

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA
MESTRADO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD) APLICADA A
ESCOAMENTO CORE ANNULAR FLOW ATRAVÉS DE
DUTOS HORIZONTAIS E CURVADOS.**

São Cristóvão - SE
Agosto de 2022

INGRID EVERLICE GOMES DA SILVA

**FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD) APLICADA A
ESCOAMENTO CORE ANNULAR FLOW ATRAVÉS DE
DUTOS HORIZONTAIS E CURVADOS.**

Projeto apresentado ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Sergipe – UFS, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química, orientada pelo Prof. Dr. Gabriel Francisco da Silva.

São Cristóvão – SE

Agosto de 2022

INGRID EVERLICE GOMES DA SILVA

**FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD) APLICADA A
ESCOAMENTO CORE ANNULAR FLOW ATRAVÉS DE
DUTOS HORIZONTAIS E CURVADOS.**

Dissertação de Mestrado aprovada no programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Sergipe em 30 de Agosto de 2022.

BANCA EXAMINADORA

Gabriel Francisco da Silva – Orientador
Universidade Federal de Sergipe

Acto de Lima Cunha – Coorientador
Universidade Federal de Sergipe

Documento assinado digitalmente
 MIKELE CANDIDA SOUSA DE SANT ANNA
Data: 27/12/2022 10:37:24-0300
Verifique em <https://verificador.itl.br>

Mikele Cândida Sousa de Sant'Anna
Universidade Federal do Maranhão



Roberto Rodrigues de Souza
Universidade Federal de Sergipe

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE**

S586f Silva, Ingrid Everlice Gomes da
Fluidodinâmica computacional (CFD) aplicada a escoamento Core Annular Flow através de dutos horizontais e curvados / Ingrid Everlice Gomes da SILVA ; orientador Gabriel Francisco da Silva. – São Cristóvão, SE, 2022.
62 f. : il.

Dissertação (mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Sergipe, 2022.

1. Engenharia química. 2. Escoamento bifásico. 3. Fluidodinâmica computacional. 4. Modelos matemáticos. 5. Óleo – Indústria. 6. Viscosidade. I. Silva, Gabriel Francisco da, orient. II. Título.

CDU 66.011

DEDICATÓRIA

A Deus; a meus pais Eraldo e Joelma que sempre me deram o apoio, assim como minhas irmãs Isabel e Thaísa, meu namorado Talvanes e amigos que estiveram presentes em minha caminhada, me incentivando a lutar por meus objetivos.

AGRADECIMENTOS

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

Aos meus pais, Eraldo e Joelma e minhas irmãs, por todo incentivo e compreensão.

Aos meus orientadores Prof. Dr. Gabriel Francisco da Silva e Prof. Dr. Acto de Lima Cunha pela paciência, ensinamentos e incentivo durante toda a trajetória.

Aos componentes da banca: Prof. Dr. Roberto Rodregues de Souza e Prof. Dra. Mikele Candida Sousa Sant'anna, por todo auxílio e contribuição durante a etapa final desse trabalho.

Aos meus amigos Tatiana, Talvanes e Félix por estarem sempre próximos e me ajudando quando precisei.

*“Quanto mais fortes forem suas
provações, maiores serão suas
vitórias”*

RESUMO

Nos últimos anos houve um aumento exponencial no consumo de petróleo mundialmente, o que ocasionou um crescente esgotamento das principais reservas de óleo leve e de reservas *onshore*. Diante desse crescimento, direcionou-se uma grande parte dos estudos para a reserva de óleo de alta viscosidade, bem como reservas *offshore*. Porém, um dos principais empecilhos é o transporte do petróleo, pois, isso requer estudos avançados para não ocorrer incrustamento do óleo nas paredes do duto, surgindo assim a necessidade de novas pesquisas voltadas para o carreamento de óleos viscosos, visto que uma soma dos que são explorados no Brasil são de um baixo grau API, sendo assim, de alta viscosidade. Uma técnica viável para esse tipo de escoamento é o “*Core Annular flow*”, em que uma fina camada de água escoar na parede do duto enquanto o óleo escoar na região central. Deste modo, o presente trabalho apresenta uma simulação do transporte de óleo e de água pelo método *Core Annular flow* via *software* ANSYS FLUENT®. Na realização da simulação, foi utilizado um modelo de escoamento bifásico água-óleo, sendo regime laminar para a fase oleosa e turbulento para a fase aquosa, adotando o modelo de interface VOF model e o modelo de turbulência $k-\epsilon$. Os resultados obtidos na simulação foram comparados ao artigo de Haoyu Li, et al., (2021) para avaliar o ajuste do modelo matemático e o desenvolvimento do escoamento *Core flow* em um software de fluidodinâmica computacional pouco utilizado na previsão do escoamento anular. Os resultados mostraram a formação do padrão de escoamento anular assim como observado no artigo de Haoyu Li, et al., (2021) e que a inclinação da tubulação é uma propriedade importante que pode levar a mudança do padrão de escoamento.

Palavras-Chaves: Escoamento Bifásico, Escoamento Anular, Escoamento óleo-água, Simulação CFD, Core Annular Flow, Óleo, Viscosidade.

ABSTRACT

In recent years there has been an exponential increase in oil consumption worldwide, which has caused the increasing depletion of the main light oil reserves and onshore reserves. In view of this growth, a large part of the studies was directed to the reserve of high viscosity oil, as well as offshore reserves. However, one of the main obstacles is the transport of oil, as this requires advanced studies to avoid oil encrustation on the walls of the pipeline, thus creating the need for new research aimed at carrying viscous oils, since a sum of those are exploited in Brazil are of a low API grade, therefore, of high viscosity. A viable technique for this type of flow is the “Core Annular flow”, in which a thin layer of water flows on the duct wall while the oil flows in the central region. Thus, the present work presents a simulation of oil and water transport by the Core Annular flow method via ANSYS FLUENT® software. In carrying out the simulation, a two-phase water-oil flow model was used, with a laminar regime for the oil phase and turbulent for the aqueous phase, adopting the interface model VOF model and the turbulence model $k-\epsilon$. The results obtained in the simulation were compared to the article by Haoyu Li, et al., (2021), to evaluate the fit of the mathematical model and the development of the Core flow in a computational fluid dynamics software little used in the prediction of annular flow. The results showed the formation of the annular flow pattern as observed in the article by Haoyu Li, et al., (2021) and that the slope of the pipe is an important property that can lead to a change in the flow pattern.

Keywords: Two-Phase Flow, Annular Flow, Oil-Water Flow, CFD Simulation, Core Annular Flow, Oil, Viscosity.

SUMÁRIO

1-	INTRODUÇÃO.....	12
1.1-	JUSTIFICATIVA.....	15
1.2 -	OBJETIVO.....	16
2-	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1	- Regimes de escoamento.....	17
2.2	Padrões de Fluxo.....	19
2.3	Padrões de escoamentos.....	22
2.4	Escoamento anular (<i>Core Annular Flow</i>).....	24
2.5	- VOF MODEL.....	29
3-	METODOLOGIA.....	34
3.1	- SOFTWARE E HARDWARE.....	34
3.2	Geometria A.....	34
3.3-	Malha Numérica.....	36
3.4	- Modelagem matemática.....	43
3.4.1	Conservação de massa e momento;.....	43
3.4.2	Modelo de Turbulência k-ε;.....	43
3.5	As condições iniciais e de contorno.....	44
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	47
4.2-	Validação da simulação proposta.....	49
	CONCLUSÃO.....	56
	REFERÊNCIAS.....	57

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - escoamento óleo-água (método Core Annular flow).....	15
Figura 2 - Desenvolvimento do perfil de velocidade axial no interior do tubo.....	19
Figura 3 - Padrões de escoamento óleo em água em tubulação horizontal.....	25
Figura 4 - Carta de diferentes padrões de escoamento água-óleo.....	25
Figura 5 - Modelo representativo do método “Core-Flow”.....	26
Figura 6 - Escoamento anular ondulado em uma tubulação horizontal.....	27
Figura 7 - Escoamento core-flow em um duto horizontal.....	29
Figura 8 - Esquema do Escoamento Core Annular Flow na entrada e saída do duto.....	31
Figura 9 - Frações de volume de fluido em um volume de controle.....	34
Figura 10 - Malha na região de entrada de água e óleo pesado (a) e na região de saída (b).....	39
Figura 11 - Geometria proposta para a simulação de validação.....	41
Figura 12 - Malha na região de entrada de água e óleo pesado (a) e na região de saída (b).....	41
Figura 13 - Malha refinada na região central.....	42
Figura 14 - Geometria B.....	43
Figura 15 - Detalhe da bloqueio utilizada para geração da malha com angulação.....	44
Figura 16 - Representação da malha da geometria B.....	44
Figura 17 - Representação da malha na região de entrada e saída do duto curvado.....	45
Figura 18 - (a) Duto curvado com 60 mm de raio de curvatura. (b) Representação da malha da tubulação.....	45
Figura 19 - Representação da seção de entrada do domínio de estudo.....	48
Figura 20 - Velocidade de escoamento no teste de malha.....	51
Figura 21 - Comparação da viscosidade turbulenta para a simulação 3D; (a) com gravidade, (b) sem gravidade.....	52
Figura 22 - Comparação da viscosidade turbulenta por Haoyu Li, et al., (2021).....	53
Figura 23 - Perfil anular ao longo de toda tubulação.....	53
Figura 24 - Viscosidade turbulenta em geometria de curva 40mm.....	54
Figura 25 - Fração volumétrica da água em tubulação com raio de curvatura de 40 mm.....	55
Figura 26 - Fração volumétrica de óleo no duto curvado em vários instantes.....	56
Figura 27 - Fração volumétrica da água em tubulação com raio de curvatura de 60 mm.....	57
Figura 28 - Campo de pressão na geometria de 60mm.....	57
Figura 29 - Campo de velocidade de escoamento bifásico.....	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dimesão das geometrias.....	39
Tabela 2 - Elementos da malha da geometria A.....	41
Tabela 3 - Elementos da malha da geometria B.....	43
Tabela 4 - Elementos da malha da geometria C.....	46
Tabela 5 - Propriedades físicas dos fluidos.....	49
Tabela 6 - Considerações adotadas para a resolução das equações.....	49
Tabela 7 - Estatísticas das malhas de validação.....	50

SÍMBOLOS

L	Comprimento	[m]
V_m	Velocidade média	[m/s]
D	Diâmetro interno	[m]
v	Velocidade axial	[m/s]
R	Raio interno	[m]
r	distância do centro	[m]
f	Fator de fricção de Fanning	[-]
ε/D	Rugosidade relativa	[-]
Re	Número de Reynolds	[-]

LETRAS GREGAS

ρ	Massa específica	[kg/m ³]
σ_k	Constante do modelo κ - ε	[-]
σ_s	Constante do modelo κ - ε	[-]
C_{s1}	Constante do modelo de turbulência κ - ε	[-]
C_{s2}	Constante do modelo de turbulência κ - ε	[-]
P_k	Produção de turbulência	[kg/ms ³]
μ	Viscosidade Dinâmica	[kg/ms]
ε	Taxa de dissipação turbulenta	[m ² /s ³]
k	Energia cinética turbulenta	[kgm ² /s ²]

SUBSCRITOS

i	Eixo de coordenadas da variável
j	Varredura da variável em todos os eixos de coordenada

1- INTRODUÇÃO

A matriz energética mundial é composta em sua grande maioria por fontes não renováveis, como o petróleo e o gás natural. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) no ano base de 2018, o petróleo e seus derivados representaram cerca de 34,5 % da matriz energética do mundo. Por ser uma das principais fontes energéticas utilizadas mundialmente, a utilização das reservas e o transporte do petróleo dependem em sua totalidade de novas tecnologias para que o processo se torne economicamente viável nas etapas de exploração, produção, transporte e, finalmente, na etapa de refino.

Os óleos pesados dominam o cenário de produção atual no mundo devido à diminuição das reservas de óleos leves. SILVA (2017) afirma em estudo que um dos principais problemas da exploração de petróleo envolve questões de escoamento de óleos pesados, cuja alta viscosidade eleva o custo de sua produção e de seu transporte.

De acordo com HART (2013), a reserva de petróleo pesado ou de alta viscosidade é mais que o dobro das reservas de petróleo leve em todo o mundo. Os óleos de alta viscosidade são compostos por hidrocarbonetos de grande peso molecular, com alta densidade relativa, que está relacionada com a presença de asfaltenos, de componentes metálicos como o níquel e o vanádio, além da presença do enxofre. São caracterizados por apresentarem baixo grau API (American Petroleum Institute) entre 12° e 22,3° (de acordo com a classificação da ANP) e alta viscosidade entre 100 e 1000 cP.

Para SILVA (2016), produzir óleo pesado em águas profundas e transportá-lo em dutos até a refinaria torna-se uma tarefa onerosa e muito complexa. Entre os problemas que surgem para garantir o fluxo do óleo nessas condições, há a formação de hidratos, a deposição de ceras, e a queda de pressão ao longo do deslocamento do fluido, havendo para esse, a utilização de sistemas de bombeamento com altas potências.

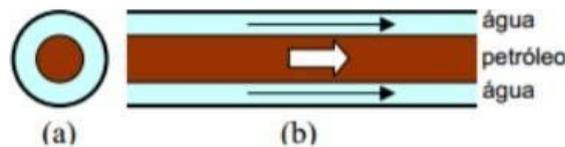
OLIVEIRA (2021) ressalta que o aproveitamento comercial de reservas de óleos pesados depende de técnicas específicas para produzi-los e transportá-los. Essas técnicas representam um desafio econômico e tecnológico para as grandes companhias de petróleo pois, o alto consumo de energia provocado pela alta viscosidade do óleo, eleva os custos da produção.

Entre os processos de transporte por dutos, tanto para campos petrolíferos *offshore* quanto para *onshore*, podem-se destacar: o pré-aquecimento do óleo a uma temperatura que

permita que o fluido chegue ao seu destino sem a necessidade de altas pressões de bombeio, isolando termicamente a tubulação; o aquecimento do óleo pela injeção de um fluido aquecido por uma linha concêntrica ao oleoduto ou diretamente por meio elétrico; a geração de emulsões de óleo em água; a redução da viscosidade pela diluição em frações mais leves de óleo; a injeção de água formando um anel lubrificante envolvendo o núcleo de óleo “Core Annular Flow” (SILVA, 2016).

Na produção de petróleo bruto pesado, tem ocorrido o processo de transporte do óleo juntamente com a água, a qual encontra-se numa fina camada na parede do tubo e o óleo no centro. Esse processo tem atraído atenções em virtude de seu benefício econômico, visto que, a película de água faz com que ocorra uma menor perda de carga e que não haja incrustação dos componentes do óleo nas paredes. O regime de fluxo mais vantajoso composto pela lubrificação por água é o fluxo anular central (CAF), onde o óleo encontra-se no núcleo de forma contínua e é cercado por um anel de água (JING SHI, et al, 2021).

Figura 1 - Escoamento óleo-água (método Core Annular flow).



Fonte: Andhros, 2017.

A técnica *core-flow* consiste em injetar água com uma vazão volumétrica inferior a do óleo fazendo com que esse seja envolvido por uma cápsula de água e escoe no centro do tubo sem tocar a parede interna do mesmo. Assim, é estabelecido um padrão anular que conseqüentemente implica em uma redução da perda de pressão por atrito. O ponto negativo durante o uso dessa técnica é quando o óleo entra em contato com a parede interna do oleoduto durante o transporte, o que pode causar um aumento significativo na pressão do sistema, provocando o rompimento do duto, que culmina em sérios danos ambientais e em problemas no sistema de transporte (ANDRADE, 2013).

Diante da dificuldade e do alto custo para a produção de óleo e de seus derivados, a indústria tem utilizado métodos de predição para analisar e simular os reservatórios e sistemas de elevação. Um desses métodos é a Dinâmica dos Fluidos Computacional – CFD, que é uma ferramenta útil que permite obter uma visão e uma previsão de comportamentos de fluxo (SHI, ET AL., 2017).

O CFD é um ramo da mecânica dos fluidos que utiliza análise numérica e estrutura de dados para investigar o comportamento de escoamento de fluidos. Em indústrias petrolíferas

existem muitos casos em que fluidos imiscíveis (como água e óleo) são transportados juntos. Durante o escoamento envolvendo mais de um fluido (multifásicos), os perfis de escoamento assumem diversas configurações para o seu transporte. Neste sentido, a Fluidodinâmica Computacional se torna uma ferramenta importante para visualizar o escoamento, a exemplo da observação dos regimes de escoamento, medição da perda de carga e da estimação da tensão cisalhante (AYUBA, 2019).

A Fluidodinâmica Computacional surgiu como uma ferramenta beneficiária no desenvolvimento, projeto e otimização de processos em engenharia química e bioquímica. O CFD é conceitualmente construído para resolver numericamente equações gerais de transporte que descrevem o sistema. Para isso, o sistema estudado é separado em pequenos volumes de controle semelhante a uma malha fina ou grade. Como os sistemas investigados são tipicamente multifásicos, a solução numérica é exigente em termos de poder computacional, de modo que muitas vezes é necessária uma simplificação (ESLAHPAZIR, et al., 2019).

1.1- JUSTIFICATIVA

Uma das maiores dificuldades na produção do óleo pesado é o seu transporte, devido a sua alta viscosidade e a alta resistência ao escoamento, portanto, os investimentos em pesquisa e desenvolvimento tornaram-se necessários para buscar informações sobre o transporte e a otimização do processo como um todo (CONCEIÇÃO et al., 2015).

Como solução para esse problema, tem sido utilizada a técnica *core-flow*, para a transferência de óleo pesado na presença de água com o objetivo de avaliar a eficiência do transporte. Apesar de ser utilizada na indústria, alguns parâmetros do *core-flow* precisam ser estudados para garantir maior eficiência durante o transporte, como por exemplo, o formato do duto e as condições de contorno (ZHU et al., 2004).

Dessa forma, o presente estudo almeja dar contribuição para melhor entendimento do escoamento bifásico de óleo-água em dutos com curvaturas por meio do método *core-flow*, visando observar a formação do escoamento anular *Core Annular flow* avaliando também a influência da curvatura da tubulação na manutenção do padrão de escoamento.

Neste trabalho podemos observar a formação do padrão de escoamento *Core flow* elaborada no *software Fluent*, assim como no artigo desenvolvido por Haoyu Li, et al., (2021) et al., (2021) feito no *software OpenFoam*, após isso, haverá a realização da simulação de escoamento para dutos com curvaturas, visando analisar a eficiência com os mesmo parâmetros e condições de contorno utilizados na geometria inicial, avaliando a influência da curvatura da tubulação.

1.2 - OBJETIVO

1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral estudar um sistema bifásico Água-Óleo usando o *Software* de fluidodinâmica computacional *ANSYS Fluent*, com o intuito de desenvolver um modelo que consiga reproduzir o transporte dos fluidos na tubulação por meio da técnica de *Core Annular Flow*, avaliando o efeito de curvatura da tubulação.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Realizar um levantamento bibliográfico sobre a técnica *Core-Flow*, e os avanços na área;
- Gerar geometrias e criar malhas representativas para o problema em questão;
- Apresentar a simulação computacional por meio do método *Core-Flow*;
- Simular e comparar resultados existentes nas bibliografias;
- Simular o escoamento em tubulações com curvaturas;

2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

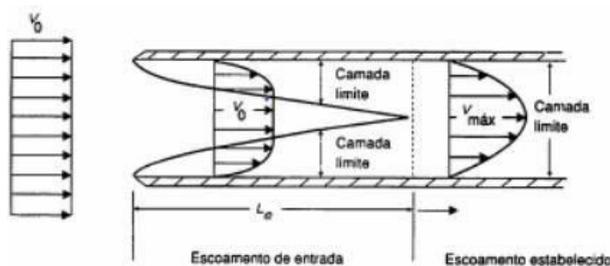
2.1- Regimes de escoamento

O número de Reynolds determina o regime de escoamento de determinado fluido dentro de um tubo ou sob uma superfície. Fluidos com mesmo número de Reynolds apresentam o mesmo comportamento durante o escoamento. Por isso, diferentes fluidos com diferentes velocidades escoando através de tubos com diferentes diâmetros podem possuir o mesmo perfil de fluxo.

2.1.1 - Escoamento Laminar

O escoamento laminar ocorre quando o fluido é governado pelas forças viscosas e suas partículas seguem uma trajetória ordenada e bem definida, como se fosse formada por camadas sobrepostas que deslizam sobre as camadas adjacente, onde as partículas de uma camada não migram para outra. Nesse tipo de escoamento, não há troca de matéria entre as camadas, apenas há troca de movimento molecular. Esse tipo de comportamento ocorre quando o número de Reynolds é menor que 2000 ($Re < 2000$). As forças viscosas de cisalhamento amortecem a tendência de surgimento da turbulência (Livi, 2004). Uma camada limite se forma ao longo da parede interna do duto. Uma força cisalhante exercida pelo tubo age sobre o escoamento retardando a velocidade do fluido próximo da parede. O efeito da superfície é sentido até o centro do tubo, e o escoamento passa a ser totalmente viscoso. A partir deste ponto, a forma do perfil de velocidades não se altera e o escoamento se encontra completamente desenvolvido. A distância entre a entrada e o local onde o escoamento se torna completamente desenvolvido é chamada comprimento de entrada, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - Desenvolvimento do perfil de velocidade axial no interior do tubo.



Fonte: LIVI, (2004)

O comprimento de entrada é uma função do número de Reynolds para escoamentos laminares:

$$\frac{L}{D} = 0.06 \frac{\rho \cdot v \cdot L}{\mu} = 0.06 \times Re \quad (1)$$

Onde:

L = Comprimento interno (m)

ρ = Massa específica (kg/m³)

V = Velocidade média do fluido (m/s)

μ = Viscosidade dinâmica do fluido (Pa.s)

D = Diâmetro interno do tubo (m)

O escoamento laminar completamente desenvolvido apresenta perfil parabólico e segue a equação:

$$v(r) = 2 \times v_m \left(1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right) \quad (2)$$

Onde:

v = Velocidade axial

V_m = Velocidade média

R = Raio interno do tubo

r = Distância do centro do tubo

2.1.2 - Escoamento Turbulento

O escoamento turbulento ocorre quando o escoamento do fluido é altamente governado pelas forças inerciais e suas partículas seguem uma trajetória irregular, com movimento das partículas não apenas no sentido do escoamento como também aleatoriamente em outras direções. Esse regime de escoamento ocorre quando o número de Reynolds é maior que 4000 (OLIVEIRA, 2016).

Para escoamentos turbulentos, a camada limite cresce mais rapidamente, devido a

intensa turbulência entre as camadas do fluido. Diversos experimentos mostram que o comprimento de entrada para o escoamento turbulento se encontra entre 25 e 40 vezes o diâmetro do tubo (OLIVEIRA, 2016).

A análise e estudo do fluxo turbulento, diferentemente do fluxo laminar, através de tubos é completamente empírico. O cisalhamento aleatório e a mistura das partículas de fluido torna o desenvolvimento matemático extremamente complexo. A perda de carga no regime turbulento é calculada pela equação de Fanning, desenvolvida empiricamente, definida para qualquer modelo de fluido por:

$$\Delta P = \frac{2fL\rho v^{-2}}{D} \quad (3)$$

O parâmetro f , denominado de fator de fricção de Fanning, adimensional, é função do tipo de fluido, regime de fluxo, número de Reynolds e condição da parede da tubulação. Esta condição é definida pela rugosidade relativa (ε/D), ou rugosidade absoluta (ε), que é a profundidade média das irregularidades da parede do tubo (MACHADO, 2002).

As expressões e os valores dos fatores de fricção são derivadas de análise teórica e empírica. Por exemplo, de acordo com a equação de Fanning, a expressão para o fator de fricção é:

$$f = \frac{\Delta P D}{(2fL\rho v^{-2})} \quad (4)$$

2.2 Padrões de Fluxo

Os padrões de fluxos ou regimes de escoamento são uma forma de classificar o escoamento multifásico. Eles representam o estado em que um fluxo multifásico aparece em um dispositivo sob determinadas condições de operação, como a velocidade de escoamento de fases, propriedades físico-químicas: massa específica e viscosidade, da forma geométrica e inclinação dos tubos. Na indústria, por exemplo, muitas aplicações são observadas utilizando tubos horizontais com escoamento bifásico líquido-gás (VALUS, 2018).

A natureza complexa do escoamento multifásico e/ou multifluido tem como princípio

a existência de interfaces entre as regiões com diferentes fases e/ou fluidos que estão escoando simultaneamente. Utilizando-se a abordagem da mecânica clássica dos meioscontínuos define-se interface como uma superfície de *descontinuidade*, isto é, não possuem espessura nem massa mas pode acumular energia e entropia (possui temperatura bem definida), que delimita duas regiões podendo ainda assim deslocar-se no espaço e deformar-se: as propriedades do escoamento como velocidade e tensões a depender do caso podem apresentar em seus valores descontinuidades significativas (RUAS, 2016).

Uma vez que o sistema em estudo é denominado como multifásico, ele poderá ser classificado ainda de acordo com o seu padrão de fluxo. Tal classificação refere-se às diferentes geometrias que podem ser formadas pelas interfaces do fluido dependendo da vazão, das propriedades e das características do meio pelo qual ocorre o escoamento (RUAS, 2016).

Muitos processos naturais são caracterizados por escoamentos bifásicos, ou seja, pelo escoamento de duas fases imiscíveis. Alguns exemplos comuns desse tipo de escoamento são: água fervente, nuvens, exploração de petróleo. Todavia, o grande interesse nesse fenômeno físico está em suas aplicações industriais.

Escoamentos bifásicos podem ser divididos conforme a natureza física das fases que estão escoando e são importantes em diversas aplicações:

- Escoamento gás-líquido: encontrado em evaporadores, ebulidores, plantas de refrigeração, sistemas de transporte de gás e óleo em tubulações e plantas de tratamento de esgoto;
- Escoamento gás-sólido: comum na indústria química com o transporte de material particulado, processo de combustão e leitos fluidizados;
- Escoamento líquido-líquido: comumente encontrado nas indústrias petroquímicas, pelo escoamento de óleo e água em oleodutos;
- Escoamento líquido-sólido: Encontrado em sistemas de transporte hidráulico de materiais sólidos e também encontrado em separadores como o ciclone hidráulico.

Nos últimos anos, a indústria petrolífera vem incentivando a pesquisa de modelos que sejam capazes de avaliar escoamentos bifásicos com precisão e permitam realizar projetos mais enxutos, econômicos e seguros. Paralelamente, a comunidade científica aprofundou seu trabalho a fim de compreender melhor os fenômenos físicos por trás desse tipo de escoamento. De fato, existe um grande número de trabalhos que avaliam escoamentos gás-

líquido, todavia estudos sobre escoamentos líquido-líquido ainda são escassos, porque durante muito tempo optou-se por considerar a mistura de líquidos como homogênea ou um pseudo-fluido. Contudo essa abordagem é bastante limitada e incapaz de atender à crescente necessidade de melhoria de processos e modelagem. Em especial, o escoamento estratificado óleo-água tem ganhado interesse por ser bastante comum na indústria de petróleo, uma vez que tende a prevalecer em tubulações na horizontal ou com pequenas inclinações, muito vistas em poços direcionais e oleodutos.

As seções a seguir apresentam uma revisão de trabalhos importantes para o entendimento de escoamentos bifásicos.

2.3 - Padrões de escoamentos

O que torna escoamentos bifásicos especialmente complexos é o fato deles poderem assumir diferentes configurações espaciais, também conhecidas como padrões de escoamento. Esses padrões podem variar bruscamente, dificultando a predição de parâmetros importantes do escoamento, com a perda de carga e frações volumétricas (BOCHIO, 2019). As primeiras identificações de padrão de escoamento foram feitas por meio de observações direta, isto é, análises visuais. Posteriormente, métodos indiretos, baseados na análise estatística das flutuações, passaram a ser utilizados concomitantemente, permitindo a geração de modelos matemáticos. Por fim, surgiram os mapas de fluxo, nos quais os padrões de escoamento são representados na forma de gráficos que identificam a sua ocorrência dentro de certos limites de uma variável do escoamento (RUAS, 2016).

Os mapas de fluxo podem ser fenomenológicos, obtidos a partir de bases teóricas dos fenômenos físicos que ocorrem nas transições entre os padrões de escoamento, ou correlacionais, obtidos a partir de dados experimentais e generalizados. Existe uma grande variedade de mapas de fluxo publicados, no entanto, é comum observar divergências entre eles. Dentre os motivos para tais divergências estão as discordâncias quanto à própria classificação e nomeação dos padrões. É comum encontrar na literatura trabalhos distintos utilizando diferentes termos subjetivos para descrever um mesmo padrão de fluxo ou ainda discordando quanto às suas transições (RUAS, 2016).

I. ***Escoamento estratificado:*** O fluido menos denso se coloca na parte superior do duto e cria uma mistura dispersa na interface.

II. **Escoamento disperso:** Apresenta pequenas frações de óleo em água ou de água em óleo ao longo do duto.

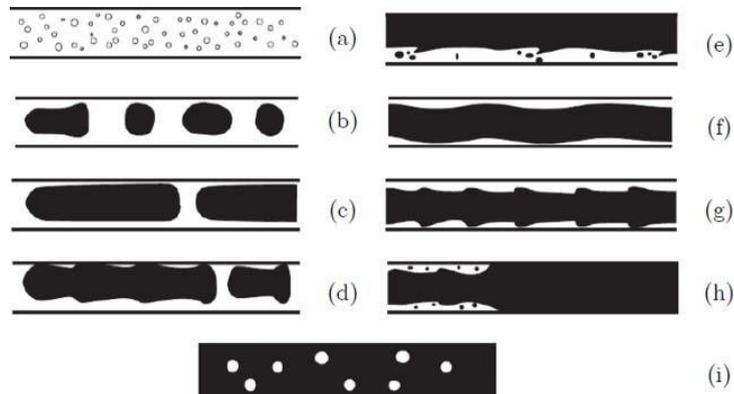
III. **Escoamento intermitente:** Possui uma semelhança ao escoamento pistonado em sistema líquido- gás, criando bolhas em formatos semelhantes a projétil.

IV. **Escoamento anular:** Apresenta uma fase no centro e a outra fase criando um perfil anular em volta do fluido central.

A Figura 3 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) golfadas; (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.

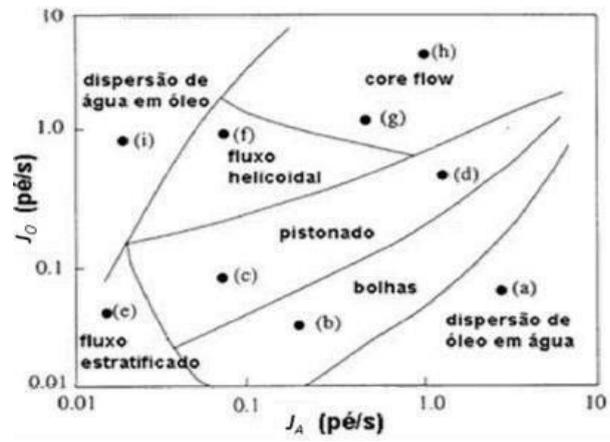
Figura 3 - Padrões de escoamento óleo em água em tubulação horizontal.



Fonte: Joseph, et al. (1997).

Já a Figura 4 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 4 - Carta de diferentes padrões de escoamento água-óleo.

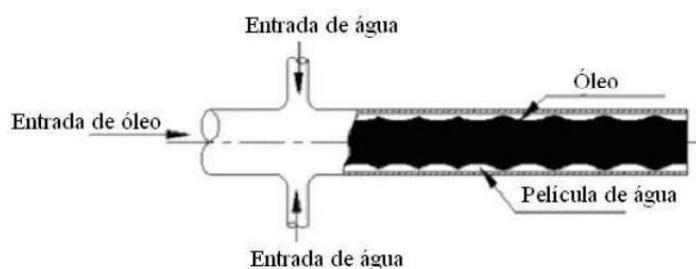


Fonte: Joseph, et al. (1997).

2.3 - Escoamento anular (*Core Annular Flow*)

Core-flow ou *Core Annular Flow*, consiste em uma técnica para favorecer a locomoção de óleos pesados de alta viscosidade via tubulações utilizando uma camada muito fina de água entre a parede do duto e o óleo pesado. Esta técnica aumenta consideravelmente a produção, reduzindo a resistência do petróleo pesado no trajeto percorrido pelo fluido independente do formato, seja na vertical ou horizontal, sem a incorporação de calor ou utilização de agentes químicos e diluentes. A água é injetada à temperatura ambiente, nas laterais do tubo de produção formando um filme lubrificante em toda sua extensão gerando um padrão de escoamento anular conforme mostrado na Figura 5, facilitando a locomoção dos óleos pesados (MARINHO, 2012).

Figura 5 - Modelo representativo do método “Core-Flow”.



Fonte: Gosh, 2009.

O método de injeção de água na região anular do escoamento diminui consideravelmente a perda de pressão por atrito, permitindo que o óleo seja transportado pelo centro do duto, com uma capacidade de bombeamento equivalente à da água. Conseqüentemente uma diminuição no gasto energético e aumentando a produção de óleo proveniente das reservas de óleo pesado em campos *offshore*.

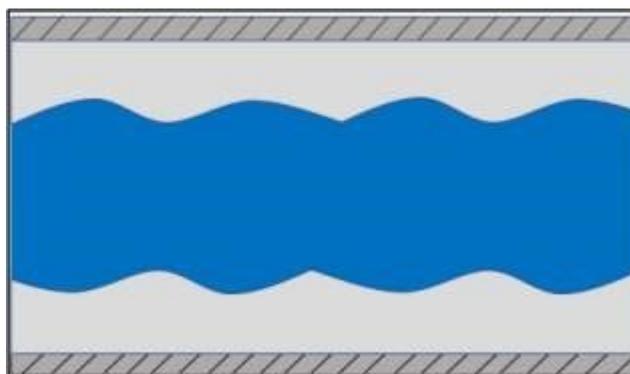
Se porventura o petróleo entrar em contato com a parede interna do oleoduto de forma intensa, durante o transporte, pode causar incrustações nas paredes do duto com um aumento significativo na pressão do sistema, danificar todo o sistema de transporte, bem como gerar possíveis desastres ambientais (MARINHO, 2012).

O escoamento anular, em relação ao formato da interface óleo-água, pode ser subdividido em escoamento anular ideal ou perfeito (PCAF- perfect core annular flow) ou anular ondulado (WCAF- wave core annular flow). No escoamento anular ideal ou perfeito é

considerado que não há ondulações na interface óleo-água. Corresponde a um escoamento concêntrico de dois fluidos em uma tubulação de seção transversal circular, em regime laminar e permanente. Em tubos horizontais, devido à ação da gravidade, o efeito de simetria fica comprometido. Já para tubulações verticais, este problema não é observado (PRADA, 1998).

O método anular ondulado representado na Figura 6, é o típico escoamento observado em situações reais. É caracterizado pela formação de ondas durante o escoamento, pois o efeito da gravidade sobre os fluidos com diferentes densidades provoca um movimento radial do núcleo, formando assim, as ondulações.

Figura 6 - Escoamento anular ondulado em uma tubulação horizontal.



Fonte: Oliveira, 2021.

De acordo com Prada (1998), a formação do escoamento anular depende da estabilidade hidrodinâmica e da determinação de parâmetros como a faixa de velocidade para a qual o escoamento anular é estável, geometria e posição do duto e propriedades dos líquidos.

A tensão superficial tem grande influência na estabilidade do escoamento anular. Em velocidades baixas, a tensão superficial e a diferença de densidade entre os fluidos provocam instabilidades no escoamento. Estas instabilidades geram ondulações na interface entre os fluidos, formando um escoamento anular ondulado, que é mais estável e de maior aplicabilidade na prática (PRADA, 1998).

2.3.1 Fundamentos e estado da arte

Estudos apontados por Oliveira (2021) têm sido reportados na literatura a respeito do escoamento anular (core-flow). O ponto principal é a redução da perda de carga por atrito causada pela injeção de água, a qual escoou junto à parede do tubo.

Russel e Charles (1959) realizaram uma modelagem analítica para o escoamento anular e estratificado de óleo e água entre duas placas paralelas e em um tubo circular. Como a maior parte da tensão cisalhante ocorre nas paredes, os autores consideraram que era razoável supor que, com a injeção de água ao redor das paredes do tubo, a queda de pressão seria menor. O fluxo simultâneo da água e óleo foram analisados e as equações finais foram aplicadas para uma gama de condições de escoamento. De acordo com resultados, os autores afirmaram que a queda de pressão foi menor no tubo circular do que no fluxo entre duas placas paralelas, pois o fluido mais viscoso, o óleo, escoou no centro do tubo, reduzindo assim o diferencial de pressão.

Oliemans (1986) realizou uma investigação das características do core-flow, como também, uma revisão da literatura sobre modelos teóricos e correlações para determinar o gradiente de pressão para um escoamento core-flow estável. Para isso, foi considerado um escoamento de óleo e água em um tubo horizontal. Um modelo teórico para escoamento anular foi adaptado, adicionando a turbulência no filme de água durante o escoamento. O modelo adaptado prediz o aumento do gradiente de pressão com o aumento da velocidade de óleo, considerando as amplitudes das ondas observadas durante os testes.

Prada (1998) realizou um estudo experimental com o objetivo de propor uma alternativa para a elevação de óleos pesados utilizando a técnica core-flow. Como resultado, foi observado que, com a utilização da técnica, a perda de carga na tubulação foi reduzida em mais de 1000 vezes em relação ao escoamento monofásico de óleo. Além disso, uma correlação para determinar o gradiente de pressão no escoamento vertical ascendente foi desenvolvida e validada.

Ooms e Poesio (2003) realizaram um estudo e propuseram um modelo teórico baseado na teoria de lubrificação hidrodinâmica para o escoamento anular em um duto horizontal. De acordo com o modelo, o fluido com a maior viscosidade se movimenta de forma ondulada no centro do duto. Essa ondulação induz variações de pressão ao longo do duto.

Biazussi (2010) estimou o coeficiente de escorregamento entre as fases óleo e água em um escoamento anular por meio do cálculo da velocidade da interface. O resultado foi obtido a partir de uma correlação cruzada entre imagens adquiridas do escoamento através de um programa desenvolvido em LabVIEW. Com isso, apresentaram o coeficiente de escorregamento que melhor se ajustou ao modelo proposto.

Andrade et al. (2013) estudou o escoamento transiente de óleo pesado e água em duto horizontal com conexões T via simulação numérica utilizando o software ANSYS CFX.

Verificou-se que a técnica core-flow não é eficiente para transportar o óleo pesado nas conexões T, pois o padrão de escoamento nas conexões muda de core-flow para estratificado.

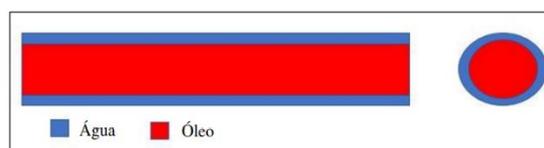
Shi et al. (2017) estudaram modelos de predição do *holdup* de água e o gradiente de pressão para escoamento de água e óleo com alta viscosidade em dutos horizontais, utilizando o padrão core-flow. Os resultados experimentais mostraram que, o *holdup* de água não está somente relacionado com a fração volumétrica da água, mas também ao grau de excentricidade da fase óleo, que é atribuída ao número de Froude da fase óleo. O que explicou a inconsistência dos resultados experimentais no que se refere à relação entre *holdup* de água e fração volumétrica da água obtidos a partir da literatura.

2.3.2 A técnica Core Annular Flow (CAF)

A técnica Core-flow é caracterizada pela injeção de água na região em contato com a parede com o intuito de envolver o óleo por uma fina camada de água, para que não ocorra nenhuma contato do óleo com a parede da tubulação, formando assim um padrão anular. Esta técnica não modifica a viscosidade do óleo, porém transforma o padrão de escoamento, e reduz o atrito no transporte do óleo pesado (ANDRADE *et al.*, 2013).

A Figura 7 apresenta um típico escoamento core-flow em um duto horizontal.

Figura 7 - Escoamento core-flow em um duto horizontal.



Fonte: Oliveira. 2021.

O CAF permite que o óleo pesado seja transportado com uma potência de bombeamento equivalente ao escoamento monofásico de água, pois somente a água entra em contato com a parede da tubulação. Com isso, a perda de carga é reduzida consideravelmente. Por outro lado, se houver um desequilíbrio no padrão de escoamento e o óleo pesado entrar em contato com a parede da tubulação, a pressão do sistema de transporte aumentará, podendo danificá-lo (Oliveira,2021).

Em virtude da quantidade de reservas de óleo pesado descobertas, principalmente

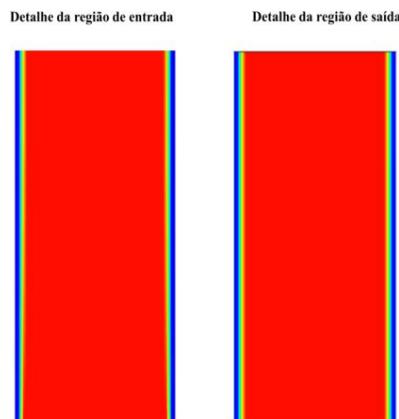
reservas *Offshore*, tornou-se um desafio transportar este óleo pesado de uma forma segura e economicamente viável. Por isso, um estudo mais aprofundado da técnica *core-flow* tornou-se de suma importância (Oliveira,2021).

De acordo com Oliveira (2021). o escoamento anular, em relação ao formato da interface óleo-água, pode ser subdividido em escoamento anular ideal ou perfeito ou anular ondulado. No escoamento anular ideal ou perfeito é considerado que não há ondulações na interface óleo-água. Corresponde a um escoamento concêntrico de dois fluidos em uma tubulação de seção transversal circular, em regime laminar e permanente. Bensakhira et al. (2004), afirma que o escoamento anular perfeito é raro de existir, podendo ocorrer somente nos casos em que os fluidos presentes no escoamento tenham densidades iguais.

O escoamento anular ondulado é o tipo de escoamento observado em situações reais. É caracterizado pela formação de ondas durante o escoamento., pois o efeito da gravidade sobre os fluidos com diferentes densidades provoca um movimento radial do núcleo, formando assim, as ondulações.

A Figura 8 apresenta um esquema de escoamento *Core Annular Flow* em duto vertical.

Figura 8 - Esquema do Escoamento Core Annular Flow na entrada e saída do duto.



Fonte: SILVA, 2012.

No escoamento de dois líquidos imiscíveis, o líquido de menor viscosidade (água) se encontra na parede 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, 1998).

A desvantagem deste método CAF é quando o óleo atinge a parede interna da

tubulação, onde ocorre o aumento da pressão, o que poderá causar acidentes como entupimento ou encrustação. 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 nãoaconteça. 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).

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

O escoamento anular apresenta características fundamentais para o 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. 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 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).

2.4 - VOF MODEL

O volume de fluidos (VOF) é um método euleriano usado para localizar e reconstruir interfaces que separam fluidos imiscíveis presentes em um escoamento bifásico. Este método foi originalmente introduzido por Hirt e Nichols (1981), sendo um dos mais aplicados para simulação deste tipo de escoamento, pois é relativamente simples de ser implementado, tem boa precisão e apresenta bom comportamento no tratamento de mudanças substanciais na topologia da interface (SILVA, 2020).

A ideia básica do método consiste em introduzir uma função indicadora, f , dentro de um volume de controle, representado, em cada passo de tempo, a fração de volume de fluido dentro de cada célula na malha computacional. Para exemplificar o funcionamento do método, considere um escoamento bifásico em uma interação gás-líquido, onde a análise é feita em coordenadas cartesianas (SILVA, 2020).

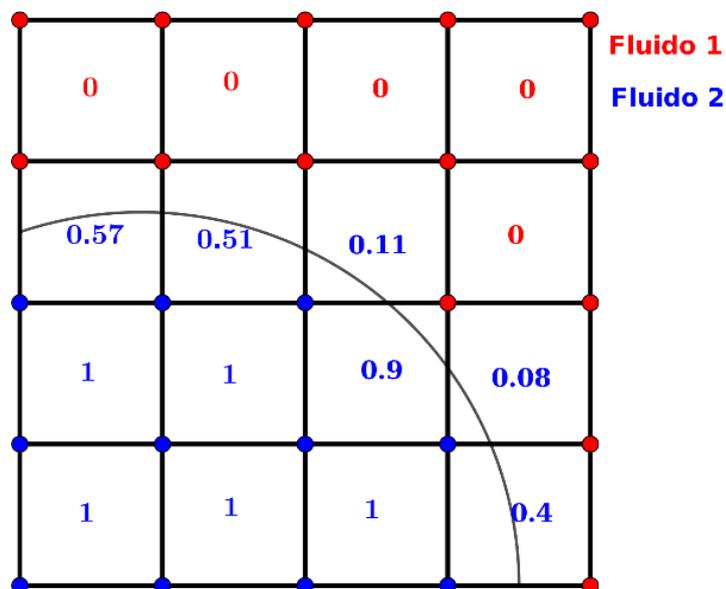
Dentro de cada célula computacional é definida a função $f \in [0,1]$, tal que:

$$f_{i,j} = \begin{cases} 0, & \text{se a célula } (i, j) \text{ estiver cheia de líquido (Fluido 1),} \\ 1, & \text{se a célula } (i, j) \text{ estiver cheia de gás (Fluido 2),} \\ f \in (0,1), & \text{se a célula } (i, j) \text{ contém, simultaneamente, líquido e gás.} \end{cases}$$

$f \in (0,1)$, se a célula (i, j) contém, simultaneamente, líquido e gás.

A representação geométrica da equação acima pode ser observada na Figura 9:

Figura 9 - Frações de volume de fluido em um volume de controle.



Fonte: Silva, 2020.

Para a imposição da viscosidade e da densidade em cada célula computacional, as seguintes interpolações foram usadas:

$$\begin{aligned}\mu &= (1-f)\mu_1 + f\mu_2 \\ \rho &= (1-f)\rho_1 + f\rho_2\end{aligned}\quad (5)$$

Com μ_1, μ_2 e ρ_1, ρ_2 representando, nesta ordem, as viscosidades e densidades de cada um dos fluidos.

A advecção das frações de volume de fluido, no método VOF, é modelada pela seguinte equação de transporte:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \nabla \cdot (uf) = 0 \quad (6)$$

É importante destacar que a precisão do método VOF depende vigorosamente da técnica escolhida para modelar a evolução da interface. Apesar da relativa simplicidade e baixo custo computacional das técnicas algébricas para resolver (4.4), uma vez que a interface não precisa ser reconstruída a cada passo de tempo, o método VOF apresenta maior eficiência com o uso de formulações geométricas de acordo com Rudman (1997).

No método VOF a interface é representada implicitamente pela fração volumétrica de uma das fases na malha computacional, enquanto a sua advecção é realizada pela distribuição desse fluido a células adjacentes. Ao longo dos anos, um grande número de métodos baseados em VOF foram desenvolvidos e tais podem ser divididos em duas categorias básicas: métodos geométricos e algébricos. A diferença entre eles é que nos métodos geométricos, a reconstrução da interface é feita de forma explícita, tornando-os mais custosos computacionalmente, mas também mais precisos (Bochio, 2019).

2.5.1 - Vantagens do VOF

- Precisão na Conservação de massa.
- Facilmente estendido do caso bidimensional para o tridimensional.
- Apresenta maior flexibilidade e eficiência que outros métodos para tratar interfaces com configurações complexas, fornecendo uma maneira simples e econômica de rastrear interfaces em formas bidimensionais ou tridimensionais.

O modelo VOF pode modelar dois ou mais fluidos imiscíveis resolvendo um único conjunto de equações de momento e rastreando a fração de volume de cada um dos fluidos em todo o domínio. As aplicações típicas incluem a previsão do rompimento do jato, o movimento de grandes bolhas em um líquido, o movimento do líquido após o rompimento de uma barragem e o rastreamento permanente ou transitório de qualquer interface líquido-gás (Ansys, 18.1).

2.6 – Introdução ao CFD

A dinâmica de fluidos computacional ou CFD é a análise de sistemas envolvendo fluxo de fluidos, transferência de calor e fenômenos associados, tais como reações químicas por meio de simulação computadorizada. A técnica é muito poderosa e abrange uma vasta gama de áreas de aplicação industrial e não industrial (Franco Neto, 2017).

O ANSYS Fluent em especial, fornece capacidades abrangentes de modelagem para uma ampla gama de problemas de fluxo de fluidos incompressíveis e compressíveis, laminares e turbulentos. Pode-se realizar análises estáticas ou transitórias. No Fluent, uma ampla gama de modelos matemáticos para fenômenos de transporte (como transferência de calor e reações químicas) é 38, combinada com a capacidade de modelar geometrias complexas (ANSYS Fluent Theory Guide, 2018).

Uma alternativa à modelagem e análises experimentais que tem ganhado força nos últimos anos é a utilização da fluidodinâmica computacional. A grande vantagem desta abordagem está na maior complexidade em relação aos códigos 1D, o que permite obter resultados mais detalhados, mas, em geral, ainda a custos menores que experimentos. A utilização e o desenvolvimentos de simulações CFD para escoamentos multifásicos ainda apresenta diversas barreiras devido à grande complexidade deste tipo de escoamento, mas vem progredindo a uma alta velocidade, com resultados interessantes para diversas aplicações (Bochio, 2019).

Um dos primeiros estudos utilizando as técnicas de CFD, foi o de Charles e Redberger (1962), o qual analisou numericamente a perda de carga em um escoamento laminar estratificado óleo-água. Esse trabalho utilizou métodos muito simples para a solução do escoamento laminar das duas fases e tinha como objetivo central mostrar que o escoamento água-óleo apresentava uma perda de carga menor que o escoamento monofásico de óleo. Embora o trabalho tenha mostrado que a utilização de técnicas numéricas podia ajudar a elucidar os problemas da área, o baixo poder de processamento da época, aliado à ausência de metodologias robustas de solução numérica, fizeram com que a maior parte dos trabalhos

seguintes se concentrassem em experimentos ou modelos unidimensionais simplificados (Bochio, 2019).

De acordo com Bochio (2019), no trabalho de Mouza, Paras e Karabelas (2001) foi utilizado o código comercial ANSYS CFX ® para realizar simulações tridimensionais do escoamento ar-água em tubos. Foram resolvidas as equações de média de Reynolds para os dois fluidos e, para computar o efeito da turbulência, o modelo $k-\varepsilon$ para a fase água e o modelo de tensão algébrica para a fase ar, utilizada nesse trabalho seja mais abrangente, ainda foi imposta uma interface plana para os cálculos e o efeito das ondulações na interface foi adicionado por meio de um valor de rugosidade efetiva.

Ghorai e Nigam (2006) realizaram simulações utilizando o software Fluent ® para solução do escoamento estratificado gás-líquido em um tubo, em regime permanente, usando o modelo Volume-Of-Fluid (VOF). Os autores conseguiram capturar a deformação da interface em suas simulações. A perda de carga apresentou boa correlação com os dados experimentais para o caso analisado, com erro de aproximadamente 5%. Para baixas velocidades superficiais de ar, o perfil de velocidades nessa fase foi bem capturado, mas a medida que o número de Reynolds foi aumentando, o valor computado próximo a interface começou a sofrer um desvio considerável (Bochio, 2019).

3- METODOLOGIA

3.1 SOFTWARE E HARDWARE

Os softwares utilizados foram o ANSYS FLUENT 18.1. As equações da conservação são discretizadas e resolvidas iterativamente para cada volume de controle, obtendo-se como resultado uma aproximação do valor de cada variável em pontos específicos do domínio.

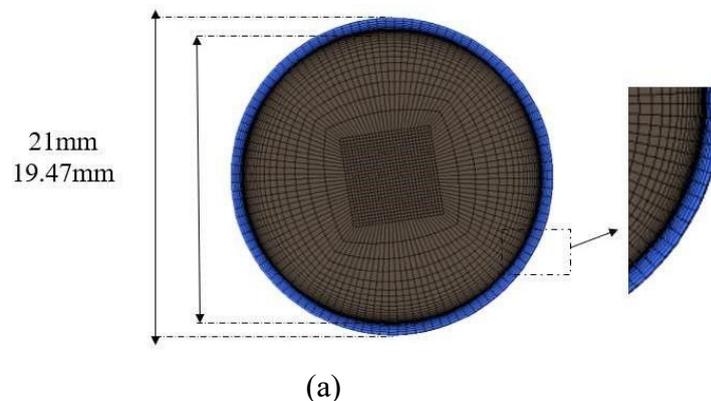
O ANSYS ICEM foi utilizado para criação da geometria A e criação da malha. O ANSYS FLUENT 18.1 foi utilizado para a instalação das condições de contorno e parâmetros de simulação no setup e para a resolução do problema no solver. As simulações foram realizadas em um computador com configuração básica de processador de Intel(R) Core (TM) i5-10300H CPU @ 2.50GHz 2.50 GHz, e memória de 8 GB.

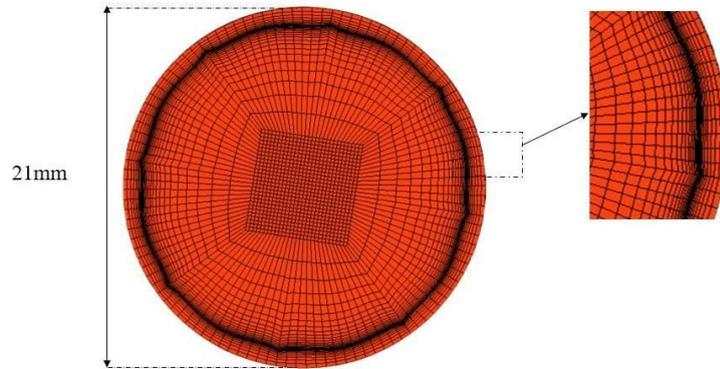
3.2 Geometria A

Para estudar a fluidodinâmica de uma tubulação com escoamento anular, foi adotada uma geometria em 3D que representa um duto de transporte de fluidos provenientes da extração de petróleo. Esse tipo de simplificação vem sendo adotada por diversos autores como Haoyu Li, et al., (2021), com o intuito de reduzir os obstáculos durante o transporte dos fluidos. A Figura 10 ilustra a geometria criada no software Ansys ICEM.

O foco deste trabalho foi a análise fluidodinâmica do escoamento óleo-água numa tubulação via CFD. Para este estudo, foram construídas geometrias em 3D, foram desenvolvidas as geometrias A, B e C para realizar as simulações. A geometria A foi adotada com a finalidade de validar as simulações, sendo construída com as dimensões adotadas no trabalho de Haoyu Li, et al., (2021). A geometria B possui como base os dados iniciais da geometria A e adicionados valores referentes a curvatura.

Figura 10 - Malha na região de entrada de água e óleo pesado (a) e na região de saída (b).





(b)
Fonte: Autor, 2022.

Tabela 1 - Dimesão das geometrias.

Geometria	Diâmetro interno (mm)	Diâmetro Externo (mm)	Comprimento (mm)	Curvatura (mm)
A	19,47	21	25,6	-
B	19,47	21	91,2	40
C	19,47	21	111,2	60

Fonte: Autor, 2022.

3.3- Malha Numérica

O próprio software Ansys ® disponibiliza técnicas de elaboração de uma malha computacional, ficando a cargo do operador escolher o método mais eficiente de acordo com o problema que se está trabalhando. A criação da geometria A e a malha foi efetuada por meio do software ICEM CFD®. As geometrias B e C, por possuírem regiões minuciosas, foram criadas em dois softwares, inicialmente no *Design Modeler* e posteriormente no ICEM CFD ®, para a elaboração da blocagem e geração da malha. Os domínios de estudo foram criados por meio da definição de pontos, curvas, superfícies e sólidos, que descrevem o seu tamanho e o seu formato.

3.3.1 - Validação

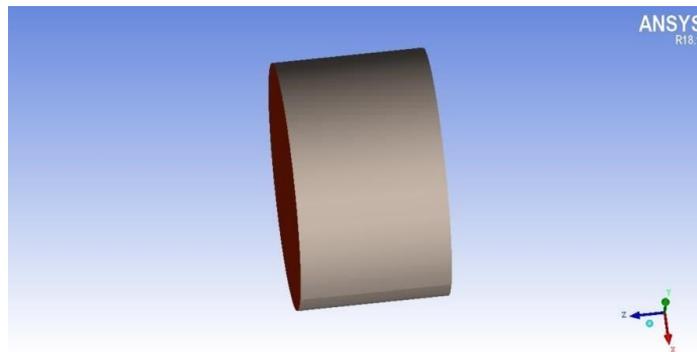
O processo de validação consiste em criar uma geometria e malha com as mesmas variáveis disponibilizadas no artigo de Haoyu Li, et al., (2021). A validação ocorreu inicialmente por meio da observação da formação do padrão de escoamento, e comparação de resultados quantitativos obtidos no trabalho de Haoyu Li, et al., (2021). Em conjunto com a validação foi realizado um teste de malha que facilitou na escolha do refinamento das geometrias em estudo, visto que, identificou-se o melhor número de elementos distribuídos

nas superfícies das geometrias.

A máquina utilizada na simulação foi uma máquina de pequeno porte com processador Intel(R) Core (TM) i5-10300H CPU @ 2.50GHz 2.50 GHz, e memória de 8 GB, que realizou o escoamento dos fluidos pelo método do padrão de escoamento *Core Annular Flow*, sendo também utilizados o padrão de interface *Volume Of Fluid – VOF* e modelo de turbulência $k - \epsilon$. As condições de contorno adotadas na simulação também foram disponibilizadas no artigo base, com o intuito de chegar a resultados semelhantes.

Na Figura 11 e Figura 12 estão representadas as geometrias referentes ao domínio de estudo da validação, bem como as malhas estruturadas utilizadas para o estudo do escoamento bifásico água-óleo. Os domínios de estudo foram criados por meio da definição de pontos, curvas, superfícies e sólidos, descrevendo o seu tamanho e o seu formato.

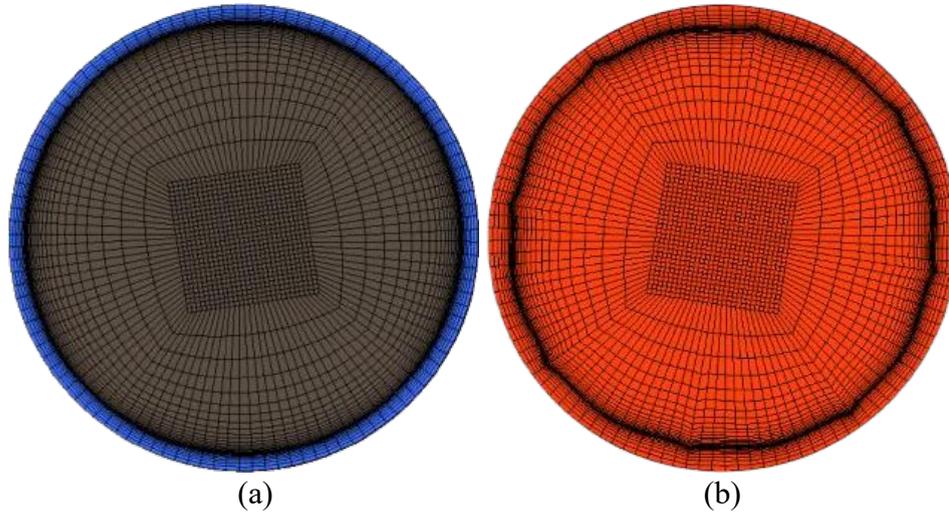
Figura 11 - Geometria proposta para a simulação de validação.



Fonte: Autor, 2022.

A Figura 12 ilustra os detalhes da malha utilizada nas simulações, onde é possível observar os principais detalhes nas interfaces de entrada do óleo e da água, onde ocorre um maior refinamento nesta região em comparação com a região central da malha.

Figura 12 - Malha na região de entrada de água e óleo pesado (a) e na região de saída (b).



Fonte: Autor, 2022.

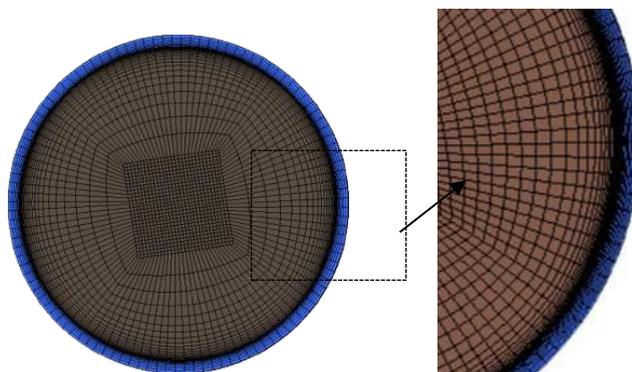
Tabela 2 - Elementos da malha da geometria A.

Elementos	Hexaédricos	Quadriláteros
407.352	388.080	18.928

Fonte: Autor, 2022.

Finalizado a etapa de criação da geometria e da malha numérica, é gerado um arquivo a ser utilizado no Ansys Fluent. Nele deve ser incluído as condições iniciais e de contorno do problema, as propriedades dos fluidos presentes, o modelo matemático que trata o escoamento multifásico e o método *Core Anular Flow*.

Figura 13 - Malha refinada na região central.



Fonte: Autor, 2022.

A Figura 13 representa uma malha com maior refinamento e com elementos mais simétricos ao longo de todo o diâmetro da tubulação. A simetria desses elementos é importante pois interfere diretamente na precisão dos cálculos e nos resultados obtidos na simulação, visto que, quanto mais diferentes os elementos da malha sejam, a probabilidade de

ocorrer um erro cresce.

3.3.2 – Geometria B

As geometrias B e C representadas nas Figuras 15 e 19 foram realizadas por meio do *Software Design Modeler*, devido à dificuldade da criação da curvatura no software ICEM CFD. Posteriormente, essas geometrias foram exportadas para Ansys ICEM CFD Release 18.1, para a realização do processo de blocagem e geração da malha.

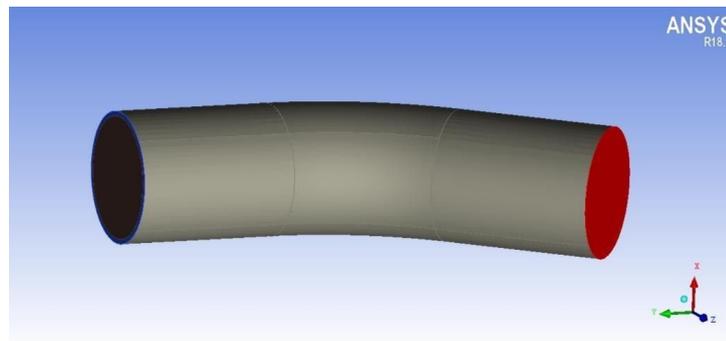
Para a realização das malhas, foi utilizada como base a malha de 100 mil elementos do teste de malha gerado na geometria A, a qual obteve um melhor resultado no perfil de velocidade. A geometria B obteve um refinamento com 355.767 elementos, sendo 338.100 elementos hexaédricos e 16.654 elementos quadriláteros.

Tabela 3 - Elementos da malha da geometria B.

Elementos	Hexaédricos	Quadriláteros
355.767	338.100	16.654

Fonte: Autor, 2022.

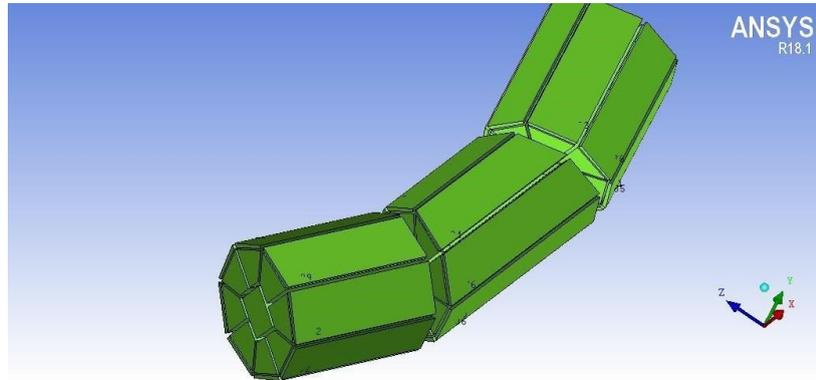
Figura 14 - Geometria B.



Fonte: Autor, 2022.

Finalizado a etapa de criação da geometria e da malha numérica, é gerado um arquivo a ser utilizado no Ansys Fluent. Nele deve ser incluído as condições iniciais e de contorno do problema, as propriedades dos fluidos presentes e o modelo matemático que trata o escoamento multifásico e do método *Core Anular Flow*.

Figura 15 - Detalhe da blocagem utilizada para geração da malha com angulação.

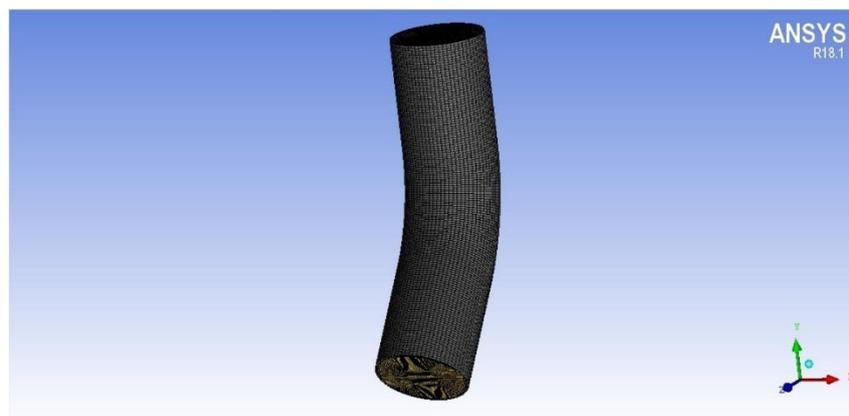


Fonte: Autor, 2022.

A Figura 15 representa a realização da blocagem da geometria curvada. Para as simulações é de suma importância a realização do processo de blocagem para o melhor desempenho na criação das malhas, visto que, a malha é feita baseada nos blocos distribuídos ao longo da tubulação.

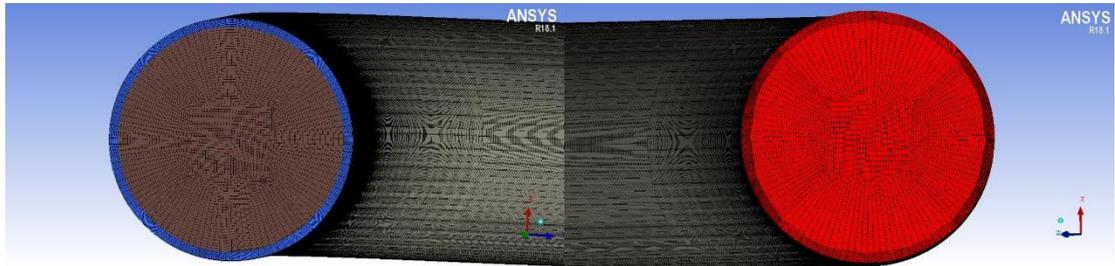
Na Figura 16 é possível observar o refinamento da malha na tubulação, seguindo o foco das malhas no refinamento da interface óleo-água para obter melhores dados do método de escoamento anular e na curvatura para obter dados com bastante precisão na localização de interesse, visto que, na região da curvatura ocorre a variação da velocidade de escoamento dos fluidos. As regiões de entrada dos fluidos e saída possuem um grande refinamento devido a análise da interface dos fluidos. Esse refinamento pode ser observado na Figura 17.

Figura 16 - Representação da malha da geometria B.



Fonte: Autor, 2022.

Figura 17 - Representação da malha na região de entrada e saída do duto curvado.

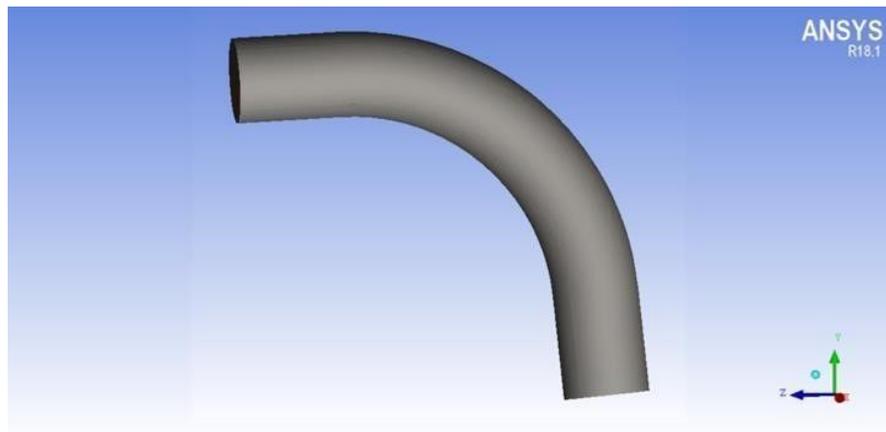


Fonte: Autor, 2022.

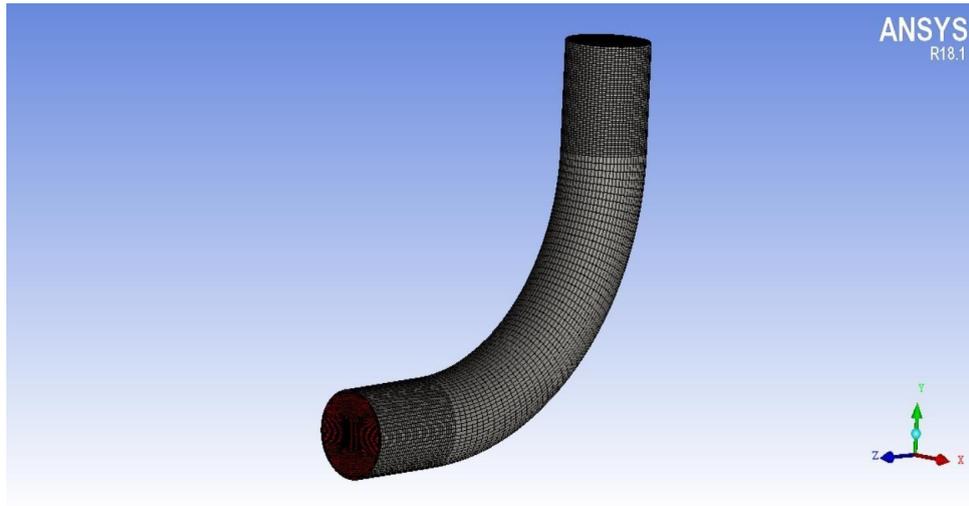
3.3.3 - Geometria C

A Figura 18 (a) representa a geometria C que possui curvatura de raio de 60 mm. Já na Figura 18 (b) é possível observar a geração da malha na geometria. O foco principal para refinamento da malha além da interface óleo-água foi na região da parede interna da curva, visto que é nessa região que pode ocorrer variação do método de escoamento desenvolvido.

Figura 18 - (a) Duto curvado com 60 mm de raio de curvatura. (b) Representação da malha da tubulação.



(a)



(b)

Fonte: Autor, 2022.

Tabela 4 - Elementos da malha da geometria C.

Elementos	Hexaédricos	Quadriláteros
306.307	291.060	14.544

Fonte: Autor, 2022.

3.4 - Modelagem matemática

Foram implementadas as principais considerações assumidas para o escoamento bifásico tipo core-flow (água-óleo), em estado transiente. Nesta pesquisa considerou-se:

- Modelo multifásico Volume of Fluid;
- Escoamento de óleo laminar, enquanto o escoamento de água é turbulento, utilizando o modelo de turbulência k-ε;
- Fluidos são incompressíveis com propriedades físico-químicas constantes;
- O efeito da gravidade;

3.4.1 Conservação de massa e momento;

As equações de conservação de massa e momento para fluidos incompressíveis e isotérmicos utilizadas foram:

$$\frac{\partial}{\partial t}(f_{\alpha}\rho_{\alpha}) + \nabla(f_{\alpha}\rho_{\alpha}\vec{U}_{\alpha}) = S_{MS\alpha} + \sum_{\beta=1}^{N_p} \Gamma_{\alpha\beta} \quad (7)$$

$$\frac{\partial \rho_{ui}}{\partial t} + \rho_{uj} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho(v + v_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i + F_{\sigma,i} \quad (8)$$

A equação da conservação da energia não é considerada neste estudo, devido ao escoamento ser isotérmico para ambas as fases, não havendo troca de calor.

3.4.2 Modelo de Turbulência k-ε;

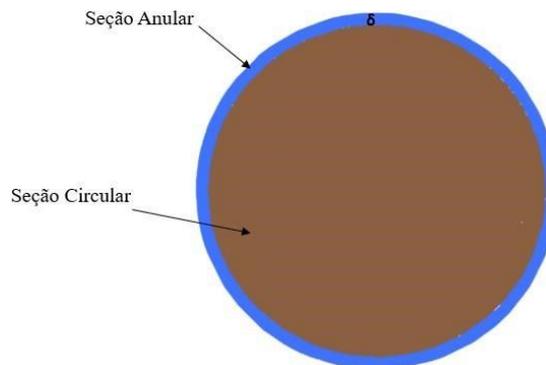
$$\frac{\partial(\rho_{\alpha}f_{\alpha}k_{\alpha})}{\partial t} + \nabla \left\{ f_{\alpha} \left[\rho_{\alpha}\vec{U}_{\alpha}k_{\alpha} - \left(\mu + \frac{\mu_{t\alpha}}{\sigma_k} \right) \nabla k_{\alpha} \right] \right\} = f_{\alpha}(G_{\alpha} - \rho_{\alpha}\epsilon_{\alpha}) \quad (9)$$

$$\frac{\partial(\rho_\alpha f_\alpha k_\alpha)}{\partial t} + \nabla \left(f_\alpha \rho_\alpha \vec{U}_\alpha \varepsilon_\alpha - \left(\mu + \frac{\mu_{t\alpha}}{\sigma_k} \right) \nabla \varepsilon_\alpha \right) = f_\alpha \frac{\varepsilon_\alpha}{k_\alpha} (C_1 G_\alpha - C_2 \rho_\alpha \varepsilon_\alpha) \quad (10)$$

3.5 As condições iniciais e de contorno

Na Figura 19 estão representadas as seções de entradas assumidas para as definições das condições de contorno de entrada dos fluidos no domínio de estudo. Nesta Figura, o δ representa o espaçamento anular.

Figura 19 - Representação da seção de entrada do domínio de estudo.



Fonte: Autor, 2022.

a) Seção de entrada: a seção de entrada ilustrada na Figura 19 corresponde a duas áreas, a anular e a circular.

- **Anular:** A água foi introduzida com um valor prescrito e não nulo para a velocidade. A frações volumétrica e velocidade do óleo nessa seção foi nula ($f_o = 0$). Já na seção de entrada de óleo, foi considerado que esse fluido foi introduzido com velocidade prescrita e não nula, com $f_o = 1$.

- **Circular:** considerou-se que apenas óleo entra nesta seção com uma velocidade axial prescrita e não nula e uma fração volumétrica igual a 1.

b) Parede: Foi adotada a condição de não deslizamento, ou seja, componentes de velocidades nulas para as fases envolvidas.

As condições iniciais e de contorno aplicadas sobre as fronteiras do domínio para resolver as equações foram obtidos do artigo de validação.

- Escoamento transiente;
- Velocidade de entrada dos fluidos foi de $V=1,24$ m/s
- $K=0$, $\varepsilon=0$;
- Volume Fraction parameters implicit

3.5.1. Propriedades termofísicas dos fluidos

As propriedades dos fluidos presentes na simulação numérica do escoamento bifásico água-óleo, empregando a técnica *core-flow* são apresentadas na Tabela 1 e as propriedades e considerações adotadas no *software* estão apresentadas na Tabela 2:

Tabela 5 - Propriedades físicas dos fluidos.

PROPRIEDADES		
FÍSICAS	ÓLEO	ÁGUA
<i>Viscosidade (m²/s)</i>	7.73×10^{-4}	6.7×10^{-7}
<i>Densidade (kg/m³)</i>	902	993
<i>Temperatura (k)</i>	288.16	288.16
<i>Tensão interfacial (n/m)</i>		0,016

Fonte: Haoyu Li, et al. (2021).

Tabela 6 - Considerações adotadas para a resolução das equações.

PROPRIEDADES	CONSIDERAÇÕES
<i>Tipo de escoamento</i>	Bifásico (óleo-água), tridimensional, transiente, incompressivo
<i>Regime de fluxo</i>	Turbulento (água)/Laminar (óleo)
<i>Modelo de turbulência</i>	k-ε
<i>Modelo multifásico</i>	Não-homogêneo
<i>Velocidade inicial</i>	1,24 m/s
<i>Acoplamento pressão-velocidade</i>	SIMPLE
<i>Discretização espacial - gradiente</i>	Least Squares Cell Based
<i>Discretização espacial – pressão</i>	PRESTO!

<i>Discretização espacial – momento</i>	Second Order Upwind
<i>Formulação transiente</i>	Second Order Implicit
<i>Critério de convergência</i>	10 ⁻⁶

Fonte: Autor, 2022.

4- RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 - Teste de malha

O teste de malha é uma etapa indispensável no processo de criação da simulação, visto que, a malha é a principal responsável pela qualidade da solução. A realização do teste tem o intuito de obter dados a fim de minimizar sua influência no resultado.

O teste consistiu primeiramente na elaboração de uma malha grosseira com número total de 52 mil elementos. Em seguida foram criadas duas malhas mais refinadas, aumentando o número total de elementos e, conseqüentemente, diminuindo o tamanho desses elementos. A malha utilizada foi composta por elementos hexaédricos e quadriláteros.

Os dados estatísticos das malhas refinadas são apresentados na Tabela 7.

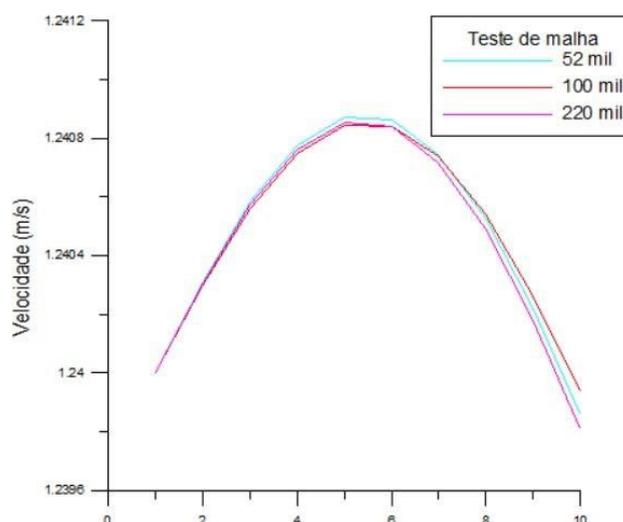
Tabela 7 - Estatísticas das malhas de validação.

<i>Malha</i> <i>Parâmetros</i>	<i>Malha 1</i>	<i>Malha 2</i>	<i>Malha 3</i>
<i>Número de nós</i>	52.290	100.850	397.700
<i>Número de elementos</i>	55.264	104.732	407.352
<i>Hexaedros</i>	49.416	97.020	388.080
<i>Quadriláteros</i>	5.612	7.488	18.928

Fonte: Autor, 2022.

O critério utilizado para verificar a qualidade da malha neste trabalho foi o perfil de velocidade de escoamento nas três malhas.

Figura 20 - Velocidade de escoamento no teste de malha.



Fonte: Autor, 2022.

A Figura 20 representa o perfil de velocidades de escoamento em três malhas de diferentes números de elementos. É possível observar que ambas as malhas possuem um perfil de velocidade de escoamento que se sobrepõe, onde o comportamento desta variável é semelhante em ambos os modelos.

Essa sobreposição está diretamente relacionada a eficiência da malha numérica. Neste caso, é possível afirmar que a variação da quantidade de elementos da malha não afetará nos resultados esperados na simulação, deste modo, a malha não precisa possuir um grande refinamento para que obtenha dados satisfatórios.

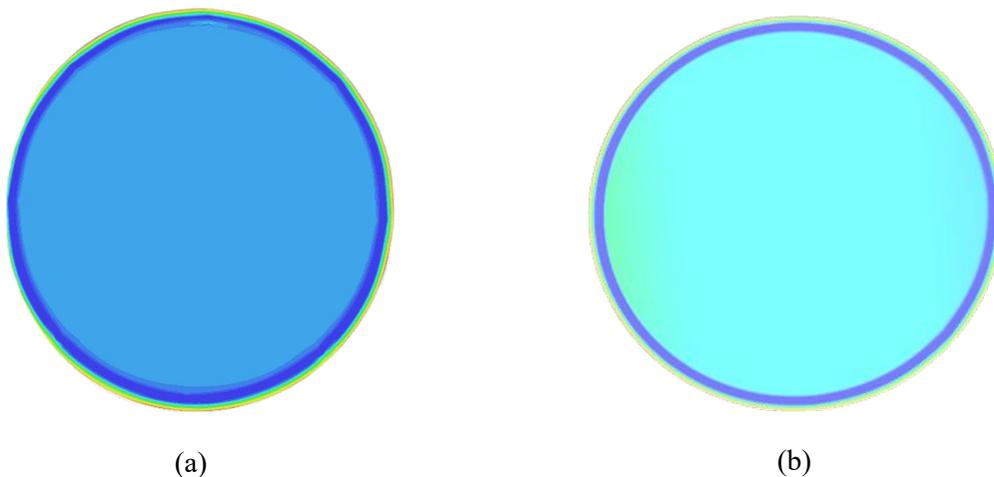
4.2- Validação da simulação proposta

Na validação da metodologia apresentada neste trabalho, foram realizadas simulações para analisar o padrão de escoamento anular em tubulações com a presença e ausência da gravidade. Para isso, foi simulado um escoamento bifásico óleo-água em regime laminar para a região oleosa e turbulenta para a região aquosa, inicialmente em duto horizontal. O resultado dessa simulação é apresentado na Figura 21 e observa-se que houve uma concordância entre os resultados obtidos por Haoyu Li, et al., (2021) e os gerados neste trabalho. Logo, é possível verificar a formação do padrão de escoamento *Core Annular flow* com o modelo matemático e as malhas empregados no presente trabalho.

O modelo *Core Annular* está representado na Figura 21 (a), no qual a base inferior demonstra uma camada de água mais elevada que o núcleo anular, isso ocorre devido ao aumento da viscosidade na região de escoamento criado pela ação da gravidade nos fluidos, acarretando o arraste do óleo para o centro da tubulação.

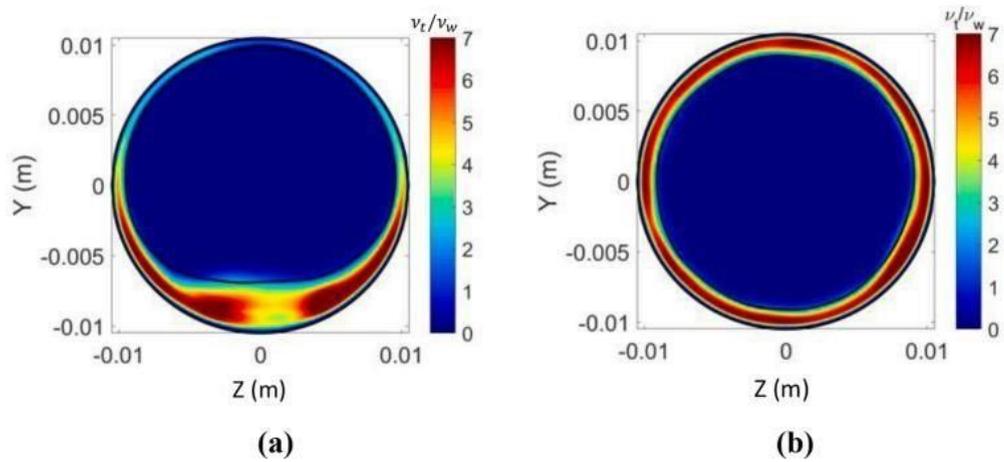
Já na Figura 21 (b), apresenta o método Core Anular sem gravidade, esse escoamento apresenta uma perfeita camada anular de água, onde o óleo escoo no centro do duto de forma que não tem nenhum contato com a parede. Ao comparar os dados apresentados na Figura 22 é possível observar que as Figuras, (a) e (b) de ambas as simulações possuem parâmetros semelhantes de escoamento, como o deslocamento da região aquosa em função da ação da gravidade no óleo Figura (a) ou perfil anular sem a presença da gravidade como mostrado na Figura (b).

Figura 21 - Comparação da viscosidade turbulenta para a simulação 3D; (a) com gravidade, (b) sem gravidade.



Fonte: Autor, 2022.

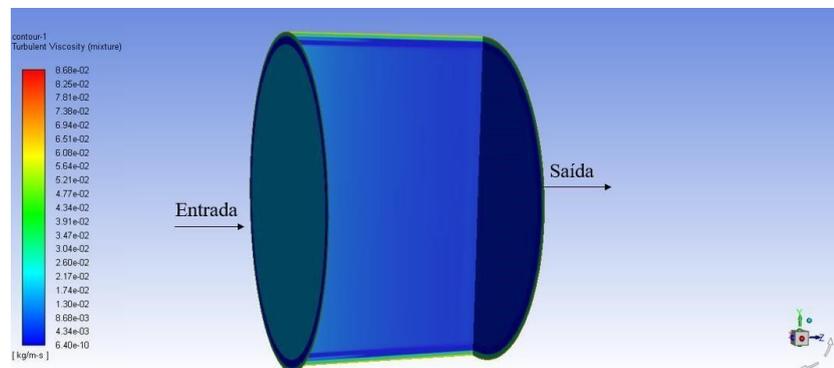
Figura 22 - Comparação da viscosidade turbulenta por Haoyu Li, et al., (2021).



Fonte: Haoyu Li, et al., (2021).

Na Figura 23, o escoamento *Core Annular flow* está presente em toda extensão da tubulação. No diâmetro de entrada, os fluidos entram em espaços diferentes, fazendo com que o óleo escoe no centro, representado pelo tom de azul escuro, presente na coluna no intervalo de $1,30 \text{ e}^{-2}$ a $8,68 \text{ e}^{-3}$. Além do mais, próximo a parede da tubulação é possível observar o gradiente de viscosidade da interação da água com a parede e a interface óleo-água representada pelo azul mais escuro. Nota-se que o perfil anular ocorreu durante toda a extensão do duto sem alterações e falhas, comprovando que o modelo matemático utilizado é capaz de prever a formação do escoamento anular.

Figura 23 - Perfil anular ao longo de toda tubulação.



Fonte: Autor, 2022.

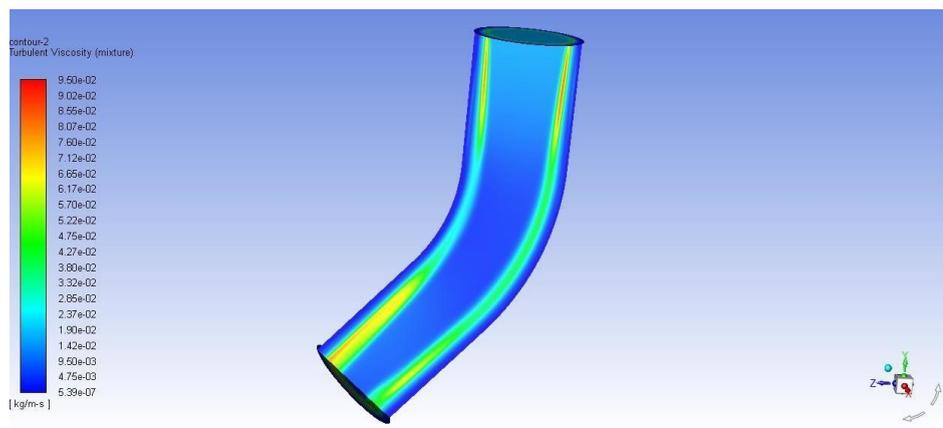
❖ Geometria B

Após a validação, foi realizada mais uma etapa para a simulação do método anular. Nessa segunda etapa, foi utilizada a geometria inicial como base para criar uma geometria com raio de curvatura de 40mm de raio para analisar se o escoamento irá permanecer em meio a uma geometria maior e com curva. O intuito das curvaturas é reproduzir escoamentos que ocorrem em região que possuem aclives ou escoamento que saem dos poços *Offshore* até o continente.

Na Figura 24 é possível observar que o método de escoamento anular acontece em toda a extensão do duto. Na região interna do duto é possível observar um menor número da viscosidade turbulenta devido a formação do núcleo anular nesta interface. A água cria uma película na interface da tubulação fazendo com que o óleo não entre em contato com a parede, promovendo assim uma menor viscosidade na parede.

Já na região central da tubulação, é possível visualizar um gradiente de cores que é representado pela variação da viscosidade turbulenta neste local. Tal gradiente está ligado ao contato óleo-água, onde o óleo possui uma maior viscosidade.

Figura 24 - Viscosidade turbulenta em geometria de curva 40mm.

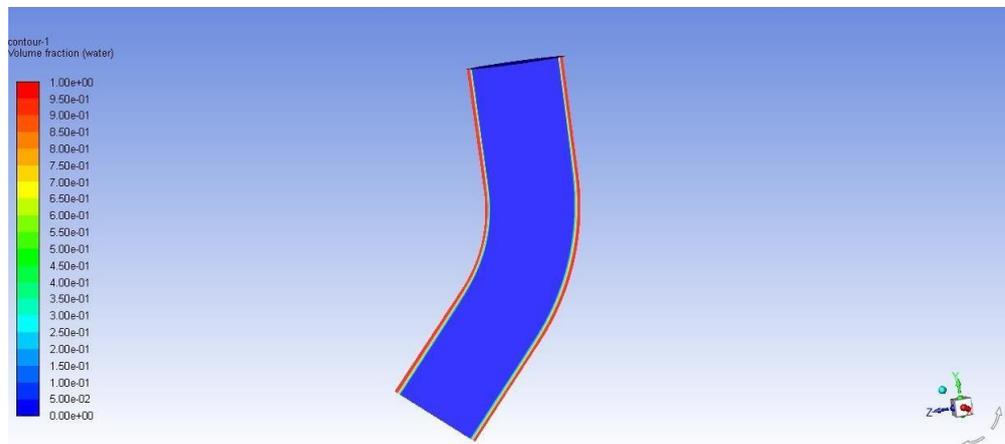


Fonte: Autor, 2022.

Para melhor observação, a Figura 25 representa a fração volumétrica da água presente ao longo da tubulação. Nota-se que a água permanece apenas próximo a parede da tubulação como o desejado para ocorrer a diminuição da viscosidade do óleo durante o processo de transporte pela tubulação. Logo, é possível observar também que não existe água na região central, demonstrando que só tem a passagem do óleo e existe a interface água-óleo

(visualizada pela coloração verde) ao longo de toda tubulação.

Figura 25 - Fração volumétrica da água em tubulação com raio de curvatura de 40 mm.



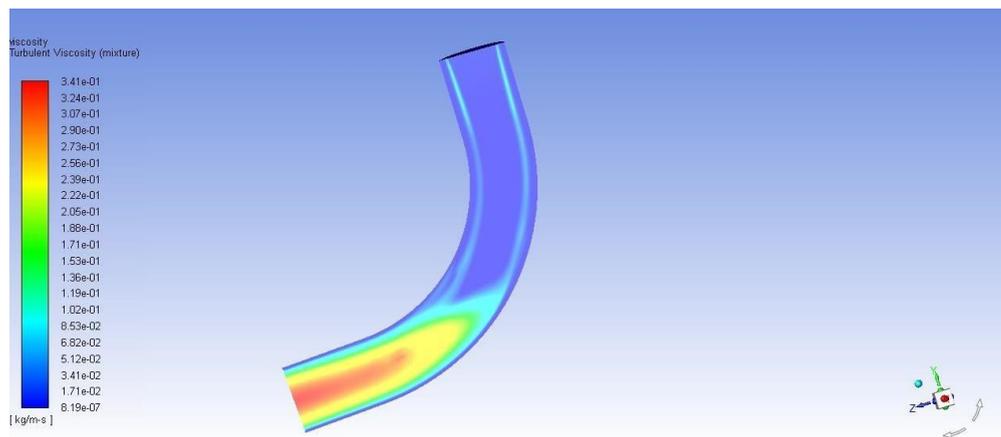
Fonte: Autor, 2022.

❖ Geometria C

Em estudos da tubulação com raio de curvatura de 60mm, foi possível observar o método anular desde o início do escoamento através da fração volumétrica de fluidos. Os parâmetros e condições de contorno adotadas para esta simulação foram as mesmas utilizadas na geometria de validação com o intuito de analisar a eficiência dos parâmetros em dutos com raios de curvaturas maiores. O óleo e a água escoam simultaneamente ao longo da tubulação sem que haja a mistura, criando assim a fina película de água na interface.

Na Figura 26 é possível observar que o método de escoamento anular acontece em toda a extensão do duto. As partes representadas na imagem com o tom azul escuro referem-se ao valor de $8.19e^{-7}$, onde a viscosidade possui o menor valor, neste caso em toda interface da parede do duto. Nota-se ao fim da tubulação um gradiente de cores, local onde ocorre a maior variação da viscosidade turbulenta entre os fluidos. O óleo escoa no centro da tubulação, enquanto a água cria o perfil anular para que não ocorra o contato do óleo com a interface.

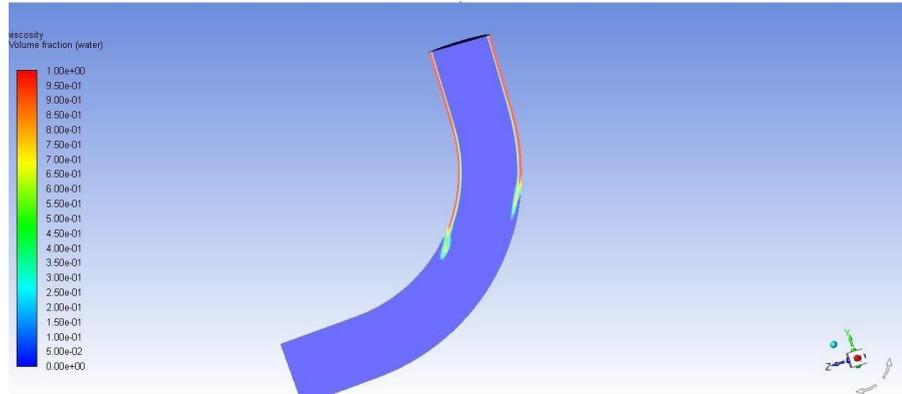
Figura 26 - Fração volumétrica de óleo no duto curvado em vários instantes.



Fonte: Autor, 2022.

Para melhor observação, a Figura 27 representa a fração volumétrica da água presente ao longo da tubulação. A região destacada em vermelho na figura representa a fração volumétrica de água na região. Neste caso, onde encontra-se em azul não existe a presença de água.

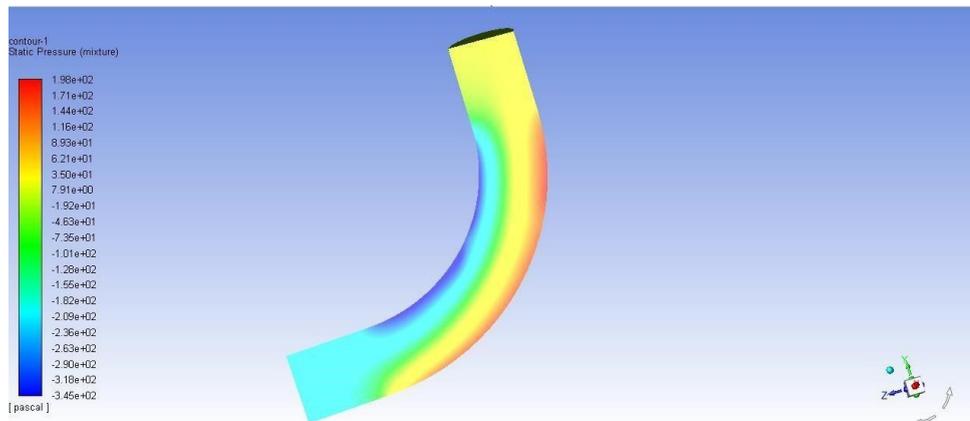
Figura 27 - Fração volumétrica da água em tubulação com raio de curvatura de 60 mm.



Fonte: Autor, 2022.

Para os resultados obtidos no duto curvado de raio 60mm, foi denominada uma região de estudo para análise da pressão na curvatura. Diante disto, a Figura 28 ilustra o campo de pressão por fricção ao longo de uma tubulação com um duto curvado. Consta uma maior pressão na região de entrada do duto que diminui ao longo do escoamento, apresentando posteriormente um gradiente de pressão elevado na região de curvatura, que pode levar a alterações nas velocidades de escoamento água-óleo, conforme observa-se na Figura 29, podendo levar a uma mudança no padrão de escoamento.

Figura 28 - Campo de pressão na geometria de 60mm.



Fonte: Autor, 2022.

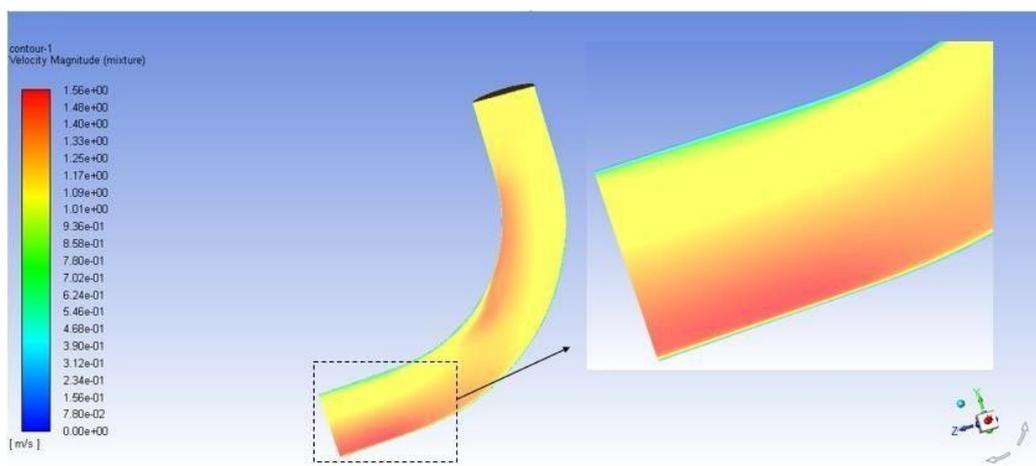
Observa-se que na região externa da curvatura a pressão é maior do que na região interna da curvatura e isso se deve ao fato de que os fluidos, tanto a água quanto o óleo, tendem a

continuar na mesma direção, ou seja, na horizontal, fazendo com que a pressão aumente nessa região e, conseqüentemente, empurre o núcleo de óleo para a parte inferior da curva.

De acordo com a Figura 28 são visíveis as regiões de maior e de menor pressão, pode-se dizer que, se a simulação fosse de um escoamento monofásico de um óleo com tais características em dutos curvados, seria um processo complicado, visto que, a perda de carga durante o escoamento seria muito alta devido aos efeitos viscosos na região inferior, podendo ocasionar o rompimento curvatura.

O campo de velocidade da mistura, ilustrado na Figura 29, permite observar que a velocidade no centro sofre pequenas variações, que são referentes ao escoamento do óleo que tem uma variação muito pequena, indicando que a fase oleosa praticamente não entra em contato com a parede do duto curvado, ou na região de curvatura, onde ocorre as maiores variações. É possível observar na imagem que a maior velocidade se encontra na região interna da tubulação.

Figura 29 - Campo de velocidade de escoamento bifásico.



Fonte: Autor, 2022.

Na região de interface do duto, ocorre um gradiente de velocidade, neste caso, como há presença de água, a velocidade na parede tende a ser nula, enquanto a velocidade dos fluidos tende a elevar na região central, concluindo o intuito do método *Core Annular Flow*.

CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos nas simulações numéricas do escoamento bifásico (água-óleo), pode-se concluir que:

- ✓ O padrão de escoamento observado foi o concêntrico, com um núcleo de óleo anular, envolvido por uma película fina de água (o padrão core-flow);
- ✓ A técnica core-flow mostrou-se eficiente em dutos horizontais e dutos curvados. A película do fluido lubrificante se manteve no duto horizontal e no duto curvado até mesmo na região interna de curvatura onde os vetores de velocidade tendem a mudar de direção;
- ✓ O modelo matemático proposto mostrou-se capaz de avaliar o escoamento bifásico (água-óleo) através de uma tubulação com curvatura, utilizando-se a técnica “Core-Flow”;
- ✓ Ao aplicar a modelagem proposta para uma tubulação horizontal na tubulação com curvatura de raio igual a 40mm, é possível observar que o modelo de escoamento Core Annular Flow se forma em todo o duto.
- ✓ O uso da técnica core-flow em conexões curvadas pode ser executado, desde que o raio de curvatura seja suficiente para manter o padrão de escoamento, caso contrário o padrão será mudado.
- ✓ Ao aplicar a modelagem proposta para uma tubulação na horizontal observa-se pelo campo de fração volumétrica a formação do escoamento anular em todo o duto ocorrendo a excentricidade do núcleo de óleo. O mesmo efeito ocorre no início da tubulação principal, antes da curvatura de 60mm de raio.
- ✓ O modelo de interface Volume of Fluid – VOF permitiu uma melhor visualização do gradiente de viscosidade na interface dos fluidos óleo-água, o qual proporcionou melhores dados para os resultados.
- ✓ A viscosidade na parede diminuiu neste processo devido a presença do perfil aquoso, o qual evitou o contato do óleo na parede.
- ✓ Ao analisar as simulações, a geometria que obteve melhores dados para a simulação foi a de 40mm de diâmetro, visto que, o método de escoamento ocorreu em sua totalidade.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, T. H. F. **Transporte de Óleos Pesados e Ultraviscosos Via Core-Flow: Aspectos Geométricos e Termofluidodinâmicos**. 123p. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande – PB, (2013).

AYUBA, Nuhu. **Simulação de perfis de escoamento multifásico (óleo-água) em duto circular horizontal**. Universidade Federal do Rio Grande – FURG. Disponível em: <http://repositorio.furg.br/bitstream/handle/1/8874/0000013040.pdf?sequence=1>

BARBOSA, Lorena Monteiro Cavalcanti. **Escoamento Não-isotérmico de Óleo Pesado, Água e Gás em Duto Vertical com Vazamento**. Universidade Federal De Campina Grande Centro De Ciências E Tecnologia. Disponível em: <https://www.ppgem.ufcg.edu.br/arquivos/2012/ALEX%20AN%C3%89SIO%20DA%20SILVA%202012.pdf>

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

BIAZUSSI, J. L. **Desenvolvimento de uma Técnica de Medida de Vazão de Óleo em Escoamento Bifásico do tipo Core-Flow**. 2010. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2010.

BOCHIO, Gustavo. **Estudo experimental e numérico do escoamento estratificado óleo-viscoso/água**. 2019. Unversidade de São Paulo, São Carlos, 2019. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18147/tde-11112021-111526/>>DOI: <https://doi.org/10.11606/T.18.2019.tde-11112021-111526>.

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

CONCEIÇÃO, S. B.; LIMA, A. G. B.; ANDRADE, T. H. F.; NETO, S. R. F.; ANGELIM, K. C. L. **Análises hidrodinâmica e energética do transporte de óleos pesados via técnica core-flow em dutos curvados**. 8º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo & Gás, Rio de Janeiro, 2015.

ESLAHPAZIR, M., Krull, R., & Krühne, U. (2019). **Dinâmica de fluidos computacional**.

Em *Biotecnologia Abrangente* (pp. 95-107). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64046-8.00123-3>

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.

GHOSH, S.; MANDAL, T.K.; DAS, G.; DAS, P.K., Review of Oil Water Core Annular Flow, pp. 1-9, Elsevier (2009).

GRANZOTTO, Desirée Grenier. **Modelagem e projeto de um sistema de controle aplicado ao escoamento bifásico de óleo viscoso e água em padrão anular**. 2008. 107f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Petróleo) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

HART, A. **A Review of Technologies for Transporting Heavy Crude Oil and Bitumen Via pipelines**. The Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, vol. 4, N° 3, pp. 327-336, (2013).

JIATONG Tan, Pingya Luo, Sara Vahaji, Jiaqiang Jing, Haili Hu, Bin Yu, Jiyuan Tu. **Experimental investigation on phase inversion point and flow characteristics of heavy crude oil-water flow**, **Applied Thermal Engineering**. Volume 180, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115777>.

JING SHI, Mustapha Gourma and Hoi Yeung. **CFD simulation of horizontal oil-water flow with matched density and medium viscosity ratio in different flow regimes**. Journal of Petroleum Science and Engineering, <http://dx.doi.org/10.1016/j.petrol.2017.01.022>

JING SHI, Mustapha Gourma, Hoi Yeung, **A CFD study on horizontal oil-water flow with high viscosity ratio**. Chemical Engineering Science. Volume 229, 2021, 116097, ISSN 0009-2509, <https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.116097>.

JOSEPH, D. D., Bai, R., Chen, K. P., Renardy, Y. Y., **Core-annular flows**. **Annual Reviews of Fluid Mechanics**, vol. 29, N° 1, pp.65–90, (1997).

KAUSHIK, V. V. R.; GHOSH, S.; DAS, G.; DAS, P. K. **CFD Simulation of Core Annular Flow Through Sudden Contraction and Engineering**, vol. 86-87, pp. 153-164, (2012).

LEA, JF, & Rowlan, L. (2019). In Gulf Drilling Guides, Gas Well Deliquification (Third

Edition), Gulf Professional Publishing, 2019, 209-236. Doi:10.1016/b978-0-12-815897-5.00011-1.

Li, Haoyu, et al. "**Simulation of turbulent horizontal oil-water core-annular flow with a low-Reynolds number $k-\epsilon$ model.**" *International Journal of Multiphase Flow* 142 (2021): 103744.

LIVI, Celso P. **Fundamentos de Fenômenos de Transporte: um texto para cursos básicos.** Rio de Janeiro: LTC, 2004.

MACHADO, José Carlos V. **Reologia e escoamento de fluidos: ênfase na indústria do petróleo.** Rio de Janeiro, Interciência: Petrobras, 2002.

NETO, Antonio Augusto Franco. **Análise de escoamento laminar disperso água-óleo em tubo horizontal.** Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2017.

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

OLIEMANS, R. V. A. **The lubricating-film model for core-annular flow.** 1986. 146 f. Tese (Doutorado) - Delft: Technische Hogeschool Delft, Technologic University of Delft. 1986.

OLIVEIRA, Jéssica Lacerda de. **Análise geométrica e termofluidodinâmica do transporte de óleos pesados, água e gás em duto cilíndrico elíptico via técnica core-flow / Jéssica Lacerda de Oliveira.** – Campina Grande, 2021. 80 f.

OLIVEIRA, Maria Fernanda Degenring. **Análise do comportamento do fluido escoando através de dutos curvos em formato S com diferentes geometrias.** Universidade Federal Fluminense, 2016.

OOMS, G.; POESIO, P. STATIONARY. **Core-annular flow Through a Horizontal Pipe.** *Physical Review*, v. 68. 2003.

PRADA, J. W. V. **Estudo experimental do escoamento anular óleo-água (“core flow”) na elevação de óleos ultraviscosos.** 1998. 184f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)

– Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 1998.

RUAS, Patrícia Haueisen Dias. **Análise teórica do escoamento bifásico e/ou dois-fluidos imiscíveis anular ascendente via GITT / Patrícia Haueisen Dias Ruas.**- João Pessoa, 2016.

- RUDMAN, M. Volume-tracking methods for interfacial flow calculations, **International journal for numerical methods in fluids**. Wiley Online Library, v.24, n.7, p.671-691, 1997.
- RUSSEL, T. W. F.; CHARLES, M. E. **The effect of the less viscous liquid in the laminar flow of two-immiscible liquids**. Can.J. Chem.Engng. v.37, p. 18-24, 1959.
- SHI, J.; LAO, L.; YEUNG, H. **Water-lubricated transport of high-viscosity oil in horizontal pipes: the water holdup and pressure gradient**. **International Journal of Multiphase Flow**. v. 96, p. 70-85, 2017.
- SILVA, Alex Anésio da. **Escoamento trifásico (óleo pesado, água e ar) em duto vertical via técnica Core-Flow**. Campina Grande, 2012.
- SILVA, Andhros. **Estudo Numérico de Escoamento Bifásico Anular Utilizando Ferramenta CFD**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2017.
- SILVA, Aquisson Theyllon Gomes da; CASTELO FILHO, Antonio. **Desenvolvimento da técnica PLIC-VOF no sistema HiG-Flow para simulação de escoamentos bifásicos**. 2020.Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/55/55134/tde-22072020-142449/>>.
- SILVA, Bruno Ferreira. **Escoamento Anular Não Estabelecido De Óleo Ultraviscoso E Água Em Dutos Curvados: Análises Hidrodinâmica E Energética**. Universidade Federal de Campina Grande, 2016. Disponível em:
<http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/bitstream/riufcg/503/1/BRUNO%20FERREIRA%20SILVA%20DISSERTA%C3%87%C3%83O%20%28PPGEM%29%202016.pdf>
- THOMAS, J. E. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. 2 ed., Rio de Janeiro: Interciência, (2004).
- Valus, Maria Gorete. **Fluidodinâmica computacional (CFD) aplicada ao escoamento bifásico líquido-gás do petróleo com base em um modelo cinético**. Campinas, SP, 2018.
- ZHU, Y. D.; SHU, C.; QIU, J.; TANI, J. **Numerical simulation of natural convection between two elliptical cylinders using DQ method**. International Journal of Heat and Mass Transfer. v. 47, p. 797–808, 2004.