase óleo a queda de pressão no duto tende a ser maior nos casos avaliados

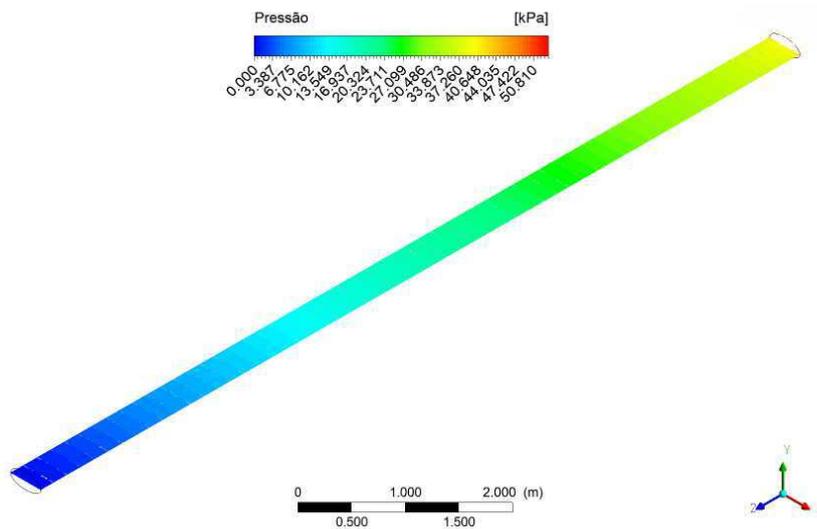
**Tabela 4.3-**Queda de pressão no duto para todos os casos simulados.

Caso	Fração Volumétrica			Velocidade (m/s)			Efeito da gravidade	Posição do duto	$\Delta p$ (kPa)
	óleo	água	gás	óleo	água	gás			
2	0,96	0,02	0,02	2,0	2,0	2,0	não	horizontal	42,0540
3	0,94	0,03	0,03	2,0	2,0	2,0	não	horizontal	41,2060
4	0,90	0,05	0,05	2,0	2,0	2,0	não	horizontal	39,5081
5	0,94	0,04	0,02	2,0	2,0	2,0	não	horizontal	41,2320
6	0,94	0,03	0,03	4,0	2,0	2,0	não	horizontal	86,2664
7	0,94	0,03	0,03	2,0	2,0	2,0	sim	horizontal	41,2060
8	0,94	0,03	0,03	2,0	2,0	2,0	sim	vertical	41,2060
9	0,94	0,03	0,03	4,0	2,0	2,0	sim	horizontal	86,2820
10	0,94	0,03	0,03	2,0	4,0	2,0	sim	horizontal	41,2268
11	0,94	0,03	0,03	2,0	2,0	4,0	sim	horizontal	41,3840
12	0,94	0,03	0,03	3,0	2,0	1,0	sim	horizontal	63,1388

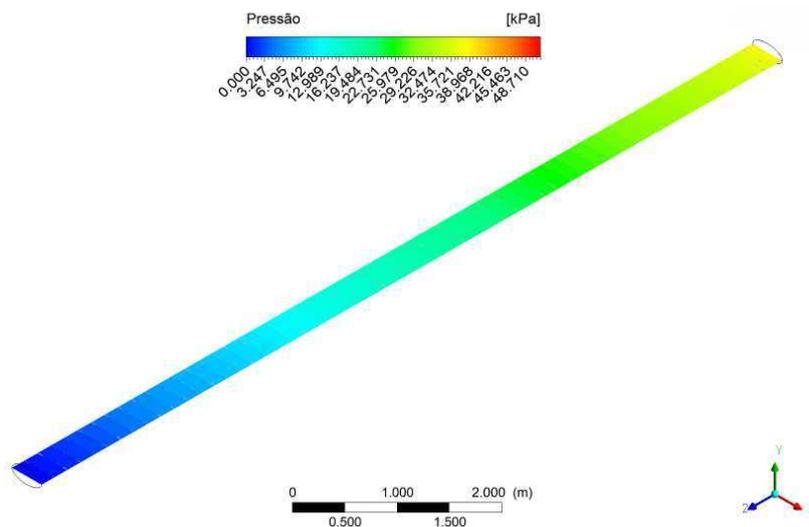
**Figura 4.10-**Distribuição de pressão da mistura fluida sobre o plano longitudinal ZX, para o caso 2 ( $f_o = 0,96$ ;  $f_a = 0,02$ ;  $f_g = 0,02$ ;  $w_o = w_a = w = 2,0$  m/s).



**Figura 4.11**-Distribuição de pressão da mistura fluida sobre o plano longitudinal ZX, para o caso 3 ( $f_o = 0,94$ ;  $f_a = 0,03$ ;  $f_g = 0,03$ ;  $w_o = w_a = w_g = 2,0$  m/s).



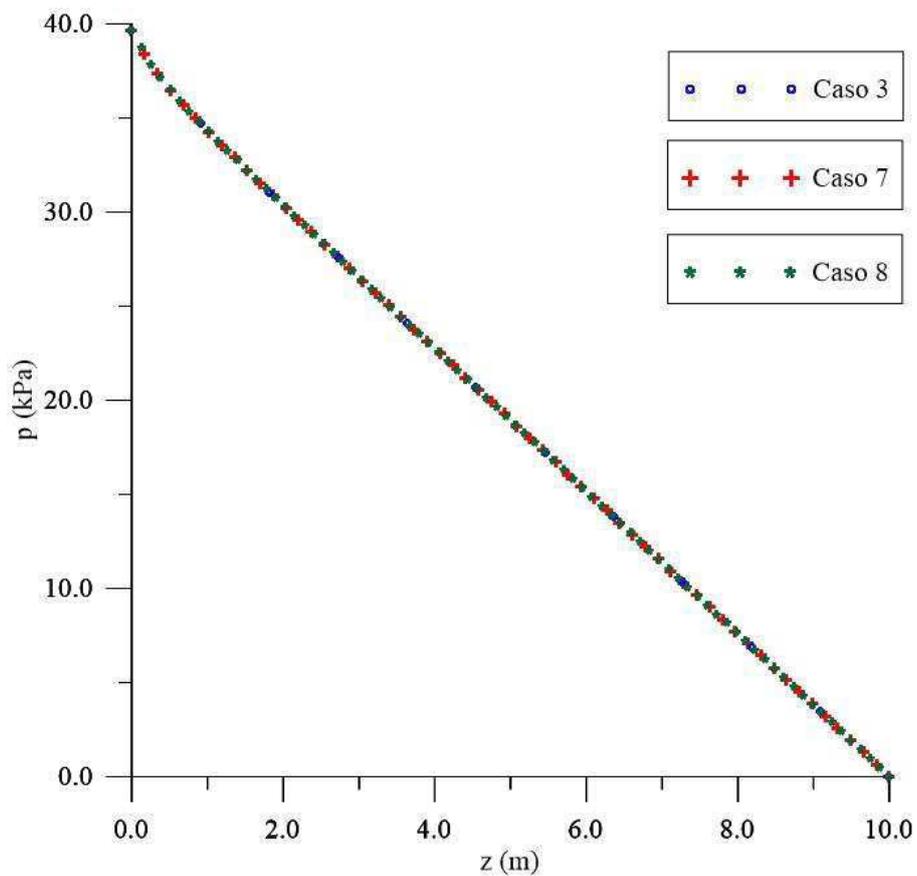
**Figura 4.12**-Distribuição de pressão da mistura fluida sobre o plano longitudinal ZX, para o caso 4 ( $f_o = 0,90$ ;  $f_a = 0,05$ ;  $f_g = 0,05$ ;  $w_o = w_a = w_g = 2,0$  m/s).



A Figura 4.13, ilustra o comportamento da pressão média na seção ao longo do duto para os casos 3, 7 e 8. Ao analisar-se os casos mencionados, os quais apresentam as mesmas

frações volumétricas e velocidades para as fases presentes, percebe-se que o efeito da gravidade e a posição do duto (se vertical ou horizontal) não influenciou no resultado da queda de pressão, já que ambos apresentaram o mesmo resultado. Contudo, vale salientar que esta análise não inclui a pressão hidrostática devido ao peso da coluna do líquido, no caso do duto vertical.

**Figura 4.13**-Perfil da pressão média na seção ao longo do duto para os casos 3, 7 e 8

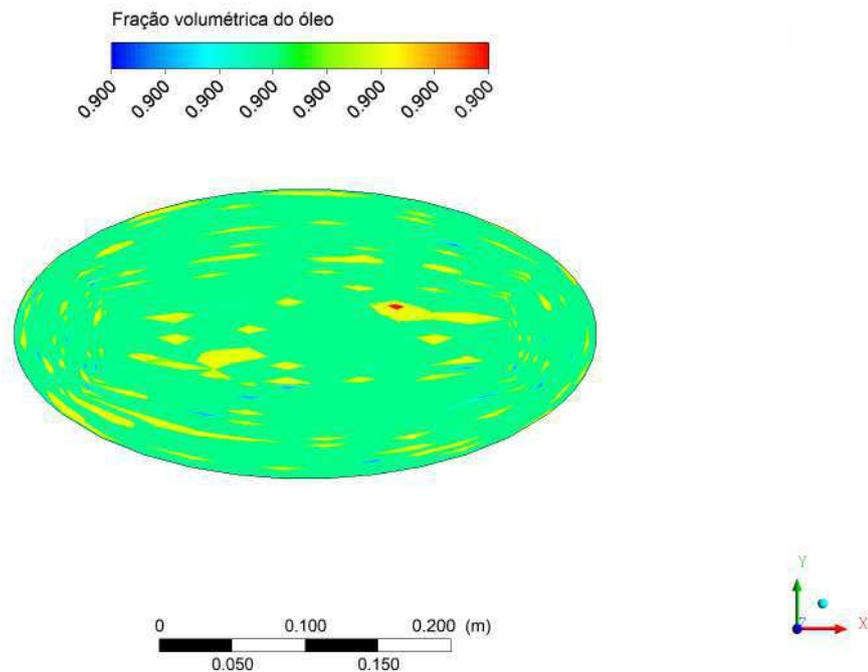


Ao comparar-se o perfil de pressão para os casos 9 (86,2820 kPa), 10 (41,2268 kPa) e 11 (41.3840 kPa), percebe-se que o aumento da velocidade das fases água e gás não influenciou tanto o resultado da queda de pressão como a velocidade da fase óleo. Isso ocorre devido as frações volumétricas das fases água e gás serem muito pequenas em relação da fase óleo.

### 4.2.3 Distribuição da fração volumétrica

Analisando a Figura 4.14, observa-se que, tanto a água como o gás, encontram-se totalmente dispersos na fase óleo. A análise foi feita no plano transversal XY para o caso 4 ( $f_o = 0,90$ ;  $f_a = 0,05$ ;  $f_g = 0,05$ ;  $w_o = w_a = w_g = 2,0$  m/s) em  $z = 8$  m.

**Figura 4.14-** Distribuição da fração volumétrica do óleo no plano XY, para o caso 4, em  $z = 8$  m



### 4.2.4 Comparação entre dutos de seção transversal circular com dutos de seção transversal elíptica

Foram realizadas três comparações analíticas envolvendo dutos com seção transversal circular e dutos com seção transversal elíptica. Para cada caso comparativo, os dutos circular e elíptico apresentaram a mesma área da seção transversal. Foi utilizada a mesma velocidade de entrada de óleo para todos os casos comparados (1,0 m/s). Como ambos os dutos possuem a mesma área de seção transversal e mesma velocidade de entrada da fase óleo, a vazão mássica da fase óleo é a mesma. A Tabela 4.4 resume essa comparação.

**Tabela 4.4**-Comparação entre um duto com seção transversal circular com um de seção transversal elíptica. a) comparativo 1 b) comparativo 2 e c) comparativo 3

a) Comparativo 1

<b>Duto</b>	<b>L<sub>1</sub> (m)</b>	<b>L<sub>2</sub> (m)</b>	<b><math>w_o = w_a = w_g</math> (m/s)</b>	<b><math>\Delta p</math> (kPa)</b>
Seção transversal circular	0,141421	0,141421	1,0	20,0633
Seção transversal elíptica	0,100000	0,200000	1,0	20,5278

b) Comparativo 2

<b>Duto</b>	<b>L<sub>1</sub> (m)</b>	<b>L<sub>2</sub> (m)</b>	<b><math>w_o = w_a = w_g</math> (m/s)</b>	<b><math>\Delta p</math> (kPa)</b>
Seção transversal circular	0,158113	0,158113	1,0	19,4828
Seção transversal elíptica	0,100000	0,250000	1,0	20,3836

c) Comparativo 3

<b>Duto</b>	<b>L<sub>1</sub> (m)</b>	<b>L<sub>2</sub> (m)</b>	<b><math>w_o = w_a = w_g</math> (m/s)</b>	<b><math>\Delta p</math> (kPa)</b>
Seção transversal circular	0,173205	0,173205	1,0	18,9022
Seção transversal elíptica	0,100000	0,300000	1,0	20,2956

Comparando a variação de pressão obtida para o duto circular com a variação de pressão obtida para o duto elíptico, pode-se observar que, para os comparativos 1, 2 e 3, a variação de pressão para o duto elíptico foi de 2,3 %, 4,6 % e 7,3 % (respectivamente) maior que a do duto circular. Portanto, para as mesmas condições operacionais e mesma área transversal, o duto circular se mostra mais eficiente e econômico se comparado ao duto elíptico. No entanto, esta comparação foi feita utilizando-se uma abordagem analítica (equações utilizadas 3.20, 3.24 e 3.25).

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

#### 5.1 Conclusões

A partir dos resultados obtidos e discussões feitas neste trabalho, pode-se concluir que:

- ✓ O modelo matemático utilizado foi capaz de descrever o escoamento trifásico (óleo, água e gás) em dutos com seção transversal elíptica;
- ✓ Os resultados dos perfis de velocidade analítico e numérico para o escoamento monofásico apresentaram ótima concordância, validando assim a metodologia utilizada neste trabalho;
- ✓ Foi possível avaliar o comportamento da distribuição de velocidade, pressão e fração volumétrica para cada fase durante o escoamento no interior do duto sob diferentes condições operacionais;
- ✓ Quanto maior for a velocidade do óleo na entrada duto, maior será a queda de pressão ao longo da tubulação, fixado a fração volumétrica das fases;
- ✓ O escoamento apresenta uma maior velocidade no centro da tubulação e menores velocidades nas regiões próximas as paredes devido a condição de não escorregamento;
- ✓ Quanto maior for a fração volumétrica do óleo maior será a perda de carga no interior do duto;
- ✓ Quanto maior for a velocidade da fase óleo maior será a vazão volumétrica e a queda de pressão, conseqüentemente tem-se uma potência de bombeamento maior;
- ✓ Fazendo-se a comparação analítica entre dutos com seção transversal elíptica e dutos com seção transversal circular com as mesmas condições operacionais, pode-se comprovar que os dutos circulares apresentaram uma melhor eficiência em relação aos dutos elípticos, no que diz respeito ao transporte de petróleo pesado.

## 5.2 Sugestões futuras

Como sugestões para futuras pesquisas pode-se citar:

- ✓ Estudar o escoamento não-isotérmico óleo, água e gás em dutos elípticos;
- ✓ Estudar o escoamento óleo, água e gás em dutos elípticos com vazamento;
- ✓ Estudar o escoamento turbulento de óleo, água e gás em dutos elípticos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BANNWART, A. C.; RODRIGUEZ, O. M. H.; TREVISAN, F. E.; VIEIRA, F. F.; CARVALHO, C. H. M. **Flow patterns and pressure gradient in horizontal, upward inclined and vertical heavy oil-water-gas flows: experimental investigation and full-scale experiments.** 3rd International Symposium on Two-phase Flow Modelling and Experimentation. Pisa. Italy. 2004.

BANNWART, A. C.; VIEIRA, F. F.; CARVALHO, C. H. M.; OLIVEIRA, A. P. **Water-assisted Flow of heavy oil and gas in a vertical pipe.** SPE International Thermal Operations and Heavy Oil Symposium. Alberta. Canadá. 2005.

BANNWART, A. C.; RODRIGUEZ, O. M. H.; TREVISAN, F. E.; VIEIRA, F. F.; CARVALHO, C. H. M. **Experimental investigation on liquid-liquid-gas flow: Flow patterns and pressure-gradient.** Journal of Petroleum Science and Engineering, vol. 65, n. 1-2, p. 1– 13, 2009.

BARBOSA, L. M. C. **Escoamento Não-Isotérmico de Óleo Pesado, Água e Gás, em Dutos Verticais Com Vazamento.** 2012. 91f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande. Brasil, 2012.

BELÉM, E. Z. G. **Escoamento trifásico (gás-água-óleo) em junções angulares: modelagem e simulação.** 2009. 133f. Monografia apresentada ao Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás e Biocombustíveis (PRH-25) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande. Brasil, 2009.

BESTION, D. **Applicability of Two-Phase CFD to Nuclear Reactor Thermalhydraulics and Elaboration of Best Practice Guidelines.** Nuclear Engineering and Desing. v. 253, p. 311-321, 2012.

BORTOLI, Á. L. **Introdução à Dinâmica de Fluidos Computacional.** Porto Alegre: Editora Universidade/UFRGS. Brasil, 2000.

CADÉ, M. A.; LIMA, A.G. B.; LIMA, W. C. P. B.; FARIAS NETO, S. R. **Natural gas laminar flow in elliptic cylindrical pipes: A numerical study**. Brazilian Journal of Petroleum and Gas, Vol. 4, No. 1, pp. 019-033. 2010

DEL FRARI, R. V. **Malhas Computacionais para Simulação Numérica de Escoamentos de Fluidos entre Cilindros com Excentricidade**. X Encontro Gaúcho de Educação Matemática. Ijuí-RS. Brasil, 2009.

FORTUNA, A.O. **Técnicas Computacionais para Dinâmica dos Fluidos: Conceitos Básicos e Aplicações**. São Paulo: Editora USP, Brasil, 2000.

FORTUNA, A. O. **Técnicas Computacionais para a Dinâmica dos Fluidos**, 2ªed. – São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, Brasil, 2012.

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

LASODE, O. A.; PAPOOLA, O. T.; PRASAD, B. V. S. S. S. 2013, **Pressure drop in liquefied petroleum gas laminar flow in cylindrical elliptic pipes**, Brazilian Journal of Petroleum and Gas, Vol. 7, pp. 169-179. 2013

LOMAX, H.; PULLIAM, T.H.; ZINGG, D.W. **Fundamentals of Computational Fluid Dynamics**. NASA Ames Research Center and University of Toronto Institute for Aerospace Studies. August 26, 1999.

MASSAH, H.; OSHINOWO, L. **Advanced Gas-Solid Multiphase Flow Models Offer Significant Process Improvements**. Journal Articles by Fluent Software Users, p. 1-6, 2000.

MATOS, R. S. **Otimização e comparação de um desempenho de trocadores de calor de tubos circulares e elípticos aletados**. 2003. 251f. Tese (Doutorado em Energia e Ciências Térmicas) - Universidade Federal do Paraná. Curitiba. Brasil, 2003.

MIGUEZ, M. F. **Estudo em CFD do escoamento de líquido e da geração de área efetiva em recheios estruturados**. Monografia (Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. Brasil 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 em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande. Brasil, 2015.

OLIVEIRA, A. C.G. **Modelação Térmica e Hidrodinâmica de Escoamentos em Permutadores de Calor**. 2012. 118f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade do Minho. Escola de Engenharia. Portugal, 2012.

OLIVEIRA, J. L. **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, Brasil, 2016.

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, Brasil, 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, Florianópolis. Santa Catarina. Brasil 2005.

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

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, K. G. **Estudo da fluidodinâmica do leito de jorro por CFD com malhas tridimensionais**. 2008. 128f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil, 2008.

SANTOS, J. S. T. **Estudo Experimental e Numérico da Parafinação em Escoamentos de Hidrocarbonetos em Dutos Produtores**. 2009. 121 f. Tese (Doutorado em Engenharia Oceânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2009.

SANTOS, M.M. **Simulação Numérica do Escoamento Bifásico Óleo-Água em Tubos**. 2010. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Itajubá. Instituto de Engenharia Mecânica. Itajubá-MG. Brasil, 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. Brasil, 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.

SARMENTO, L. R. B.; PEREIRA FILHO, G. H. S.; LIMA, A. G. B.; FARIAS NETO, S. R.; BARBOSA, E. S., CUNHA, A. L. **Multiphase flow and heat transfer in Risers**, Defect and Diffusion Forum, v. 348, p. 3-8, 2014b.

SELLI, M.F. **Identificação de padrões de escoamento horizontal bifásico gás-líquido através de distribuição tempo-frequência e redes neurais**. 2007. 99f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. Universidade de São Paulo. Brasil, 2007.

SILVA, A. A. **Escoamento trifásico (óleo pesado, água e ar) em duto vertical via técnica core-flow**. 2012. 95f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande. Brasil. 2012.

SILVA, R. J.; VALLE, R.; ZIVIANI, M. **Numerical hydrodynamic and thermal analysis of laminar flow in curved elliptic and rectangular ducts.** International Journal Thermal Sciences, Vol. 38, pp. 585-594. 1999.

SOUZA, A. D. **Estudo da perda de carga em escoamento multifásico utilizando técnicas de inteligência artificial com ênfase no escoamento de petróleo.** 2011. 153f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Sergipe. São Cristóvão. Brasil, 2011.

TAVARES, D. P. S. **Escoamento Trifásico Não-Isotérmico em oleodutos Horizontais com Vazamento: Modelagem e Simulação.** 2012. 104f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande-PB. Brasil, 2012.

TAVARES, D. P. S. A.; VASCONCELLOS, M. A.; NETO, S. R. F.; LIMA, A. G. B. **Evaluation of multiphase flow in the presence of leak in oil pipelines: modeling and simulation,** Defect and Diffusion Forum, v. 348, p. 64-70, 2014.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method.** 2ed. Pearson Education Limited. 2007.

VIEIRA, F. F. **Escoamento trifásico vertical de óleos pesados aplicado à elevação artificial.** 2004. 121f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Petróleo) – Universidade Estadual de Campinas. Campinas. Brasil, 2004.

VORONOVA, T. V.; NIKITIN, N. V. **Direct numerical simulation of turbulent flow in an elliptical pipe.** Computational Mathematical and Mathematical Physics, Vol. 46, No. 8, pp. 1378-1386, 2006.

WINDHAB, E. J.; DRESSLER, M.; FEIGL, K.; FISCHER, P.; MEGIAS-ALGUACIL, D. **Emulsion Processing—from single-drop deformation to design of complex processes and products.** Chemical Engineering Science, v. 60, n. 8-9, p. 2101–2113, 2005.

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

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.