



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA



PRISCILA FARIAS NILO

**ESTUDO NUMÉRICO DO ESCOAMENTO BIFÁSICO
ÓLEO-ÁGUA APLICADO EM DUTO HORIZONTAL,
UTILIZANDO A TÉCNICA “*CORE ANNULAR FLOW*”**

JOÃO PESSOA - PB
2017

PPGEM / MESTRADO ACADÊMICO

PRISCILA FARIAS NILO

**ESTUDO NUMÉRICO DO ESCOAMENTO BIFÁSICO ÓLEO-
ÁGUA APLICADO EM DUTO HORIZONTAL, UTILIZANDO
A TÉCNICA “*CORE ANNULAR FLOW*”**

Dissertação apresentada ao curso de Pós Graduação
em Engenharia Mecânica da Universidade Federal da
Paraíba, em cumprimento às exigências para
obtenção do Grau de Mestre.

Orientador
Prof. Dr. Gilberto Augusto Amado Moreira

**JOÃO PESSOA - PB
2017**

Catálogo na publicação
Seção de Catálogo e Classificação

N695e Nilo, Priscila Farias.

Estudo numérico do escoamento bifásico óleo-água aplicado em duto horizontal, utilizando a técnica core annular flow / Priscila Farias Nilo. - João Pessoa, 2018.

82 f. : il.

Orientação: Gilberto Augusto Amado Moreira.
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

1. Óleo pesado. 2. Core-flow. 3. Queda de pressão. 4. Medidor por bocal. I. Moreira, Gilberto Augusto Amado. II. Título.

UFPB/BC

**ESTUDO NUMÉRICO DO ESCOAMENTO BIFÁSICO
ÓLEO-ÁGUA APLICADO EM DUTO HORIZONTAL,
UTILIZANDO A TÉCNICA "CORE ANNULAR FLOW"**

por

PRISCILA FARIAS NILO

Dissertação aprovada em 19 de dezembro de 2017



Prof. Dr. GILBERTO AUGUSTO AMADO MOREIRA
Orientador – UFPB



Prof. Dr. JOSÉ MAURÍCIO ALVES DE MATOS GURGEL
Examinador Interno - UFPB



Prof. Dr. FABIANO CORDEIRO CAVALCANTI
Examinador Externo – UFPB

*À minha mãe Marilene, meu pai Almir e meus
irmãos Regis e Arthur. Razões da minha vida.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, Por Tudo.

Aos meus pais, Marilene e Almir, que souberam alicerçar conceitos e deveres em minha vida, por me ensinarem o respeito acima de tudo e independente de qualquer coisa.

Aos meus irmãos, Regis e Arthur, meus amores, que mesmo distante fazem minha vida mais feliz.

Aos meus amigos, Daniely, Elder, Laércio, Márcia e Susane, por estarem presentes, conversando, aconselhando e dando forças nos momentos mais difíceis, muito obrigada.

Ao Professor Gilberto Augusto Amado Moreira pela paciência e orientação.

A UFCG pelas grandes oportunidades e toda formação obtida na área de Petróleo e Gás.

A Matemática, porque ela me envolve e me completa.

Ao CNPQ, pelo apoio financeiro para a realização do curso de pós-graduação. Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM) pela oportunidade, apoio e crescimento à minha formação acadêmica.

E a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

*“Ando devagar
Porque já tive pressa
E levo esse sorriso
Porque já chorei demais*

*Hoje me sinto mais forte
Mais feliz, quem sabe
Só levo a certeza
De que muito pouco sei
Ou nada sei*

*Conhecer as manhas
E as manhãs
O sabor das massas
E das maçãs*

*É preciso amor
Pra poder pulsar
É preciso paz pra poder sorrir
É preciso a chuva para florir*

*Penso que cumprir a vida
Seja simplesmente
Compreender a marcha
E ir tocando em frente
Como um velho boiadeiro
Levando a boiada
Eu vou tocando os dias
Pela longa estrada, eu vou
Estrada eu sou
Conhecer as manchas
E as manhãs
O sabor das massas
E das maçãs*

*É preciso amor
Pra poder pulsar
É preciso paz pra poder sorrir
É preciso a chuva para florir*

*Todo mundo ama um dia
Todo mundo chora
Um dia a gente chega
E outro vai embora*

*Cada um de nós compõe a sua história
Cada ser em si
Carrega o dom de ser capaz
E ser feliz,*

*Conhecer as manhas
E as manhãs
O sabor das massas
E das maçãs*

*É preciso amor
Pra poder pulsar
É preciso paz pra poder sorrir
É preciso a chuva para florir*

*Ando devagar
Porque já tive pressa
E levo esse sorriso
Porque já chorei demais
Cada um de nós compõe a sua história
Cada ser em si
Carrega o dom de ser capaz
E ser feliz”*

(Almir Sater e Renato Teixeira)

ESTUDO NUMÉRICO DO ESCOAMENTO BIFÁSICO ÓLEO-ÁGUA APLICADO EM DUTO HORIZONTAL, UTILIZANDO A TÉCNICA “*CORE ANNULAR FLOW*”

RESUMO

O transporte de óleo pesado é um dos principais desafios tecnológicos para a indústria petrolífera no mundo, o que se explica pela elevada perda de carga causada pelo atrito entre o óleo e a parede da tubulação. Dessa forma, o presente trabalho apresenta um estudo numérico para o transporte de água e óleo pesado em dutos horizontais com um medidor por Bocal, empregando a técnica *core anular flow* utilizando o *software* comercial ANSYS CFX 15.0. O modelo matemático multifásico de mistura foi usado para o escoamento bifásico água-óleo, 3D, transiente, isotérmico, com o óleo escoando em regime laminar e água em regime turbulento, em que foi escolhido o modelo de turbulência $k - \epsilon$. Nesta perspectiva, a velocidade, a queda de pressão e a fração volumétrica para cada fase são analisados nos resultados. Foi observado a água envolvendo o núcleo de óleo que escoar na região central da tubulação, reproduzindo o escoamento *core flow*, o que acarretou uma redução na queda de pressão. Os resultados foram confrontados com dados experimentais disponíveis na literatura, e foi verificado uma boa concordância entre os mesmos.

Palavras-Chave: Óleo Pesado, *Core-flow*, Queda de Pressão, Medidor por Bocal.

NUMERICAL STUDY OF THE MULTIPHASE OIL-WATER APPLIED IN HORIZONTAL DUTY, USING THE “*CORE ANNULAR FLOW*”

ABSTRACT

The high viscosity heavy oil transport is one of the main technological challenges for the oil industry, which is explained by the high loss of load caused by the friction between the oil and the pipe wall. Thus, the present work presents a numerical study for the transport of water and heavy oil in horizontal pipe with a nozzle meter, using the core annular flow technique using the commercial software ANSYS CFX 15.0. The multiphase mixture mathematical model was used for two-phase water-oil flow, 3D, transient, isothermal, with the oil flowing in laminar regime and water in turbulent regime, in which the turbulence model $k - \epsilon$ was chosen. In this perspective, the velocity, the pressure drop and the volumetric fraction for each phase are analyzed in the results. The water surrounding the oil core flowing in the central region of the pipe was observed, reproducing the core annular flow, which resulted in a reduction in the pressure drop. The results were compared with experimental data available in the literature, and a good agreement was found between them.

Keywords: Heavy Oil, Core flow, Pressure drop, Nozzle Meter.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Produção de Petróleo, segundo regiões geográficas (milhões barris/dia) – 2015.	20
Figura 1.2: Ilustração da plataforma operacional e de tubulações ou risers utilizados no transporte de óleo pesado.	22
Figura 2.1 - Padrões de escoamento óleo em água em tubulação horizontal.	26
Figura 2.2 - Carta de diferentes padrões de escoamento água-óleo.....	27
Figura 2.3 - Desenvolvimento do perfil de velocidade e variação da pressão na região de entrada de um escoamento em um tubo.	28
Figura 2.4 - Esquema do Escoamento <i>Core Annular Flow</i>	31
Figura 2.5 - Padrões de escoamento observados para $U_o = 0.75 \text{ m/s}$ em um tubo de acrílico de 26 mm.	33
Figura 2.6 - Escoamento de óleo e água em regime <i>perfect core annular flow</i> . Esquema do perfil de velocidade e da viscosidade.....	35
Figura 2.7: Modelos dos mecanismos hidrodinâmicos cor flow. (a) Lubrificação (b) Sustentação.....	36
Figura 2.8 - Escoamento Anular com Ondulações “Dente de Serra Atrasado”. Escoamento no Modelo de Lubrificação.	36
Figura 2.9 - Comprimento da onda (λ) em função da razão de velocidades superficiais óleo-água.	37
Figura 2.10 - Escoamento anular de óleo-água verticalmente ascendente.....	38
Figura 2.11 - Misturadores de duas fases diferentes.....	41
Figura 2.12 - Representação esquemática da instalação de testes.	44
Figura 3.1 - Tubulação Horizontal com 40 mm de diâmetro (medidor de escoamento por bocal).....	55
Figura 3.2: Esquema detalhado da região de entrada de água e óleo e saída do duto horizontal.	56
Figura 3.3: Região inicial próximo ao bocal de injeção da tubulação.	56
Figura 3.4: Representação da malha na região de entrada de água e óleo pesado (a) e na região de saída (b) do duto horizontal.	57
Figura 3.5: Detalhe externo da malha na região da parede do duto horizontal.	58
Figura 3.6: Representação da malha na região do Bocal.	58
Figura 3.7: Etapas para a solução do problema CAF.....	61

Figura 4.1: Comparação entre as velocidades da água obtida de forma analítica (literatura) e numérica (presente trabalho) em função da posição radial para a Malha 01.	66
Figura 4.2: Comparação entre as velocidades da água obtida de forma analítica (literatura) e numérica (presente trabalho) em função da posição radial para a Malha 02.	66
Figura 4.3: Comparação entre as velocidades da água obtida de forma analítica (literatura) e numérica (presente trabalho) em função da posição radial para a Malha 03.	67
Figura 4.4: Queda de Pressão Bifásica Experimental.	68
Figura 4.5: Queda de Pressão Bifásica Numérica deste Trabalho.	68
Figura 4.6: Erro relativo entre a Queda de Pressão Experimental e Numérica, as linhas representam +/-20% da linha de tendência, conforme apresenta-se na Tabela 4.3.	69
Figura 4.7: Evolução temporal da fração volumétrica de óleo pesado sobre o plano yz para $U_o = 0,65m/s$ e $U_w = 0,66m/s$ em diferentes tempos (Caso 12).	70
Figura 4.8: Perfil de velocidade numérico e analítico da água para $U_w = 0.88m/s$ (regime turbulento)	71
Figura 4.9: Campo de Velocidade Superficial do Óleo Pesado na posição $z = 1,450m$ da entrada do duto	72
Figura 4.10: Campo de Velocidade Superficial da Água na posição $z = 1,450m$ da entrada do duto.	72
Figura 4.11: Fração Volumétrica de óleo na seção transversal XY em Z para $U_w = 0,44m/s$	73
Figura 4.12: Fração Volumétrica de óleo na seção transversal XY em Z para $U_w = 1,10 m/s$	73
Figura 4.13: Perfil de Velocidade para $U_o = 0,45m/s$	74
Figura 4.14: Perfil de Velocidade Superficial de Óleo Pesado em duas posições radiais no tempo total de 4s (Caso 8).	75
Figura 4.15: Comparação da queda de pressão entre o escoamento monofásico do óleo pesado e o escoamento anular (água-óleo) no Bocal.	76
Figura 4.16: Comparação da queda de pressão entre o escoamento monofásico da água e o escoamento anular (água-óleo) no Bocal.	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Dados utilizados no padrão CAF.....	46
Tabela 3.1: Funções dos softwares ANSYS-CFX.....	48
Tabela 3.2: Característica das Malhas Numéricas	59
Tabela 3.3: Propriedades físico-químicas das fases utilizadas nas simulações, no presente trabalho.....	60
Tabela 4.1: Dados utilizados nas simulações numéricas do escoamento para o óleo em regime laminar e a água em regime turbulento.	64
Tabela 4.2: Tempo de Convergência para cada malha empregada	65
Tabela 4.3: Comparação entre a queda de pressão numérica e queda de pressão experimental.	69

LISTA DE QUADROS

Quadro 5.1: Situações Avaliadas	59
Quadro 5.2: Condições Gerais do Problema e da Solução Numérica.....	62

NOMENCLATURA

Letras Latinas

\vec{U}	Vetor Velocidade	[m/s]
J	Velocidade da Mistura	[m/s]
$A_{\alpha\beta}$	Densidade da área superficial	[-]
C_1	Constante do modelo k- ϵ	[-]
C_2	Constante do modelo k- ϵ	[-]
C_D	Coeficiente de arraste	[-]
C_μ	Constante do modelo k- ϵ	[-]
$D_{\alpha\beta}$	Arraste Total	[-]
$d_{\alpha\beta}$	Coeficiente de escala de comprimento de mistura	[N]
f_A	Fração Volumétrica da água	[-]
f_O	Fração Volumétrica do óleo	[-]
f_α	Fração Volumétrica da fase	[-]
g	Aceleração da gravidade terrestre	[m/s ²]
G_a	Geração de energia cinética turbulenta	[kg/ m/s ³]
M_a	Força de arraste interfacial	[N/m ³]
P	Pressão	[Pa]
Q	Vazão Volumétrica	[m ³ /s]
R	Raio do tubo	[m]
r	Raio do núcleo de óleo	[m]
$S_{MS\alpha}$	Fonte de Massa	[N/m ³]
$S_{M\alpha}$	Fonte de momento devido a força de corpo externa	[N]
t	Tempo	[s]
U_W	Velocidade da água	[m/s]
U_O	Velocidade do óleo	[m/s]
U_r	Velocidade radial	[m/s]
U_z	Velocidade axial	[m/s]
U_θ	Velocidade tangencial	[m/s]
d	Densidade específica do óleo	[Kg/m ³]

Letras Gregas

σ_ε	Constante do modelo k- ε	[-]
σ_k	Constante do modelo k- ε	[-]
ρ	Densidade	[Kg/ m^3]
$\rho_{\alpha\beta}$	Densidade da mistura	[Kg/ m^3]
k_a	Energia Cinética Turbulenta	[m^2/s^3]
α e β	Fases envolvidas	[-]

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANP:	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis.
API:	<i>American Petroleum Institute</i>
CAF:	<i>Core Annular Flow.</i>
LABRADS	Laboratório de Refrigeração por Adsorção
PCAF:	<i>Perfect Core annular flow</i>
UFCG:	Universidade Federal de Campina Grande
UFPB:	Universidade Federal da Paraíba
WCAF:	<i>Wave Core annular flow</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	20
1.1 Objetivo Geral.....	23
1.2 Objetivos Específicos	23
1.3 Estrutura do Trabalho.....	24
2. ASPECTOS TEÓRICOS.....	25
2.1 Escoamento Multifásico	25
2.2 O Escoamento Interno em Tubulações	27
2.2.1 Escoamento Laminar	29
2.2.2 Escoamento Turbulento.....	29
2.2.3 Queda de Pressão no escoamento laminar e turbulento	30
2.3 A técnica <i>Core Annular Flow</i> (CAF)	30
2.3.1 A Estabilidade Hidrodinâmica do Padrão de Fluxo Óleo-Água <i>Core Annular Flow</i>	32
2.3.2 Escoamento anular perfeito (<i>Perfect core anular flow</i> - PCAF)	33
2.3.3 Escoamento Anular Ondulado (<i>Wave core anular flow</i> - WCAF).....	35
2.4 Estado da Arte	39
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	47
3.1 Escoamento Monofásico	48
3.2 Escoamento Multifásico	49
3.2.1 Conceitos Básicos em Escoamentos Multifásicos.....	49
3.2.2 Modelo Não-Homogêneo	50
3.3 Equações de Fechamento	52
3.3.1 Modelo de Mistura.....	52
3.3.2 Forças de Arraste Interfacial	53
3.3.3 Modelo de turbulência $k-\varepsilon$	54
3.4 Descrição do Problema Físico.....	55
3.5 Domínio Físico.....	57
3.5.1 Domínio Computacional.....	57
3.6 Condições Iniciais e de Contorno	60
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	63
4.1 Teste de Convergência de Malha.....	65

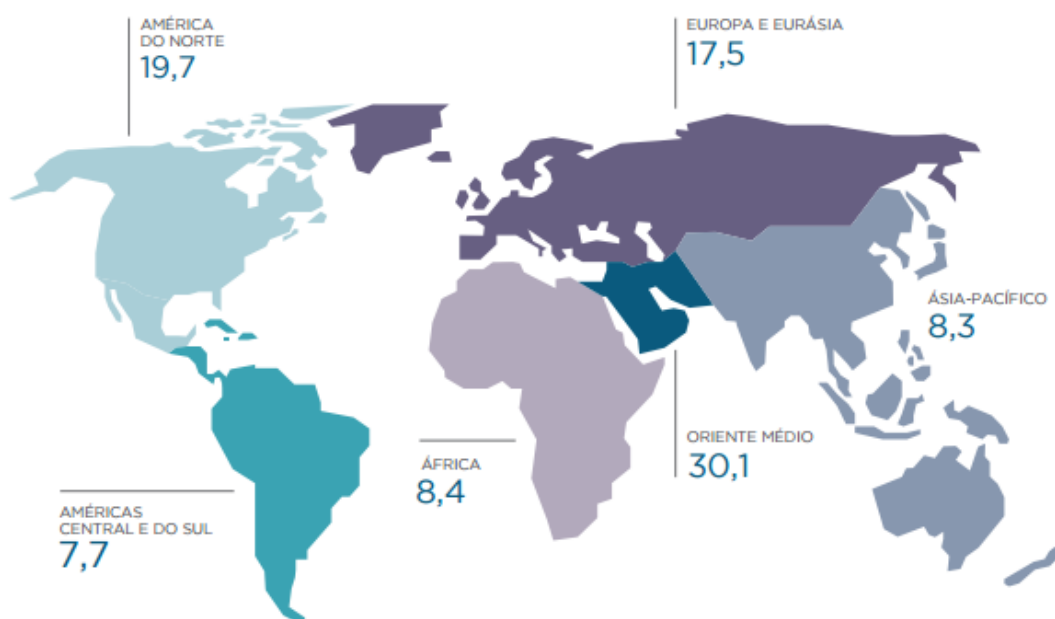
4.2	Validação do Modelo utilizando os Resultados Experimentais de Dehkordi <i>et al.</i> (2017)	67
5.	CONCLUSÃO.....	78
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	78
	REFERÊNCIAS.....	80

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

No mundo a procura de energia continua em grande maioria por combustíveis fósseis, e as pesquisas estão ativas para a exploração de reservatórios de petróleo, com o intuito de aumentar os recursos disponíveis (DEHKORDI *et al.*, 2017). Segundo a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), em 2015, as reservas provadas de petróleo no mundo atingiram a marca de 1,7 trilhão de barris. A Figura 1.1 apresenta a produção de petróleo no mundo em 2015, que aumentou em 2,8 milhões de barris/dia em relação a 2014.

Figura 1.1: Produção de Petróleo, segundo regiões geográficas (milhões barris/dia) – 2015.



Fonte: Anuário Estatístico ANP, 2016.

O óleo pesado, extra-pesado e betume representam cerca de 70% dos recursos totais de petróleo no mundo, de 9 a 13 trilhões de barris. A maioria dos grandes projetos estão centralizados no óleo pesado (LIVINUS *et al.*, 2017). A viscosidade do óleo pesado é bem maior que a do óleo leve. Segundo Manichand (2002), a indústria petrolífera usa a expressão grau API ($^{\circ}\text{API}$) (American Petroleum Institute) como padrão da densidade do óleo em relação à da água, e é dada pela seguinte expressão:

$$^{\circ} API = \frac{141,5}{d} - 131,5 \quad (1.1)$$

Onde d é a densidade específica do óleo.

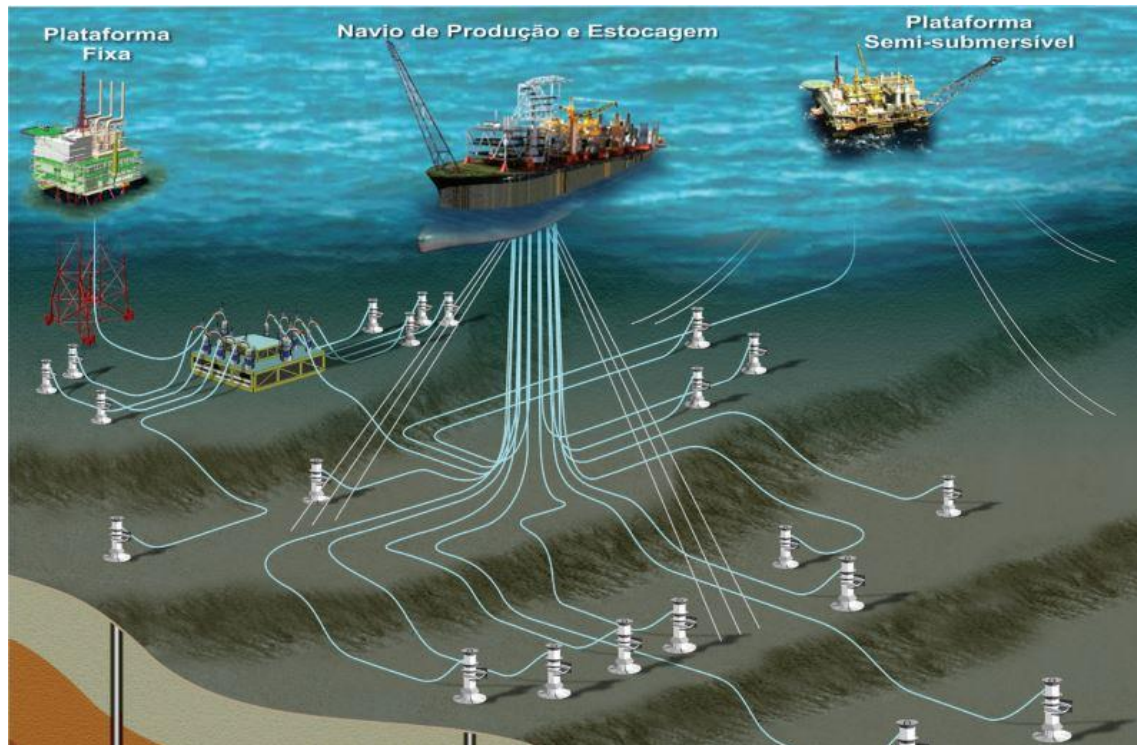
Para a indústria petrolífera canadense podemos classificar o óleo pesado da seguinte forma: *óleo extra pesado e areias betuminosas (tar sands)*: viscosidade no tanque nas condições de reservatório acima de 10.000 cp; $^{\circ}API < 10$; *óleo pesado*: viscosidade no tanque nas condições de reservatório entre 100 e 10.000 cp; $10 < ^{\circ}API < 20$; *óleo medianamente pesado*: viscosidade no tanque nas condições de reservatório até 100 cp; $20 < ^{\circ}API < 30$ (MANICHAND, 2002).

A maior dificuldade encontrada na utilização do óleo pesado é a sua elevada viscosidade, tornando difícil o seu transporte, aumentando o custo de refinação. Dessa forma, transportar óleo pesado e ultra viscoso é um grande desafio tecnológico para a indústria petrolífera. Este fato ocorre devido à alta queda de pressão relacionada com os efeitos viscosos dos fluidos. Segundo Vara (2001) existem diversas técnicas de transporte de óleo pesado *offshore* e *onshore*, com cada uma apresentando suas limitações técnicas e econômicas:

- I. **Aquecimento externo nos dutos:** tem como objetivo manter uma temperatura mínima do óleo, é uma técnica bastante cara e apresenta limitações com relação a distâncias;
- II. **Dutos termicamente isolados:** ocorre um pré-aquecimento do óleo a uma certa temperatura, permitindo transportar o óleo sem excessiva pressão de bombeio.
- III. **Emulsão de óleo em água:** consiste em misturar 90% de óleo pesado a 10% de uma solução de surfactante diluída para formar emulsões. Após isso, é associado mais água na mistura, ocorrendo uma emulsão de óleo pesado.
- IV. **Injeção de água (*Core Annular Flow*):** ocorre a injeção de água e óleo em uma tubulação criando uma configuração anular onde o óleo ocupa o centro do tubo e a água as partes laterais da parede do duto.

A Figura 1.2 apresenta formas de transporte de petróleo a partir de plataformas de exploração de petróleo *offshore*.

Figura 1.2: Ilustração da plataforma operacional e de tubulações ou risers utilizados no transporte de óleo pesado.



Fonte: MORAIS, 2013.

A técnica de injeção de água (*Core Annular Flow*) consiste em injetar água, adjacente a tubulação, evitando o contato do óleo com a tubulação, garantindo a diminuição da queda de pressão durante o transporte. Uma desvantagem desta técnica é quando o óleo entra em contato com a parede interna da tubulação durante o transporte. Isto pode causar um grande aumento na pressão do sistema, o que pode resultar em sérios danos ao sistema de transporte e ao ambiente. A característica mais importante da técnica de fluxo de núcleo é que não modifica a viscosidade do óleo, mas altera o padrão de fluxo e reduz o atrito durante o transporte de produtos muito viscosos, como óleo pesado (GADELHA *et al.*, 2013).

A aplicação de Fluidodinâmica Computacional (CFD) se mostra ao longo dos anos como uma grande ferramenta para a análise de escoamentos multifásicos, e para previsão dos parâmetros envolvidos em tais escoamentos principalmente com relação ao padrão Core Flow, podemos citar estudos como: Ghosh e Das (2010), Ghosh, Das e Das (2011), Kaushik *et al.* (2012), Gadelha *et al.* (2013), Tripathi *et al.* (2015), Hernández *et al.* (2016), Shi, Mustapha e Hoi (2017).

No transporte de petróleo são encontrados ambientes em situações adversas ao cotidiano, dessa forma, são usados dispositivos como medidores baseados em pressão

diferencial como os medidores por Bocal, visto que, são caracterizados pelo baixo custo de manutenção, pois não apresentam partes móveis. Contudo, é necessário definir com detalhes o escoamento multifásico nesses dispositivos para a exploração de petróleo. Segundo Paladino (2005), reduzindo a seção de passagem, a velocidade do fluido aumenta, ocorrendo uma diminuição da pressão. Na literatura são poucos os trabalhos que enfatizam o escoamento de líquidos imiscíveis com a aplicação de dispositivos de medição de pressão. Contudo, enfatizaremos o trabalho de Dehkordi *et al.* (2017), como ponto de partida para esta pesquisa.

Dehkordi *et al.* (2017), realizaram um estudo experimental e numérico de padrões de escoamento de água e óleo pesado através de um medidor de vazão por Bocal e um Tubo Venturi, em dutos com 40 mm de comprimento. Investigaram a queda de pressão, velocidade e fração volumétrica na CAF. Para comparação entre o estudo experimental e o numérico os autores analisaram a velocidade do óleo entre 0,25 m/s e 0,75 m/s, e em relação à água com velocidades de 0,44-1,32 m/s. Nesta pesquisa é enfatizado o estudo do medidor de vazão por Bocal.

1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como Objetivo Geral a utilização da Fluidodinâmica Computacional para analisar numericamente o Escoamento Bifásico de Óleo-Água, aplicado em dutos petrolíferos horizontais com medidor de vazão por bocal, usando a técnica “*Core Annular Flow*”.

1.2 Objetivos Específicos

- I. Apresentar uma modelagem matemática para o transporte isotérmico de água-óleo pesado usando a técnica “*Core Annular Flow*”;
- II. Investigar a estabilidade do padrão de escoamento de acordo com o comprimento do duto, durante o tempo;
- III. Analisar os perfis de velocidade das fases água e óleo no comportamento do escoamento anular;
- IV. Avaliar a Queda de Pressão ao longo do escoamento;
- V. Comparar os resultados obtidos numericamente com resultados disponíveis na literatura.

1.3 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está organizado em quatro capítulos além deste introdutório.

No Capítulo II apresenta-se os aspectos teóricos, onde são apresentados a fundamentação teórica e os conceitos referentes ao tema e destaca os principais estudos relacionados ao tema da pesquisa.

No Capítulo III é abordada a Modelagem Matemática de escoamento multifásico, descrevendo a matemática do problema físico em estudo e apresenta a descrição do problema, o procedimento computacional e a solução, as condições iniciais e de contorno do problema em questão.

O Capítulo IV enfatiza a validação das simulações numéricas, os resultados e discussões dos mesmos.

Por fim, as conclusões do trabalho e recomendações para continuidade do estudo são mostradas no Capítulo V.

CAPÍTULO II

2. ASPECTOS TEÓRICOS

2.1 Escoamento Multifásico

Os escoamentos multifásicos são caracterizados por um fluxo formado com mais de um fluido, separados por interfaces, podendo apresentar uma fase contínua (meio líquido ou gasoso) e uma fase dispersa (bolhas de gás, gotas de líquido ou partículas sólidas). Considerando o número de fases presentes no escoamento, podemos classificá-los pelos seguintes tipos: bifásico (sólido-líquido, sólido-gás, líquido-líquido e líquido-gás) e trifásico (sólido-líquido-gás e líquido-líquido-gás).

Em tubulações que envolvam líquido-gás ou líquido-líquido, os escoamentos multifásicos apresentam-se sob várias configurações geométricas. Os diferentes padrões de escoamento dependem de vários fatores, como: vazões das fases, velocidade relativa entre elas, pressão, o diâmetro e a inclinação do duto, rugosidade das paredes internas, tensão superficial e as viscosidades e densidades dos fluídos. Os padrões de escoamento líquido-líquido em dutos são diferentes da mistura líquido-gás, devido à uma maior transferência de quantidade de movimento interfacial e menores efeitos de empuxo gravitacional, dado pela diferença de densidade entre as fases. (PALADINO, 2005).

Dependendo de qual seja a fase contínua, os padrões de escoamento líquido-líquido são divididos em padrões baseados em óleo (“*oil based*”), em que o óleo é a fase contínua ou padrões baseados em água (“*water based*”), tendo a água como fase contínua (PALADINO, 2005).

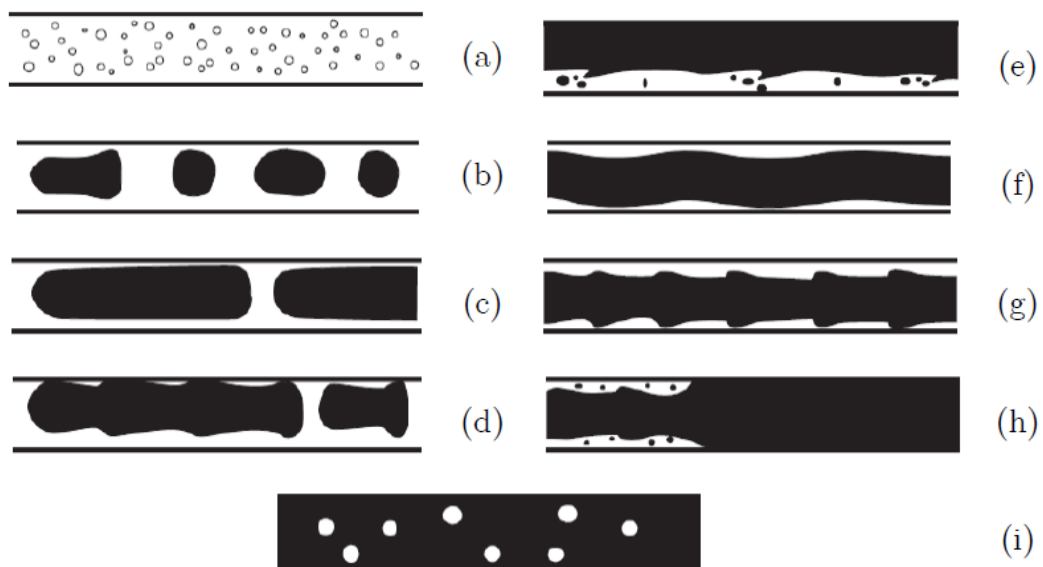
Vários trabalhos como Trallero, Sarica e Brill (1997) e Arirachakaran *et al.* (1989) apresentam definições para os padrões de escoamento líquido-líquido em dutos horizontais. Trallero, Sarica e Brill (1997) classifica os padrões de escoamento de acordo com o fluido que compõe a fase contínua e a configuração do escoamento, estratificada ou dispersa: escoamento estratificado com óleo sobre a água, com exceção do óleo com massa específica maior que a água; escoamento com mistura na interface; dispersão de óleo em água sobre água; dispersão de óleo em água; dispersão de água e óleo e óleo em água; dispersão de água em óleo.

Arirachakaran *et al.* (1989) apresentaram uma classificação para escoamento líquido-líquido, baseada nas configurações geométricas adotadas pelo escoamento líquido-gás, tal classificação é dada a seguir:

- I. **Escoamento estratificado:** Pode ocorrer mistura dispersa na interface, onde a fase menos densa irá se colocar na parte superior do duto.
- II. **Escoamento disperso:** apresenta dispersões de óleo em água ou de água em óleo.
- III. **Escoamento intermitente:** Semelhante ao escoamento pistonado em sistema líquido-gás.
- IV. **Escoamento anular:** Apresenta uma fase no centro e a outra fase envolvendo o centro em forma de um anel.

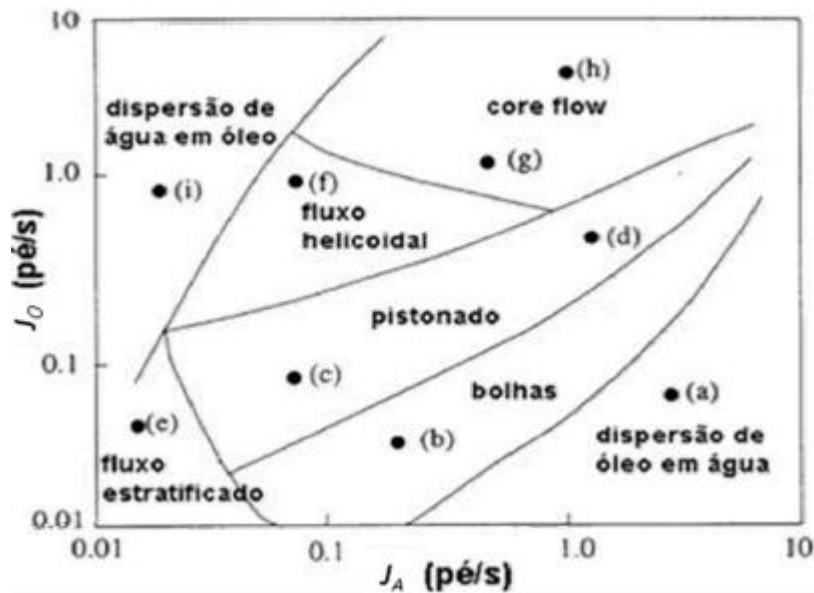
A Figura 2.1 apresenta diferentes padrões de escoamento de óleo e água em tubulação horizontal: (a) Dispersão ou emulsão de óleo em água; (b) Gotas alargadas ou esféricas de um fluido em outro; (c) Intermitente; (d) Intermitente; (e) Estratificado; (f) Anular ondulado; (g) *Bamboo Waves*; (h) *Wavy Core Annular Flow* com dispersão de bolhas; (i) Dispersão de água em óleo. Já a Figura 2.2 mostra um mapa com diferentes padrões de escoamento de casos obtidos ao variar a quantidade de óleo em água para uma injeção fixa de água no escoamento. Quando a taxa de óleo aumenta, as bolhas de óleo podem se fundir, tornando a fase óleo contínua ao longo do tubo, sendo observados o padrão estratificado e anular para essas condições.

Figura 2.1 - Padrões de escoamento óleo em água em tubulação horizontal.



Fonte: JOSEPH *et al.* (1997).

Figura 2.2 - Carta de diferentes padrões de escoamento água-óleo.



Fonte: JOSEPH *et al.* 1997 apud ANDRADE, 2008.

2.2 O Escoamento Interno em Tubulações

O escoamento de um fluido em um tubo tende a ser ordenado para baixas velocidades. Entretanto, a medida em que a velocidade cresce acima de um determinado valor crítico, o escoamento passa a apresentar comportamento desordenado. Dessa forma, diz-se que o regime de escoamento é *Laminar* quando está caracterizado por linhas de corrente suaves e movimento altamente ordenado. Entretanto, quando ocorre flutuações de velocidade e movimentos altamente desordenados, ocorre o regime de escoamento *Turbulento* (ÇENGEL e CIMBALA, 2007).

O número de Reynolds representa fisicamente a razão entre a força de inércia (ρUD) e a força viscosa (μ), resultando em:

$$R_e = \frac{\rho UD}{\mu} \quad (2.1)$$

Onde:

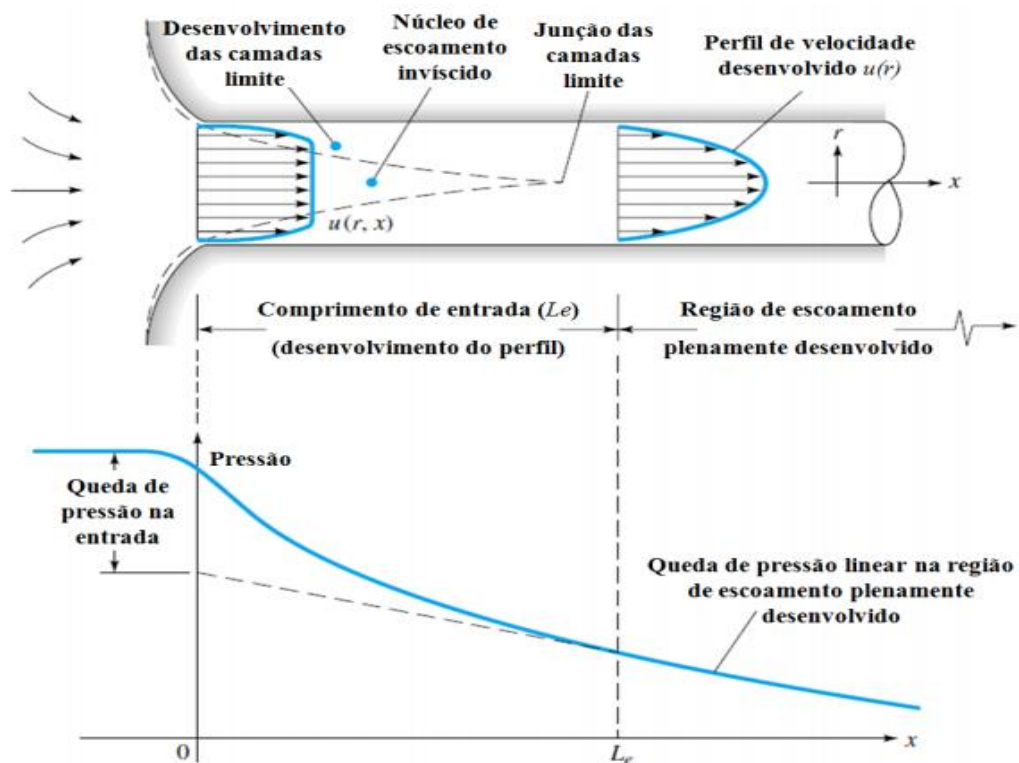
D é o diâmetro interno da tubulação; U é a velocidade média de escoamento; ρ é a densidade do fluido e μ é a viscosidade absoluta do fluido.

O número de Reynolds definido pela Equação (2.1) permite diferenciar quantitativamente os regimes de escoamentos monofásicos em laminar ou turbulento, caracterizando com valores numéricos (Re) quando:

- I. $Re < 2300$, Escoamento Laminar;
- II. $2300 < Re < 4000$, Escoamento Transitório;
- III. $Re > 4000$, Escoamento Turbulento.

A região do escoamento na qual são atuantes os efeitos das forças de cisalhamento viscosas causadas pela viscosidade do fluido, é denominada de camada limite hidrodinâmica. A espessura dessa camada limite hidrodinâmica aumenta na direção do escoamento até que ela atinja o centro do tubo e, portanto, preencher todo o tubo. Dessa forma, a região de entrada do tubo até o ponto onde a camada limite integra o eixo central é chamada de *região de entrada hidrodinâmica*, e o comprimento dessa região é chamado de *comprimento de entrada hidrodinâmica*, L_h . A região na qual o perfil de velocidade está completamente desenvolvido e permanece sem alterações é chamada de *região hidrodinamicamente completamente desenvolvida*, conforme mostra a Figura 2.3. A queda de pressão na região de escoamento plenamente desenvolvido é linear para o escoamento laminar de um fluido Newtoniano.

Figura 2.3 - Desenvolvimento do perfil de velocidade e variação da pressão na região de entrada de um escoamento em um tubo.



Fonte: WHITE, 2002.

A forma do perfil de velocidade plenamente desenvolvido no escoamento em tubos depende se o regime de escoamento é laminar ou turbulento.

2.2.1 Escoamento Laminar

Para o escoamento laminar, o comprimento de entrada hidrodinâmica (L_e) é dado por:

$$\frac{L_e}{D} = 0,06 R_e \quad (2.2)$$

No escoamento monofásico em regime laminar de um fluido Newtoniano o perfil de velocidade na região completamente desenvolvida é dado por:

$$u(r) = u_{m\acute{a}x} \left(1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right) \text{ para } -R \leq r \leq R \quad (2.3)$$

Onde: R é o raio interno a tubulação, r é a posição radial, e $u_{m\acute{a}x}$ é a velocidade máxima no centro do tubo, definida como:

$$u_{m\acute{a}x} = 2U \quad (2.4)$$

Sendo U a velocidade média do escoamento na região transversal.

2.2.2 Escoamento Turbulento

No escoamento turbulento, as camadas limites crescem mais rapidamente, e o comprimento de entrada (L_e) é menor, logo pode ser escrito da seguinte forma:

$$\frac{L_e}{D} = 4,4 (R_e)^{1/6} \quad (2.5)$$

Para o escoamento monofásico de um fluido Newtoniano em regime turbulento o perfil de velocidade na região completamente desenvolvida hidrodinamicamente pode ser representado pela equação empírica da lei de potência:

$$u = u_{m\acute{a}x} \left(1 - \left| \frac{r}{R} \right| \right)^{\frac{1}{n}} \quad (2.6)$$

Onde $u_{m\acute{a}x}$ é a velocidade máxima no centro do tubo

$$u_{m\acute{a}x} = U \frac{2n^2}{(n+1)(2n+1)} \quad (2.7)$$

Sendo U a velocidade média do escoamento, r é a posição radial, R é o raio interno do tubo, o expoente n na Equação (2.6) é dado pela expressão empírica:

$$n = 1,8 \log(\text{Re}) - 1,7 \quad (2.8)$$

2.2.3 Queda de Pressão no escoamento laminar e turbulento

A queda de pressão no escoamento laminar e turbulento de um fluido Newtoniano dentro de um tubo é dada por (ÇENGEL e CIMBALA, 2007):

$$\Delta P = f \frac{L}{D} \frac{\rho U^2}{2} \quad (2.10)$$

onde no caso de escoamento laminar, f é o fator de atrito de Darcy-Weisbach, dado pela seguinte expressão:

$$f = \frac{64}{\text{Re}} \quad (2.11)$$

Para o escoamento turbulento, o fator de atrito é dado pela Equação de Colebrook:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log \left(\frac{\varepsilon/d}{3,7} - \frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{f}} \right) \quad (2.12)$$

Onde ε/d é a rugosidade relativa e Re é o número de Reynolds, com ε sendo a rugosidade absoluta.

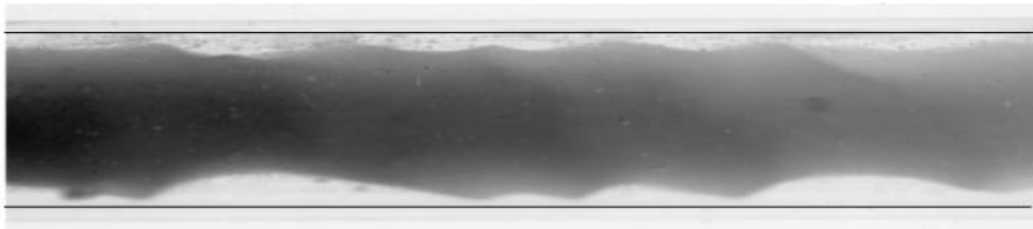
2.3 A técnica *Core Annular Flow* (CAF)

A diminuição das reservas de óleo leve tem direcionado os pesquisadores a estudar formas de como lidar com o óleo pesado, bem como seu transporte. Dentre vários métodos de transporte de óleo altamente viscoso, o transporte lubrificado com água surge como uma tecnologia de eficiência energética nas últimas décadas (KAUSHIK *et al.*, 2012).

A técnica CAF consiste basicamente em injetar água em uma tubulação em um fluxo menor que o óleo, fazendo com que o óleo seja envolvido por uma camada de água, sem tocar na parede da tubulação, formando assim um padrão anular (ANDRADE *et al.*, 2013). Esta

técnica não modifica a viscosidade do óleo, porém transforma o padrão de escoamento, e reduz o atrito no transporte do óleo pesado (ANDRADE, 2013). A Figura 2.4 apresenta um esquema de escoamento *Core Annular Flow* em duto horizontal.

Figura 2.4 - Esquema do Escoamento *Core Annular Flow*



Fonte: HOUSZ *et al.* 2017

A técnica CAF é de suma importância industrial, pois os estudos experimentais, numéricos e analíticos têm sido relatados em diferentes aspectos do *core anular flow* (GHOSH; DAS & DAS, 2010). Para a CAF horizontal, na literatura são apresentados estudos relatados por Charles, Govier e Hodgson (1961); Arney *et al.* (1993); Bannwart, (1998); Ooms *et al.* (1983); Strazza e Pietro (2012); Kaushik *et al.* (2012). Em relação a CAF vertical, são várias pesquisas como: Prada e Bannwart (2001); Ghosh e Das (2012); Gupta, Turangan e Manica (2016).

No escoamento de dois líquidos imiscíveis, o líquido de menor viscosidade (água) se encontra na região de deformação (paredes da tubulação) lubrificando o escoamento do óleo, e assim, possibilitando seu transporte com menor perda de carga. Este fato torna atrativo a aplicação desta técnica não apenas na área de transporte, como também na área de elevação de óleos pesados e ultraviscosos (PRADA, 1999). A desvantagem ocorre quando o óleo atinge a parede interna da tubulação, onde ocorre o aumento da pressão, o que poderá causar acidentes (ANDRADE *et al.*, 2013). Como a densidade do óleo é menor do que a da água, o núcleo tende a subir e tocar a parte superior da parede da tubulação, contudo, durante experiências foi confirmado que a velocidade do núcleo pode ser mantida suficientemente alta para que isso não aconteça. As forças hidrodinâmicas são exercidas no núcleo, o que contrabalança as forças devido a diferença de densidade entre a água e o óleo (OOMS *et al.*, 2012).

Alguns modelos teóricos são destacados para o escoamento em tubulações horizontais através do escoamento anular, tais como: o núcleo (óleo) escoar em regime laminar, lubrificado pela água que escoar também em regime laminar e o outro o núcleo escoar em regime laminar e

a água em regime turbulento. Salientando a existência de duas possibilidades como o núcleo (óleo) escoar concêntrica ou excêntrica na tubulação (PRADA, 1999).

2.3.1 A Estabilidade Hidrodinâmica do Padrão de Fluxo Óleo-Água *Core Annular Flow*

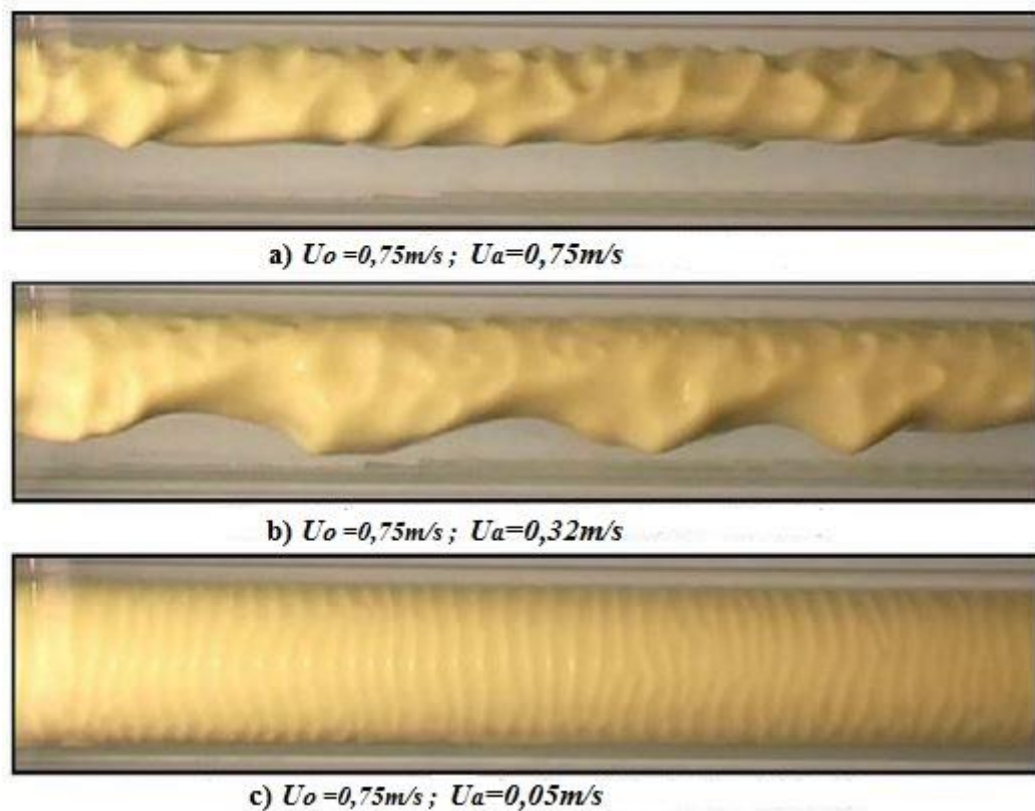
O escoamento anular aponta características fundamentais em relação ao transporte de óleos pesados, tais como a redução da perda de carga fazendo com que a produção de óleo pesado seja viável. Dessa forma, o estudo da estabilidade da CAF é necessário para apontar as causas de instabilidade do escoamento, e assim, indicar operações adequadas para que o escoamento seja estável (ANDRADE, 2013).

O problema da estabilidade hidrodinâmica é a determinação das condições de velocidade, propriedades dos fluidos, fração da água, excentricidade, para os quais as configurações de estabilidade do *core flow* devem ser mantidas. A estabilidade determina o tipo de padrão de fluxo, à medida que os parâmetros de fluxo mudam, alguns padrões ganham mais estabilidade, contudo, outros se tornam instáveis (PRADA, 1999). Segundo Sotgia, Tartarini e Stalio (2008), a velocidade superficial do óleo depende em geral de vários parâmetros geométricos, tais como: diâmetro do tubo, rugosidade, ângulo de contato, dentre outros. A Figura 2.5 mostra a evolução de alguns padrões de escoamento com a velocidade do óleo (U_o) fixa e variando a velocidade da água (U_A) mostrando que com a redução da velocidade superficial da água, houve um aumento no núcleo de óleo, observa-se ainda a formação de ondas em maiores velocidades superficiais da água.

A tensão interfacial é um fator de grande influência na estabilidade do escoamento anular, pois ela modela a curvatura na interface óleo-água ajudando na compreensão da configuração do padrão CAF (ANDRADE, 2013).

Uma das causas de instabilidade no escoamento anular é a viscosidade, bem como a estratificação causada pela diferença de densidade dos dois líquidos imiscíveis, que escoam ao mesmo tempo em uma tubulação. Vários pesquisadores têm investigado a instabilidade da estratificação causada pela viscosidade no escoamento *Couette* (completamente desenvolvido) e no escoamento *Poiseuille* (pistonado) (GHOSH *et al.*, 2009). Estudos numéricos e experimentais são encontrados na literatura voltados ao comportamento de sub-padrões da CAF, denominados de *perfect core anular flow* (PCAF) e *wave core anular flow* (WCAF) (ANDRADE, 2013).

Figura 2.5 - Padrões de escoamento observados para $U_o = 0.75 \text{ m/s}$ em um tubo de acrílico de 26 mm.



Fonte: Adaptado de SOTGIA, TARTARINI e STALIO (2008).

2.3.2 Escoamento anular perfeito (*Perfect core annular flow - PCAF*)

No escoamento anular perfeito (PCAF) é admitida que a interface óleo-água não apresente ondulações, com apenas a variação da velocidade axial ao longo da coordenada radial e os dois fluidos dispostos concentricamente (PRADA, 1999). Este comportamento é desestabilizado pelo efeito da gravidade, a qual perturba o núcleo de óleo que escoar juntamente com o filme de água em um tubo horizontal, ocasionando ondulações no núcleo de óleo (BAI; CHEN & JOSEPH, 1992; BENSAXHRIA & PEYSSON; ANTONINI, 2004).

Segundo Sotgia, Tartarini e Stalio (2008), a teoria da estabilidade hidrodinâmica é usada para concluir que, sob um conjunto selecionado de parâmetros como a densidade igual das duas fases, água e óleo, o escoamento anular é estável somente quando o fluido viscoso ocupa a maioria da seção transversal. O escoamento anular perfeito concêntrico é algo raro, mesmo que o escoamento seja laminar, a instabilidade causada pelo atrito interfacial acarreta em ondas no núcleo constituído de óleo pesado (JOSEPH e RENARDY, 1993). Para Dehkordi *et al.* (2017),

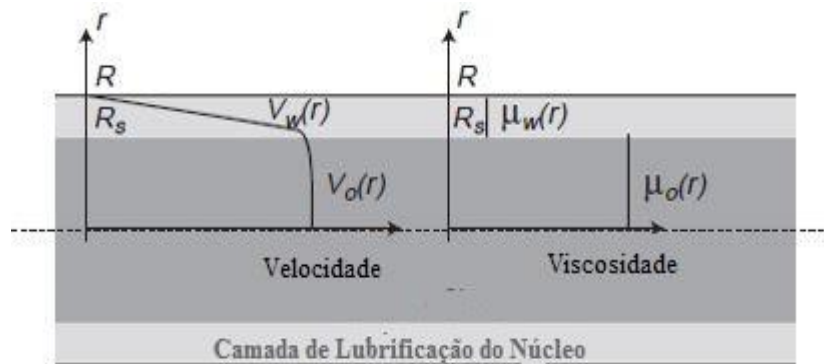
no padrão de escoamento CAF, as duas fases são imiscíveis e separadas por uma interface que varia em termos de forma e extensão, devido à evolução da estrutura do escoamento.

Arney *et al.* (1993), apresentaram a solução do problema da CAF laminar-laminar, com densidades iguais e interface lisa concêntrica, denominado de “*perfect core annular flow*”. Os autores resolveram a equação de Navier Stokes e determinaram um fator de atrito em função de um número de Reynolds da mistura, concluindo que para valores baixos de Reynolds, os dados de fator de atrito foram maiores, o que se explica pelo fato de a baixas velocidades do escoamento, a gravidade gera excentricidade, aumentando o atrito entre a região do núcleo do óleo e a parede da tubulação. Sendo assim, a queda de pressão é reduzida usando o número de Reynolds e o fator de atrito, obtendo resultados favoráveis para altos números de Reynolds.

Dehkordi *et al.* (2017) observaram experimentalmente o comportamento do escoamento água e óleo em um Tubo Venturi e um Bocal, com diâmetro interno da tubulação de 40mm e seção da garganta de 30mm, para os casos de escoamento anular ondulado foi verificado que as ondas da interface desaparecem quando a mistura escoar através do Bocal, visto que a aceleração impulsiona a transição para o escoamento de padrão anular.

Segundo Bensakhria, Peysson e Antonini (2004) o escoamento anular perfeito, ver Figura 2.6, é raro e pode existir apenas para o escoamento de dois fluidos com densidades iguais, contudo para uma razão volumétrica fixa entre água e óleo, o escoamento anular não é estável à baixa velocidade. A instabilidade ocorre devido a tensão interfacial, o que perturba o núcleo do óleo, entretanto com o aumento da velocidade, a estabilidade do padrão é alcançada. Para velocidades ainda maiores o escoamento torna-se ondulado.

Figura 2.6 - Escoamento de óleo e água em regime *perfect core annular flow*. Esquema do perfil de velocidade e da viscosidade.



Fonte: BENSAKHIRA, PEYSSON & ANTONINI (2004).

2.3.3 Escoamento Anular Ondulado (*Wave core annular flow - WCAF*)

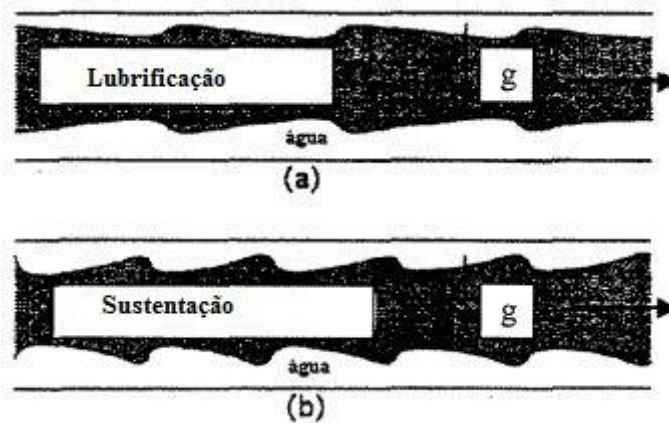
As ondulações formadas na interface líquido-líquido, estão associadas com os esforços gravitacionais, superficiais e hidrodinâmicos (viscosos e inerciais). Na literatura existem dois modelos que tentam explicar a ação das forças hidrodinâmicas sobre a formação das ondas durante o escoamento anular: o modelo de lubrificação e o de sustentação, ver Figura 2.7 (OOMS *et al*, 1983; VARA, 2001).

O *modelo de lubrificação* foi desenvolvido nos anos 80 na Holanda por um grupo da Shell Oil Co, juntamente com a Delft University of Technology, coordenado por G. Ooms e R. V. A. Oliemans. E o *modelo de sustentação (Lift)* hidrodinâmica foi desenvolvido na universidade de Minnesota, pelo grupo do Prof. Daniel D. Joseph (VARA, 2001).

No modelo de lubrificação, atribui-se que o movimento ondulado do núcleo de óleo com relação à parede da tubulação conduz a um gradiente de pressão na região anular, contrabalançando as forças de empuxo sobre o núcleo devido à diferença de densidade. Logo, a presença de ondas é fundamental na lubrificação do núcleo. No caso da amplitude ser nula, o núcleo alcança a parede da tubulação (OOMS *et al.*, 1983).

Em contrapartida, o modelo de sustentação diz que uma grande diferença nas velocidades do óleo e da água conduz a sustentação do núcleo de óleo (VARA, 2001).

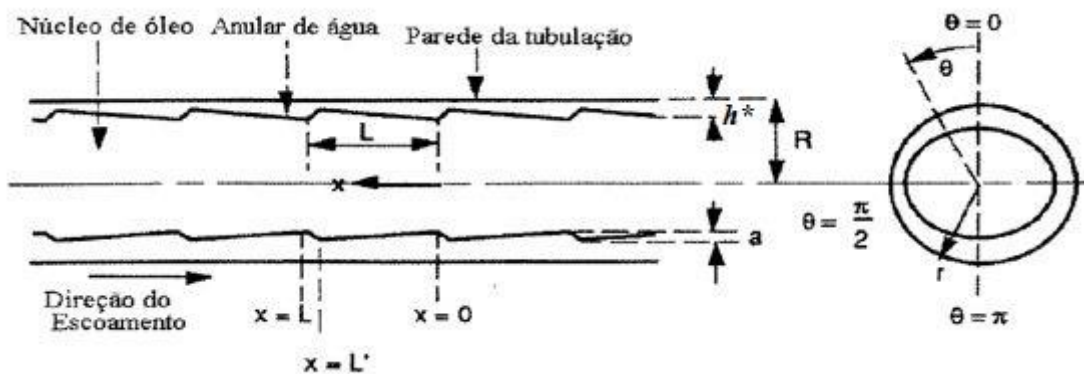
Figura 2.7: Modelos dos mecanismos hidrodinâmicos cor flow. (a) Lubrificação (b) Sustentação.



Fonte: Adaptado de VARA (2001)

Ooms *et al.* (1983), desenvolveram um modelo teórico para escoamento anular com o núcleo de óleo bastante viscoso e um anel de água em um tubo horizontal. Assumiram uma viscosidade do óleo alta, apresentando nenhuma variação do perfil da interface de água e óleo com o tempo. Portanto, admitiram que o núcleo é um sólido formando com a água uma interface sólido-líquido. O esquema das ondas pode ser visto na Figura 2.8.

Figura 2.8 - Escoamento Anular com Ondulações “Dente de Serra Atrasado”. Escoamento no Modelo de Lubrificação.



Fonte: Adaptado de OOMS *et al.* (1983).

O modelo é baseado na teoria da lubrificação hidrodinâmica,

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{h^{*3}}{R^2} * \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(h^{*3} \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) = 6\mu w \frac{\partial h^{*3}}{\partial x} \quad (2.12)$$

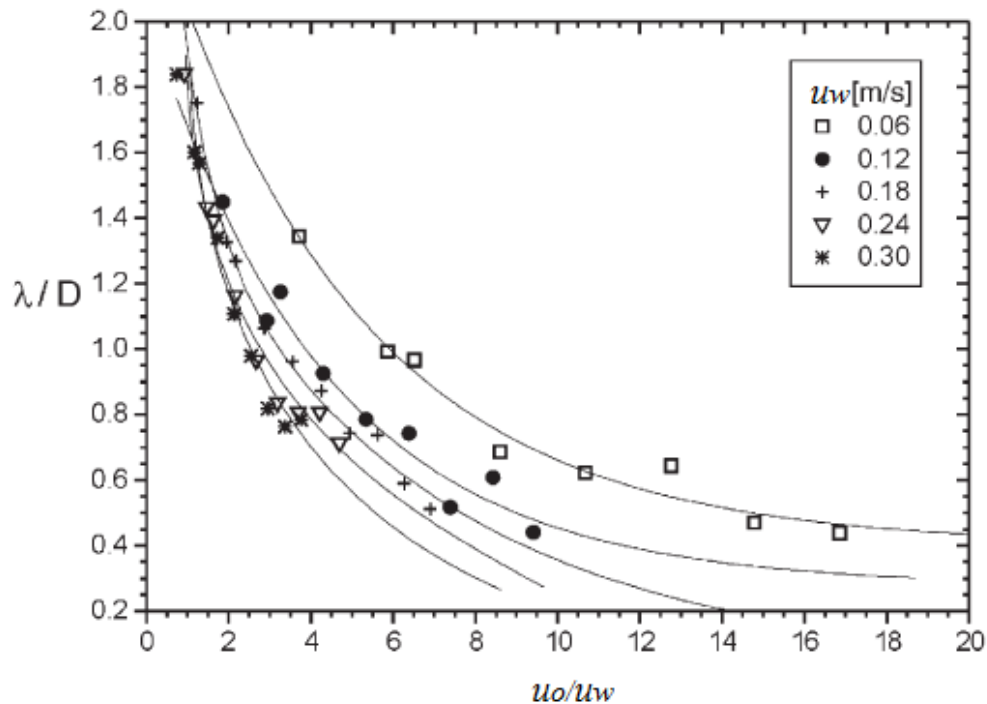
Onde, h^* é a espessura do filme formado pela água, R é o raio do tubo, μ é a viscosidade da água, w é a velocidade na parede do tubo, a variável Φ é a pressão sendo determinada pela equação:

$$\Phi = p + \rho g \cos \theta \quad (2.13)$$

Rodriguez e Bannwart (2006a), avaliaram experimentalmente a amplitude das ondas, velocidade e perfil das ondas do padrão CAF vertical, observando que o núcleo de óleo conduz-se a ocupar o volume total, reduzindo a amplitude da onda e tornando-se mais lento. Constataram que o comprimento da onda tende a diminuir com o aumento da razão óleo-água, Figura 2.9. Segundo Ameri e Tirandaz (2017), a amplitude e o comprimento de onda diminui com o aumento da fração de volume de óleo, entretanto, a amplitude diminui um pouco mais rápido se comparada com o comprimento de onda.

Rodriguez e Bannwart (2006b), estudaram uma solução analítica para prever a geometria da onda, afirmando que depende apenas da geometria da tubulação, das propriedades físicas e das vazões dos fluidos. Foi comparado as previsões do modelo e os dados experimentais, apresentando resultados favoráveis.

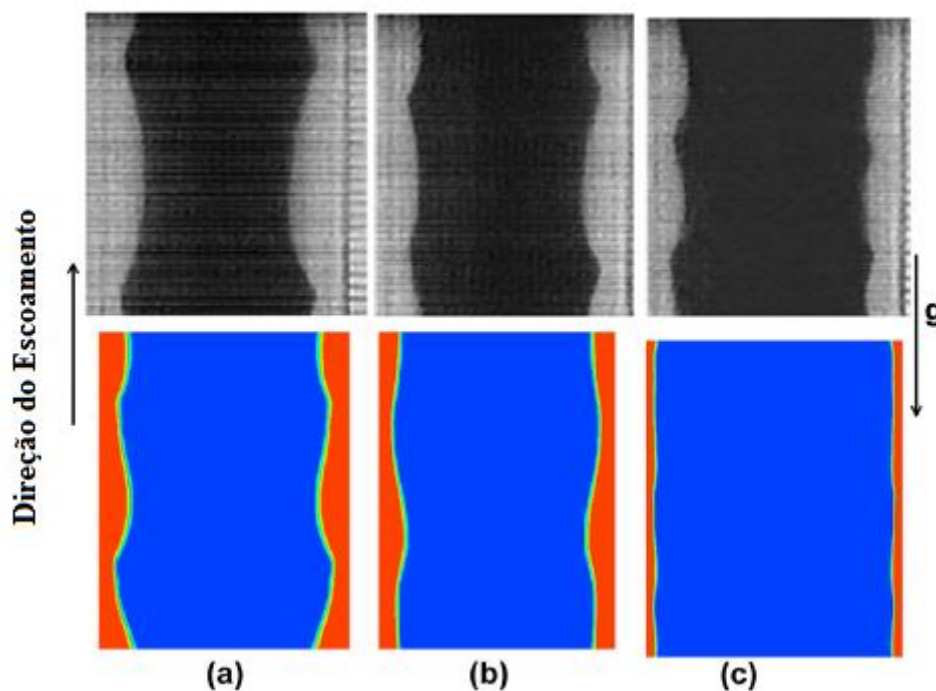
Figura 2.9 - Comprimento da onda (λ) em função da razão de velocidades superficiais óleo-água.



Fonte: Adaptado de RODRIGUEZ & BANNWART (2006).

Gupta, Turangan e Manica (2016), estudaram o padrão CAF de óleo-água, laminar-laminar, em um tubo de raio 14,2 mm, sob três condições: escoamento vertical ascendente, vertical descendente e por último sem considerar os efeitos da gravidade. Os autores modelaram as condições de escoamento correspondentes às experiências realizadas por Rodriguez e Bannwart (2006). Ambas as simulações CFD e experimentos mostraram para um escoamento vertical ascendente que a amplitude de onda foi reduzida com o aumento da taxa de fluxo de óleo e com a taxa de fluxo de água constante. Para o caso “sem gravidade” os resultados corresponderam com a solução analítica, isso para um escoamento anular plenamente desenvolvido. Para o escoamento vertical ascendente, as ondas “dentes de serra” são observadas na interface. Na Figura 2.10 apresenta-se a comparação das ondas interfaciais obtidas a partir dos experimentos realizados por Rodrigues e Bannwart (2006) e Simulações em CFD (água em vermelho e óleo azul) para escoamento anular de óleo-água verticalmente ascendente para $U_w = 0,058 \text{ m/s}$ e $U_o =$ (a) 0,21 m/s, (b) 0,37 m/s, (c) 0,61 m/s.

Figura 2.10 - Escoamento anular de óleo-água verticalmente ascendente.



Fonte: Adaptado de GUPTA, TURAGAN & MANICA (2016).

A CAF torna possível uma grande economia na potência de bombeamento. No século XIX, o incremento da carta de Moody abrangendo o número de Reynolds e o fator de atrito

facilitou o desenvolvimento de sistemas em tubulações, sendo estendido para trabalhos em tubos lubrificados (VARA, 2001).

Russel & Charles (1959) estudaram um fator de atrito levando em consideração a velocidade superficial da água. Para qualquer fluido newtoniano de uma fase em uma tubulação horizontal, a perda de pressão foi obtida usando a equação de Fanning:

$$\Delta P = \frac{2f\Delta LV^2\rho}{g_c D} \quad (2.14)$$

e por correlações empíricas entre f , fator de fricção, ε/D = rugosidade relativa, e DV^ρ/μ , número de Reynolds. Para o fluxo de duas fases em um tubo o fator de atrito foi especificado como:

$$f_w = \frac{\Delta P g_c D}{2\Delta LV_w^2\rho} \quad (2.15)$$

esta formulação apenas funcionou para um problema específico, não sendo estendida para outros casos.

Dehkordi *et al.* (2017) em sua pesquisa observaram experimentalmente e numericamente que para quantidades fixas de água o aumento no teor de óleo resulta em maiores queda de pressão, e mantendo a velocidade superficial do óleo constante com a adição da água a queda de pressão diminui, o que se é esperado usando a CAF.

2.4 Estado da Arte

Segundo Vara (2001), a primeira aplicação de escoamentos anulares com o transporte de óleo, surge com o pedido de patente de Clark e Shapiro (1949) da *Socony Vacuum Oil*. Os autores estudaram que a diferença de densidade da água e do óleo quando pequena, sendo o óleo com alta viscosidade, acarretaria no envolvimento do óleo pela água, formando assim um padrão de escoamento anular. Enfatizaram ainda, a utilização de aditivos para controlar a emulsão da água no óleo, fato que pode acontecer quando a viscosidade da água é maior que a do óleo.

Logo, surge o interesse na investigação do comportamento do escoamento óleo-água, revelando que na adição de água ao óleo ocorre a redução do gradiente de pressão, dentre outras contribuições. Pesquisadores canadenses se questionavam de como transportar óleos pesados em oleodutos, sendo um simples bombeio algo conflitante. Vários estudos experimentais sobre escoamentos anulares foram realizados no Canadá, com o patrocínio do *Research Council of*

Alberta. Os estudos foram mencionados por Russel, Hodgson e Govier (1959) e Charles, Govier e Hodgson (1961), dentre outras pesquisas. Dessa forma, os pesquisadores estudaram tecnologias de transporte de óleos pesados, desenvolvendo uma técnica que denominaram de *Core Flow*.

Russel, Hodgson e Govier (1959), analisou experimentalmente o escoamento óleo-água em tubulação horizontal. Para as vazões estudadas, foram observados apenas os padrões bolhas, estratificado e disperso. Os dados de perda de pressão foram correlacionados a um fator de atrito em função da velocidade superficial da água, como já especificado anteriormente no texto.

Charles, Govier e Hodgson (1961), estudaram o escoamento horizontal de água e óleo com densidades iguais, analisando diferentes tipos de padrões dependendo das velocidades superficiais da água e do óleo, concluindo que a adição de água ao escoamento de óleo diminui a perda de carga, sendo o escoamento anular o padrão que apresenta maior redução no gradiente de pressão, garantindo um interesse quando se trata do transporte de óleo com alta viscosidade.

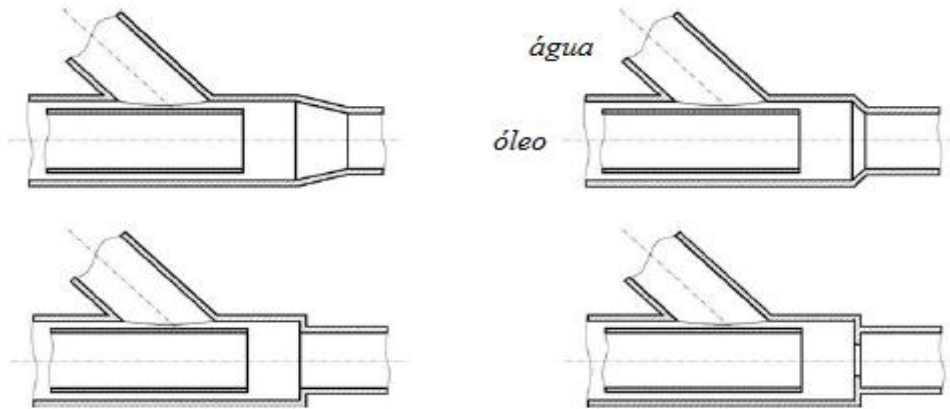
Com o decorrer do tempo, avanços ocorreram na Holanda com Ooms (1972) e Ooms e Oliemans (1984), e nos Estados Unidos com Joseph *et al.* (1984). Foram construídos oleodutos, operando conforme tecnologia *Core Flow*, na Venezuela e nos Estados Unidos, cujos bons resultados indicaram a viabilidade prática dessa técnica.

Oliemans *et al* (1987) avaliaram que a turbulência é bastante importante para o modelo teórico no estudo do *core flow* em tubos horizontais. No experimento foi utilizado um tubo horizontal de 16 m de comprimento e um óleo de 3 Pa.s de viscosidade. Dessa forma, foi observado que o efeito da turbulência no filme de lubrificação pode modificar a geometria da interface água-óleo, sendo indicadas correlações empíricas para prever o comprimento de onda e a fração volumétrica da água, observando que o comprimento da onda varia com a fração de água e a velocidade do óleo.

Sotgia, Tartarini e Stalio (2008), estudaram experimentalmente o padrão de escoamento e a queda de pressão da mistura água-óleo, onde são bombeados separadamente. A água e óleo são inseridos na seção de teste através de quatro configurações diferentes, ver Figura 3.1, que foram projetados para acomodar tubos com diferentes diâmetros. Com o objetivo de identificar as regiões com condições operacionais adequadas para as aplicações, propondo uma transição anular/estratificada com base em experimentos. Foram analisados um conjunto de sete tubos diferentes de pyrex e acrílico (são transparentes), com diâmetros variando entre 21 a 40 mm. São observados padrões de escoamento *core flow* ondulado, estratificado, estratificado com

ondulações, dentre outros. Dessa forma os resultados são analisados e comparados com resultados a leis empíricas apresentados na literatura.

Figura 2.11 - Misturadores de duas fases diferentes.



Fonte: SOTGIA, TARTARINI & STALIO (2008).

Ghosh *et al* (2009) analisaram o escoamento anular de forma geral, apresentando vários modelos para determinar a queda de pressão, fração volumétrica, parâmetros de operação e o efeito da geometria no escoamento. Logo, conclui-se que uma boa escolha dos parâmetros para o uso da CAF pode reduzir o custo de energia, favorecendo o transporte de petróleo.

Yusuf *et al* (2012) avaliaram experimentalmente o efeito da viscosidade do óleo e o gradiente de pressão no escoamento água e óleo, em um duto horizontal com diâmetro de 25,4mm, onde seis regimes de escoamento foram observados, dentre eles o core annular. Para o escoamento anular com o aumento da velocidade da água, a perturbação na interface também aumentou, entretanto, o óleo escoou no núcleo do duto. A maior diferença de pressão foi identificada na região onde o escoamento de óleo é a fase contínua.

Kaushik *et al.* (2012) investigaram o escoamento anular, óleo e água, através de contração e expansão súbita, simulando dois modelos em 3D desenvolvidos no software CFD FLUENT 6.3.26. O modelo foi utilizado para prever o estado de funcionamento em que a incrustação é mínima, no caso de uma expansão súbita, mostrando que a incrustação pode ser minimizada aumentando a velocidade do óleo ou aumentando o diâmetro do tubo. O estudo relata ainda, as medidas que podem ser tomadas para reduzir a incrustação. Tal modelo pode ser usado satisfatoriamente em uma previsão de características hidrodinâmicas do escoamento anular em contração e expansão súbita.

Strazza e Pietro (2012) apresentaram a CAF em tubulação horizontal de diâmetro 0,003 m e comprimento de 0,025m utilizando o pacote de software CFD ANSYS FLUENT 14.5. Estudaram a queda de pressão, após uma condição estratificada, usando água para limpeza de uma tubulação horizontal. Investigaram a influência do período de parada, os efeitos iniciais da retenção do óleo e a velocidade da limpeza, salientando a importância da velocidade para uma rápida eliminação da camada de óleo. Observaram os efeitos da tensão interfacial entre os dois fluidos em três casos: 0,01 N/m, 0,02 N/m, 0,03 N/m e 0,04 N/m, mostrando que para o valor mais baixo da tensão interfacial, a interface é menos ondulada, contudo, em valores muito baixos pode ocorrer a emulsão do fluido do núcleo que se dispersa no fluido anular.

Gadelha *et al* (2013) estudaram numericamente o efeito da temperatura e fração de volume de ar no escoamento trifásico óleo-água-ar, utilizando a CAF, em um duto horizontal com 3m de comprimento, com a influência da gravidade e das forças de arraste, utilizando o software ANSYS CFX. Observaram que para o escoamento trifásico de água-óleo-ar que o aumento da temperatura acarretou na redução da queda de pressão, o que é explicado pelo fato da diminuição da viscosidade do óleo. Contudo, o aumento da temperatura aumenta a viscosidade do ar, porém a fração do ar é muito pequena. A temperatura na entrada do tubo é uniforme, devido as condições de fronteira assumidas, à medida que os fluidos se afastam da entrada a temperatura diminui.

Andrade *et al.* (2014), apresentaram um estudo numérico da CAF usando a ferramenta computacional ANSYS CFX ® 12.0, para um escoamento horizontal e ascendente em um tubo curvado com 6 m de comprimento e 0,15m de diâmetro, com um raio de curvatura de 20 cm. O modelo matemático de mistura foi utilizado para desenvolver o escoamento bifásico água e óleo pesado, tridimensional, transiente e isotérmico, admitindo regime laminar para fase óleo e regime turbulento para a fase água, com o modelo de turbulência $k-\epsilon$. Foi observado o fluxo anular horizontal e o núcleo de óleo apresentou uma excentricidade ao eixo do tubo. Para avaliar o efeito do escoamento da água no desempenho do escoamento do óleo pesado, realizou-se uma simulação para avaliar o desligamento e reinício do bombeamento da água, após 12 segundos a bomba é desligada, e é observado que a queda de pressão aumenta, e assim, quando a bomba é ligada novamente o padrão anular começa a ser recuperado e a queda de pressão diminui após 20 segundos.

Tripathi *et al.* (2015), estudaram a CAF usando o ANSYS FLUENT 14.5 em um tubo horizontal de 0,025m e diâmetro de 0,003m, com o fluido anular newtoniano e o núcleo não-newtoniano, os dois fluidos são imiscíveis e incompressíveis, o óleo é injetado no tubo através

de um bocal. O modelo Volume of Fluid (VOF), Euleriano-Euleriano, foi utilizado para interface bem definida. A viscosidade do óleo é de $\mu_1 = 10 Pa.s^n$ onde $n = 1,2$, e a viscosidade da água é de $\mu_2 = 1.003 \times 10^{-3} Pa.s$, com densidades de $\rho_1 = 1100 kg/m^3$ e $\rho_2 = 998 kg/m^3$. Foram analisados a queda de pressão ao longo do tubo e a hidrodinâmica do escoamento, concluindo que a queda de pressão é reduzida para um valor próximo ao obtido apenas com o fluxo da água na tubulação, tornando viável o escoamento do fluido não-newtoniano altamente viscoso com a técnica CAF.

Hernández *et al.* (2016), analisaram a influência de um bocal na formação do fluxo core anular como PCAF, em um tubo horizontal usando simulação CFD com o modelo de turbulência $k-\varepsilon$. Inicialmente o estudo procurou analisar a descarga do bocal para o fluxo do núcleo e durante a junção dos fluidos. Daí, a formação e evolução das estruturas interfaciais a partir do bocal foram analisadas e comparadas com os padrões de fluxo de acordo com trabalhos presentes na literatura. A técnica CFD utilizada pode prever em curto espaço de tempo a forma dos efeitos de excentricidade do núcleo, pressão e da energia cinética de turbulência da descarga do bocal durante a formação da CAF.

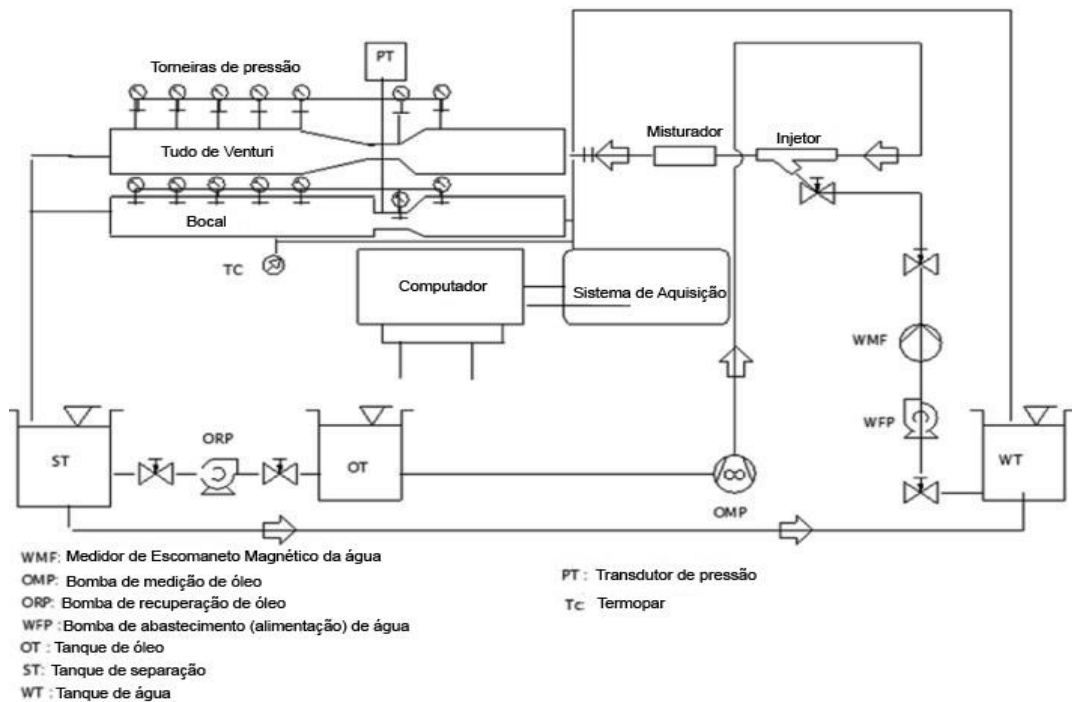
Shi, Mustapha e Hoi (2017), realizaram um estudo do escoamento horizontal de água e óleo em diferentes padrões (anular, bolhas de óleo em água e disperso), usando CFD com o pacote FLUENT e o modelo utilizado foi o Volume of Fluid (VOF) em conjunto com o SST $k-w$. Para o escoamento anular foram analisadas as influências do esquema de turbulência e os ângulos de contato com a parede da tubulação. Dessa forma, foram apresentados resultados da simulação para características específicas da CAF com óleo de viscosidade baixa, visto que a CAF é amplamente estudada com a viscosidade do óleo sendo duas ou três vezes superior à da água, mostrando que não há mudança acentuada do gradiente de velocidade na interface, que é um comportamento diferente dos perfis de velocidade para uma alta viscosidade.

Dehkordi *et al.* (2017), estudaram os padrões de escoamento CAF de água e óleo altamente viscoso através de um Bocal e um medidor Venturi em um tubo horizontal de 40 mm, utilizando o modelo VOF com o ANSYS FLUENT 16.2, dois modelos de turbulência foram usados: $k-\varepsilon$ e (SST) $k-w$. O objetivo da pesquisa foi avaliar se a CFD é uma ferramenta confiável para investigar o comportamento de água e óleo altamente viscoso nos dispositivos de medição, validando através de uma comparação com dados experimentais, o esboço da seção de teste experimental é mostrado na Figura 3.2. Dessa forma, foram investigados a queda de pressão, a velocidade e a fração volumétrica no escoamento anular. Os autores concluíram que a CFD

disponibiliza informações valiosas quando se trata do escoamento de misturas de óleo-água nesses dispositivos.

A seção de teste é composta de 11m de tubo Plexiglas transparente (para melhor visualização) na posição horizontal e o medidor de escoamento por bocal (NFM) instalado conforme mostra a Figura 3.2. O medidor de escoamento por bocal (NFM) foi fabricado de acordo com a norma ISO (ISO, 5167-4, 2003).

Figura 2.12 - Representação esquemática da instalação de testes.



Fonte: Adaptado de DEHKORDI *et al.* (2017).

Livinus, Yeung e Lao (2017), formularam correlações a partir do desligamento e reinício de experimentos com óleo de alta viscosidade em um tubo PVC de comprimento 5,5 m e com diâmetro interno de 26 mm, foi avaliado o tempo necessário para o reinício da CAF, após o desligamento devido a incrustações, no tubo que passa a escoar apenas água. As novas correlações superam o tempo de reinício quando comparado ao experimental, contudo, a evolução da queda de pressão apresentou-se de acordo com os experimentos.

A Tabela 2.1 mostra os diversos trabalhos relacionados com a CAF, como Charles, Govier e Hodgson (1961) e Dehkordi *et al.* (2017), descrevendo a configuração do sistema e o tipo de core-annular, com as respectivas propriedades físicas utilizadas por cada pesquisa.

Nesta perspectiva, este trabalho contribui com o tema, uma vez que, investiga o comportamento do escoamento anular de óleo e água em uma tubulação horizontal, que apresenta um medidor por bocal, analisando o perfil de velocidade e a queda de pressão ao longo desse escoamento, sendo os resultados confrontados com dados experimentais da literatura.

Tabela 2.1: Dados utilizados no padrão CAF.

Autor	Configuração do Sistema	Tipo do <i>core-flow</i>	Diâmetro (m)	Viscosidade da fase (Pa.s)		Velocidade da fase (m/s)	
				Óleo	Água	Óleo	Água
Charles, Govier e Hodgson (1961)	Horizontal	PCAF	-----	0,0063; 0,0168 0,065	-----	0,015 – 0,9	0,03 – 1,07
Ooms <i>et al.</i> (1983)	Horizontal	-----	0,051 e 0,2	2,3; 3,2 e 3,3	-----	0,97 – 1,1	-----
Oliemans <i>et al.</i> (1987)	Horizontal	-----	0,05	3	-----	1	-----
Arney <i>et al.</i> (1993)	Horizontal	PCAF	0,016	200;900; 2,7;0,8	-----	0,14-0,16	0,06-0,65
Bannwar t (2001)	Vertical descendente	WCAF	0,0254	17,6	-----	0,5 – 1,75	0,15 – 0,44
Sotgia, Tartarini e Stalio (2008)	Horizontal	WCAF	0,021; 0,215 0,026; 0,028 0,030 0,040	0,919	1,026x10 ⁻³	0,35 - 0,90; 0,19 – 0,97; 0,25 – 0,87; 0,26 – 0,68; 0,22 – 0,94; 0,27 – 0,92; 0,17 – 0,75	-----
Ghosh, Das e Das (2010)	Vertical	WCAF	0,012	0,2	-----	0,15 – 0,8	0,15 – 1,2
Andrade <i>et al.</i> (2013)	Horizontal Vertical ascendente	WCAF	0,15	10	8,89x10 ⁻³	-----	0,2;0,4;0,45;0,5; 0,55;0,6;0,8;1,0; 1,2;1,4;1,6;1,8 e 2,0.
Andrade <i>et al.</i> (2014)	Horizontal e Vertical ascendente	WCAF	0,15	10	8,89x10 ⁻³	-----	0,2;0,4;0,45;0,5; 0,55;0,6;0,8;1,0; 1,2;1,4;1,6;1,8 e 2,0.
Gupta, Turangan e Manica (2016)	Vertical ascendente e Vertical descendente	WCAF PCAF	0,0284	0,5	0,001	0,21; 0,37 e 0,61	0,058
Jiang <i>et al.</i> 2016	Horizontal	-----	0,012	0,2	-----	0,4-0,6	0,6-1,0
Dehkordi <i>et al.</i> (2017)	Horizontal	WCAF PCAF	0,04	0,9	1,026x10 ⁻³	0,25 – 0,75	0,44-1,32

Fonte: AUTOR (2017).

CAPÍTULO III

Este capítulo aborda a modelagem matemática do escoamento multifásico, descrevendo a matemática do problema físico em estudo. Sendo assim, o modelo matemático é composto pelas seguintes equações fundamentais, a Equação da Conservação de Massa, a Equação da Quantidade de Movimento e por equações constitutivas para estabelecer a relação entre o campo de tensões e o campo de velocidade. É enfatizado a metodologia do trabalho, destacando a descrição do problema físico, o domínio físico e as condições iniciais e de contorno utilizadas nas simulações numéricas.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho foi utilizado o pacote comercial ANSYS CFX versão 15.0, do qual possui um conjunto de softwares que possibilita a elaboração de um problema de CFD (Computational Fluid Dynamics). Para a resolução do problema a metodologia CFD no pacote segue os seguintes passos:

- I. Primeiro é construído o domínio de cálculo, onde as equações serão aplicadas;
- II. Após construir o domínio, é realizada a discretização através da construção da malha computacional, onde são definidos os limites dos volumes de controle;
- III. A terceira etapa contempla o pré-processamento, onde são configurados os modelos matemáticos, propriedades físicas dos materiais, condições de contorno e critérios de resolução numérica;
- IV. Após o pré-processamento, inicia-se a resolução numérica das equações;
- V. A última etapa é o pós-processamento que compreende a análise dos resultados através de gráficos, planos de corte, dentre outros.

A Tabela 3.1 associa os softwares da ANSYS nas suas respectivas funções.

Tabela 3.1: Funções dos softwares ANSYS-CFX.

Função	Software
Construção da Geometria	ICEM-CFD
Geração da Malha	ICEM-CFD
Pré-Processamento	CFX-Pré
Resolução Numérica	CFX-Solver
Pós-Processamento	CFX-Post

Fonte: AUTOR (2017).

Para a solução CFD de escoamento multifásico um único balanço de massa e três equações da Quantidade de Movimento não são suficientes para estudar os campos de escoamento de todas as fases envolvidas. Nas abordagens para a solução CFD multifásica de escoamentos dispersos, as equações para a fase contínua são resolvidas e existem várias formas de tratar a fase dispersa. Na modelagem matemática de escoamento multifásico podem ser utilizadas duas aproximações para o estudo das equações governantes:

- a) Euleriana-Euleriana: onde as equações de quantidade de movimento são resolvidas para cada uma das fases presentes (contínua e dispersa) e o acoplamento entre as fases se dá pela transferência interfacial.
- b) Euleriana-Lagrangiana: é assumido que o transporte de partícula é realizado pela fase contínua, sendo as equações de quantidade de movimento solucionadas apenas para a fase contínua.

O modelo matemático que descreve o escoamento multifásico compreende de um sistema de equações diferenciais parciais (as Equações de Conservação de Massa e da Quantidade de Movimento Linear) conhecidas como as equações de Navier-Stokes, sendo aplicadas para cada fase do escoamento e válidas para a solução do escoamento em regime laminar e turbulento.

3.1 Escoamento Monofásico

Nesta seção, estão descritas as equações governantes do modelo utilizado pelo ANSYS CFX versão 15.

Equação da Conservação de Massa

De forma genérica utilizando o operador vetorial ∇ a equação da Conservação de Massa em regime transiente pode ser escrita da seguinte forma (Bird, Stewart, Lightfoot, 2004):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U}) = 0 \quad (3.1)$$

Onde ρ é a massa específica do fluido e \vec{U} é ao vetor velocidade. O primeiro termo do lado esquerdo representa a taxa de variação temporal de massa em termos do elemento infinitesimal escolhido e o segundo termo representa a taxa líquida de fluxo de massa para fora da superfície de controle.

Equação da Quantidade de Movimento

A equação da quantidade de movimento para um volume de controle infinitesimal, em regime transiente, é dada pela seguinte equação (Bird, Stewart, Lightfoot, 2004):

$$\frac{\partial(\rho \vec{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U} \otimes \vec{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau} + \vec{S}_M \quad (3.2)$$

Onde ρ é a massa específica do fluido e \vec{U} é o vetor velocidade, u, v e w são as componentes deste vetor, e o tensor da tensão $\vec{\tau}$ está relacionado com a taxa de formação:

$$\vec{\tau} = \mu(\nabla \vec{U} + (\nabla \vec{U})^T) - \frac{2}{3} \delta \cdot \vec{U} \quad (3.3)$$

O primeiro e o segundo termo do lado direito da Equação (3.2) representam a aceleração total da partícula fluida, respectivamente a aceleração local e convectiva. Os dois primeiros termos do lado direito representam as forças de superfície, ou seja, forças de pressão (tensões normais), forças viscosas (tensões de cisalhamento) e o último termo representa às forças de campo denominadas de termo fonte.

3.2 Escoamento Multifásico

3.2.1 Conceitos Básicos em Escoamentos Multifásicos

Para se entender melhor o escoamento multifásico alguns termos devem ser definidos. Quando uma mistura fluida de óleo e água escoar através de um duto com seção transversal A,

com vazões volumétricas de óleo e água representados por Q_o e Q_A respectivamente, as velocidades médias de cada fase (velocidade superficial) são dadas por:

$$U_o = \frac{Q_o}{A} \text{ e } U_A = \frac{Q_A}{A} \quad (3.4)$$

A velocidade da mistura é definida pela divisão da vazão volumétrica total pela área da seção transversal da tubulação,

$$J = \frac{Q_o + Q_A}{A} \quad (3.5)$$

As frações volumétricas de injeção de óleo e água são, respectivamente:

$$f_o = \frac{Q_o}{Q_o + Q_A} \text{ e } f_A = \frac{Q_A}{Q_o + Q_A} \quad (3.6)$$

3.2.2 Modelo Não-Homogêneo

Neste modelo cada fase possui um campo de velocidade distintos. Estes campos são obtidos através da solução das equações da continuidade e da quantidade de movimento para cada fase.

Equação da Conservação da Massa

A equação que descreve a conservação de massa para o escoamento multifásico para a fase α é dada por (ANSYS, 2009):

$$\frac{\partial}{\partial t}(f_\alpha \rho_\alpha) + \nabla \cdot (f_\alpha \rho_\alpha \vec{U}_\alpha) = \sum_{\beta=1}^{N_p} \Gamma_{\alpha\beta} + S_{MS\alpha} \quad (3.7)$$

Onde: f_α é a fração volumétrica, ρ_α a massa específica, \vec{U}_α é o vetor velocidade. O termo $\Gamma_{\alpha\beta}$ é o fluxo mássico interfacial por unidade de volume e $S_{MS\alpha}$ representa possíveis fontes de massa, no caso de não ser levada em consideração, temos:

$$S_{MS\alpha} = 0$$

O subscrito α ou β , representam a fase contínua ou a fase dispersa; $\alpha\beta$ ou $\beta\alpha$ representam a interação entre as fases α e β junto à interface.

Equação da Quantidade de Movimento

As equações de transporte de quantidade de movimento para a fase α são dadas por (ANSYS, 2009):

$$\frac{\partial}{\partial t}(f_\alpha \rho_\alpha \vec{U}_\alpha) + \nabla \cdot [(f_\alpha (\rho_\alpha \vec{U}_\alpha \otimes \vec{U}_\alpha))] = -f_\alpha \nabla P_\alpha + \nabla \cdot \{f_\alpha (\tau_\alpha + \tau_\alpha^{turb} + \tau_s)\} + \sum_{\beta=1}^{N_P} (\Gamma_{\alpha\beta}^+ \vec{U}_\beta - \Gamma_{\beta\alpha}^+ \vec{U}_\alpha) + \vec{S}_{M\alpha} + \vec{M}_\alpha \quad (3.8)$$

onde:

- I. O sub-índice α indica a fase no escoamento multifásico, f, ρ, μ e \vec{U} são, respectivamente, fração volumétrica, densidade, viscosidade dinâmica e o vetor velocidade, P é a pressão;
- II. $\vec{S}_{M\alpha}$ representa o termo das forças externas que atuam sobre o sistema por unidade de volume.
- III. $\Gamma_{\alpha\beta}^+$ corresponde à taxa de fluxo mássico por unidade de volume da fase β para a fase α vice-versa;
- IV. τ_α e τ_α^{turb} correspondem respectivamente às tensões viscosas e às tensões turbulentas de Reynolds;
- V. τ_s corresponde a tensão da fase sólida;
- VI. \vec{M}_α é a força interfacial total que age entre as duas fases, por unidade de volume.
- VII. $\sum_{\beta=1}^{N_P} (\Gamma_{\alpha\beta}^+ \vec{U}_\beta - \Gamma_{\beta\alpha}^+ \vec{U}_\alpha)$ representa a transferência de momento induzida pela transferência de massa interfacial.

A força total por unidade de volume pode ser expresso da seguinte forma:

$$\vec{M}_\alpha = \sum_{\beta \neq \alpha} \vec{M}_{\alpha\beta} \quad (3.9)$$

onde $\vec{M}_{\alpha\beta}$ é dado por:

$$\vec{M}_{\alpha\beta} = \vec{M}_{\alpha\beta}^D + \vec{M}_{\alpha\beta}^L + \vec{M}_{\alpha\beta}^{Lub} + \vec{M}_{\alpha\beta}^{VM} + \vec{M}_{\alpha\beta}^{TD} + \vec{M}_{\alpha\beta}^S \quad (3.10)$$

e:

- I. $\vec{M}_{\alpha\beta}^D$ - força de arraste;
- II. $\vec{M}_{\alpha\beta}^L$ - força “lift”;
- III. $\vec{M}_{\alpha\beta}^{Lub}$ - força de lubrificação da parede;
- IV. $\vec{M}_{\alpha\beta}^{VM}$ - força de massa virtual;

- V. $\vec{M}_{\alpha\beta}^{TD}$ - força de dispersão turbulenta;
- VI. $\vec{M}_{\alpha\beta_S}$ - força de pressão do sólido.

A taxa de transferência de momento entre as fases é dada principalmente pela ação da força de arraste, $\vec{M}_{\alpha\beta}^D$, dessa forma, as demais forças atuantes na interface não foram consideradas.

No presente trabalho foram levados em consideração as seguintes hipóteses em relação à hidrodinâmica do escoamento:

- I. Não existe fonte de massa;
- II. Não há transferência de massa entre as fases;
- III. Não há transferência de quantidade de movimento induzida pela transferência de massa interfacial;
- IV. Os efeitos do campo gravitacional são desprezíveis;
- V. Escoamento isotérmico, cuja temperatura é 25°C;
- VI. As paredes da tubulação e sua rugosidade são desprezíveis, isto é, paredes lisas.

Portanto, com essas hipóteses as Equações (3.7) e (3.8) podem ser escritas da seguinte forma:

$$\frac{\partial}{\partial t}(f_\alpha \rho_\alpha) + \nabla \cdot (f_\alpha \rho_\alpha \vec{U}_\alpha) = 0 \quad (3.11)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(f_\alpha \rho_\alpha (f_\alpha \rho_\alpha \vec{U}_\alpha)) + \nabla \cdot [(f_\alpha (\rho_\alpha \vec{U}_\alpha \otimes \vec{U}_\alpha))] \\ = -f_\alpha \nabla P_\alpha + \nabla \cdot \{f_\alpha (\tau_\alpha + \tau_\alpha^{turb})\} + \vec{M}_\alpha \end{aligned} \quad (3.12)$$

3.3 Equações de Fechamento

A formulação de transferência de momento entre as fases e de tensão turbulenta depende do regime de escoamento. Dessa forma, a capacidade do modelo multifásico incidi na modelagem desses termos, que são chamados de leis de fechamento.

As equações constitutivas ou equações de fechamento, são correlações que expõe as tensões viscosas e turbulentas, τ_α e τ_α^{turb} , e os termos de transferência de interface, em função das variáveis de cálculo (U , ρ , etc) (PALADINO, 2005).

3.3.1 Modelo de Mistura

O modelo de mistura é mais simples, já que trata ambas as fases α e β simetricamente (ANSYS, 2009). A área superficial por unidade de volume é dada da seguinte forma:

$$A_{\alpha\beta} = \frac{f_{\alpha}f_{\beta}}{d_{\alpha\beta}} \quad (3.13)$$

onde, $d_{\alpha\beta}$ é a escala de comprimento de área, que deve ser especificada. No trabalho considerou-se este parâmetro como sendo 1 mm.

O coeficiente de transferência interfacial pode ser correlacionado em termos do número de Reynolds e o número de Prandtl da mistura, dados por:

$$Re_{\alpha\beta} = \frac{\rho_{\alpha\beta}|\vec{U}_{\beta}-\vec{U}_{\alpha}|d_{\alpha\beta}}{\mu_{\alpha\beta}} \text{ e } Pr_{\alpha\beta} = \frac{\mu_{\alpha}C_{p\alpha\beta}}{\lambda_{\alpha\beta}} \quad (3.14)$$

onde, $\mu_{\alpha\beta}$ e $C_{p\alpha\beta}$, $\lambda_{\alpha\beta}$ são viscosidade, capacidade calorífica específica, condutividade térmica da mistura, respectivamente. Sendo a viscosidade e a densidade da mistura dados pelas seguintes equações:

$$\mu_{\alpha\beta} = f_{\alpha}\mu_{\alpha} + f_{\beta}\mu_{\beta}$$

$$\rho_{\alpha\beta} = f_{\alpha}\rho_{\alpha} + f_{\beta}\rho_{\beta}$$

3.3.2 Forças de Arraste Interfacial

A força de arraste interfacial por unidade de volume que age na fase α devido à interação com a fase β é expressa em função da velocidade relativa como (ANSYS, 2009):

$$\vec{M}_{\alpha\beta}^D = C_{\alpha\beta}^{(d)} \left(\vec{U}_{\beta} - \vec{U}_{\alpha} \right) \quad (3.15)$$

onde $C_{\alpha\beta}^{(d)}$ é o coeficiente de arraste interfacial, dado pela seguinte equação:

$$C_{\alpha\beta}^{(d)} = \frac{C_D}{8} A_{\alpha\beta} \rho_{\alpha} \left| \vec{U}_{\alpha} - \vec{U}_{\beta} \right| \quad (3.16)$$

onde C_D é o coeficiente de arraste, $C_D = 0,44$, $A_{\alpha\beta}$ é a área superficial por unidade de volume, ρ_{α} é a massa específica da fase contínua e $\left| \vec{U}_{\alpha} - \vec{U}_{\beta} \right|$ é a velocidade de deslizamento entre as fases dispersa e contínua, na direção da fase contínua.

3.3.3 Modelo de turbulência k - ε

A turbulência é definida como flutuações no campo de fluxo no tempo e no espaço, sendo um procedimento complexo e garante mudanças significativas nas características do escoamento. A turbulência ocorre quando as forças de inércia do fluido se tornam significativamente maiores que às forças viscosas, com um elevado número de Reynolds do escoamento.

O modelo de turbulência adotado neste trabalho foi o k - ε padrão. É um modelo de viscosidade turbulenta onde os tensores de Reynolds são proporcionais aos gradientes de velocidade média. São duas equações de transporte resolvidas para o comprimento turbulento e a escala de tempo ou para quaisquer duas combinações linearmente independentes dessas equações. Sendo k a energia cinética turbulenta, definida como a variância das flutuações na velocidade; ε é a taxa de dissipação turbulenta, que é a taxa pela qual as flutuações de velocidade se dissipam.

I. Equação da Energia Cinética Turbulenta:

$$\frac{\partial(\rho_\alpha f_\alpha k_\alpha)}{\partial t} + \nabla \bullet \left\{ f_\alpha \left[\rho_\alpha \vec{U}_\alpha k_\alpha - \left(\mu + \frac{\mu_{t\alpha}}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla k_\alpha \right] \right\} = f_\alpha (G_\alpha - \rho_\alpha \varepsilon_\alpha) \quad (3.17)$$

II. Equação da taxa de dissipação turbulenta:

$$\frac{\partial(\rho_\alpha f_\alpha k_\alpha)}{\partial t} + \nabla \bullet \left\{ f_\alpha \rho_\alpha \vec{U}_\alpha \varepsilon_\alpha - \left(\mu + \frac{\mu_{t\alpha}}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon_\alpha \right\} = f_\alpha \frac{\varepsilon_\alpha}{k_\alpha} (C_1 G_\alpha - C_2 \rho_\alpha \varepsilon_\alpha) \quad (3.18)$$

onde: G_α é geração de energia cinética turbulenta no interior da fase α ;

ε_α é a taxa de dissipação de energia cinética turbulenta da fase α , dada por:

$$\varepsilon_\alpha = \frac{c_\mu q_\alpha^3}{l_\alpha}$$

k_α é a energia cinética turbulenta da fase α , dada pela seguinte expressão:

$$k_\alpha = \frac{q_\alpha^2}{2}$$

Sendo:

l_α o comprimento de escala espacial, q_α a escala de velocidade, c_μ é uma constante empírica dada pela seguinte expressão:

$$c_\mu = 4c_\alpha^2$$

$\mu_{t\alpha}$ é a viscosidade turbulenta, dada por:

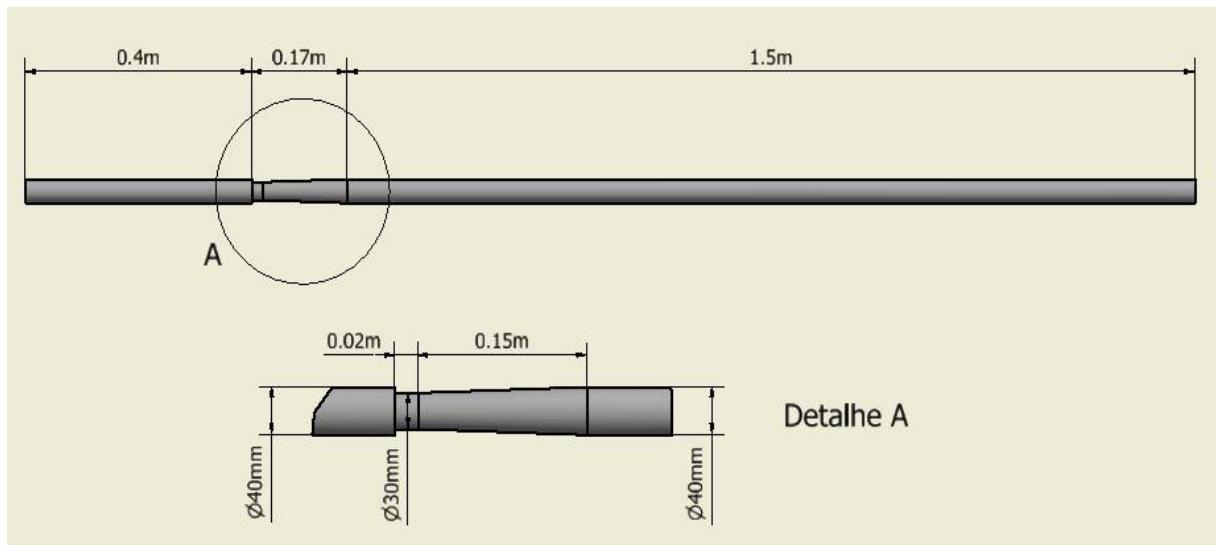
$$\mu_{t\alpha} = c_\mu \rho_\alpha \frac{k_\alpha^2}{\varepsilon_\alpha}$$

Dessa forma, as constantes adotadas neste trabalho são: $C_1 = 1.44$; $C_2 = 1.92$; $C_\mu = 0.09$; $\sigma_k = 1.0$ e $\sigma_\varepsilon = 1.3$.

3.4 Descrição do Problema Físico

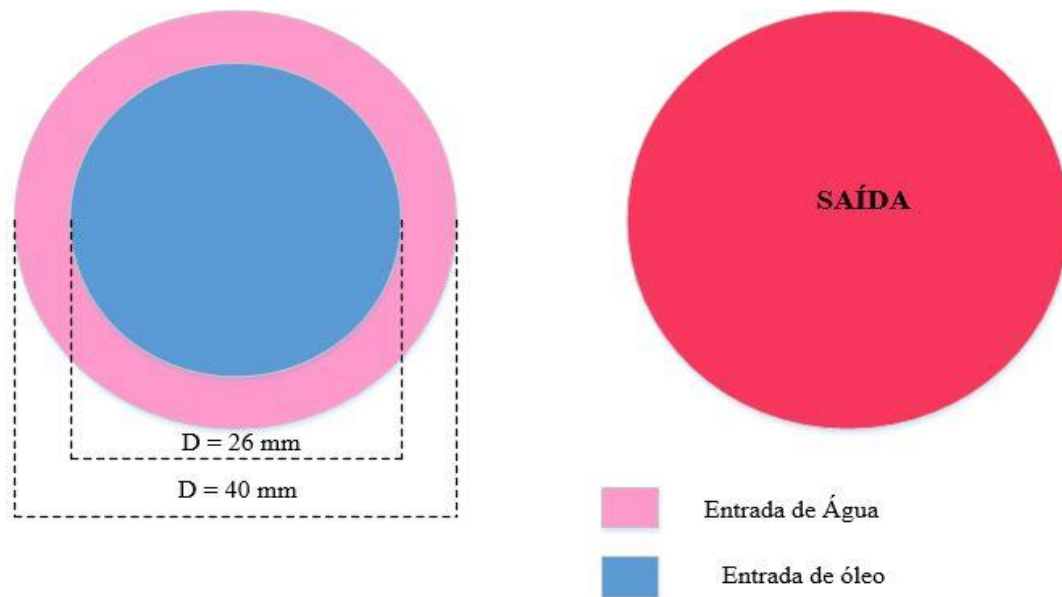
O problema físico trata-se de uma tubulação com um medidor de escoamento por bocal (NFM) posicionado horizontalmente, utilizado por Dehkordi *et al* (2017), ver Figura 3.1, com 2,070 m de comprimento, seção circular de 40mm de diâmetro e uma seção de estrangulamento de 30mm. Para a investigação do escoamento isotérmico de óleo pesado e água, o diâmetro de entrada de água é igual a 14 mm e o diâmetro referente a entrada de óleo é igual a 26 mm. O esboço da seção de teste experimental é mostrado na Figura 2.12. A Figura 3.2 representa a região de entrada de óleo e água e a região de saída.

Figura 3.1 - Tubulação Horizontal com 40 mm de diâmetro (medidor de escoamento por bocal).



Fonte: AUTOR (2017).

Figura 3.2: Esquema detalhado da região de entrada de água e óleo e saída do duto horizontal.

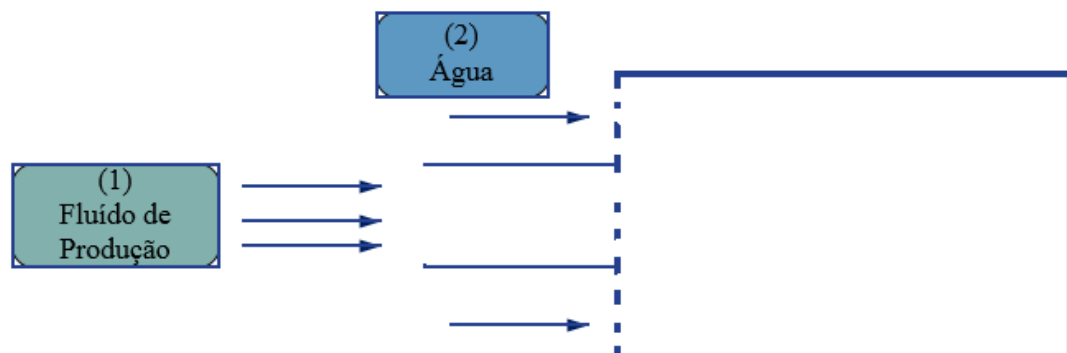


Fonte: AUTOR (2017).

Seja a Figura 3.3 a representação do esquema da região inicial próximo à região de injeção na tubulação, podemos considerar:

1. Região de escoamento do fluido de produção de um reservatório petrolífero;
2. Região de escoamento da água injetada com o objetivo de reproduzir o escoamento anular do tipo líquido-líquido (água-óleo) em dutos (flowline).

Figura 3.3: Região inicial próximo ao bocal de injeção da tubulação.



Fonte: AUTOR (2017).

As áreas da seção transversal das regiões correspondentes as fases óleo (A_o) e água (A_a) são dadas pelas seguintes equações:

$$A_o = \frac{\pi}{4} D_2^2 \quad (3.19)$$

e

$$A_a = \frac{\pi}{4} (D_1^2 - D_2^2) \quad (3.20)$$

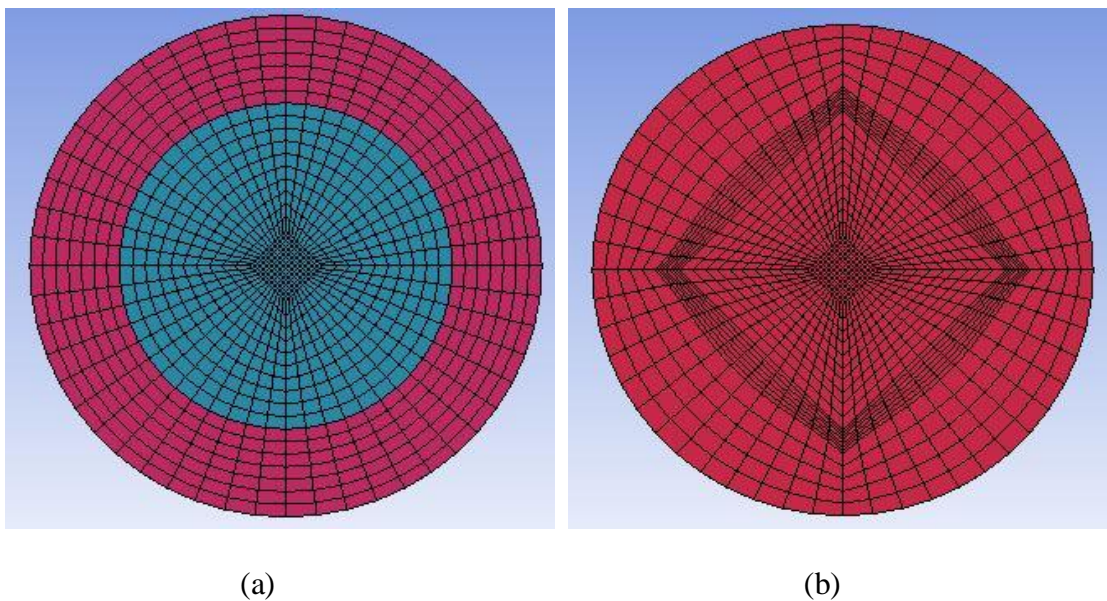
onde, D_1 é o diâmetro da tubulação e D_2 o diâmetro no duto de fluido de produção (óleo).

3.5 Domínio Físico

3.5.1 Domínio Computacional

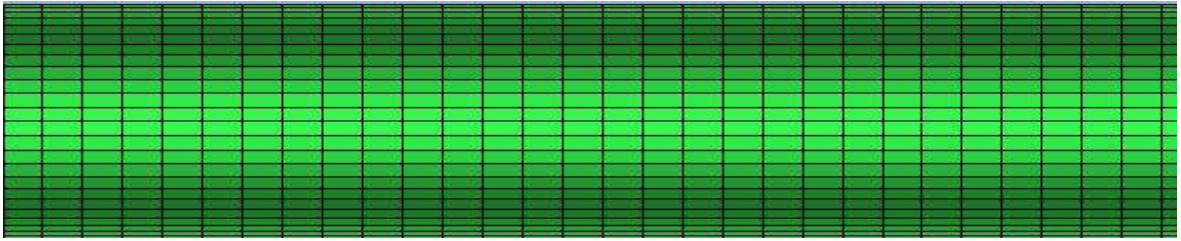
O domínio computacional é representado pela malha do tubo usado no presente trabalho, Figuras 3.4, 3.5 e 3.6. Para geração da malha foi necessário representar a geometria no ICEM-CFD 15.0 pois a garantia de uma grande opção de criação de geometrias estruturadas e não estruturadas com auxílio de pontos, previamente definidos, curvas e superfícies em um espaço tridimensional, é obtida.

Figura 3.4: Representação da malha na região de entrada de água e óleo pesado (a) e na região de saída (b) do duto horizontal.



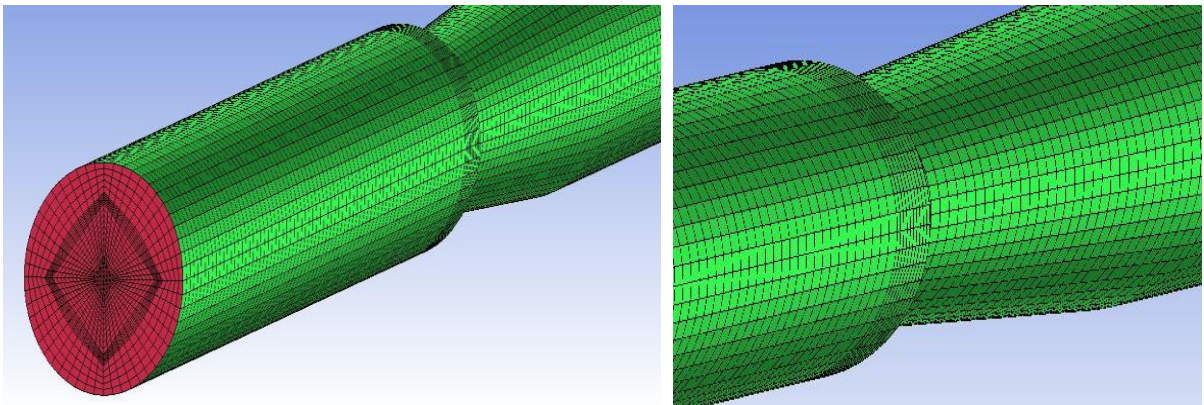
Fonte: AUTOR (2017).

Figura 3.5: Detalhe externo da malha na região da parede do duto horizontal.



Fonte: AUTOR (2017).

Figura 3.6: Representação da malha na região do Bocal.



Fonte: AUTOR (2017).

Para gerar a malha sobre a geometria do tubo, foi necessário realizar as seguintes etapas:

- I. Definir interativamente o modelo de blocos ou blocagem por meio de divisão, definições de borda, modificação das faces e movimento nos vértices;
- II. Verificar a qualidade dos blocos para assegurar que a blocagem gere uma malha de boa qualidade;
- III. Considerar cotas nos lados dos blocos para definir o tamanho máximo dos elementos ou volumes de controle e razão de expansão;
- IV. Verificar a qualidade da malha para garantir que os critérios de qualidade específicos sejam atendidos;
- V. Repetir o(s) procedimento(s) se necessário.

Foi realizado um estudo de dependência de malha, observando o quanto os resultados dependem do domínio computacional que é a malha, composta por elementos hexaédricos. Para isto, foram geradas 3 malhas para o estudo do caso em questão. O número de elementos

expostos na Tabela 3.2 foram baseados no trabalho experimental e numérico de Dehkordi *et al* (2017), onde foi usada uma malha computacional com 500.871 elementos hexaédricos. As três malhas foram submetidas ao mesmo tipo de problema, para a observação dos resultados com menor erro relativo entre as soluções analíticas e numéricas.

Tabela 3.2: Característica das Malhas Numéricas

Malha Computacional	Total de Elementos Hexaédricos	Número de Nós
Malha 1	471.991	484860
Malha 2	595.680	610572
Malha 3	613.995	629228

Fonte: AUTOR (2017).

A Figura 3.6 descreve o modelo da malha computacional 3D, composta de 595.680 elementos hexaédricos.

A modelagem matemática adotada no presente trabalho para descrever o comportamento no interior da tubulação depende das situações avaliadas, expostas no Quadro 3.1. As propriedades físico-químicas usadas nas duas situações estão apresentadas na Tabela 3.3.

Quadro 3.1: Situações Avaliadas

Situação	Escoamento	Fases presentes	
		Água	Óleo
A	Monofásico	X	
B	Bifásico	X	X

Fonte: AUTOR (2017).

Tabela 3.3: Propriedades físico-químicas das fases utilizadas nas simulações, no presente trabalho.

Propriedades físicas	Água	Óleo Pesado	Fonte
Massa Específica (kg/m ³)	998	910	Dehkordi <i>et al</i> (2017)
Viscosidade Dinâmica (Pa.s)	1,026x10 ⁻³	0,9	Dehkordi <i>et al</i> (2017)
Tensão Superficial (N/m)	0,072		

Fonte: AUTOR (2017).

3.6 Condições Iniciais e de Contorno

Foi considerado que a tubulação inicialmente estava cheia com água. Logo, as condições sobre as fronteiras são definidas de acordo como segue:

- a) Na seção anular referente à entrada de água foi adotado um valor prescrito e não nulo para a componente de velocidade axial e a fração volumétrica de água na direção z (axial) e nulo para as outras componentes nas direções r e θ , ou seja:

$$R - \Delta r < r < R \Rightarrow \begin{cases} u_{z,A} = u_A \\ f_A = 1,0 \\ u_{z,o} = f_o = 0 \end{cases} \quad (3.21)$$

onde R é o raio da respectiva tubulação e r é o raio do núcleo de óleo.

- b) Na seção de entrada de óleo, foi considerada uma velocidade U_o não nula e uma fração volumétrica do óleo de $f_o = 1,0$ na direção z e nulo para as componentes nas direções r e θ . Dessa forma, considere as seguintes condições:

$$0 < r < R - \Delta r \Rightarrow \begin{cases} u_{z,o} = u_o \\ f_o = 1,0 \\ u_{r,o} = u_{r,A} = u_{z,A} = f_A = 0 \end{cases} \quad (3.22)$$

Onde R é o raio das respectivas tubulações e r é o raio do núcleo de óleo.

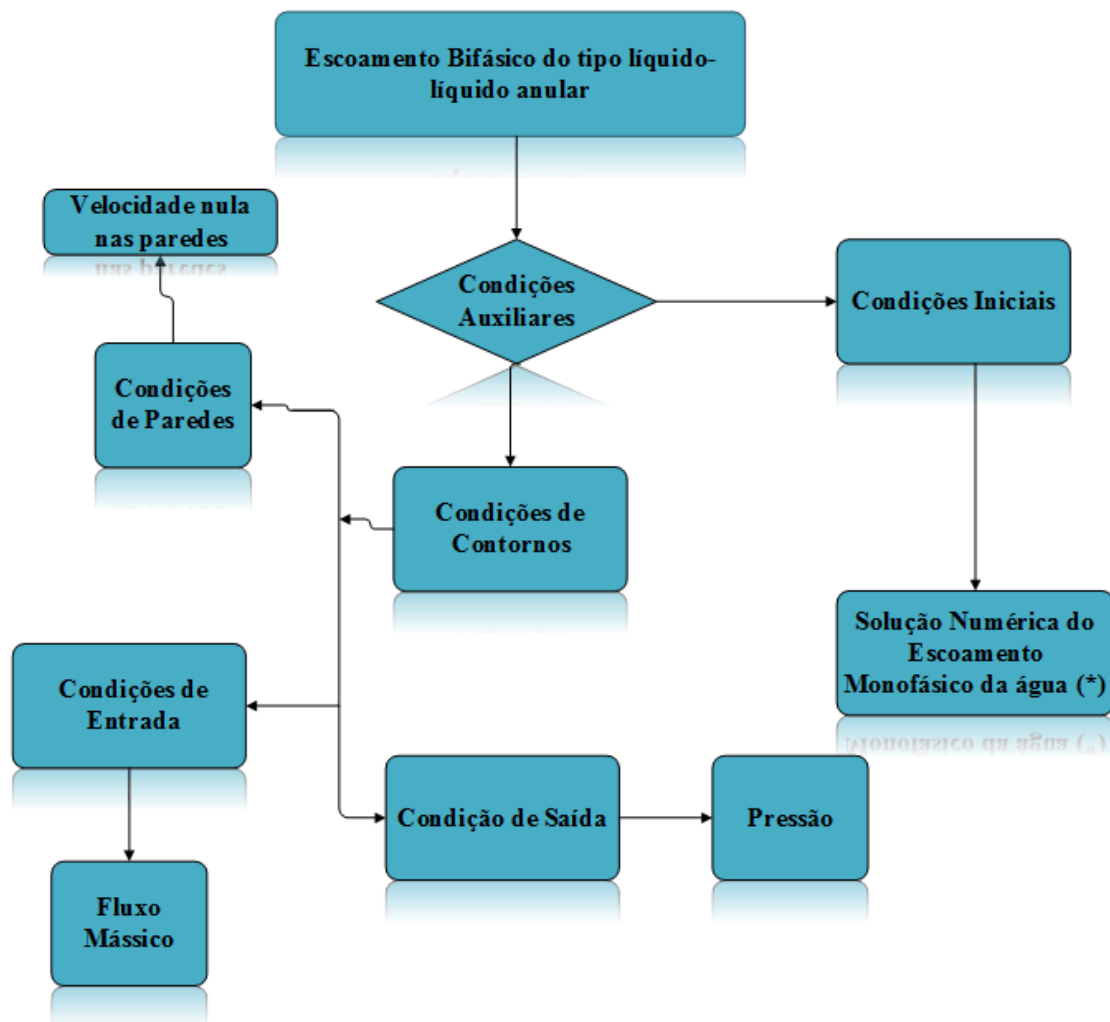
- c) Nas fronteiras, com relação as paredes da tubulação foi considerado a condição de não-deslizamento, portanto:

$$\begin{aligned} u_{r,A} = u_{\theta,A} = u_{z,A} &= 0 \\ u_{r,o} = u_{\theta,o} = u_{z,o} &= 0 \end{aligned} \quad (3.23)$$

- d) Na seção de saída foi prescrito uma pressão estática constante de $P = 86126,25 Pa$.

A figura 3.7 ilustra o fluxograma que resume o processo de solução do problema físico desta pesquisa utilizando CFD.

Figura 3.7: Etapas para a solução do problema CAF.



(*) Nas Condições em Estudo

O Quadro 3.2 apresenta os modelos numéricos necessários para execução do problema, os métodos de solução do sistema de equações lineares, a função de interpolação, entre outros.

Estudos realizados sobre o tema desta pesquisa é escasso na literatura, trabalhos experimentais e numéricos que apresentem escoamentos de líquidos imiscíveis. Contudo, para a validação das simulações realizadas, os resultados foram comparados com os dados utilizados pelo trabalho de Dehkordi *et al* (2017), que apresenta de forma clara sua pesquisa na área deste trabalho.

Quadro 3.2: Condições Gerais do Problema e da Solução Numérica.

Característica	Consideração	
	Monofásico	Bifásico
Regime	Permanente	Transiente
Passo de Tempo	-----	0,1 s
Critério de Convergência para a	10^{-7}	10^{-7}
Solução dos Sistemas de Equações	(RMS)	(RMS)
Esquema de Advecção	Alta Resolução	Alta Resolução
Esquema Transiente	-----	Segunda Ordem
Esquema de Interpolação para a	Trilinear	Trilinear
Pressão		
Esquema de Interpolação para a	Trilinear	Trilinear
Velocidade		
Método Numérico	Volumes Finitos	Volumes Finitos
Modelo	-----	Não Homogêneo
Condições do Modelo	Ambientes (25°C e 1 atm)	Ambientes (25°C e 1 atm)

Fonte: AUTOR (2017).

CAPÍTULO IV

Este capítulo apresenta os resultados e as discussões dos casos estudados, analisando a influência de cada parâmetro avaliado: velocidade superficial da água e do óleo, queda de pressão bifásica e monofásica, fração volumétrica da água e do óleo, dentre outros. De início são apresentados os resultados obtidos nas simulações de refino de malha e na validação do modelo computacional utilizado nas simulações realizadas no pacote ANSYS-CFX versão 15.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O comportamento do transporte de óleo pesado na tubulação lubrificada com água nas paredes, foi estudado numericamente com a utilização de computadores com processadores Intel Core com 3.40 GHZ, 8 GB RAM, no laboratório LABRADS (Laboratório de Refrigeração por Adsorção) no Centro de Energias Alternativas e Renováveis – CEAR da Universidade Federal da Paraíba – UFPB.

Na Tabela 4.1 são apresentados os diferentes casos usados para as diferentes simulações, onde estão explícitos os valores dos seguintes parâmetros: velocidade do óleo, velocidade da água, vazão da água e vazão do óleo. Nesta tabela é possível mostrar 4 casos para a velocidade do óleo (0,45m/s, 0,55m/s, 0,65m/s e 0,75m/s), onde a velocidade da água varia de 0,44 m/s a 1,32 m/s mantendo uma variação de 0,22 m/s. A água escoar em regime turbulento e o óleo em regime laminar, durante todo o comprimento do duto.

Segundo Andrade (2008) para que o transporte do óleo através da técnica *core-flow* seja otimizado, deve-se realizar uma mudança na velocidade superficial da água, mantendo a velocidade superficial do óleo constante. Dessa forma, o autor realizou simulações utilizando velocidades superficiais de água variando entre 0,4 e 1,4 m/s, com a velocidade superficial do óleo fixa e igual a 0,4 m/s, buscando uma eficiência máxima na lubrificação da parede, ou seja, uma menor queda de pressão.

Tabela 4.1: Dados utilizados nas simulações numéricas do escoamento para o óleo em regime laminar e a água em regime turbulento.

Regime Transiente			Regime de Escoamento		Vazão Volumétrica	
Experimentos Numéricos	Velocidade da fase, U_f (m/s)		Água (a)	Óleo (o)	Q_A (m³/s)	Q_O (m³/s)
	Óleo (o)	Água (a)			Água (a)	Óleo (o)
1	0,45	0,44	Turbulento	Laminar	3,1931E-04	2,3892E-04
2	0,45	0,66	Turbulento	Laminar	4,7897E-04	2,3892E-04
3	0,45	0,88	Turbulento	Laminar	6,3862E-04	2,3892E-04
4	0,45	1,10	Turbulento	Laminar	7,9828E-04	2,3892E-04
5	0,45	1,32	Turbulento	Laminar	9,5793E-04	2,3892E-04
6	0,55	0,44	Turbulento	Laminar	3,1931E-04	2,9201E-04
7	0,55	0,66	Turbulento	Laminar	4,7897E-04	2,9201E-04
8	0,55	0,88	Turbulento	Laminar	6,3862E-04	2,9201E-04
9	0,55	1,10	Turbulento	Laminar	7,9828E-04	2,9201E-04
10	0,55	1,32	Turbulento	Laminar	9,5793E-04	2,9201E-04
11	0,65	0,44	Turbulento	Laminar	3,1931E-04	3,4510E-04
12	0,65	0,66	Turbulento	Laminar	4,7897E-04	3,4510E-04
13	0,65	0,88	Turbulento	Laminar	6,3862E-04	3,4510E-04
14	0,65	1,10	Turbulento	Laminar	7,9828E-04	3,4510E-04
15	0,65	1,32	Turbulento	Laminar	9,5793E-04	3,4510E-04
16	0,75	0,44	Turbulento	Laminar	3,1931E-04	3,9820E-04
17	0,75	0,66	Turbulento	Laminar	4,7897E-04	3,9820E-04
18	0,75	0,88	Turbulento	Laminar	6,3862E-04	3,9820E-04
19	0,75	1,10	Turbulento	Laminar	7,9828E-04	3,9820E-04
20	0,75	1,32	Turbulento	Laminar	9,5793E-04	3,9820E-04

4.1 Teste de Convergência de Malha

As soluções alcançadas pelas simulações em CFD devem ser independente da malha, isto é, com a malha refinada, os resultados obtidos anteriormente não podem sofrer alterações. Contudo, este objetivo é difícil de atingir para simulações de utilidade prática, visto que, quanto mais refinada for a malha, maior será o custo computacional da simulação, podendo ser inviável (EGER, 2010).

Para o teste de convergência de malhas, foi realizado a comparação entre os perfis de velocidades em cada malha, verificando o grau de refinamento sendo observado a independência dos resultados. Foram geradas 3 malhas utilizando o software ICEM, a descrição das malhas está exposta na Tabela 3.2. Salientando que nos testes de malha foi determinado o escoamento monofásico de água, consequentemente o custo computacional para uma simulação bifásica será bem maior.

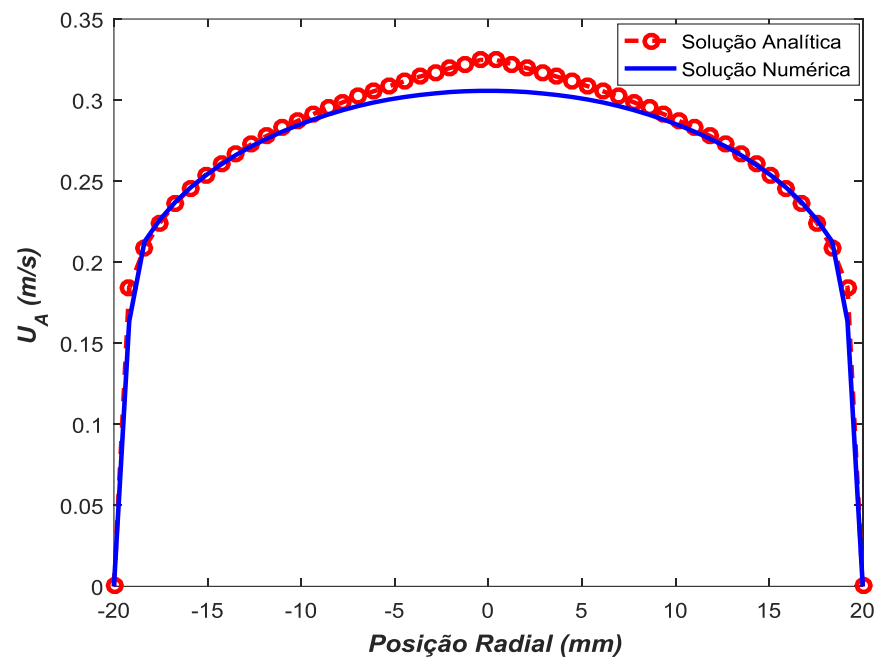
Tabela 4.2: Tempo de Convergência para cada malha empregada

Malha	Tempo de Convergência [h:min:s]
01	0:30:27
02	1:40:30
03	2:39:25

Fonte: AUTOR (2017).

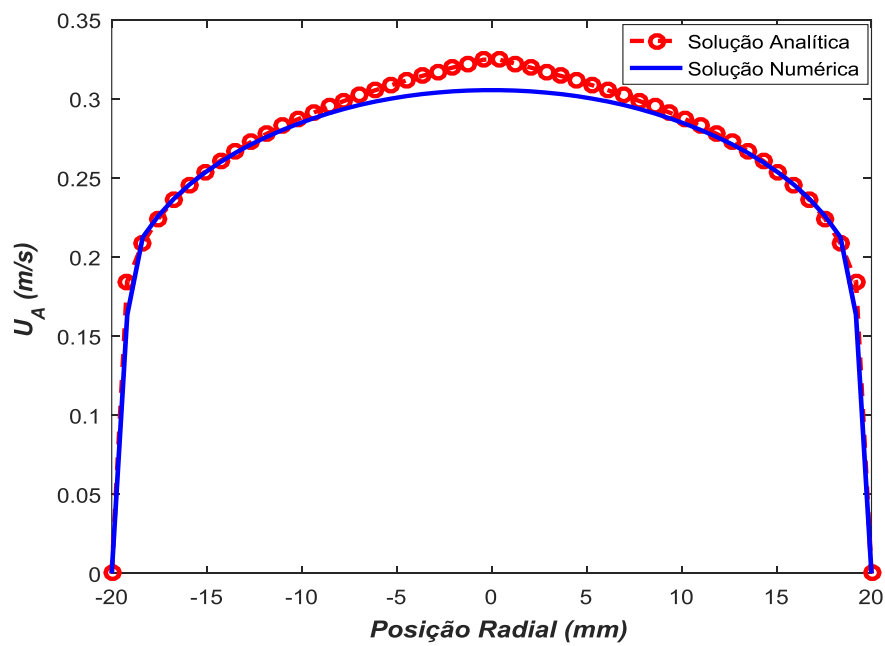
Os testes de malha foram realizados através da análise da solução numérica e analítica do escoamento monofásico da água, observando os perfis de velocidade ao longo do comprimento da tubulação, conforme mostra as Figuras 4.1, 4.2 e 4.3. Os gráficos mostram o comportamento de independência do refinamento de malhas, que apontam a similaridade nos perfis de velocidades, e assim, ao analisar o custo computacional das malhas geradas, foi selecionada a Malha 01 para realização das demais simulações em escoamento bifásico de água e óleo.

Figura 4.1: Comparação entre as velocidades da água obtida de forma analítica (literatura) e numérica (presente trabalho) em função da posição radial para a Malha 01.



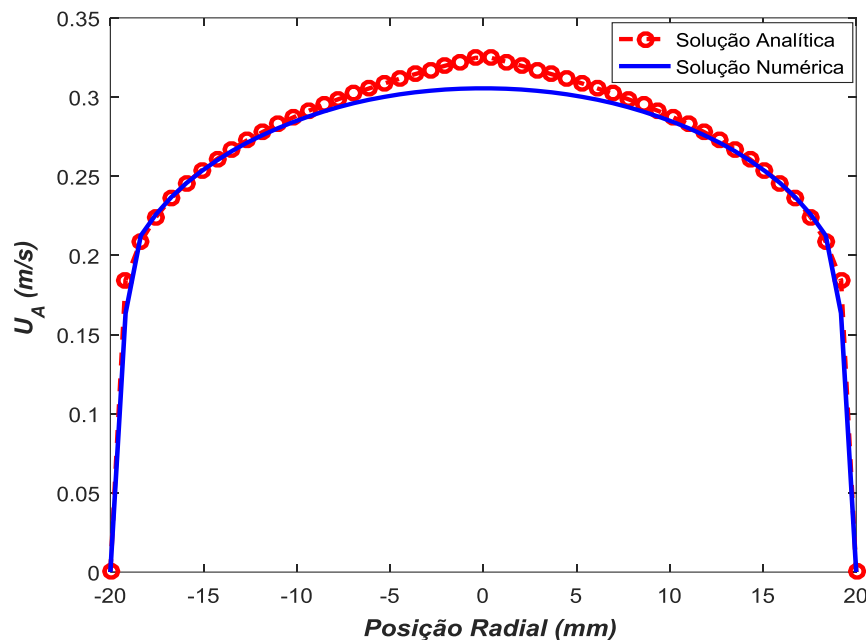
Fonte: AUTOR (2017).

Figura 4.2: Comparação entre as velocidades da água obtida de forma analítica (literatura) e numérica (presente trabalho) em função da posição radial para a Malha 02.



Fonte: AUTOR (2017).

Figura 4.3: Comparação entre as velocidades da água obtida de forma analítica (literatura) e numérica (presente trabalho) em função da posição radial para a Malha 03.



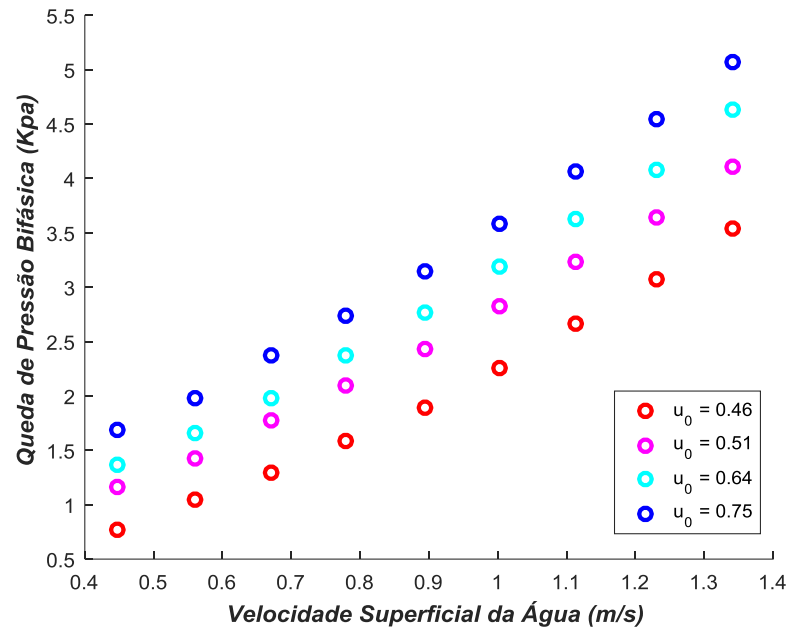
Fonte: AUTOR (2017).

4.2 Validação do Modelo utilizando os Resultados Experimentais de Dehkordi *et al.* (2017)

Os resultados obtidos das simulações realizadas neste trabalho foram validados utilizando os dados experimentais da Queda de Pressão Bifásica (Água-Óleo) apresentados por Dehkordi *et al.* (2017). A Figura 4.4 apresenta a Queda de Pressão Bifásica Experimental de Dehkordi *et al.* (2017) e a Figura 4.5 apresenta os resultados referentes a Queda de Pressão Bifásica deste trabalho na posição $z = 1,450m$ da entrada do duto próximo ao Bocal. Os resultados apresentam a variação da queda de pressão em função do aumento das velocidades superficiais da água, mantendo – se constantes a velocidade superficial do óleo. Foi observado que a queda de pressão máxima deste trabalho foi de 4,0 Kpa e a pressão máxima da literatura foi de 5,0 Kpa, o que era esperado, visto que, o escoamento core annular flow avaliado neste trabalho, apresenta-se em uma região hidrodinamicamente completamente desenvolvida, tanto para o óleo como para a água, as densidade dos fluidos muito próximas e a viscosidade do óleo elevada. Dessa forma, quando a velocidade superficial do óleo é alterada entre os valores de (0,45m/s e 0,75m/s), a queda de pressão é menor para os menores valores da velocidade

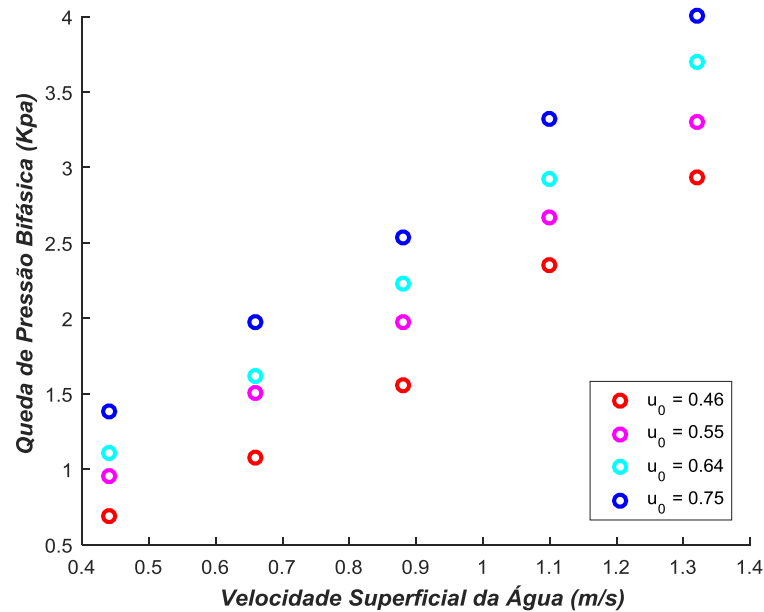
superficial da água (0,44m/s). Na Tabela 4.3 a velocidade superficial do óleo para 0,64m/s evidencia esse comportamento, o qual também foi observado por Dehkordi (2017).

Figura 4.4: Queda de Pressão Bifásica Experimental.



Fonte: DEHKORDI *et al.* (2017)

Figura 4.5: Queda de Pressão Bifásica Numérica deste Trabalho.



Fonte: AUTOR (2017).

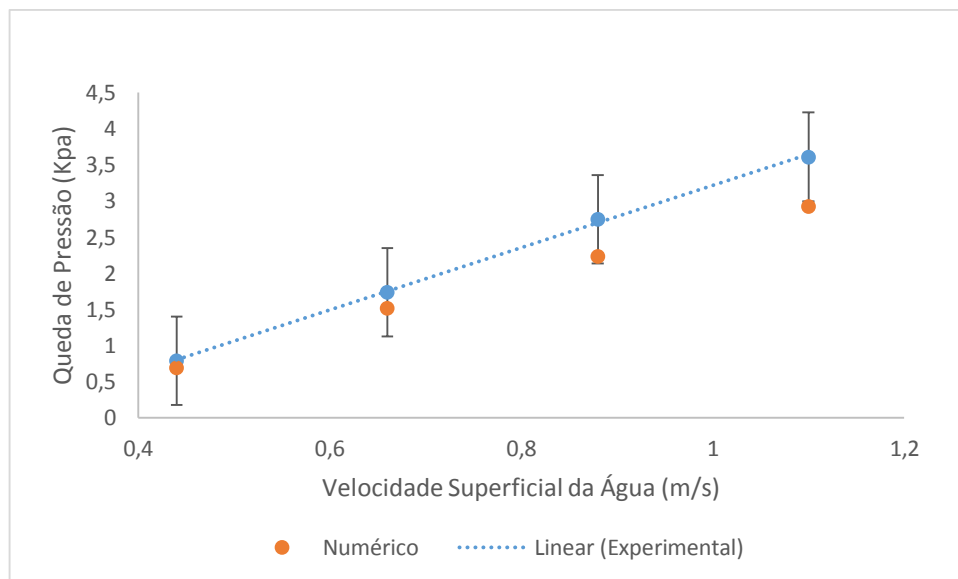
A Figura 4.6 mostra o erro relativo, conforme a Tabela 4.3, existente entre a queda de pressão experimental (linha tracejada) e a queda de pressão numérica desta pesquisa, com a apresentação de $\pm 20\%$ da linha de tendência.

Tabela 4.3: Comparação entre a queda de pressão numérica e queda de pressão experimental.

U_o (m/s)	U_A (m/s)	ΔP [Kpa]	ΔP [Kpa]	Erro Relativo (%)
		Numérico deste Trabalho	Experimental de Dehkordi <i>et al.</i> (2017)	
0.46	0.44	0,690	0.790	12,7
0.51	0.66	1.510	1.735	12,9
0.64	0.66	1.620	1.985	18,4
0.64	0.88	2.230	2.750	18,9
0.64	1.10	2.920	3.610	19,1
0.75	0.66	1.970	2.340	15,8
0.75	0.88	2.540	3.140	19,1

Fonte: AUTOR, 2017

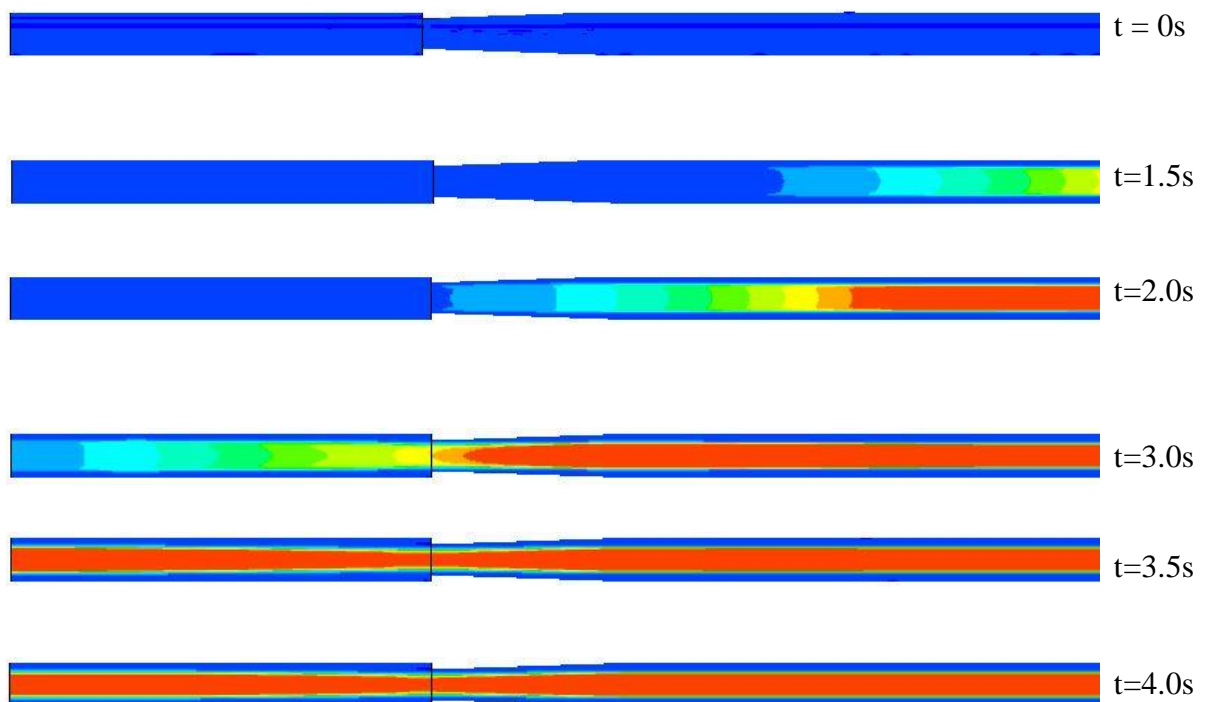
Figura 4.6: Erro relativo entre a Queda de Pressão Experimental e Numérica, as linhas representam $\pm 20\%$ da linha de tendência, conforme apresenta-se na Tabela 4.3.



Fonte: AUTOR, 2017.

A Figura 4.7 apresenta um encadeamento de imagens que mostram o óleo sendo injetado no centro da tubulação, e como o duto foi inicialmente preenchido com água, a água foi difundida para a região das paredes, o que mostra a formação de um filme de água envolvendo o óleo. Os resultados mostraram que não houve a formação de ondulações na interface e durante as simulações não foi observado a fração de óleo escoando na parede do duto, o que favorece ao escoamento água-óleo, visto que, ocorre uma redução na queda de pressão, objetivo esperado pelo uso da técnica CAF. Dessa forma, as simulações numéricas de escoamento água-óleo com viscosidade elevada e forças interfaciais evidencia o regime de escoamento core annular.

Figura 4.7: Evolução temporal da fração volumétrica de óleo pesado sobre o plano yz para $U_o = 0,65m/s$ e $U_w = 0,66m/s$ em diferentes tempos (Caso 12).

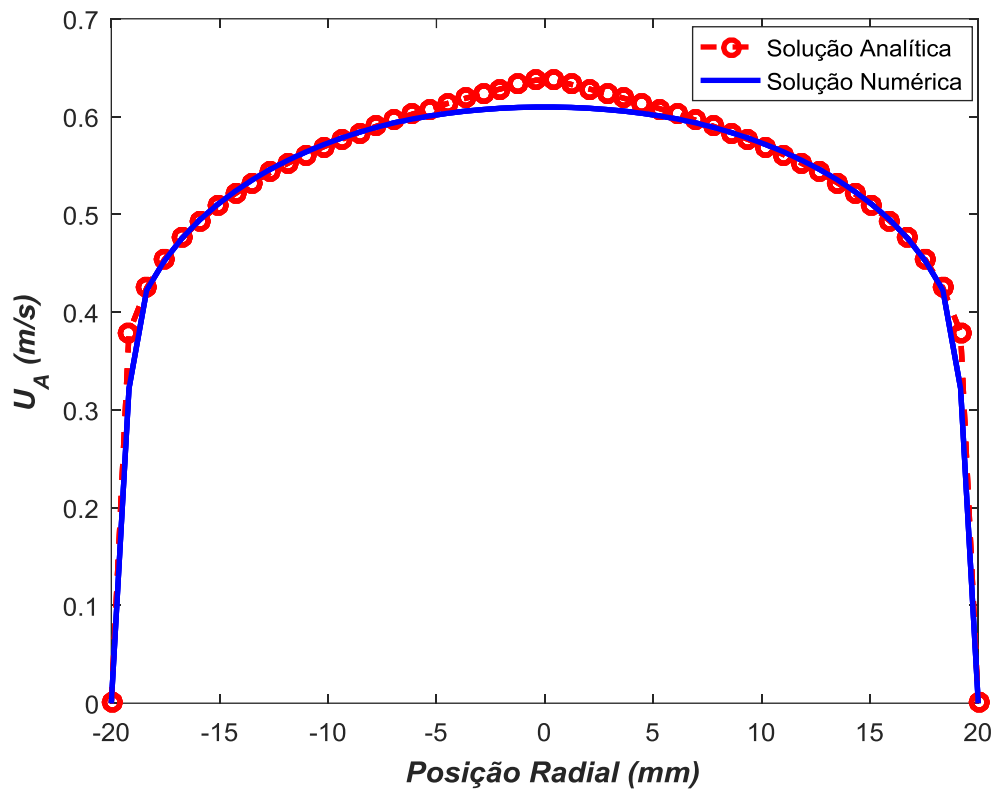


Fonte: AUTOR (2017).

Na Figura 4.8 apresenta-se o perfil de velocidade do escoamento monofásico de água em função da posição radial, na posição longitudinal igual $z = 1$ m da entrada, obtida numericamente com aquela obtida via solução analítica disponibilizada na literatura, verificando uma concordância entre os resultados analíticos e numéricos. Dessa forma, foram determinados de acordo com a Equação 2.2 o valor de $L_e = 0,0308m$ para o escoamento da fase óleo e pela Equação 2.5 o valor de $L_e = 0,9792m$ para o escoamento da fase água,

mostrando que todo escoamento está na região hidrodinamicamente completamente desenvolvido.

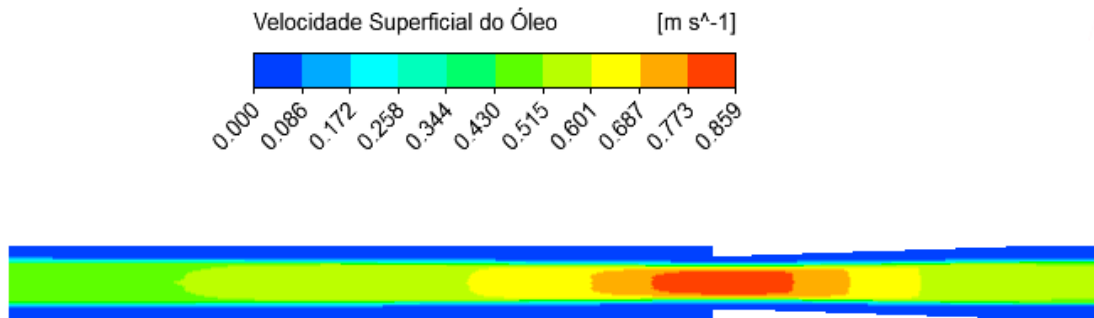
Figura 4.8: Perfil de velocidade numérico e analítico da água para $U_w = 0.88\text{m/s}$ (regime turbulento)



Fonte: AUTOR (2017).

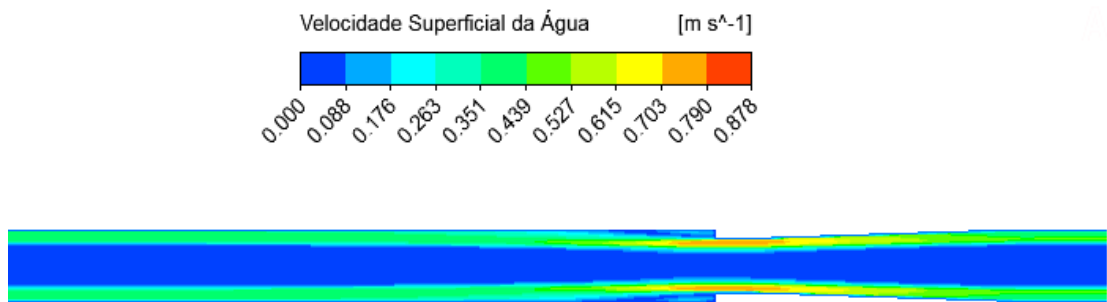
As Figuras 4.9 e 4.10 apresentam a velocidade superficial do óleo pesado na posição $z = 1,450\text{ m}$ da entrada do duto e próximo ao Bocal, onde o campo de velocidade superficial nas paredes do duto é nula, e aumenta quando a fração volumétrica do óleo tende ao centro do duto, aumentando significativamente no Bocal, comportamento esperado. No caso da velocidade superficial da água, acontece o oposto, aumenta à medida que se afasta do centro do duto.

Figura 4.9: Campo de Velocidade Superficial do Óleo Pesado na posição $z = 1,450m$ da entrada do duto



Fonte: AUTOR (2017).

Figura 4.10: Campo de Velocidade Superficial da Água na posição $z = 1,450m$ da entrada do duto

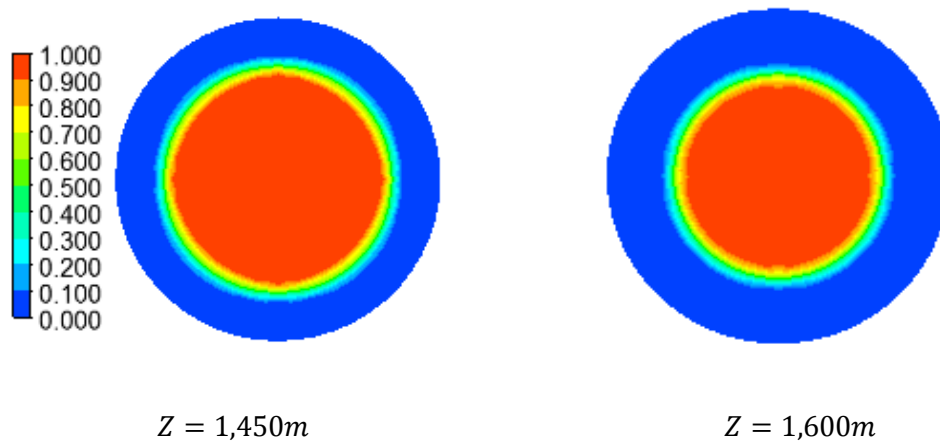


Fonte: AUTOR (2017).

Para analisar o efeito da viscosidade do óleo no escoamento CAF no interior do duto horizontal, foram considerados dois casos para a mesma condição de velocidade superficial do óleo, $U_o = 0,75m/s$, variando a velocidade superficial da água, $U_w = 0,44m/s$ e $U_w = 1,10m/s$. Os resultados são apresentados nas Figuras 4.11 e 4.12, mostrando os contornos das frações volumétricas do óleo na posição $Z = 1,450m$ da entrada do duto e próximo ao Bocal e na posição $Z = 1,600m$ após o Bocal, para o tempo de simulação igual a 3s.

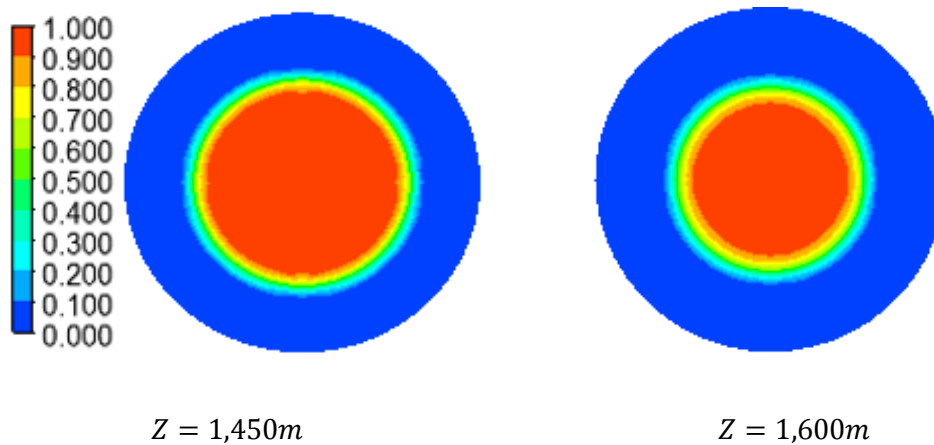
Dessa forma, as imagens mostram um regime de escoamento core anular flow, não apresentando ondulações na interface, consequentemente apresenta-se uma redução na queda de pressão, pois não foi observado fração de óleo nas paredes do duto. Com a redução da velocidade superficial da água, houve um aumento no núcleo de óleo, causando um maior atrito nas fases, e assim, a velocidade de escoamento no centro do duto tende a diminuir, este comportamento também foi analisado por Sotgia, Tartarini e Stalio (2008).

Figura 4.11: Fração Volumétrica de óleo na seção transversal XY em Z para $U_w = 0,44 \text{ m/s}$.



Fonte: AUTOR (2017).

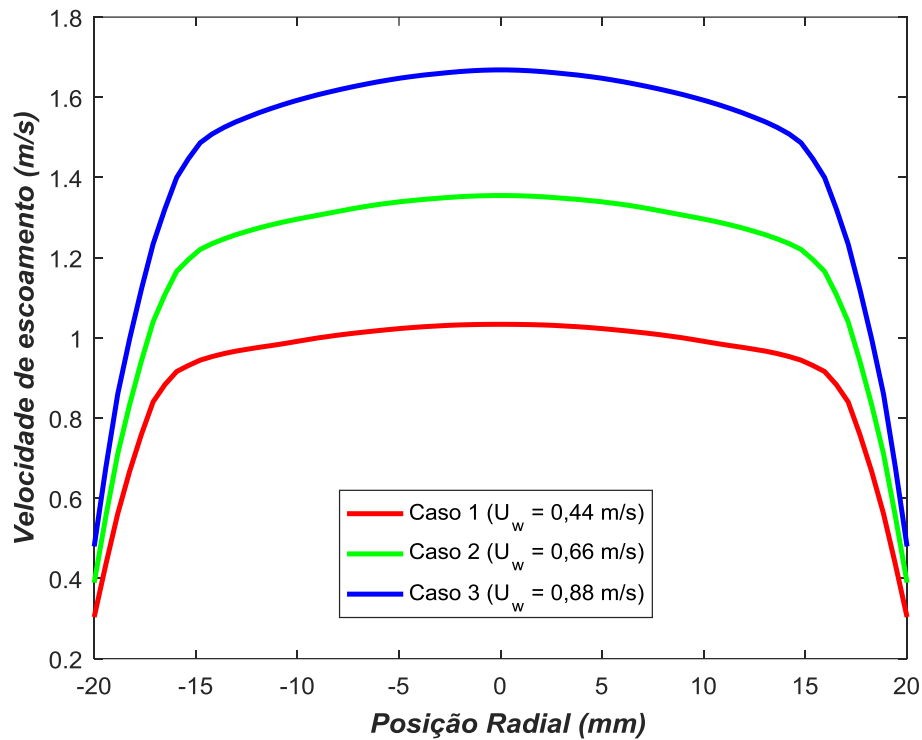
Figura 4.12: Fração Volumétrica de óleo na seção transversal XY em Z para $U_w = 1,10 \text{ m/s}$.



Fonte: AUTOR (2017).

Na Figura 4.13 observa-se que à medida que a velocidade superficial da água aumenta de $U_w = 0,44 \text{ m/s}$ para $U_w = 0,88 \text{ m/s}$, a velocidade de escoamento próximo à saída do duto é maior no centro, e nas paredes a velocidade é nula, comportamento semelhante foi observado no trabalho de Ghosh, Das e Das (2010). Para as condições de escoamento neste trabalho, não foram observadas a formação de ondulações, visto que, isto ocorre quando maiores gradientes de velocidades na interface fazem com que essa região seja perturbada.

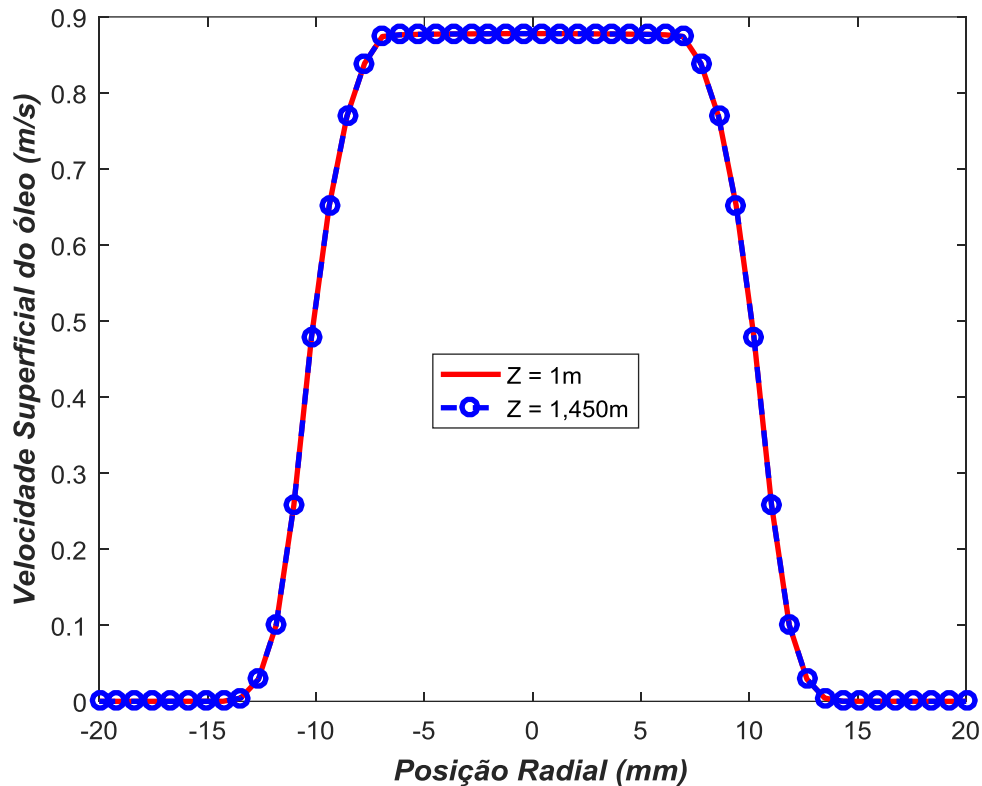
Figura 4.13: Perfil de Velocidade para $U_o = 0,45m/s$.



Fonte: AUTOR (2017).

A Figura 4.14 mostra que a velocidade superficial do óleo nas proximidades superior e inferior da parede do duto é igual a zero e aumenta em direção ao centro do duto e consequentemente se torna constante em $U_o = 0,859m/s$, e ainda, foi observado a concentricidade da velocidade superficial com relação ao eixo do duto, ou seja, o núcleo de óleo está escoando concêntrico no tubo de seção transversal circular, o que se explica pelas condições do escoamento ser completamente desenvolvido e inicialmente a água preencher o duto, a viscosidade do óleo elevada e a densidade das fases muito próximas.

Figura 4.14: Perfil de Velocidade Superficial de Óleo Pesado em duas posições radiais no tempo total de 4s (Caso 8).

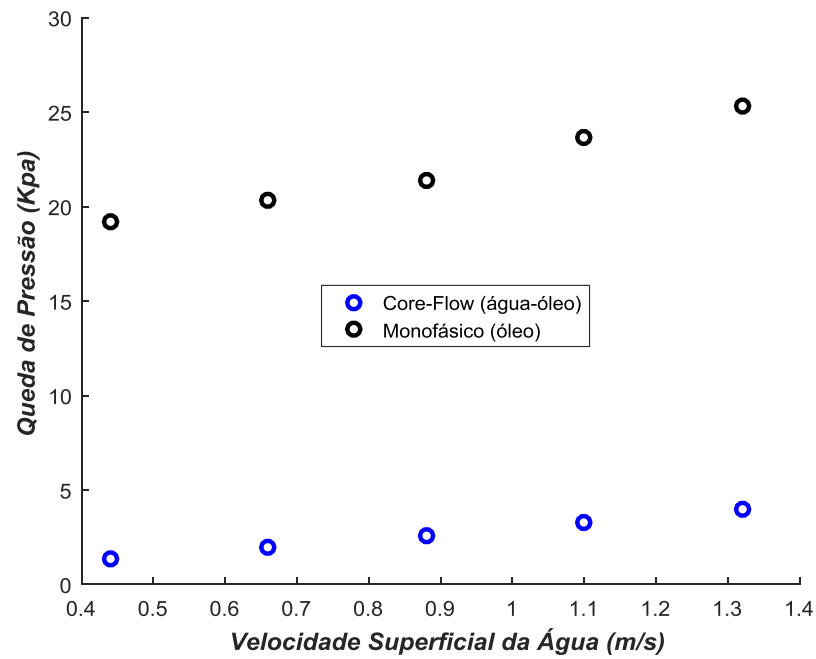


Fonte: AUTOR (2017).

As Figuras 4.15 e 4.16 apontam a diferença entre a queda de pressão do escoamento monofásico da água e do óleo pesado e a queda de pressão usando a técnica CAF. Com a utilização da CAF a queda de pressão reduziu significativamente quando comparada com o escoamento monofásico do óleo pesado, ou seja, $\Delta P = 25300Pa$ (monofásico óleo) para $\Delta P = 4000Pa$ (CAF). O aumento da queda de pressão (monofásico óleo) é causado pelo contato do óleo com a parede do duto, visto que, a viscosidade do óleo é maior do que a da água. Este comportamento da queda de pressão também é observado por Bannwart (2001), Tripathi *et al.* (2015). Andrade (2013) em sua pesquisa afirma que com a técnica CAF a redução na queda de pressão foi de aproximadamente 90%, apresentando para o escoamento com apenas óleo um $\Delta P = 52200Pa$ e para o uso da CAF um $\Delta P = 4826Pa$, dessa forma, os resultados numéricos demonstraram que o escoamento de óleo no duto apresentou uma queda de pressão de aproximadamente 10 vezes superior à queda de pressão quando foi utilizado a técnica CAF.

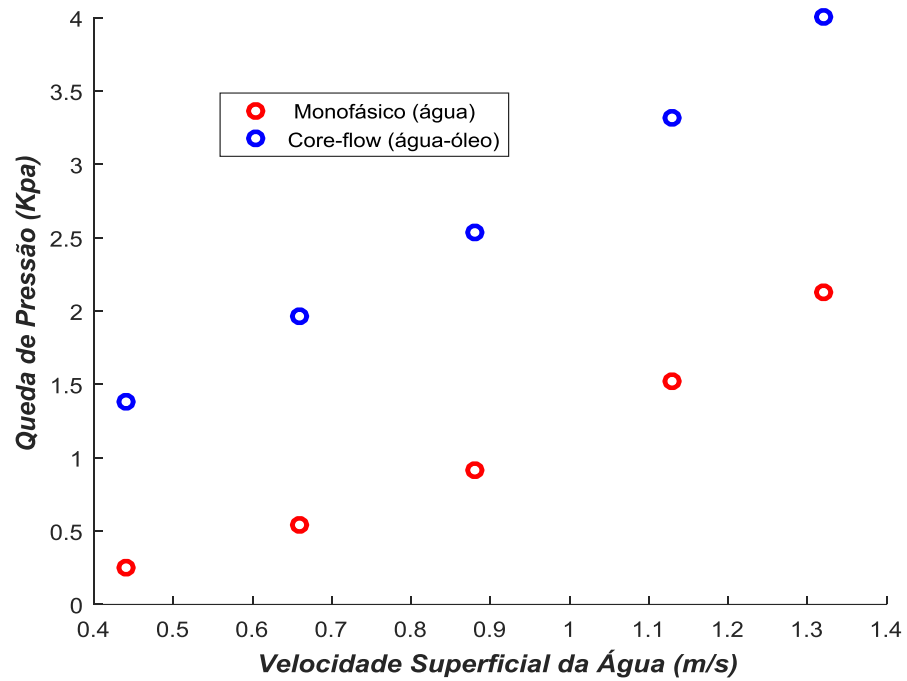
Neste trabalho foi observado o escoamento monofásico de água, e pode-se afirmar que a queda de pressão utilizando a CAF se aproxima da queda de pressão monofásica da água, que foi de $\Delta P = 2124 Pa$.

Figura 4.15: Comparação da queda de pressão entre o escoamento monofásico do óleo pesado e o escoamento anular (água-óleo) no Bocal.



Fonte: AUTOR (2017).

Figura 4.16: Comparação da queda de pressão entre o escoamento monofásico da água e o escoamento anular (água-óleo) no Bocal.



Fonte: AUTOR (2017).

CAPÍTULO VI

5. CONCLUSÃO

Ao analisar os resultados obtidos neste trabalho foi observado que o uso da técnica fluidodinâmica computacional (CFD), com a utilização do software Ansys CFX, reproduziu o comportamento do escoamento *core annular flow*, em um duto horizontal com a presença de um Bocal, comprovando que o emprego de modelos CFD, no estudo do escoamento multifásico, é de grande valor para a avaliação das condições operacionais.

O modelo foi validado com dados experimentais apresentados por Dehkordi *et al.* (2017) e os resultados obtidos neste trabalho apresentaram conformidade em relação aos resultados do autor. Foi possível obter para o regime transiente resultados que confirmam a evolução do filme de água envolvendo o óleo.

Pode-se observar que a velocidade superficial do óleo foi maior no centro do tubo e diminuiu gradualmente para zero nas paredes, e variando a velocidade superficial da água de 0,44-1,32 m/s, constatou-se que com a redução da velocidade superficial da água ocorre o aumento no núcleo de óleo.

A utilização da técnica CAF proporciona uma redução expressiva na queda de pressão, visto que, a queda de pressão foi maior para o escoamento monofásico do óleo pesado quando comparada com a queda de pressão com o uso da técnica CAF. Destaca-se ainda, que o estudo do escoamento de óleo e água ocorreu em uma região hidrodinamicamente completamente desenvolvida, garantindo uma queda de pressão ainda menor em comparado com a literatura, onde apenas o óleo foi estudado em região completamente desenvolvida.

Nesta perspectiva, conclui-se que as simulações apresentaram boa concordância com os dados experimentais da literatura na avaliação do escoamento *Core Annular Flow* óleo e água.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

- I. Analisar o efeito da gravidade sobre o comportamento do escoamento “*core annular flow*”;
- II. Estudar a dinâmica do escoamento “*core annular flow*” no espaço tridimensional com dutos de comprimentos maiores;

- III. Analisar o regime de escoamento com o duto preenchido inicialmente com óleo pesado;
- IV. Estudar o comportamento do escoamento anular variando a temperatura.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, T. H. F. **Transporte de Óleos Pesados e Ultraviscosos Via Core-flow: Aspectos Geométricos e Termofluidodinâmicos**. 2013. 143f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2013.

_____. **Estudo Numérico do Transporte de Óleos Pesados em Tubos lubrificados por Água**, 2008. 80f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2013.

_____; NETO, S. R. F; LIMA, A. G. B; SILVA, C.J; LIMA, W. M. P. B. Operation control of fluids pumping in curved pipes during annular flow: a numerical evaluation. **International Journal of Multiphysics**. v.8, n. 3, p.271-284. Set. 2014.

_____; SILVA, F. N; _____. Applying CFD in the analysis of heavy oil - water two-phase flow in joints by using core annular flow technique. **International Journal of Multiphysics**. v.7, n. 2, p.137-151. 2013.

ANP – Agência Nacional do Petróleo e Gás Natural e Biocombustíveis. Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. 2008. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/wwwanp/noticias/3138-anp-divulga-anuario-estatistico-2016>. Acesso em: 02 de mai. 2017.

ANSYS, CFX – Theory Manual, 2009.

ARIRACHAKARAN, S.; OGLESBY, K. D.; MALINOWSKY, M. S.; SHOHAM, O.; BRILL, J. P. An analysis of oil/water flow phenomena in horizontal pipes. **Society Petroleum Engineers**. Mar. 1989.

ARNEY, M. S.; BAI, R.; GUEVARA, E.; JOSEPH D. D.; LIU, K. Friction Factor And Holdup Studies For Lubricated Pipelining. **International Journal of Multiphase Flow**. v. 19, n. 6, p. 1061-1076, Dez. 1993.

BAI, R.; CHEN, K.; JOSEPH, D. D. Lubricated pipelining: Stability of Core-annular flow. Part. 5. Experiments and comparison with theory. *Journal of Fluid Mechanics*. v. 240, p. 92-132, Jul. 1992.

BANNWART, A. C. Modeling aspects of oil–water core–annular flows. **Journal of Petroleum Science and Engineering**. v.32, p.127– 143, Dez. 2001.

BENSAKHRIA, A.; PEYSSON, Y.; ANTONINI, G. Experimental Study of the Pipeline Lubrication for Heavy Oil Transport. **Oil & Gas Science and Technology**. v. 59, n. 5, p. 523-533, Set-Out. 2004.

BIRD, R. B.; LIGHTFOOT, E. N.; STEWART, W. E. Fenômenos de transporte. 2. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos – LTC, 2004.

ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. Mecânica dos Fluidos – Fundamentos e Aplicações. 1. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2007.

CHARLES, M. E.; GOVIER, G. W.; HODGSON, G. W. The horizontal pipeline flow of equal density oil-water mixtures. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**. v. 39, n. 1, p. 27-36, Fev. 1961.

DEHKORDI, P. B.; COLOMBO, L. P. M.; GUILIZZONI, M.; SOTGIA, G. CFD simulation with experimental validation of oil-water core-annular flows through Venturi and Nozzle flow meters. **Journal of Petroleum and Engineering**. v. 149, p. 540-552, Jan. 2017.

EGER, R. S. **Modelação de escoamentos turbulentos sob a ação de rotação alternada**, 2010. 126f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

GADELHA, A. J. F.; NETO, S. R. F.; SWARNAKAR, R.; LIMA, A. G. B. Thermo-Hydrodynamics of Core-Annular Flow of Water, Heavy Oil and Air Using CFX. **Advances in Chemical Engineering and Science**. v. 3, n.4, p. 37-45, Out. 2013.

GHOSH, S.; DAS, G.; DAS, P. K. Simulation of core annular down flow through CFD – A comprehensive study. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**. v. 49, p. 1222 – 1228, Set. 2010.

_____; _____. Simulation of core annular in return bends CFD – A comprehensive study. **Chemical Engineering Research and Design**. v. 89, p. 2244 – 2253, Nov. 2011.

_____; _____. Inception and Termination of the Core-Annular Flow Pattern for Oil-Water Down flow Through a Vertical Pipe. **AIChE**. v. 58, p. 2020-2029, Jul. 2012.

_____.; MANDAL, T.K; _____. Review of oil water core annular flow. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 13, p. 1957 – 1965, Out. 2009.

GUPTA, R.; TURANGAN, C.K.; MANICA, R. Oil-water core-annular flow in vertical pipes: A CFD study. **Chemical Engineering Canadian**. v. 94, p. 980-987, Mai. 2016.

HERNÁNDEZ, M.; MANUEL, J.; MALDONADO, O. D.; VARGAS, G. A.; BOYÁS, R. S.; VILLALOBOS, L. Z. CFD simulation of interfacial instability from the nozzle in the formation of viscous core-annular flow. **Canadian Journal of Chemical Engineering**. v. 94, n. 10, p. 2004 – 2012, Out. 2016.

HOUSZ, I.E.M.R.M.; OOMS, G.; HENKES, R.A.W.M.; POURQUIE, M.J.B.M.; KIDESS, A.; RADHAKRISHNAN, R. A comparison between numerical predictions and experimental results for horizontal core-annular flow with a turbulent annulus. **International Journal of Multiphase Flow**. v.95, p. 271-282, Out. 2017.

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

JOSEPH, D. D.; RENARDY, Y. Y. Fundamentals of Two-Fluids Dynamics. Part II: Lubricated Transport, Drops and Miscible Liquids. **New York Springer-Verlag**, 1993.

KAUSHIK, V. V. R.; GHOSH, S.; DAS, G.; DAS, P. K. CFD simulation of core annular flow through sudden contraction and expansion. **Journal of Petroleum and Engineering**. v. 86-87, p. 153 – 164, Mai. 2012.

LIVINUS, A.; HOI, Y.; LIYUN, L. Restart time correlation for core annular flow in pipeline lubrication of high-viscous oil. **Journal of Petroleum Exploration and Production Technology**. v. 7, n. 1, p. 293-302, Mar. 2017.

MANINCHAND, R. N. **Análise do Desempenho do Aquecimento Eletromagnético na Recuperação de Reservatórios de Petróleo**. 2002. 86f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2002.

MORAIS, J. M. **Petróleo em Águas profundas: uma história tecnológica da PETROBRAS na exploração e produção offshore**. Brasília. Ipea: Petrobras, 2013.

Disponível em: <

http://ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=18251>. Acesso em 28 de mai. 2017.

OLIEMANS, R. V. A.; OOMS, G.; WU, H. L.; DUIJVESTIJN, A. The Core-annular Oil/Water Flow Turbulent-Lubricating-Film Model and Measurements in a 5 cm Pipe Loop. **International Journal of Multiphase Flow**. v.13, n.1, p.23-31, 1987.

_____; SEGAL, A.; WEES, V. D. A. J.; MEERHOFF, R.; _____. A theoretical model for core-annular flow of a very viscous oil core and a water annulus through a horizontal pipe. **International Journal of Multiphase Flow**. v.10, n.1, p.41-60, Out. 1983.

_____; POURQUIE, M.J.B.M.; POESIO, P. Numerical study of eccentric core-annular flow. . **International Journal of Multiphase Flow**. v.42, p.74-79, Jun. 2012.

PALADINO, E. E. **Estudo do Escoamento Multifásico em Medidores de Vazão do Tipo Pressão Diferencial**. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/capitalhumano/arquivos/prh09/emilio_ernesto_paladino_prh09_ufsc_d.pdf>. Acesso em: 01 out. 2016.

PRADA, J. W. V. **Estudo Experimental do Escoamento Anular Óleo – Água (“Core-Flow”) na Elevação de Óleos Ultraviscosos**. 1999. 211f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Petróleo), Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Instituto de Geociências, Campinas, 1999.

_____; BANNWART, A. C. Pressure drop in vertical core annular flow. **Journal French Society of Mechanical. Science**. v. 23, n. 4, 2001.

RODRIGUEZ, O. M. H.; BANNWART, A. C. Analytical Model for Interfacial Waves in Vertical Core flow. **Journal of Petroleum Science and Engineering**. v. 54, n. 3, p. 173-182, Jul. 2006.

_____; _____. Experimental Study on Interfacial Waves in Vertical Core flow. **Journal of Petroleum Science and Engineering**. v. 54, n. 3, p. 140-148, Jul. 2006.

RUSSEL, T. W. F.; HODGSON, G. W.; GOVIER, G. W. Horizontal Pipeline Flow of Mixtures of oil and water. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**. v. 37, n. 1, p. 9-17, Fev. 1959.

_____; CHARLES, M. E. The Effect of the Less Viscous Liquid in the Laminar Flow of Two-Immiscible Liquids. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**. v. 37, n. 1, p. 18-24, Fev. 1959.

SHI, J.; MUSTAPHA, G.; HOI, Y. CFD simulation of horizontal oil-water flow with matched density and medium viscosity ratio in different flow regimes. **Journal of Petroleum Science and Engineering**. v. 151, p. 373-383, Mar. 2017.

SOTGIA, G.; TARTARINI, P.; STALIO, E. Experimental analysis of flow regimes and pressure drop reduction in oil-water mixtures. **International Journal of Multiphase Flow**. v.34, n. 12, p.1161-1174, Jun. 2008.

STRAZZA, D.; PIETRO, P. Experimental study on the restart of core-annular flow. **Chemical Engineering Research and Design**. v. 90, n. 11, Nov. 2012.

TRIPHATI, S; BHATTACHARYA, A; SINGH, R; TABOR, R. F. Lubricated Transport of Highly Viscous Non-Newtonian Fluid as Core-Annular Flow: A CFD Study. **Procedia Iutam**, v. 15, p. 278 – 285, Dez 2015.

TRALLERO, J.L.; SARICA. C.; BRILL, J.P. A study of oil/water flow patterns in horizontal pipes. **Society of Petroleum Engineers**, v.12, p. 165-172, Ago. 1997.

VARA, R. M. O. **Hidrodinâmica do Escoamento Bifásico Óleo Pesado – Água em Tubo Horizontal**. 2001. 182f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Petróleo), Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Instituto de Geociências, Campinas, 2001.

WHITE, F. M. **Mecânica dos Fluidos**. 4. ed. Rio de Janeiro: McGraw-Hill Interamericana do Brasil Ltda, 2002.

YUSUF, N.; AL-WAHAIBI, Y.; AL-WAHAIBI, T.; AL-AJMI, A.; OLAWALE, A. S.; MOHAMMED, I. A.; Effect of oil viscosity on the flow structure and pressure gradient in horizontal oil–water flow. **Chemical Engineering Research and Design**. v. 90, p.1019-1030, 2012.