

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

RAFAELLA CASADO SILVA

**ESTUDO COMPUTACIONAL DO DESLOCAMENTO DE FLUIDOS EM
TUBULAÇÕES NA ETAPA DE COMISSIONAMENTO DAS LINHAS DE
PRODUÇÃO DE PETRÓLEO *OFFSHORE***

LONDRINA

2022

RAFAELLA CASADO SILVA

**ESTUDO COMPUTACIONAL DO DESLOCAMENTO DE FLUIDOS EM
TUBULAÇÕES NA ETAPA DE COMISSONAMENTO DAS LINHAS DE
PRODUÇÃO DE PETRÓLEO *OFFSHORE***

**Computational study of fluid displacement in pipes in the commissioning stage
of offshore oil production lines**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentada como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Química da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador (a): Larissa Maria Fernandes Gatti.

LONDRINA

2022



Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

RAFAELLA CASADO SILVA

**ESTUDO COMPUTACIONAL DO DESLOCAMENTO DE FLUIDOS EM
TUBULAÇÕES NA ETAPA DE COMISSONAMENTO DAS LINHAS DE
PRODUÇÃO DE PETRÓLEO *OFFSHORE***

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Química da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 02/Dezembro/2022

Larissa Maria Fernandes Gatti
Doutora em Engenharia Química
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Pricila Marin
Doutora em Engenharia Química
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Rigoberto Eleazar Melgarejo Morales
Doutor em Engenharia Mecânica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LONDRINA

2022

Dedico este trabalho à minha família e aos colegas
que fizeram parte desta caminhada.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por me dado saúde e forças para concluir essa etapa, aos meus pais, Sidney e Célia, pelo apoio de uma vida toda, a minha irmã, Luanna, por estar sempre ao meu lado me apoiando em cada decisão e a minha avó, Maria, por todas as orações e comemorações em cada etapa concluída.

A minha orientadora Prof.^a Dr^a Larissa, pelas orientações, sugestões e por toda ajuda durante o curso. Ao meu supervisor do estágio e orientador de iniciação científica, Prof. Rigoberto, por todo conhecimento repassado e pela oportunidade de participar de um projeto de pesquisa grandioso. Aos pesquisadores, Henrique Stel, que me treinou e me capacitou para desenvolver este trabalho e à Marco Conte por todo conhecimento compartilhado. Aos colegas do NUEM, Elcilane, Murilo e Anna, pelas incontáveis reuniões que me auxiliaram durante todo este ano. Ao NUEM e a UTFPR Curitiba pela estrutura que permitiu o desenvolvimento deste trabalho.

Gostaria de deixar registrado também, o meu reconhecimento a todos o corpo docente de Engenharia Química que fizeram parte da minha formação.

Agradeço também aos colegas de curso que me ajudaram a passar pelas etapas mais difíceis de forma leve e tranquila. Sem vocês, essa jornada teria sido muito mais dolorosa.

Enfim, agradeço a todos aqueles que fizeram parte desta conquista, direta ou indiretamente.

“O homem não teria alcançado o possível se,
repetidas vezes, não tivesse tentado o
impossível”.
(MAX WEBER).

RESUMO

A importância do petróleo no cenário atual está relacionada a sua aplicação tanto no setor energético como em inúmeros outros produtos, tais como plástico, fibras e borrachas. O petróleo é definido como uma mistura naturalmente formada por hidrocarbonetos e derivados orgânicos sulfurados, nitrogenados, oxigenados, entre outros. Dentro da indústria de petróleo, a paralização da produção em plataformas *offshore* pode causar problemas relacionados ao fluxo bloqueado da linha de produção devido a presença de petróleo altamente viscoso, o que dificulta a reinicialização da planta. O deslocamento de fluidos por *flushing* é uma das soluções aplicadas nesta situação e consiste em bombear um fluido para a linha de fluxo com a intenção de limpar o óleo. Dessa forma, o presente estudo de caso teve como objetivo utilizar a dinâmica dos fluidos computacional (CFD) para investigar o escoamento e o tempo de limpeza de uma seção de teste horizontal de acrílico com 8,15 m de comprimento e diâmetro interno de 26 mm. Além disso, também foi possível validar o melhor modelo de turbulência de acordo com as condições analisadas. Para isso, foram utilizadas duas misturas de água e glicerina de baixa viscosidade (3,5 cP e 8,5 cP) para deslocar água da torneira presente na seção de teste com velocidades de injeção da mistura de 0,2 m/s, 0,5 m/s e 1 m/s. Os dados experimentais de fração mássica de glicerina foram coletados a partir de dois sensores posicionados estrategicamente na seção de teste e comparados com os dados retirados das simulações. A comparação entre os dados experimentais e os dados da simulação permitiu a validação do modelo de turbulência SST Gamma – Theta como o mais adequado para as condições simuladas. A partir da análise dos resultados, verificou-se um padrão de escoamento estratificado para a menor velocidade de injeção de ambas as misturas. Já para o tempo de limpeza da tubulação horizontal, a mistura com viscosidade de 8,5 cP e 1 m/s mostrou-se mais efetiva, já que a limpeza da tubulação ocorreu em menor tempo. Sendo assim, o estudo de caso atingiu seus objetivos e os resultados foram satisfatórios, tendo em vista que foi possível a comparação com dados retirados da literatura.

Palavras-chave: deslocamento de fluidos; escoamento multifásico; petróleo; *flushing*.

ABSTRACT

The importance of oil in the current scenario is related to its application both in the energy sector and in countless other products, such as plastic, fibers and rubbers. Petroleum is defined as a mixture naturally formed by hydrocarbons and sulfur, nitrogen and oxygenated organic derivatives, among others. Within the oil industry, production stoppage on offshore platforms can cause problems related to blocked flow of the production line due to the presence of highly viscous oil, which makes it difficult to restart the plant. Fluid displacement by flushing is one of the solutions applied in this situation and consists of pumping a fluid into the flow line with the intention of cleaning the oil. Thus, the present case study aimed to use computational fluid dynamics (CFD) to investigate the flow and cleaning time of an 8.15 m long acrylic test section with an internal diameter of 26 mm. In addition, it was also possible to validate the best turbulence model according to the conditions analyzed. For this, two mixtures of water and glycerin of low viscosity (3.5 cP and 8.5 cP) were used to displace tap water present in the test section with injection speeds of the mixture of 0.2 m/s, 0.5 m/s and 1 m/s. Experimental data on glycerin mass fraction were collected from two sensors strategically positioned in the test section and compared with data taken from the simulations. The comparison between the experimental data and the simulation data allowed the validation of the SST Gamma – Theta turbulence model as the most suitable for the simulated conditions. From the analysis of the results, a stratified flow pattern was verified for the lowest injection speed of both mixtures. As for the cleaning time of the horizontal pipe, the mixture with a viscosity of 8.5 cP and 1 m/s was more effective, since the pipe cleaning took place in a shorter time. Thus, the case study achieved its objectives and the results were satisfactory, considering that it was possible to compare with data taken from the literature.

Keywords: fluid displacement; multiphase flow; Petroleum; flushing.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Evolução do consumo mundial de energia primária.....	13
Figura 2. Métodos de limpeza de tubulações.....	19
Figura 3. Condições iniciais de cada cenário analisado.....	21
Figura 4. Comparação entre os resultados experimentais (a) e a simulação (b).	22
Figura 5. Comparação entre as imagens do experimento e simulação para diâmetro, ângulo de inclinação da tubulação e velocidades de injeção diferentes.	23
Figura 6. Contornos de concentração de óleo em regimes frontais de diferentes padrões de fluxo.....	24
Figura 7. Representação da bancada experimental.....	25
Figura 8. Vista frontal e isométrica da seção de teste.....	26
Figura 9. Trajetórias de partículas em escoamentos unidimensionais laminar e turbulento.	29
Figura 10. Elemento de volume fixo, $\Delta x, \Delta y, \Delta z$, através do qual escoo fluido.....	30
Figura 11. Tensões sobre um elemento de fluido na direção x	32
Figura 12. Volume de controle criado num vértice dos elementos finitos.....	43
Figura 13. Condições de contorno.	48
Figura 14. Malha estruturada da geometria da seção de teste.	48
Figura 15. Posição dos sensores S1 e S2 para obtenção da fração mássica da glicerina.....	49
Figura 16. Comparação entre os dados experimentais e da simulação para velocidade de injeção de 0,2 m/s nas mistura com viscosidade (a) de 3,5 cP e (b) de 8,5 cP na posição dos sensores S1 e S2.....	50
Figura 17. Comparação entre os dados experimentais e da simulação para velocidade de injeção de 0,5 m/s nas mistura com viscosidade (a) de 3,5 cP e (b) de 8,5 cP na posição dos sensores S1 e S2.....	51
Figura 18. Comparação entre os dados experimentais e da simulação para velocidade de injeção de 1 m/s nas mistura com viscosidade (a) de 3,5 cP e (b) de 8,5 cP na posição dos sensores S1 e S2.....	52
Figura 19. Perfil de velocidade do escoamento.....	53

Figura 20. Padrão de escoamento estratificado para a velocidade de injeção da mistura água e glicerina 0,2 m/s a) para mistura com viscosidade 3,5 cP e b) para mistura com viscosidade 8,5 cP.	54
Figura 21. Formação da interface ao longo do escoamento para a velocidade de injeção da mistura água e glicerina de 0,2 m/s a) para a mistura de 3,5 cP e b) para a mistura de 8,5 cP.	55
Figura 22. Desenvolvimento do escoamento com velocidade de injeção da mistura de 0,5 m/s a) para a mistura de 3,5 cP e b) para a mistura de 8,5 cP.	56
Figura 23. Formação da interface ao longo do escoamento para a velocidade de injeção da mistura água e glicerina de 0,5 m/s a) para a mistura de 3,5 cP e b) para a mistura de 8,5 cP.	57
Figura 24. Desenvolvimento do escoamento com velocidade de injeção da mistura de 1 m/s a) para a mistura de 3,5 cP e b) para a mistura de 8,5 cP.	58
Figura 25. Efeito da difusão ao longo do escoamento para a velocidade de injeção da mistura de 1 m/s para a) mistura de 3,5 cP e b) mistura 8,5 cP.	59
Figura 26. Efeito da viscosidade e da velocidade de injeção da mistura água e óleo no tempo de limpeza da tubulação horizontal	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Propriedades termofísicas da água e da glicerina à 20°C.....	26
Tabela 2. Grade de testes do experimento.	28
Tabela 3. Valores das constantes nas equações do modelo de turbulência SST.....	37
Tabela 4. Valores das constantes da equação da intermitência do modelo de turbulência Gamma - Theta.....	40
Tabela 5. Valores das constantes na equação de transporte do modelo de turbulência Gamma - Theta.....	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CFD	Dinâmica dos Fluidos Computacional (<i>Computational Fluid Dynamics</i>)
NUEM	Núcleo de Escoamento Multifásico
SST	<i>Shear Stress Transport</i>
VCM	<i>Variable Composition Mixture</i>
VOF	Volume de Fluido (<i>Volume of Fluid</i>)

LISTA DE SÍMBOLOS

\tilde{D}_K	Termo de destruição de turbulência do modelo Gamma – Theta acoplado ao modelo SST	[kg · m ⁻¹ · s ⁻³]
\tilde{P}_K	Termo de produção de turbulência do modelo Gamma – Theta acoplado ao modelo SST	[kg · m ⁻¹ · s ⁻³]
$\overline{Re}_{\theta t}$	Número de Reynolds de Transição Local	[-]
D_ϕ	Difusividade Cinemática Escalar	[m ² · s ⁻¹]
S_ϕ	Termo de origem volumétrica	[-]
$C_{a1,a2}$	Constante do Modelo Gamma - Theta	[-]
$C_{e1,e2}$	Constante do Modelo Gamma - Theta	[-]
$C_{\theta t}$	Constante da equação de transporte do Modelo Gamma – Theta	[1]
D_ω	Termo de destruição de turbulência	[kg · m ⁻¹ · s ⁻³]
$E_{\gamma 1,\gamma 2}$	Termos de transição do modelo Gamma - Theta	[-]
$F_{1\ orig}$	Função Ponderada 1 original do modelo de turbulência SST	[-]
$F_{1,2,3}$	Funções Ponderadas do modelo de turbulência SST	[1]
F_{lenght}	Correlação empírica que controla o comprimento da região de transição	[m]
$F_{onset,onset\ 1,2,3}$	Funções de ativação da produção de intermitência	[1]
$F_{reattach}$	Força de Religação do Modelo Gamma - Theta	[-]
F_{turb}	Função de desativação da relaminarização	[1]
F_{wake}	Função do Modelo Gamma - Theta	[1]
$F_{\theta t}$	Função de mistura do Modelo Gamma - Theta	[1]
P_k	Termo de produção turbulência	[kg · m ⁻¹ · s ⁻³]
$P_{\gamma 1,\gamma 2}$	Termos de transição do modelo Gamma-Theta	[-]
$P_{\theta t}$	Termo fonte do modelo Gamma - Theta	[-]
R_T	Razão de viscosidade	[-]
R_y	Número de Reynolds turbulento baseado na distância da parede	[-]
$U_{injeção}$	Velocidade de Injeção da mistura água e glicerina	[m · s ⁻¹]
U_j	Velocidade Local	[m · s ⁻¹]
\vec{V}	Vetor velocidade	[m · s ⁻¹]
$V_{r,\theta,z}$	Velocidade do fluidos em coordenadas cilíndricas	[m · s ⁻¹]
$v_{x,y,z}$	Velocidade do fluido nas direções x, y e z	[m · s ⁻¹]
x_j	Função indicadora da fase i	[1]
Ω_{SST}	Magnitude do vetor vorticidade	[s ⁻¹]
$\alpha_{\omega 1,\omega 2,\omega 3}$	Coefficientes do modelo de turbulência SST	[1]
β^*	Coefficiente do modelo de turbulência SST	[1]
$\beta_{\omega 1,\omega 2,\omega 3}$	Coefficientes do modelo de turbulência SST	[1]
γ_{eff}	Intermitência efetiva do modelo Gamma - Theta	[1]
γ_{sep}	Intermitência de separação do modelo Gamma - Theta	[1]
δ_w	Distância do ponto de cálculo à parede mais próxima	[m]
$\zeta_{1,2}$	Funções genéricas do modelo de turbulência SST	[1]
$\mu_{glicerina}$	Viscosidade dinâmica da glicerina	kg · m ⁻¹ · s ⁻¹
$\mu_{mistura}$	Viscosidade dinâmica da mistura água e glicerina	[kg · m ⁻¹ · s ⁻¹]
μ_t	Viscosidade dinâmica turbulenta	[kg · m ⁻¹ · s ⁻¹]
μ_w	Viscosidade dinâmica da água	[N · s · m ⁻²]
$\nu_{glicerina}$	Viscosidade cinemática da glicerina	[cm ² · s ⁻¹]
$\nu_{mistura}$	Viscosidade cinemática da mistura água e glicerina	[m ² · s ⁻¹]

$\rho_{\text{água}}$	Massa específica da água	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$
$\rho_{\text{glicerina}}$	Massa específica da glicerina	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$
ρ_{mistura}	Massa específica da mistura água e glicerina	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$
σ_f	Constate do modelo Gamma – Theta	[1]
$\sigma_{k1,k2,k3}$	Coefficientes do modelo de turbulência SST	[1]
$\sigma_{\theta t}$	Constantes da equação de transporte do Modelo Gamma – Theta	[1]
$\sigma_{\omega1,\omega2,\omega3}$	Coefficientes do modelo de turbulência SST	[1]
$\nu_{\text{água}}$	Viscosidade cinemática da água	$[\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}]$
Φ	Concentração	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$
CD_{kw}	Função do modelo de turbulência SST	$[\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{m}^{-3}]$
Cd_{ω}	Função do modelo SST Gamma - Theta	$[\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{m}^{-3}]$
D	Diâmetro da tubulação	[m]
Fr	Número de Froude	[-]
L	Comprimento característico do campo de escoamento	[m]
Re_V	Número de Reynolds de vorticidade	[1]
Re_c	Número de Reynolds crítico	[1]
$Re_{\theta t}$	Número de Reynolds de Transição (baseado nas condições de camada livre)	[-]
Re_{ω}	Número de Reynolds de turbulência	[-]
Re	Número de Reynolds	[-]
S	Magnitude da taxa de deformação	$[\text{s}^{-1}]$
T	Temperatura	$[\text{°C}]$
V	Velocidade do fluido	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$
a	Coefficiente estimado por Segur; Oberstar	$[\text{°C}]$
b	Coefficiente estimado por Segur; Oberstar	$[\text{°C}]$
g	Aceleração da gravidade	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-2}]$
k	Energia cinética turbulenta	$[\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}]$
p	Pressão termodinâmica local	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}]$
r	Raio da tubulação	[m]
t	Tempo	[s]
u	Velocidade média do fluido	$[\text{m}\cdot\text{s}]$
x	Fração Mássica da glicerina na mistura	[-]
y	Distância do ponto de cálculo mais próxima da parede	[m]
α	Fator de ponderação	[1]
γ	Intermitência do modelo Gamma – Theta	[-]
δ	Espessura da Camada Limite	[m]
μ	Viscosidade dinâmica molecular	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}]$
ν	Viscosidade cinemática	$[\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}]$
ρ	Massa específica do fluido	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$
σ	Tensão normal	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}]$
τ	Tensão de cisalhamento	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}]$
φ	Quantidade conservada por unidade de massa	[-]
ω	Taxa de dissipação específica de turbulência	$[\text{s}^{-1}]$

SUMÁRIO

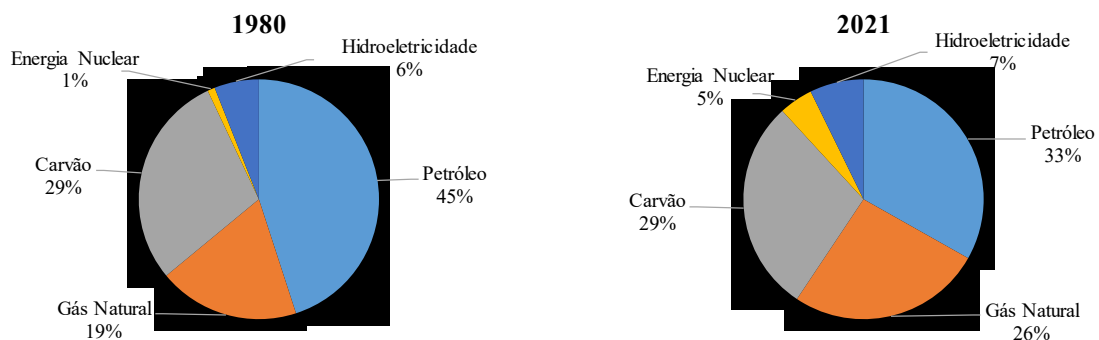
1	INTRODUÇÃO	13
2	PROBLEMÁTICA ABORDADA.....	17
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
4	METODOLOGIA EXPERIMENTAL	25
4.1	Configuração do experimento e procedimento	25
4.2	Definição da grade de testes.....	27
5	MODELAGEM MATEMÁTICA E NUMÉRICA	29
5.1	Equações governantes do escoamento monofásico em uma tubulação horizontal.....	29
5.2	Modelagem da turbulência em escoamento monofásico.....	35
5.3	Modelagem numérica	42
5.3.1	Condições de contorno e malha numérica	45
6	RESULTADO E DISCUSSÃO.....	49
6.1	Validação do modelo de turbulência.....	49
6.2	Análise do escoamento	53
6.3	Influência dos parâmetros viscosidade e velocidade no tempo de limpeza da tubulação horizontal	59
7	CONCLUSÃO	61
7.1	Sugestão de trabalhos futuros.....	62
	REFERÊNCIAS.....	63
	ANEXO A - CÓDIGO COMPUTACIONAL PARA O CÁLCULO DA VISCOSIDADE EM PYTHON	69

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, o petróleo é considerado um dos principais recursos naturais utilizados como fonte de energia. A exploração do petróleo iniciou-se em meados do século XIX e a partir de então passou a ser utilizado em larga escala com a criação dos motores movidos a gasolina ou óleo diesel. Na década de 1970, o uso do petróleo como fonte de energia já representava cerca de 50% do consumo mundial de energia e mesmo que atualmente seu uso esteja dando lugar a fontes alternativas de energia, o petróleo ainda é uma das fontes de energia mais utilizadas no mundo (SANTOS, 2021). Além de geração de energia, derivados do petróleo como asfalto, óleos lubrificantes e óleo cru são utilizados na pavimentação de estradas, manutenção de máquinas e como matéria prima para produção de plásticos, fibras e borrachas, respectivamente (FARAH, 2012).

Tendo em vista as diversas aplicações, o consumo do petróleo, como fonte de energia, cresceu fortemente entre 1920 e 1973. Neste período, em razão de conflitos no Oriente Médio, o preço do petróleo quadruplicou e grande parte dos países consumidores buscou reduzir consumo do petróleo adotando outras fontes energéticas e implantando medidas econômicas nas indústrias e nas cidades (FARAH, 2012). A Figura 1 mostra a redução da utilização do petróleo como fonte principal de energia a partir da distribuição do consumo mundial das energias primárias, de acordo com *British Petroleum Review of World Energy* edição de 2011 e 2022, para os anos de 1980 e 2021, respectivamente.

Figura 1. Evolução do consumo mundial de energia primária.



Fonte: *British Petroleum Review of World Energy 2011 and 2022.*

A estrutura do consumo de energia no Brasil sofreu alteração a partir de 1979, devido à elevação do preço do petróleo em decorrência da guerra entre Irã e Iraque. Neste período, o petróleo correspondia a cerca de 45% do total das fontes primárias de energia (FARAH, 2012). No entanto, de acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (2022), no ano de 2020, o consumo de petróleo e seus derivados para geração de energia era cerca de 33,1%, podendo ser reduzido para 32% em 2026. Essa redução do consumo de petróleo como energia primária está relacionada a perspectiva de substituição da gasolina por etanol e do óleo combustível e GLP por gás natural (PLANO DECIMAL DE EXPANSÃO DE ENERGIA PARA 2026, 2022).

A palavra petróleo é oriundo do latim e quer dizer “óleo de pedra” (COSTA, 2018). O petróleo é definido como “uma mistura de ocorrência natural, consistindo predominantemente em hidrocarbonetos e derivados orgânicos sulfurados, nitrogenados, oxigenados e outros elementos”. Na literatura, é possível encontrar diversas teorias sobre a origem do petróleo e uma delas é a teoria orgânica. Os defensores desta teoria assentem que os hidrocarbonetos foram formados em rochas sedimentares no período geológico Quaternário há, aproximadamente, 1,5 milhão de anos (TERRON, 2017).

Nos poços de petróleo existe uma fase gasosa, chamada de gás natural, e uma fase líquida constituída por uma mistura complexa de várias substâncias. Grande parte desta mistura é composta por hidrocarbonetos saturados (alcanos normais, isoalcanos e cicloalcanos) e por aromáticos. Também há compostos sulfurados, nitrogenados, oxigenados e soluções aquosas salinas, porém, em menor quantidade (TERRON, 2017).

Dentro da indústria petrolífera, uma das atividades mais complexas é a perfuração de poços, tendo em vista que o processo envolve diversas etapas, desde a construção até a finalização para tornar a produção de petróleo e gás viável. Historicamente, Edwin Drake foi o primeiro a perfurar um poço de petróleo em 1859, no estado da Pensilvânia, Estados Unidos, operando um sistema de bombas de extração que eram utilizadas para a exploração de água subterrânea. Já o primeiro poço de petróleo *offshore* foi perfurado por Henry Williams na costa do Pacífico no final do século XIX. No Brasil, o primeiro poço foi perfurado em 1946 na Bacia do

Recôncavo, Bahia (GAUTO *et al.*, 2016). Atualmente, cerca de 90% do petróleo produzido no Brasil é extraído de plataformas *offshore* (PETROBRAS, 2022).

Nas plataformas *offshore*, há situações em que se faz necessário paralisar a produção do petróleo. Esta situação é acompanhada por uma intensa troca de calor entre a tubulação e a água fria, fato que contribuiu para aumentar a viscosidade do óleo, o que prejudica a reinicialização da produção (LEUCHTENBERGER *et al.*, 2021). Com a finalidade de evitar situações de fluxo bloqueado, geralmente um fluido menos viscoso é bombeado da plataforma para a linha de fluxo com a intenção de limpar o óleo mais viscoso (DELLECASE, 2013). Esta ação envolve um processo de deslocamento de um fluido por outro fluido e é chamado *flushing*.

O *flushing* é uma técnica de limpeza de tubulação comumente utilizada em aplicações industriais como a remoção de produtos líquidos que permanecem em dutos na indústria química, recuperação secundária de óleo na indústria petrolífera, em operações de pré-comissionamento onde a água do mar deve ser removida para evitar corrosão, em operações de comissionamento em que a água é substituída por um meio seguro para evitar a formação de hidrato ou em operações de descomissionamento onde o fluxo do poço é substituído para permitir um desligamento seguro. Na literatura são descritos diversos estudos focados no deslocamento de fluidos miscíveis e imiscíveis, os quais priorizam a análise da transição de padrão de fluxo, da instabilidade da interface e da eficiência do deslocamento. Como exemplo, pode-se citar o estudo de Leuchtenberger *et al.* (2021) que analisou o deslocamento de líquidos miscíveis variando a velocidade de injeção do fluido deslocante e também investigou as diferentes configurações de fluxo e o estudo de Xu *et al.* (2011) que apresentou uma análise do deslocamento de fluidos imiscíveis investigando a influência da viscosidade e densidade dos fluidos trabalhados no deslocamento. Geralmente, o deslocamento de fluidos é investigado utilizando a Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) (ZHENG *et al.*, 2017).

A dinâmica dos fluidos computacional é uma ferramenta de simulação que faz uso de computadores de alta performance e matemática aplicada para modelar situações de fluxo de fluidos com o objetivo de prever os fenômenos de transferência de calor, massa e momento (XIA; SUN, 2002). Normalmente, o sucesso da simulação está relacionado a comparação com dados obtidos por meio de experimentos

computacionais e também na previsão de fenômenos complexos que não podem ser reproduzidos em laboratório (KAUSHAL; SHARMA, 1993).

Desde o final da década de 1960, houve elevado crescimento no desenvolvimento e aplicações do CFD em todos os aspectos da dinâmica dos fluidos. Como resultado, o CFD tornou-se uma parte essencial da análise de engenharia de inúmeras empresas em virtude de ser capaz de prever o desempenho de novos projetos ou processos antes de serem fabricados ou implementados (SCHALDACH *et al.*, 2000). No projeto e desenvolvimento, o CFD é visto como uma ferramenta numérica padrão que prevê, além do comportamento do fluxo dos fluidos, a transferência de calor e massa, mudança de fase, reações químicas, movimento mecânico ou deformação de estruturas sólidas. Dessa forma, o uso do CFD é benéfico na área ambiental para analisar poluição atmosférica, fluxos oceânicos e incêndio em prédios, em aplicações industriais que incluem as áreas de aeroespço, automotivo, eletrônica, petróleo, marinho, nuclear, entre outras (XIA; SUN, 2002).

O objetivo desse estudo de caso foi investigar o padrão de escoamento e a influência dos parâmetros viscosidade e velocidade de injeção no tempo de limpeza de tubulações horizontais das linhas de petróleo *offshore* de uma indústria petrolífera através do *flushing* por deslocamento de fluidos miscíveis. Os dados experimentais foram obtidos por meio de experimentos realizados pelo Núcleo de Escoamento Multifásico (NUEM). Já os dados da simulação numérica foram obtidos através da metodologia CFD e, a partir da comparação entre os dados experimentais e da simulação, foi possível validar o modelo numérico de turbulência.

2 PROBLEMÁTICA ABORDADA

O deslocamento de fluidos líquido-líquido por *flushing* é uma operação com sutilezas próprias, sendo necessário controlar a vazão do líquido que promoverá o deslocamento do fluido original para garantir a remoção completa do líquido existente na tubulação. Caso esta vazão não seja controlada ou seja insuficiente para promover a remoção do líquido original, poderá haver acúmulo na parte inferior da tubulação. Além disso, há riscos de formação de emulsões se as vazões forem muito altas, gerando, conseqüentemente, aumento nos efeitos da turbulência e nas perdas de pressão devido ao atrito.

Este estudo de caso visa contornar uma problemática que já vem sendo analisada em um projeto de pesquisa para otimização de operações de *flushing* e que envolve o estudo experimental apoiado em modelagem numérica para operações de deslocamento de fluidos, visando validar modelos e otimizar operações convencionais para evitar o conservadorismo. De maneira específica, o estudo de caso em questão baseou-se em dados experimentais para validar o modelo de turbulência mais adequado para as condições de vazão determinadas pela indústria petrolífera. Para validação do modelo de turbulência, utilizou-se a Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) e, a partir do processamento das simulações, observou-se a necessidade de controlar parâmetros como viscosidade do líquido deslocante, tempo de simulação e modelo de turbulência.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

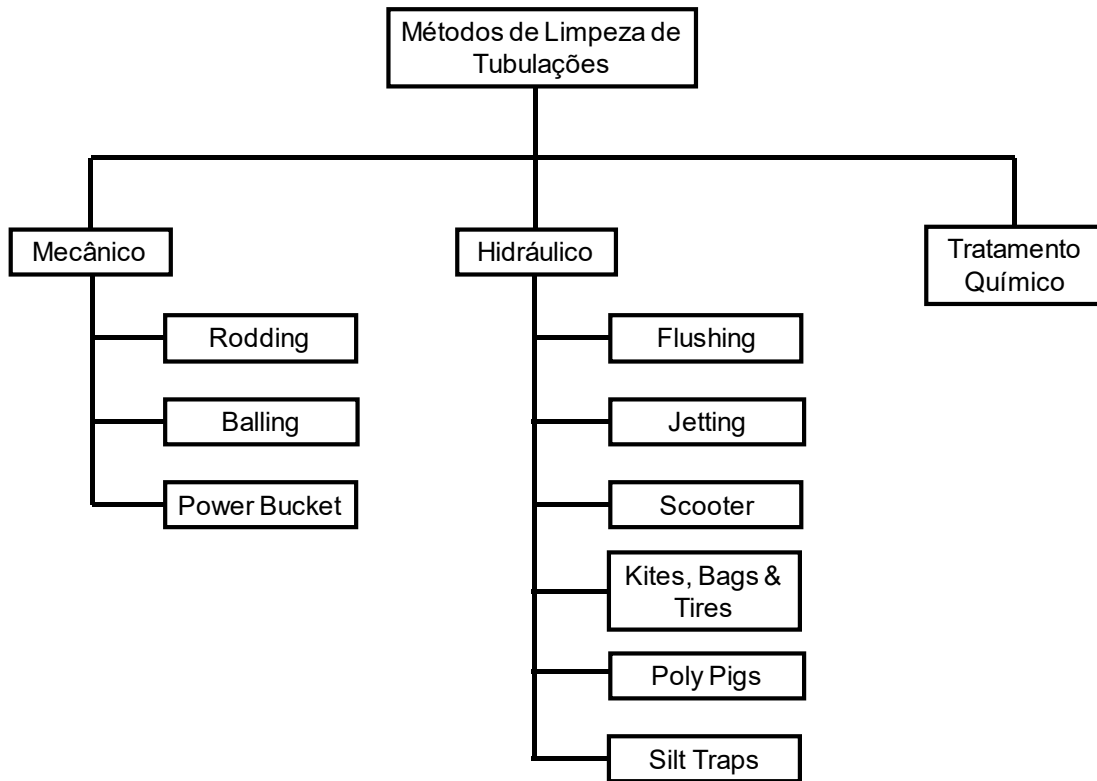
Nas plataformas *offshore*, a instalação do sistema de tubulações submarinas envolve uma série de testes que são capazes de verificar a resistência mecânica do sistema de tubulação e a integridade das conexões. Os testes realizados após a instalação do sistema de tubulações marinhas integram a etapa de pré-comissionamento de um projeto, cujo objetivo é qualificar o sistema como pronto para a etapa de comissionamento e para a partida da plataforma. Além disso, também garante o controle operacional e confirma a segurança para os operadores da plataforma e para o meio ambiente (GUO *et al.*, 2005).

O comissionamento é a preparação do sistema de tubulação instalados antes da utilização para a finalidade pretendida, sejam eles produtos químicos, subprodutos de petróleo e gás, petróleo e gás, água, águas residuais, entre outros. As atividades necessárias que serão desenvolvidas nesta etapa variam de acordo com a finalidade do uso do sistema de tubulação, porém, o comissionamento determinará que as tubulações não possuem defeitos e que estão aptas para conduzir o produto final (NASCIMENTO; RAMLI; 2014).

Todas as etapas do processo de comissionamento focam na operacionalidade da planta industrial. Para esse fim, o comissionamento deve ser entendido como um dos maiores macroprocessos na implantação do projeto e as atividades que levam ao comissionamento são uma parte importante do processo. De acordo com Nascimento e Ramli (2014), as etapas do comissionamento incluem: projeto de sistemas operacionais por meio de pesquisa e desenvolvimento, desenvolvimento de uma sequência de partida da planta, coordenação e execução da preservação, atividades de teste e aceitação de fábrica, calibração de válvulas e instrumentos, inspeção física, limpeza dos tubos, teste hidrostático de tubulações e testes de sistemas elétricos, peças mecânicas e instrumentação. Dessa forma, o foco deste estudo é no processo de limpeza da tubulação através do deslocamento de fluidos por meio da técnica *flushing*.

Segundo Siringi, Home e Koehn (2014), são utilizados três principais métodos de limpeza de tubulações, sendo eles o mecânico, o hidráulico e o químico. A partir da Figura 2 observa-se um breve esquema que resume os tipos de limpeza de tubulação dentro de cada método.

Figura 2. Métodos de limpeza de tubulações.



Fonte: Adaptado de Siringi; Home; Koehn (2014)

O *flushing* é considerado o método hidráulico mais antigo e eficaz utilizado para limpar tubulações. De modo geral, é frequentemente empregado na substituição de água de má qualidade por água de melhor qualidade. Além disso ajuda a remover resíduos desinfetantes, retira bactérias nocivas, remove sedimentos em suspensão e auxilia em problemas de odor desagradável da água (ELLISON, 2003).

O princípio de funcionamento do *flushing* consiste no deslocamento de um fluido por outro fluido. Nas plataformas *offshore*, devido às baixas temperaturas do fundo do mar, é comum ocorrer o entupimento das linhas de produção por hidratos e esse fato torna-se um problema quando o fluxo do poço é interrompido por um longo período de tempo. Assim, para evitar a formação de hidratos, utiliza-se o *flushing* com metanol nos *jumpers* para deslocar e inibir qualquer acúmulo de água nas linhas (CAGNEY; HARE; SVEDEMAN; 2006).

Experimentos conduzidos por Xu *et al.* (2011) mostraram que o deslocamento de água por óleo é facilitado pelo aumento da viscosidade e da densidade do óleo e também que há uma vazão mínima crítica para o início do deslocamento de água por

óleo que é dependente do diâmetro da tubulação. Já o estudo de Leuchtenberger *et al.* (2021) propôs uma análise abrangente de como ocorre o deslocamento de um líquido viscoso por um líquido menos viscoso em uma tubulação variando a velocidade de injeção. Os resultados mostraram diferentes configurações de fluxo à medida que a velocidade superficial da água aumentou, dependendo da viscosidade do óleo e da distância da entrada. Este estudo analisou também o tempo de limpeza relacionado as diferentes configurações de fluxo.

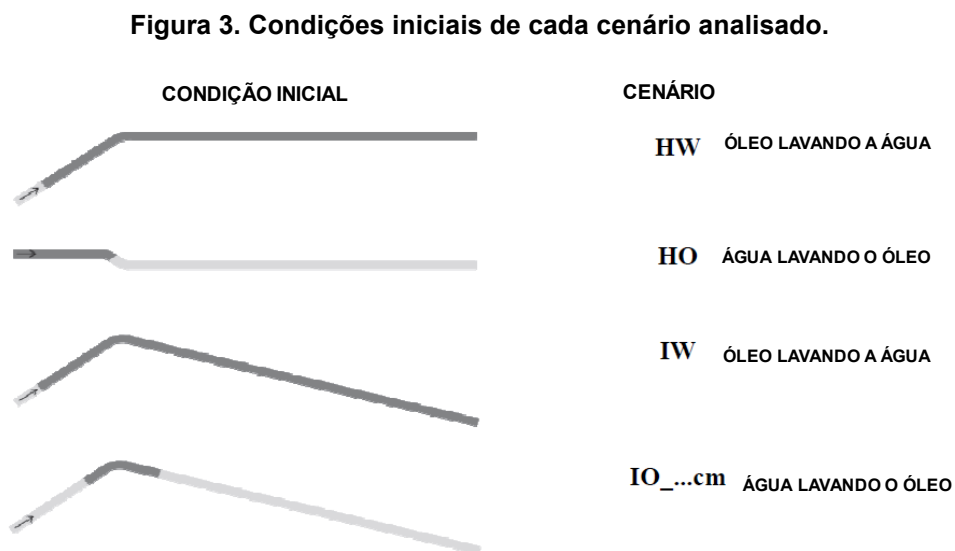
Na literatura é possível encontrar estudos que recorreram ao CFD para investigar o deslocamento de fluido por *flushing*. O CFD pode ser visto como uma maneira de substituir as equações diferenciais parciais governantes do fluxo de fluido por números que, quando deslocados no espaço-tempo, mostram uma descrição numérica final do campo de fluxo completo de interesse. As soluções demandam uma repetitiva manipulação de milhões de números e, por isso, é humanamente impossível sem a ajuda de computadores digitais de alta velocidade (ANDERSON, 2009). Dessa forma, os avanços são relacionados ao desenvolvimento dos hardwares em computadores, principalmente no que diz respeito ao armazenamento e velocidade de execução e, por esse motivo, a comunidade usuária do CFD impulsiona o desenvolvimento de supercomputadores (GRAVES, 1982).

De acordo com Anderson (2009), o primeiro grande trabalho utilizando a dinâmica dos fluidos computacional foi desenvolvido no Instituto de Tecnologia de Massachusetts utilizando um computador digital primitivo, por Kopal (1947). O estudo teve como objetivo resolver numericamente as equações diferenciais governantes de Taylor e Maccoll (1933) do escoamento supersônico e os dados obtidos foram reunidos em tabelas. O estudo dos autores Fay e Riddell (1958) também fez uso do CFD para desenvolver dois métodos de solução numérica das equações diferenciais não lineares do ponto de estagnação da camada limite, sendo que um deles foi para o caso de equilíbrio e outro para o caso de não equilíbrio. Blottner (1964) também apresentou um esquema implícito de diferenças finitas para resolver as equações diferenciais parciais relacionadas a camada limite de não equilíbrio.

Dentro da indústria de petróleo e gás, o CFD é aplicado para otimizar o processo de limpeza de orifícios em poços. Dessa forma, Yeo *et al.* (2021) geraram correlações e tabelas matriciais relativas à otimização de vários parâmetros, incluindo

taxas de fluxo, tubulação e características dos fluidos. De forma específica, as correlações para velocidade crítica e gradiente crítico de pressão foram desenvolvidas pela análise de dados resultantes de simulações CFD. Além da limpeza, o CFD é aplicado para analisar a dinâmica do petróleo bruto durante o fluxo através do duto e identificar pontos de erosão para diferentes curvaturas do cotovelo do tubo, como mostra o estudo de Eje *et al.* (2020).

Em relação ao deslocamento de fluidos por *flushing*, Schumann *et al.* (2014) realizaram um experimento de deslocamento líquido-líquido, onde foram apresentados quatro cenários com óleo lavando a água em uma seção de teste horizontal e água lavando o óleo em uma seção de teste inclinada para baixo, variando a velocidade de injeção dos líquidos. Neste estudo, a velocidade de propagação da frente de lavagem foi medida por um sensor de anel de condutividade e os resultados obtidos foram comparados com o simulador comercial OLGA. A Figura 3 apresenta as condições iniciais dos quatro cenários estudados pelos autores e as seções de teste utilizadas.



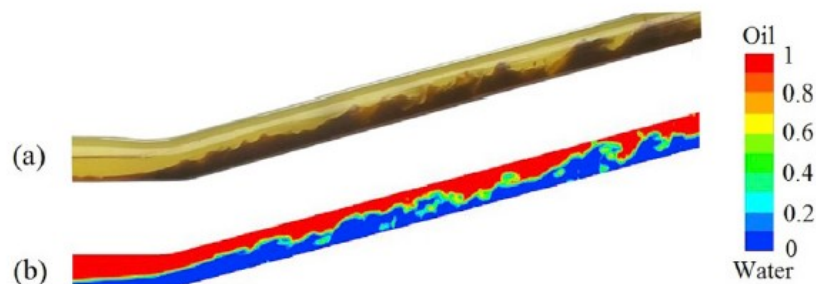
Fonte: Adaptado de Schurmann *et. al* (2014).

A partir dos resultados experimentais, os autores concluíram que a limpeza foi mais eficaz quando um líquido de baixa viscosidade (água) foi deslocado por um líquido de viscosidade mais alta (óleo). Além disso, o padrão OLGA foi capaz de prever

o deslocamento de água por óleo de maneira eficaz e os resultados mostraram-se melhores à medida que a vazão foi aumentando (SCHURMANN *et. al*, 2014).

Song *et al.* (2017) investigou como ocorre o escoamento de deslocamento água-óleo em uma tubulação inclinada e os resultados experimentais foram validados utilizando o CFD através de um modelo numérico transiente 3D. Desse modo, os autores utilizaram o modelo VOF (*Volume of Fluid*) para verificar as características interface óleo-água e o modelo padrão de turbulência k- ϵ foi utilizado devido a condição de turbulência da vazão. A Figura 4 mostra a comparação dos resultados experimentais (a) e a simulação (b). Sendo assim, por meio do estudo, os autores concluíram que os modelos numéricos utilizados refletiram de forma qualitativa os dados experimentais.

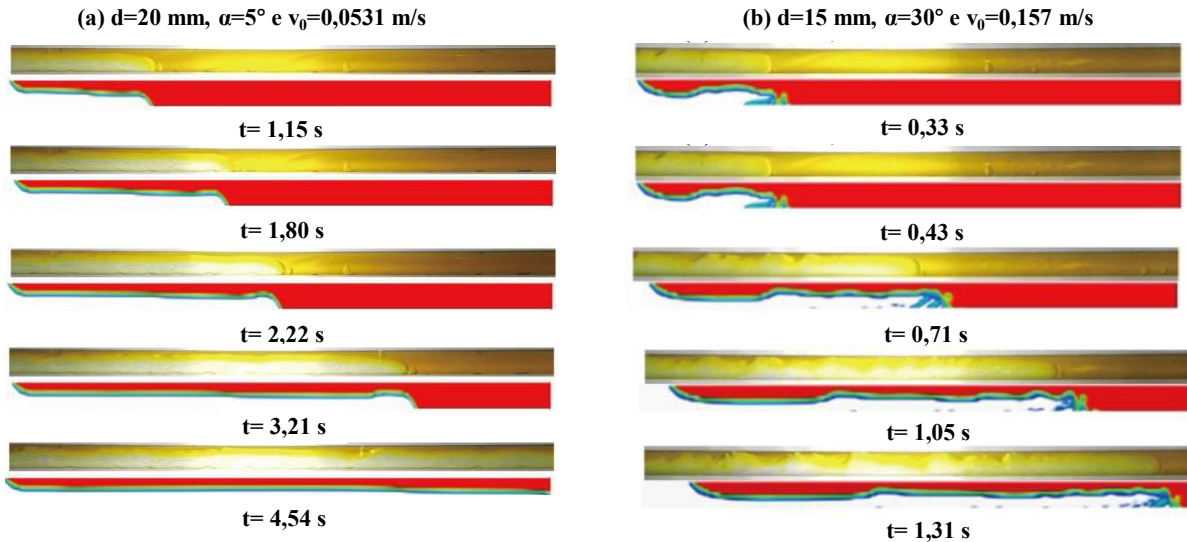
Figura 4. Comparação entre os resultados experimentais (a) e a simulação (b).



Fonte: Song *et al.* (2017)

Zheng *et al.* (2017) utilizou o CFD para simular um processo de deslocamento de água-óleo em uma tubulação com inclinação variando entre 0° e 30° , na qual foi aplicada o modelo multifásico VOF. Durante a retirada dos dados experimentais, os autores encontraram três padrões de fluxo os quais combinaram favoravelmente com os dados da simulação. A Figura 5 mostra a comparação entre as fotografias tiradas durante a realização do experimento e imagens da simulação.

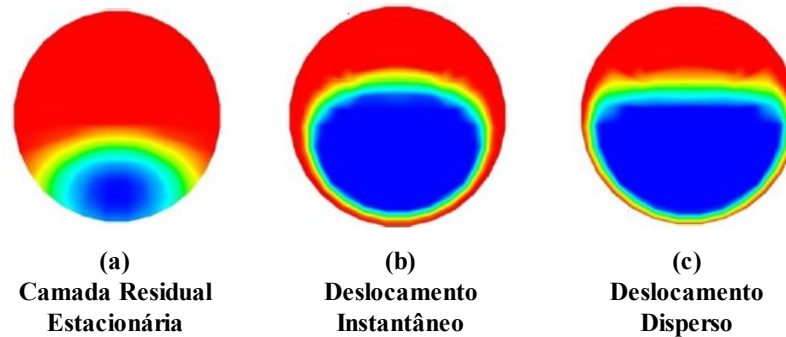
Figura 5. Comparação entre as imagens do experimento e simulação para diâmetro, ângulo de inclinação da tubulação e velocidades de injeção diferentes.



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

De acordo com os autores, ao analisar os escoamentos apresentados na Figura 5, foi possível caracterizar a configuração do fluxo em três categorias diferentes: camada residual estacionária, deslocamento instantâneo e deslocamento disperso. A camada residual estacionária denota o fluxo em que a camada de óleo permanece estacionária na seção superior do tubo. O deslocamento instantâneo ocorre com o aumento da velocidade de entrada da água (V_0) quando não há camada de óleo estacionária ligada a parede do tubo. Já o deslocamento disperso foi observado em altas velocidades de entrada da água (ZHENG *et al.*, 2017). A Figura 6 evidencia os contornos de concentração dos diferentes padrões de fluxo de óleo.

Figura 6. Contornos de concentração de óleo em regimes frontais de diferentes padrões de fluxo.



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

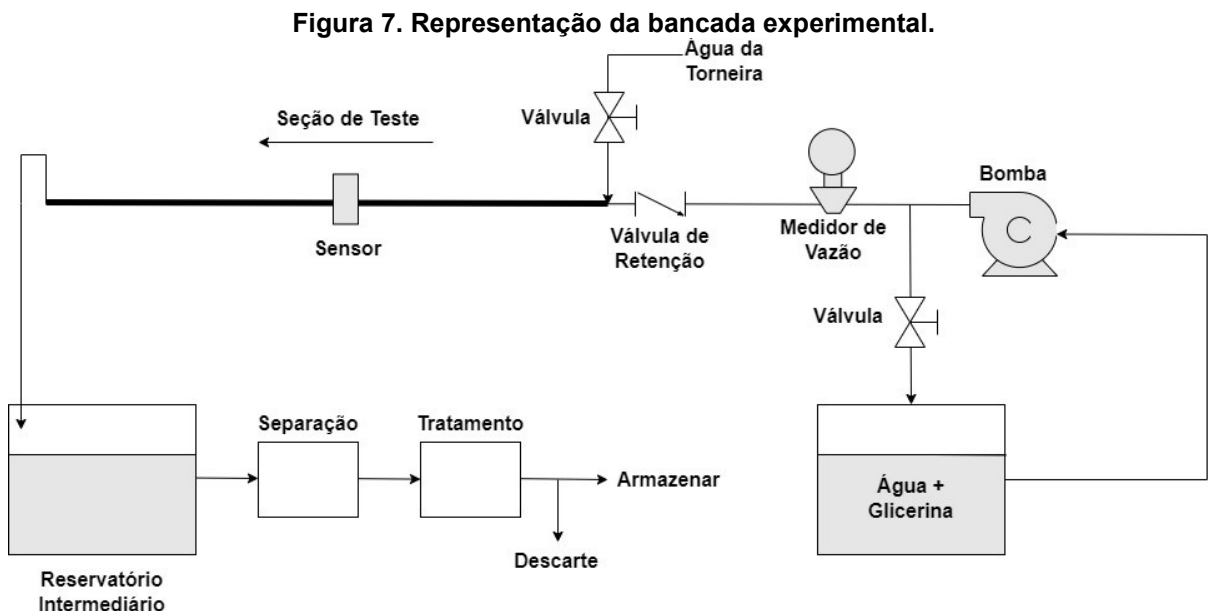
A análise da Figura 6 (a) exibe uma estrutura de duas camadas formadas por camada de óleo ocupando a seção superior do tubo (em vermelho) e a camada de água permanece no fundo do tubo (em azul). Já nos padrões de fluxo de deslocamento instantâneo e disperso, observa-se uma estrutura de três camadas e, por esse motivo, os autores concluíram que as ondas de interface e as gotículas de óleo são tridimensionais, o que é consistente com o experimento (ZHENG *et al.*, 2017).

Sendo assim, o estudo concluiu que a inclinação da tubulação e o número de Reynolds foram responsáveis pelas transições de padrão de fluxo e, além disso, a espessura da camada de óleo no padrão de camada residual estacionária foi reflexo do ângulo de inclinação do tubo. No mais, o aumento da velocidade de entrada da água foi responsável pela diminuição da camada de óleo, gerando uma transição de fluxo e também foi tido como um fator de destaque para melhorar a eficiência do deslocamento (ZHENG *et al.*, 2017).

4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

4.1 Configuração do Experimento e Procedimento

O experimento foi realizado em uma bancada, como a representada pela Figura 7, composta por reservatórios de líquidos, dutos de PCV e acrílico transparentes, válvulas, um medidor de vazão do tipo *Coriolis*, uma bomba de deslocamento positivo, sensores resistivos e câmaras para captação de imagens. A seção de teste consiste em uma tubulação de acrílico com 26 mm de diâmetro interno e 8,15 m de comprimento.



Fonte: Adaptado de NUEM (2022)

Inicialmente, para retirar todas as impurezas presentes na seção de teste, água da torneira foi escoada por um determinado intervalo de tempo. Em seguida, a torneira foi fechada e a seção de teste permaneceu preenchida de água. Para iniciar o escoamento da mistura água e glicerina, ligou-se a bomba de deslocamento positivo na vazão correta para evitar o desperdício de líquido e logo depois ligou-se os sensores resistivos e a câmara para captação dos sinais e das imagens do escoamento. Para melhorar a visualização do fenômeno, utilizou-se corante alimentício na cor amarela e a viscosidade da mistura água e glicerina foi medida antes e depois da adição do corante e verificou-se que não houve alteração

significativa. Sabendo que o experimente foi realizado a 20°C, a Tabela 1 mostra as propriedades termofísicas dos fluidos utilizados.

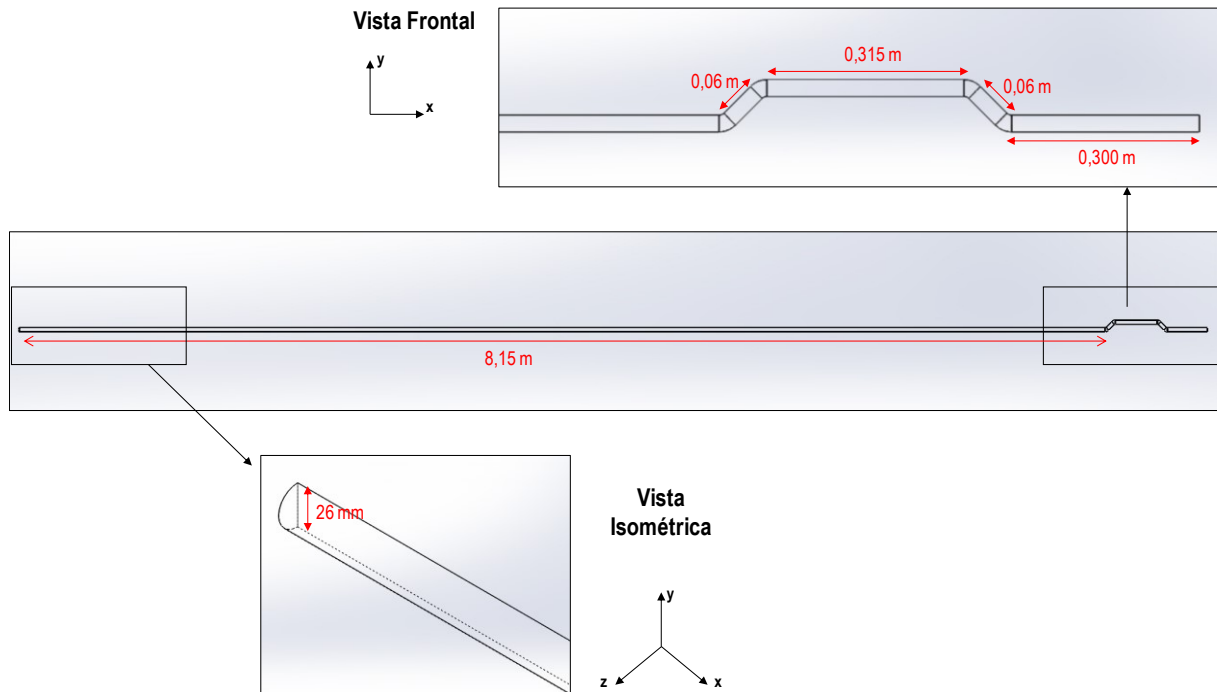
Tabela 1. Propriedades termofísicas da água e da glicerina à 20°C.

Fluido	Densidade (kg/m ³)	Viscosidade (cP)
Água	998,21	1,0016
Glicerina	1260,8	1243,8

Fonte: Bergman e Lavine (2019)

A geometria da seção de teste utilizada no experimento consiste em uma tubulação horizontal com *jumper* próximo a seção de saída. Para redução do custo computacional, optou-se por utilizar uma seção de teste com 180°, tendo em vista que a geometria da tubulação é simétrica. Dessa forma, na Figura 8 observa-se a estrutura do *jumper* e a seção de saída destacadas na vista frontal e a seção de entrada na vista isométrica.

Figura 8. Vista frontal e isométrica da seção de teste.



Fonte: autoria própria.

4.2 Definição da grade de testes

O número de Froude (Fr), como mostra a Equação (1), é interpretado como a razão entre as forças inerciais e gravitacionais (FOX *et. al.*, 2018).

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}} \quad (1)$$

Para determinar as velocidades de injeção da mistura deslocante, utilizou-se o critério de $1 < Fr < 4$, assim como exigido pela empresa. Dessa forma, para calcular a velocidade de injeção, foi determinada uma faixa de vazão mássica e, a partir desta faixa e da área da tubulação, foi possível calcular a velocidade de injeção da mistura. Através da Equação (2), fornecida pela empresa, calculou-se o número de Froude e as condições foram selecionadas de acordo com o critério determinado pela empresa:

$$Fr = U_{injeção} \left(gD \left(1 - \frac{\rho_{água}}{\rho_{mistura}} \right) \right)^{-0.5} \quad (2)$$

A densidade da mistura de água e glicerina foi calculada pela expressão:

$$\rho_{mistura} = x\rho_{glicerina} + (1 - x)\rho_{água} \quad (3)$$

em que x é a fração mássica da glicerina.

Dessa forma, a Tabela 2 apresenta as condições selecionadas para as simulações.

Tabela 2. Grade de testes do experimento.

Teste	Velocidade de Injeção (J_L) (m/s)	Fr	Re	Concentração	Tempo (s)
1	0,2	1,4	1649	33% em volume de Glicerina +	102
2	0,5	3,4	4063	67% em volume de Água	41
3	1	6,9	8120	(3,5 cP, 1089 kg/m ³)	20
4	0,2	1,2	726	50% em volume de Glicerina +	50
5	0,5	2,8	1764	50% em volume de Água	35
6	1	5,6	3493	(8,5 cP, 1140 kg/m ³)	20

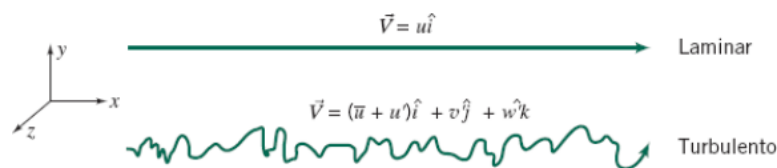
Fonte: autoria própria.

5 MODELAGEM MATEMÁTICA E NUMÉRICA

5.1 Equações governantes do escoamento monofásico em uma tubulação horizontal

A classificação dos escoamentos é realizada de acordo com o tipo de movimento e velocidade das partículas do fluido. Um escoamento é dito laminar quando as partículas componentes do fluxo se movem ordenadamente em camadas lisas, ou lâminas. Já o escoamento turbulento é aquele onde as partículas fluidas se misturam enquanto se movimentam ao longo do escoamento devido as flutuações aleatórias no campo tradicional de velocidades (FOX *et al.*, 2018). A Figura 9 mostra as trajetórias de partículas em escoamentos unidimensionais laminar e turbulento.

Figura 9. Trajetórias de partículas em escoamentos unidimensionais laminar e turbulento.



Fonte: Fox *et al.* (2018)

O número de Reynolds (Re) representa a relação entre as forças de inércia e viscosas agindo em uma determinada região do escoamento (FOX *et al.*, 2018). Para um escoamento no interior de um tubo, Re é definido como:

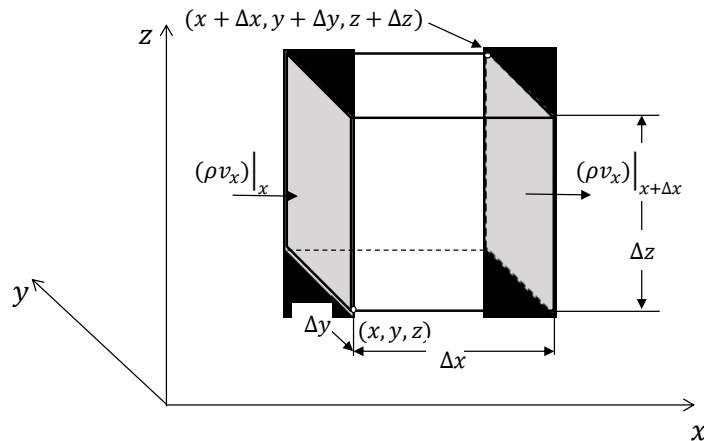
$$Re = \frac{\rho u D}{\mu} \quad (4)$$

A significância fundamental do Re é que ele permite avaliar o tipo de escoamento e indica se o escoamento é laminar ou turbulento (FOX *et al.*, 2018). Usualmente, adota-se:

$$\begin{aligned} Re &\leq 2300 - \textit{Laminar} \\ 2300 &\leq Re \leq 4000 - \textit{Transição} \\ Re &> 4000 - \textit{Turbulento} \end{aligned}$$

O escoamento de um fluido é descrito por equações diferenciais, mais precisamente pelas equações de Navier-Stokes. Dessa forma, a equação da conservação de massa (equação da Continuidade) é desenvolvida a partir de um balanço de massa, mostrado na Equação (5), em um elemento de volume $\Delta x \Delta y \Delta z$, fixo no espaço, através do qual escoo um fluido. A Figura 10 mostra o elemento de volume fixo $\Delta x \Delta y \Delta z$ através do qual escoo o fluido. As setas indicam o fluxo de massa para dentro e para fora do volume de controle nas duas faces sombreadas, localizadas em x e em $x + \Delta x$.

Figura 10. Elemento de volume fixo, $\Delta x, \Delta y, \Delta z$, através do qual escoo fluido.



Fonte: Adaptado de Lightfoot; Bird; Stewart (2004)

$$\left\{ \begin{array}{c} \text{taxa de aumento} \\ \text{de massa} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} \text{taxa de entrada} \\ \text{de massa} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{c} \text{taxa de saída} \\ \text{de massa} \end{array} \right\} \quad (5)$$

Através da Figura 10, tem-se que a taxa de entrada de massa no elemento em x é $(\rho v_x)|_x \Delta y \Delta z$ e a taxa de saída de massa em $x + \Delta x$ é $(\rho v_x)|_{x+\Delta x} \Delta y \Delta z$. Já a taxa de aumento de massa no interior do elemento de volume é dada por $\Delta x \Delta y \Delta z \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} \right)$ (LIGHTFOOT; BIRD; STEWART, 2004). Então, o balanço de massa fica:

$$\Delta x \Delta y \Delta z \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} \right) = \Delta y \Delta z [(\rho v_x)|_x - (\rho v_x)|_{x+\Delta x}] + \Delta z \Delta x [(\rho v_y)|_y - (\rho v_y)|_{y+\Delta y}] + \Delta x \Delta y [(\rho v_z)|_z - (\rho v_z)|_{z+\Delta z}] \quad (6)$$

Dividindo a Equação (6) por $\Delta x \Delta y \Delta z$ e tomando o limite quando Δx , Δy e Δz tendem a zero e utilizando as definições de derivadas parciais, tem-se a equação de conservação de massa, em coordenadas cartesianas, a qual descreve a taxa de variação temporal da densidade do fluido em uma posição fixa no espaço (LIGHTFOOT; BIRD; STEWART, 2004).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = - \left(\frac{\partial}{\partial x} \rho v_x + \frac{\partial}{\partial y} \rho v_y + \frac{\partial}{\partial z} \rho v_z \right) \quad (7)$$

Reescrevendo a Equação (7) em notação vetorial:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\nabla \cdot \rho \vec{V}) = 0 \quad (8)$$

Na Equação (8), o vetor $\rho \vec{V}$ é o fluxo de massa e seu divergente é a taxa líquida de saída de massa por unidade de volume.

Tendo em vista que o presente estudo analisa uma tubulação, a equação da conservação de massa, em coordenadas cilíndricas (LIGHTFOOT; BIRD; STEWART, 2004), é dada por:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho r V_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\rho V_\theta) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho V_z) = 0 \quad (9)$$

Para um fluido incompressível, $\rho = \text{constante}$, a equação da conservação de massa, em coordenadas cilíndricas (LIGHTFOOT; BIRD; STEWART, 2004), é dada por:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r V_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0 \quad (10)$$

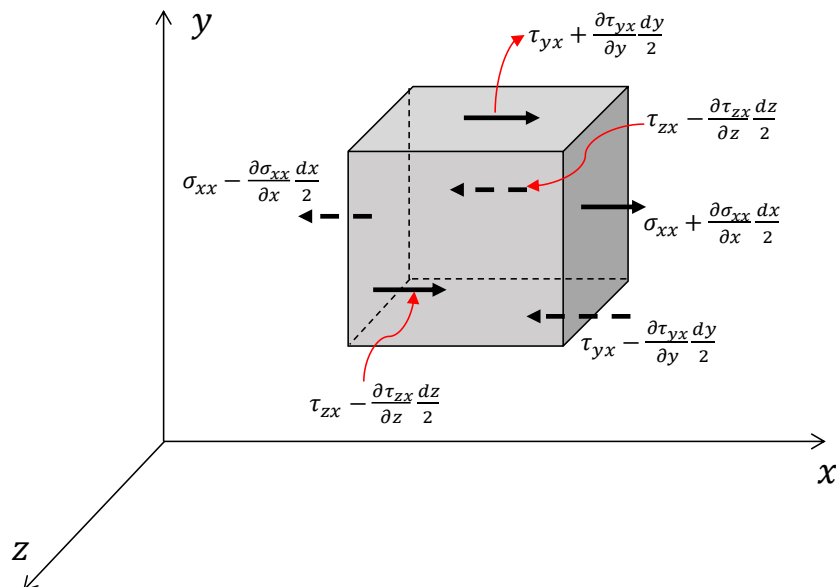
Para deduzir a forma diferencial da equação da quantidade de movimento, aplica-se a segunda lei de Newton a uma partícula fluida infinitesimal de massa dm (FOX et al., 2018). Escrevendo a segunda lei de Newton na forma vetorial:

$$d\vec{F} = dm \left[u \frac{\partial \vec{V}}{\partial x} + v \frac{\partial \vec{V}}{\partial y} + w \frac{\partial \vec{V}}{\partial z} + \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} \right] \quad (11)$$

Observa-se, na Equação (11), a necessidade de uma formulação adequada para a força $d\vec{F}$, ou para suas componentes (dF_x, dF_y, dF_z) atuando sobre o elemento. As forças que atuam sobre um elemento fluido são classificadas como forças de campo e forças de superfície (forças normais e forças de cisalhamento) (FOX et al., 2018).

Para exemplificar o desenvolvimento, considera-se a componente x da força atuando sobre um elemento diferencial de massa dm e volume $dV = dxdydz$. As forças de superfície na direção x se originam das tensões que atuam na direção x (FOX et al., 2018). As tensões atuando na direção x em cada fase do elemento são mostradas na Figura 11.

Figura 11. Tensões sobre um elemento de fluido na direção x .



Fonte: Adaptado de FOX et al. (2018).

Somando as forças na direção x , obtém-se a força resultante dF_{S_x} :

$$\begin{aligned}
dF_{S_x} = & \left(\sigma_{xx} + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} \frac{dx}{2} \right) dydz - \left(\sigma_{xx} - \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} \frac{dx}{2} \right) dydz + \left(\tau_{yx} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \frac{dy}{2} \right) dx dz \\
& - \left(\tau_{yx} - \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \frac{dy}{2} \right) dx dz + \left(\tau_{zx} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \frac{dz}{2} \right) dx dy \\
& - \left(\tau_{zx} - \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \frac{dz}{2} \right) dx dy
\end{aligned} \tag{12}$$

onde σ é a tensão normal e τ é a tensão de cisalhamento.

Simplificando, tem-se que:

$$dF_{S_x} = \left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) dx dy dz \tag{13}$$

Quando a única força atuante no corpo é a gravidade, a força de corpo por unidade de massa é igual a \vec{g} . Então, dF_{S_x} é dada por:

$$dF_x = dF_{B_x} + dF_{S_x} = \left(\rho g_x \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) dx dy dz \tag{14}$$

onde F_{B_x} é a força de campo na direção x e F_{S_x} são forças de superfície na direção x .

Usando desenvolvimento similar para as direções y e z , as componentes da força ficam:

$$dF_y = dF_{B_y} + dF_{S_y} = \left(\rho g_y \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right) dx dy dz \tag{15}$$

$$dF_z = dF_{B_z} + dF_{S_z} = \left(\rho g_z \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \right) dx dy dz \tag{16}$$

A partir da formulação das expressões para as componentes dF_x , dF_y e dF_z , é possível obter as equações diferenciais do movimento para as direções x , y e z (FOX et al., 2018).

$$\rho g_x \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} = \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (17)$$

$$\rho g_y \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} = \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (18)$$

$$\rho g_z \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} = \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (19)$$

As Equações (17), (18) e (19) são as equações diferenciais do movimento de qualquer partícula fluida incompressível que satisfaz a hipótese do contínuo (FOX *et al.*, 2018).

Expressando as tensões em termos de gradientes de velocidade e de propriedades de fluidos, em coordenadas cartesianas (FOX *et al.*, 2018), tem-se que:

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (20) \quad \sigma_{xx} = -p - \frac{2}{3} \mu \nabla \cdot \vec{V} + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \quad (23)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (21) \quad \sigma_{yy} = -p - \frac{2}{3} \mu \nabla \cdot \vec{V} + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \quad (24)$$

$$\tau_{zx} = \tau_{xz} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (22) \quad \sigma_{zz} = -p - \frac{2}{3} \mu \nabla \cdot \vec{V} + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \quad (25)$$

em que p é a pressão termodinâmica local.

Substituindo as equações de tensão (Equações de (20) a (25)) nas equações diferenciais do movimento (Equações de (17) a (19)), chega-se as equações de Navier-Stokes (FOX *et al.*, 2018):

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (26)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (27)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (28)$$

Para coordenadas cilíndricas, as equações de Navier-Stokes são escritas como (FOX *et al.*, 2018):

$$\begin{aligned} & \rho \left(\frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} - \frac{v_\theta^2}{r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) \\ &= \rho g_r - \frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [r v_r] \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_r}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} \right\} \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} & \rho \left(\frac{\partial v_\theta}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} - \frac{v_r v_\theta}{r} + v_z \frac{\partial v_\theta}{\partial z} \right) \\ &= \rho g_\theta - \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \mu \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [r v_\theta] \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial z^2} \right\} \end{aligned} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} & \rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} - \frac{v_\theta^2}{r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \\ &= \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right\} \end{aligned} \quad (31)$$

5.2 Modelagem da turbulência em escoamento monofásico

Em teoria, as equações desenvolvidas na seção anterior são válidas tanto para escoamentos laminares quanto turbulentos. Na prática, entretanto, sua solução direta para escoamentos turbulentos requer o uso de pesados recursos computacionais, sendo proibitiva para a vasta maioria dos problemas em engenharia. Para esse fim, a alternativa mais comum consiste na utilização de modelos de turbulência.

Dentre os muitos modelos de turbulência existentes, um dos mais utilizados na literatura é o k- ω SST (*Shear Stress Transport*) de Menter (1994), que é baseado na metodologia RANS (*Reynolds Averaged Navier – Stokes*). Neste tipo de abordagem, o ponto de partida é a decomposição de Reynolds em variáveis de fluxo em partes médias e flutuantes, onde a inserção dessas variáveis nas equações de Navier – Stokes seguida por uma média das próprias equações, da origem ao tensor de tensão de Reynolds, que descreve os efeitos das flutuações turbulentas de pressão e velocidades (ALFONSI, 2009).

De acordo com as características do escoamento, os modelos que utilizam a metodologia RANS podem ser classificados através das características do seu escoamento. Dessa forma, o modelo $k-\omega$ SST é classificado como um modelo de duas equações, ou seja, são utilizadas duas equações de transporte de propriedades turbulentas, sendo uma a equação da energia cinética turbulenta (k) junto com a equação da taxa de dissipação específica de turbulência (ω) (COSTA, 2018).

O modelo $k-\omega$ SST foi proposto por Menter (1994) com o objetivo de modelar a turbulência de escoamentos adversos de pressão e separação da camada limite. Este modelo faz uso da formulação dos modelos $k-\varepsilon$ de Launder e Spalding (1974) e $k-\omega$ de Yakhot *et al.*, (1992).

A equação de transporte de energia cinética turbulenta e a equação da taxa de dissipação específica de turbulência são dadas, respectivamente, pelas Equações (32) e (33):

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{V} \rho k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{k3}} \right) \nabla k \right] + P_K - \beta^* \rho k \omega \quad (32)$$

$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{V} \rho \omega) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega 3}} \right) \nabla \omega \right] + \frac{\alpha_{\omega 3} \rho}{\mu_t} P_K + \frac{2}{\sigma_{\omega 2} \omega} (1 - F_1) \rho (\nabla k \cdot \nabla \omega) - \beta_{\omega 3} \rho \omega^2 \quad (33)$$

onde P_k é o termo de produção e é calculado como:

$$P_k = \mu_t \left[\nabla \vec{V} + (\nabla \vec{V})^T \right] \nabla \vec{V} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{V}) (3\mu_t \nabla \cdot \vec{V} + \rho k) \quad (34)$$

Os coeficientes σ_{k3} , $\sigma_{\omega 3}$, $\alpha_{\omega 3}$ e $\beta_{\omega 3}$ são calculados pela função genérica $\zeta = (\sigma_k, \sigma_\omega, \alpha_\omega, \beta_\omega)$, tal que $\zeta_3 = F_1 \zeta_1 + (1 - F_1) \zeta_2$, onde (MENTER, 1994):

$$F_1 = \tanh \left\{ \left[\min \left(\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega \delta_w}, \frac{500 \mu}{\rho \delta_w^2 \omega} \right); \frac{4 \rho k}{C D_{k\omega} \sigma_{\omega 2} \delta_w^2} \right) \right]^4 \right\} \quad (35)$$

$$C D_{k\omega} = \max \left(\frac{2 \rho}{\sigma_{\omega 2} \omega} (\nabla k \cdot \nabla \omega); 1 \times 10^{-10} \right)$$

A Tabela 3 apresenta os valores dos coeficientes da equação de transporte de energia cinética turbulenta.

Tabela 3. Valores das constantes nas equações do modelo de turbulência SST.

σ_{k1}	σ_{k2}	$\sigma_{\omega1}$	$\sigma_{\omega2}$	$\alpha_{\omega1}$	$\alpha_{\omega2}$	$\beta_{\omega1}$	$\beta_{\omega2}$
2	1	2	1/0,856	5/9	0,44	0,0075	0,0828

Fonte: Menter, 1994

De acordo com Menter (1994), o modelo assume a viscosidade dinâmica turbulenta, μ_t , como uma função de k e ω , e multiplicada por uma função ponderada F_2 , tal que:

$$\frac{\mu_t}{\rho} = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega; \Omega_{SST} F_2)} \quad (36)$$

onde $a_1 = 0,31$ e Ω_{SST} é a magnitude do vetor vorticidade (Menter, 1994). A função ponderada F_2 é dada por:

$$F_2 = \tanh \left\{ \left[\max \left(\frac{d\sqrt{k}}{\beta^* \omega \delta_w}; \frac{500\mu}{\rho \delta_w^2 \omega} \right) \right]^{-2} \right\} \quad (37)$$

onde d é o diâmetro em m .

O problema descrito no estudo de caso envolve a solução de líquidos miscíveis. Dessa forma, a Equação (38) representa a equação de transporte da concentração do fluido a ser misturado.

$$\frac{\partial(\rho_{mistura}\varphi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_{mistura}V\varphi) = \nabla \cdot (\rho_{mistura}D_\phi \nabla \varphi) + S_\varphi \quad (38)$$

onde $\varphi = \frac{\phi}{\rho_{mistura}}$.

Em conjunto com o modelo SST, utilizou-se o modelo transicional Gamma-Theta, o qual é baseado na transição laminar-turbulento e utiliza duas equações de

transporte, uma para a intermitência e a outra para os critérios de início de transição em termos do número de Reynolds de transição (ANSYS, 2021).

A formulação do modelo proposta por Menter *et al.* (2004) é baseada em duas equações de transporte. A primeira é a equação de intermitência utilizada para desencadear o processo de transição. Já a segunda equação de transporte foi formulada para evitar operações não-locais introduzidas pelas quantidades utilizadas nas correlações experimentais como valores de fluxo livre, intensidade da turbulência ou gradiente de pressão fora da camada limite.

Além disso, uma equação adicional é formulada em termos de número de Reynolds no início da transição ($Re_{\theta t}$). Para a formulação do modelo de transição, as principais exigências foram que apenas variáveis locais e gradiente, bem como a distância da parede, pudessem ser usadas nas equações (MENTER *et al.*, 2004).

A equação da intermitência do modelo Gamma-Theta é dada por (MENTER *et al.*, 2004):

$$\frac{\partial(\rho\gamma)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j \gamma)}{\partial x_j} = P_{\gamma 1} - E_{\gamma 1} + P_{\gamma 2} - E_{\gamma 2} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_f} \right) \frac{\partial \gamma}{\partial x_j} \right] \quad (39)$$

Já os termos de transição são definidos como:

$$P_{\gamma 1} = F_{lenght} \rho S [\gamma F_{onset}]^{c_{a1}} \quad (40)$$

$$E_{\gamma 1} = c_{e1} P_{\gamma 1} \gamma \quad (41)$$

onde S é a magnitude da taxa de deformação e F_{lenght} é uma correlação empírica que controla o comprimento da região de transição.

A formulação da função F_{onset} é a principal diferença para outros modelos de intermitência. Essa função é utilizada para acionar a produção de intermitência e é formulada em função da vorticidade, e neste caso, taxa de deformação, do número de Reynolds (MENTER *et al.*, 2004):

$$Re_v = \frac{\rho y^2 S}{\mu} \quad (42)$$

$$F_{onset\ 1} = \frac{Re_\nu}{2,193 \cdot Re_{\theta c}} \quad (43)$$

$$F_{onset\ 2} = \min(\max(F_{onset\ 1}, F_{onset\ 1}^4), 2,0) \quad (44)$$

$$R_T = \frac{\rho k}{\mu \omega} \quad (45)$$

$$F_{onset\ 3} = \max\left(1 - \left(\frac{R_T}{2,5}\right)^3, 0\right) \quad (46)$$

$$F_{onset} = \max(F_{onset\ 2} - F_{onset\ 3}, 0) \quad (47)$$

em que $Re_{\theta c}$ na Equação (43) é o número de Reynolds crítico onde a intermitência começa a aumentar na camada limite. A conexão entre essas duas grandezas pode ser obtida a partir da seguinte correlação:

$$Re_{\theta c} = f(\widetilde{Re}_{\theta t}) \quad (48)$$

Por sua vez, os termos de destruição/relaminarização são definidos como (MENTER *et al.*, 2004):

$$P_{\gamma 2} = C_{a2} \rho \Omega_{SST} \gamma F_{turb} \quad (49)$$

$$E_{\gamma 2} = c_{e1} P_{\gamma 2} \gamma \quad (50)$$

onde Ω_{SST} é a magnitude da vorticidade, a qual garante que a intermitência permaneça zero na camada limite laminar e permite que o modelo preveja a relaminarização.

O termo F_{turb} , presente na Equação (49), é utilizado para desabilitar a fonte de destruição/relaminarização fora de uma camada limite laminar ou na subcamada viscosa e é definido como (MENTER *et al.*, 2004):

$$F_{turb} = e^{-\left(\frac{R_T}{4}\right)^4} \quad (51)$$

Os valores das constantes mostradas na equação da intermitência são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4. Valores das constantes da equação da intermitência do modelo de turbulência Gamma - Theta

c_{e1}	c_{e2}	c_{a1}	c_{a2}	σ_f
1,0	50	0,5	0,03	1,0

Fonte: Menter et. al. (2004)

A condição de contorno padrão para γ para uma parede é fluxo normal zero, enquanto para uma entrada é igual a 1 (MENTER *et al.*, 2004).

De acordo com a formulação de Menter *et al.* (2004), a equação de transporte para o número de Reynolds de transição é definida da seguinte forma:

$$\frac{\partial(\rho\widetilde{Re}_{\theta t})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j \widetilde{Re}_{\theta t})}{\partial x_j} = P_{\theta t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\sigma_{\theta t} (\mu + \mu_t) \frac{\partial \widetilde{Re}_{\theta t}}{\partial x_j} \right] \quad (52)$$

O termo fonte ($P_{\theta t}$) é projetado para forçar o escalar transportado $\widetilde{Re}_{\theta t}$ a corresponder ao valor local de $Re_{\theta t}$ calculado a partir de uma correlação empírica fora da camada limite, sendo definido como:

$$P_{\theta t} = c_{\theta t} \frac{\rho}{t} (Re_{\theta t} - \widetilde{Re}_{\theta t}) (1,0 - F_{\theta t}) \quad (53)$$

onde t é uma escala de tempo presente por razões dimensionais e é calculado como:

$$t = \frac{500\mu}{\rho U^2} \quad (54)$$

A função de mistura ($F_{\theta t}$) é utilizada para desativar o termo fonte na camada limite e também para permitir que o escalar transportador ($\widetilde{Re}_{\theta t}$) se difunda do fluxo livre. Dessa forma, $F_{\theta t}$ é definido da seguinte forma (MENTER *et al.*, 2004):

$$F_{\theta t} = \min \left(\max \left(F_{wake} \cdot e^{-\left(\frac{y}{\delta}\right)^4}, 1,0 - \left(\frac{\gamma - \frac{1}{c_{e2}}}{1,0 - \frac{1}{c_{e2}}} \right)^2 \right), 1,0 \right) \quad (55)$$

$$\theta_{BL} = \frac{\widetilde{Re}_{\theta t} \mu}{\rho U}; \delta_{BL} = \frac{15}{2} \theta_{BL}; \delta = \frac{50 \Omega y}{U} \cdot \delta_{BL} \quad (56)$$

$$Re_{\omega} = \frac{\rho \omega y^2}{\mu} \quad (57)$$

$$F_{wake} = e^{-\left(\frac{Re_{\omega}}{1 \times 10^5}\right)^2} \quad (58)$$

Para $F_{\theta t}$, a condição de contorno no fluxo livre é igual a zero e na camada limite é igual a 1. Já para $\widetilde{Re}_{\theta t}$, a condição de contorno em uma parede é fluxo zero e na entrada deve ser calculada a partir da correlação empírica baseada na intensidade de turbulência da entrada (MENTER *et al.*, 2004).

As constantes da equação de transporte que controla a magnitude do termo fonte ($c_{\theta t}$) e o coeficiente de difusividade ($\sigma_{\theta t}$) são mostradas na Tabela 5.

Tabela 5. Valores das constantes na equação de transporte do modelo de turbulência Gamma - Theta.

$c_{\theta t}$	$\sigma_{\theta t}$
0,03	10,0

Fonte: Menter et. al. (2004)

Durante o estudo de Menter *et al.* (2004), foi relatado que, sempre que ocorria a separação da camada limite laminar, o modelo previa a localização de reativação da turbulência muito a jusante. Ao analisar os dados experimentais, foi observado que a concordância com o experimento tendeu a diminuir conforme a intensidade do fluxo livre foi reduzida. Como resultado, a energia cinética turbulenta levou mais tempo para atingir valores grandes o suficiente para fazer com que a camada limite fosse reconectada.

Com a finalidade de corrigir esse desvio, foi introduzida uma modificação que permitiu que a energia cinética turbulenta aumentasse rapidamente uma vez que a camada limite laminar se separa. A ideia principal foi permitir que a intermitência local excedesse 1 sempre que a camada limite laminar se separasse, o que resultaria em uma grande produção de energia cinética turbulenta permitindo a reativação mais precoce. Dessa forma, a modificação para a transição induzida por separação é (MENTER *et al.*, 2004):

$$\gamma_{sep} = \min \left(8 \cdot \max \left[\left(\frac{Re_v}{2,193 Re_{\theta c}} \right) - 1, 0 \right] F_{reattach}, 5 \right) F_{\theta t} \quad (59)$$

$$F_{reattach} = e^{-\left(\frac{R_T}{15}\right)^4} \quad (60)$$

$$\gamma_{eff} = \max(\gamma, \gamma_{sep}) \quad (61)$$

Finalmente, o novo modelo de transição foi calibrado para ser usado com o modelo de turbulência SST (MENTER, 1994). Sendo assim, o modelo de transição foi acoplado ao modelo SST da seguinte forma:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = \tilde{P}_K - \tilde{D}_K + \frac{\partial}{\partial x_j} \left((\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \quad (62)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \omega) = \alpha \frac{P_K}{v_t} - D_\omega + C d_\omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left((\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) \quad (63)$$

$$\tilde{P}_K = \gamma_{eff} P_K; \tilde{D}_K = \min(\max(\gamma_{eff}, 0, 1), 1, 0) D_K \quad (64)$$

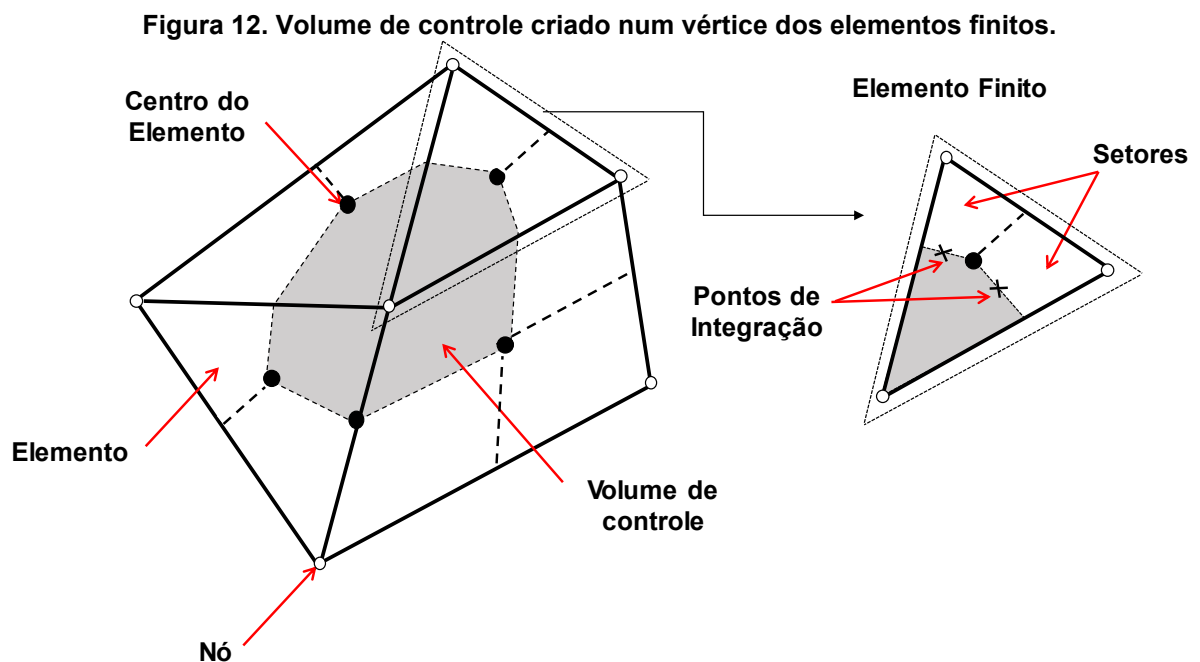
$$R_y = \frac{\rho y \sqrt{k}}{\mu}; F_3 = e^{-\left(\frac{R_y}{120}\right)^8}; F_1 = \max(F_{1\ orig}, F_3) \quad (65)$$

onde P_K e D_K são os termos originais de produção e destruição, respectivamente, do modelo SST e $F_{1\ orig}$ é a função de mistura original do modelo SST.

5.3 Modelagem numérica

As equações governantes apresentadas nas seções anteriores requerem uma solução numérica. Neste estudo de caso, a solução numérica implementada pelo programa de dinâmica dos fluidos computacional ANSYS® CFX® (ANSYS, 2021) é baseada na metodologia de volumes finitos baseada em elementos. Essa metodologia é baseada na discretização do domínio de cálculo em uma malha numérica, a qual é constituída por volumes de controle finitos, sobre os quais as equações governantes são integradas, discretizadas e linearizadas, resultando em um sistema algébrico de equações que são resolvidos computacionalmente, através de um processo iterativo (AZEVEDO, 2019).

De acordo com Rodrigues (2019), a metodologia dos volumes finitos baseado em elementos é um método utilizado para discretizar equações de conservação, sendo considerado um método numérico híbrido por utilizar o método dos volumes finitos na discretização das equações de conservação e o método dos elementos finitos para a discretização espacial. Neste método, os volumes de controle de cada elemento finito da malha são constituídos em torno de centros. Na Figura 12, a região sombreada representa, esquematicamente, a criação de um volume de controle poliédrico, delimitado pelos centros de cada elemento. No presente estudo de caso, é importante ressaltar que o domínio utilizado é tridimensional, mas para facilitar a compreensão e a visualização do volume de controle, a malha será representada como bidimensional.



Fonte: Adaptado de ANSYS (2021).

Ainda na Figura 12, os elementos finitos são representados pelas linhas sólidas, enquanto os volumes de controle são definidos pelas linhas tracejadas. As propriedades dos fluidos e as variáveis do problema são calculadas nos vértices das linhas sólidas, marcados como círculos em branco. Já as equações de conservação de massa (Equação (8)) e conservação de quantidade de movimento (Equação (26)-(28)), os chamados fluxos de superfície, são avaliados entre os volumes de controle

adjacentes, em posições denominadas de pontos de integração. A partir do teorema de divergência de Gauss, as integrais de volume são convertidas sobre os termos envolvendo operadores de gradiente e divergentes em integrais de superfície (ANSYS, 2021).

Na sequência o programa promove a discretização das integrais de volume e de superfície. As integrais de volume são discretizadas dentro de cada setor, como mostra a Figura 12, e acumuladas no volume de controle a que cada setor pertence. Já as integrais de superfície são discretizadas no ponto de integração e são distribuídas para os volumes de controle adjacentes. Tendo em vista que as integrais de superfície são iguais e opostas para o volume de controle adjacentes aos pontos de integração, as integrais de superfície são, no mesmo local, conservativas (ANSYS, 2021).

Por fim, após calcular as variáveis nos nós da malha, o programa realiza uma interpolação geométrica para as variáveis escalares, propriedades do fluido, gradientes de propriedades e termos difusivos, para aproximar os valores de certos termos nos pontos de integração, representados na Figura 12. Essa interpolação é chamada de trilinear e é baseada em funções de forma que calculam o valor nos pontos de integração em função da contribuição dos nós vizinhos (ANSYS, 2021).

Já a interpolação para os termos advectivos é realizada, no programa ANSYS® CFX®, através do seguinte esquema:

$$\varphi_{ip} = \varphi_{up} + \beta \nabla \varphi \cdot \Delta \vec{r} \quad (66)$$

em que φ_{ip} representa o valor de uma variável genérica qualquer no ponto de integração, φ_{up} é o valor dessa variável nó a montante, \vec{r} é o vetor do nó a montante até o ponto de integração, β é uma função que varia de 0 a 1 e $\nabla \varphi$ é o gradiente dessa variável genérica.

Neste estudo de caso, o esquema de advecção recomendado pelo programa é chamado de “esquema de alta resolução” (*high resolution scheme*). Ele calcula a função β por meio de uma formulação não-linear em cada um dos nós. O método atribui valores máximos e mínimos para os nós adjacentes e resolve a Equação (66) para β em cada ponto de integração vizinho ao nó, evitando que o valor de φ

ultrapasse os limites de φ_{min} e φ_{max} . Dessa forma, β deve possuir o menor valor nodal dentre os pontos de integração (ANSYS, 2021).

Finalmente, para o acoplamento pressão-velocidade, o programa em questão faz uso de um sistema de malha co-localizada, em que os volumes de controle presentes são idênticos para todas as equações de transporte. A equação utilizada para essa solução consiste em uma aproximação da equação de transporte similar à da quantidade de movimento em cada um dos pontos de integração, como mostra a equação abaixo (ANSYS, 2021):

$$V_{i,ip} = \bar{V}_{i,ip} - \frac{\forall \Delta t}{a \Delta t + \rho \forall} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \Big|_{ip} - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} \Big|_{ip} \right) + \frac{\rho \forall}{a \Delta t + \rho \forall} (V_{i,ip}^0 - \bar{V}_{i,ip}^0) \quad (67)$$

onde \forall é o volume de controle, a é a aproximação ao coeficiente central da equação da quantidade de movimento com a exclusão do termo transiente e Δt é o passo de tempo (time step). As barras superiores indicam os termos que correspondem a valores médios, enquanto os expoentes 0 indicam valores do intervalo de tempo anterior ao atual.

5.3.1 Condições de contorno e malha numérica

Neste estudo de caso, a geometria utilizada foi baseada na geometria experimental comentada na seção 4.1. Para chegar nas condições de contorno final do problema, inicialmente foram levantadas e testadas várias hipóteses descritas seguir.

Na entrada da tubulação, o fluido deslocador (mistura água e glicerina) foi inserido com as mesmas velocidades da grade de testes experimentais conforme indicado na Tabela 2. Inicialmente, na condição de contorno da entrada, considerou-se que a mistura água e glicerina era ideal e, portanto, a densidade e a viscosidade foram calculadas de acordo com as Equações (68) e (69), respectivamente.

$$\rho_{mistura} = \frac{1}{\left(\frac{x}{\rho_{glicerina}}\right) + \left(\frac{1-x}{\rho_{\acute{a}gua}}\right)} \quad (68)$$

$$v_{mistura} = \frac{1}{\left(\frac{x}{v_{glicerina}}\right) + \left(\frac{1-x}{v_{\acute{a}gua}}\right)} \quad (69)$$

Já nas paredes internas, foi utilizada a condição de não-deslizamento e na saída a condição do tipo *outlet* com gradiente de pressão nulo. Um plano de simetria foi utilizado visando a economia de esforço computacional, reduzindo pela metade o tamanho da malha numérica.

Neste estudo de caso, o fluido deslocador usado foi uma mistura de água e glicerina, e para atingir as viscosidades desejadas de 3,5 cP e 8,5 cP, foi necessário conhecer a fração mássica de cada um dos componentes da mistura. Como os fluidos são considerados miscíveis, foi preciso configurar uma mistura de composição variável (*variable composition mixture* – VCM), já que há uma variação da quantidade dos fluidos ao longo do tempo dentro da tubulação.

Para a configuração da VCM, foi necessário utilizar um dos fluidos que compõe a mistura como o fluido-base, chamado de *constraint*, sendo que usualmente é utilizado o fluido de menor densidade para esse fim. Configurando a fração mássica do segundo fluido, todo o restante será preenchido pelo fluido-base, ou seja, se houver 30% do segundo fluido sendo injetado na tubulação, os outros 70% na entrada serão automaticamente preenchidos pelo fluido base.

Os valores iniciais da mistura foram obtidos por meio de um código em linguagem *Python*, disponível no apêndice A, o qual apresenta uma compilação de dados existentes na literatura a respeito da mistura água e glicerina. O código sugere que, para se obter uma mistura com viscosidade de aproximadamente 8,5 cP, é necessária uma proporção de 50% de água e 50% de glicerina. Já para 3,5 cP são necessários 67% da composição mássica de água e 33% de glicerina.

O ANSYS® CFX® utiliza equações para mistura ideal para calcular as propriedades físicas da mistura água e glicerina, porém, sabe-se que esta mistura foge da idealidade. Para a densidade foi utilizada a equação padrão do programa:

$$\frac{1}{\rho_M} = \frac{Y_A}{\rho_A} + \frac{Y_{Gli}}{\rho_{Gli}} \quad (70)$$

onde ρ representa densidade, Y representa a fração mássica dos componentes e os subíndices A e G representam a fração ocupada pela água e glicerina, respectivamente.

A viscosidade foi calculada pela Equação (71) de acordo com o cálculo proposto por Cheng (2008), o qual encontra-se detalhado no apêndice A.

$$\mu_{mistura} = \mu_g \exp(A\alpha) \quad (71)$$

onde

$$\mu_g = 0,001 \cdot 12100 \cdot \exp\left(\frac{-1233 + T}{9900 + 70T}\right) \quad (72)$$

$$A_i = \log\left(\frac{\mu_A}{\mu_{Gli}}\right) \quad (73)$$

$$\alpha_i = 1 - Y_g + \frac{abY_g(1 - Y_g)}{aY_g + b(1 - Y_g)} \quad (74)$$

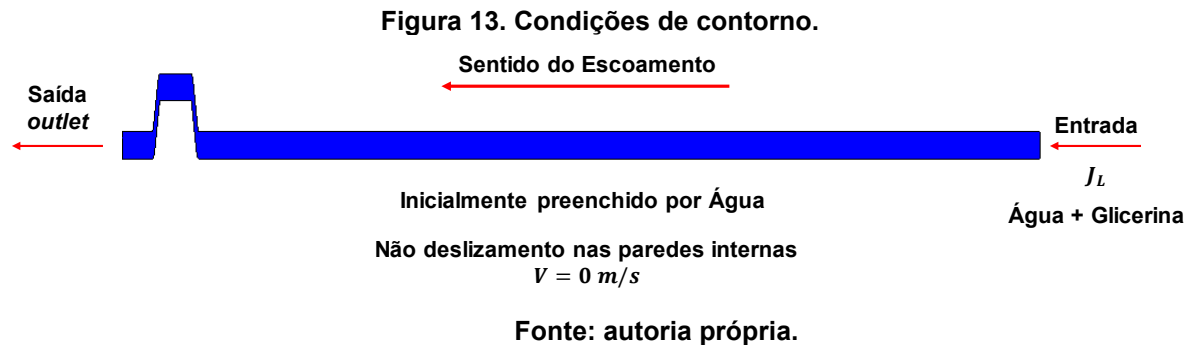
$$\mu_A = 0,001 \cdot 1,790 \exp\left(\frac{-1230 - T}{36100 + 360T}\right) \quad (75)$$

$$= 0,705 - 0,0017T \quad (76)$$

$$b = (4,9 + 0,036T)a^{2,5} \quad (77)$$

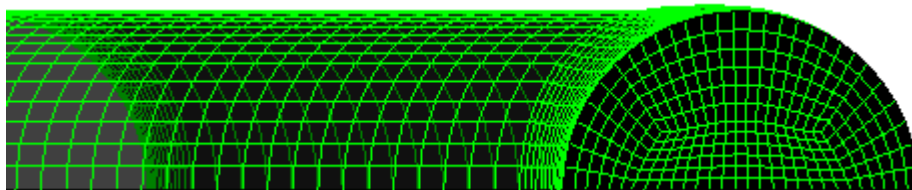
onde T representa a temperatura dos fluidos.

A Figura 13 apresenta de maneira simplificada as condições de contorno utilizadas nas simulações.



Para geração da malha utilizou-se o software Ansys ICEM CFD[®], o qual é capaz de fornecer geração avançada de geometria e malha, diagnóstico de malha e funções de reparo úteis para análises profundas. Além disso, seu design é focado em aplicações de engenharia com foco específico na dinâmica computacional de fluidos e análise estrutural. A geração de malha é um problema dependente da geometria, o que significa que não há um método de malha singular que pode ser usado para cada problema. Dessa forma, o ICEM CFD[®] permite que sejam criadas estruturas de grades diferentes, ou seja, malhas estruturadas multi-blocos, malhas não estruturadas e malhas híbridas (ANSYS, 2021). A Figura 14 ilustra a malha estruturada multi-blocos criada a partir da estratégia de o-grid empregada neste estudo, a qual é composta por 1.103.436 nós e 994.980 elementos.

Figura 14. Malha estruturada da geometria da seção de teste.

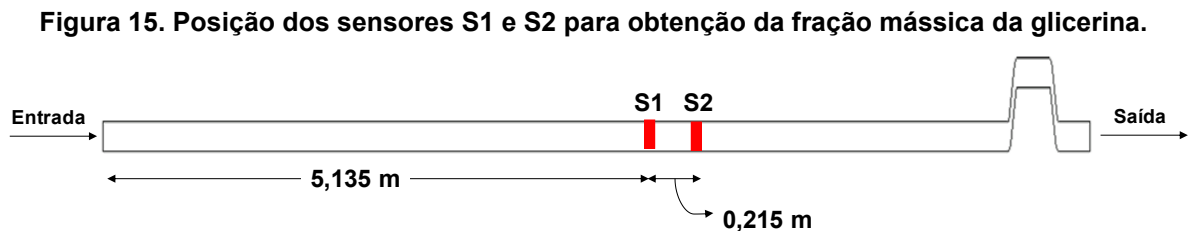


Fonte: autoria própria.

6 RESULTADO E DISCUSSÃO

6.1 Validação do modelo de turbulência

A limpeza da tubulação horizontal ocorreu de forma que a mistura água e glicerina foi deslocando a água da torneira presente na seção de teste. Através de dois sensores colocados na seção de teste, foi possível obter dados experimentais da fração mássica da glicerina e por meio deles avaliar se a limpeza da tubulação ocorreu de forma satisfatória ou não. A Figura 15 mostra a posição dos sensores denominados S1 e S2 na seção de teste.

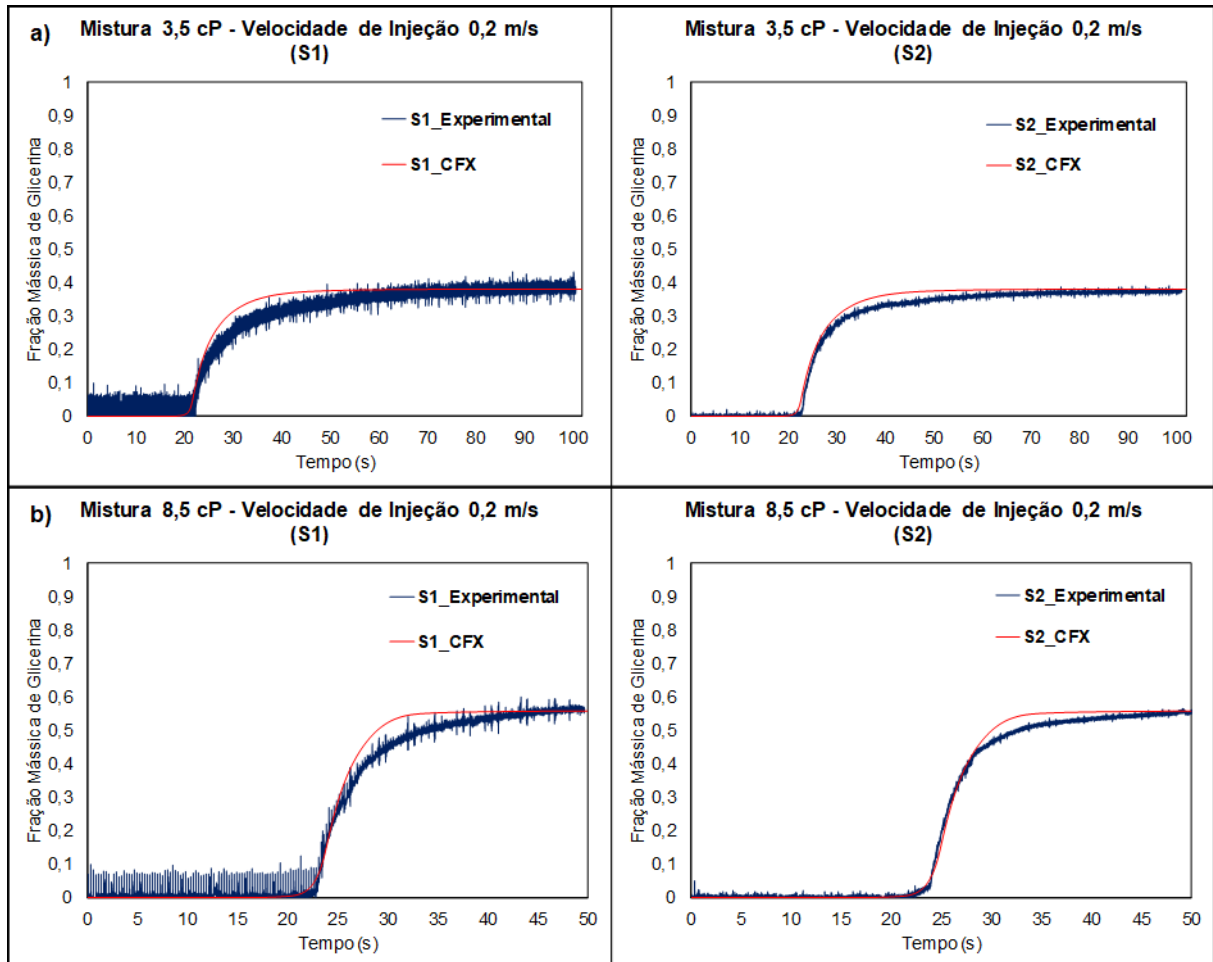


Fonte: autoria própria.

A análise da limpeza da tubulação foi realizada partindo do valor inicial da fração mássica de glicerina na mistura injetada na seção de teste, ou seja, assim que a seção de teste apresentou o mesmo valor inicial da fração mássica da mistura, considerou-se que houve a limpeza da tubulação. Sendo assim, o valor inicial da fração mássica da glicerina para 3,5 cP foi de 0,38 e para 8,5 cP, 0,56.

Para avaliar se os dados de fração mássica da glicerina foram bem representados pelo modelo de turbulência em questão, plotou-se os gráficos mostrados na Figura 16 para velocidade de injeção da mistura água e glicerina de 0,2 m/s nas posições S1 e S2.

Figura 16. Comparação entre os dados experimentais e da simulação para velocidade de injeção de 0,2 m/s nas mistura com viscosidade (a) de 3,5 cP e (b) de 8,5 cP na posição dos sensores S1 e S2.



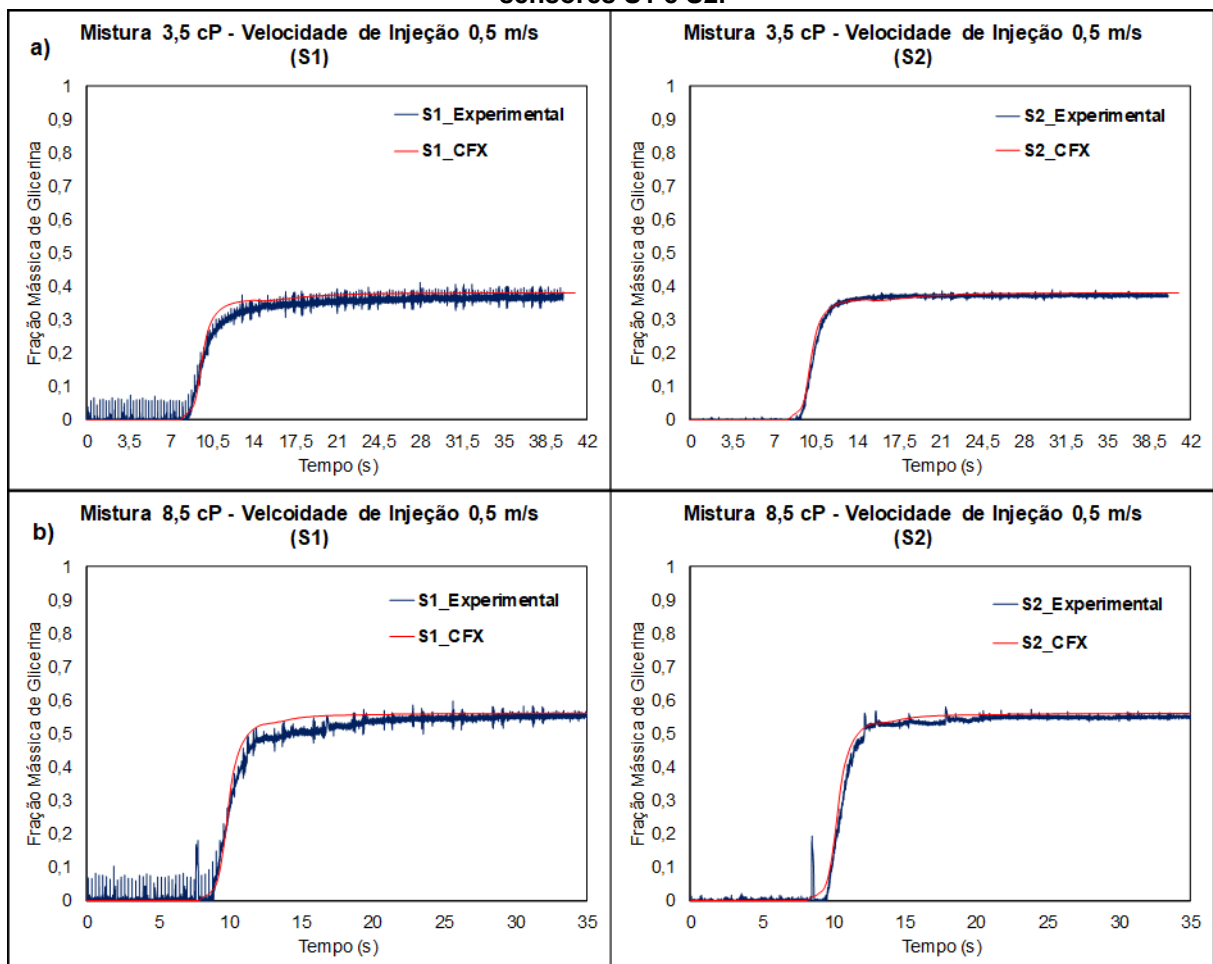
Fonte: autoria própria.

A partir da Figura 16 (a), é possível observar o comportamento das curvas para a mistura de água e glicerina com viscosidade de 3,5 cP nas posições dos sensores S1 e S2. Na posição S1, nota-se a presença de ruído na medida, o que não interferiu na leitura dos dados. Além disso, fica evidente a semelhança no comportamento das curvas dos dados experimentais (azul escuro) e simulação (vermelho), indicando que o modelo de turbulência SST Gamma-Theta representou de forma satisfatória a fração mássica de glicerina neste ponto. Ademais, a parte linear da curva constante no ponto 0,38 de fração mássica de glicerina indica que ocorreu a limpeza da tubulação, já que atingiu o valor inicial da fração mássica de glicerina. As curvas representadas na posição S2 somente reforçam que o modelo de turbulência

em estudo foi suficiente para representar os dados experimentais nas condições estudadas. Por fim, na Figura 16 (b), que representa os dados experimentais e da simulação para a mistura de 8,5 cP, também mostraram que o modelo de turbulência utilizado foi satisfatório, tendo em vista que as curvas analisadas foram muito semelhantes.

Para a velocidade de injeção da mistura água e glicerina de 0,5 m/s foi realizada a mesma análise em relação a fração mássica da glicerina. Dessa forma, as curvas obtidas foram as mostradas na Figura 17.

Figura 17. Comparação entre os dados experimentais e da simulação para velocidade de injeção de 0,5 m/s nas mistura com viscosidade (a) de 3,5 cP e (b) de 8,5 cP na posição dos sensores S1 e S2.



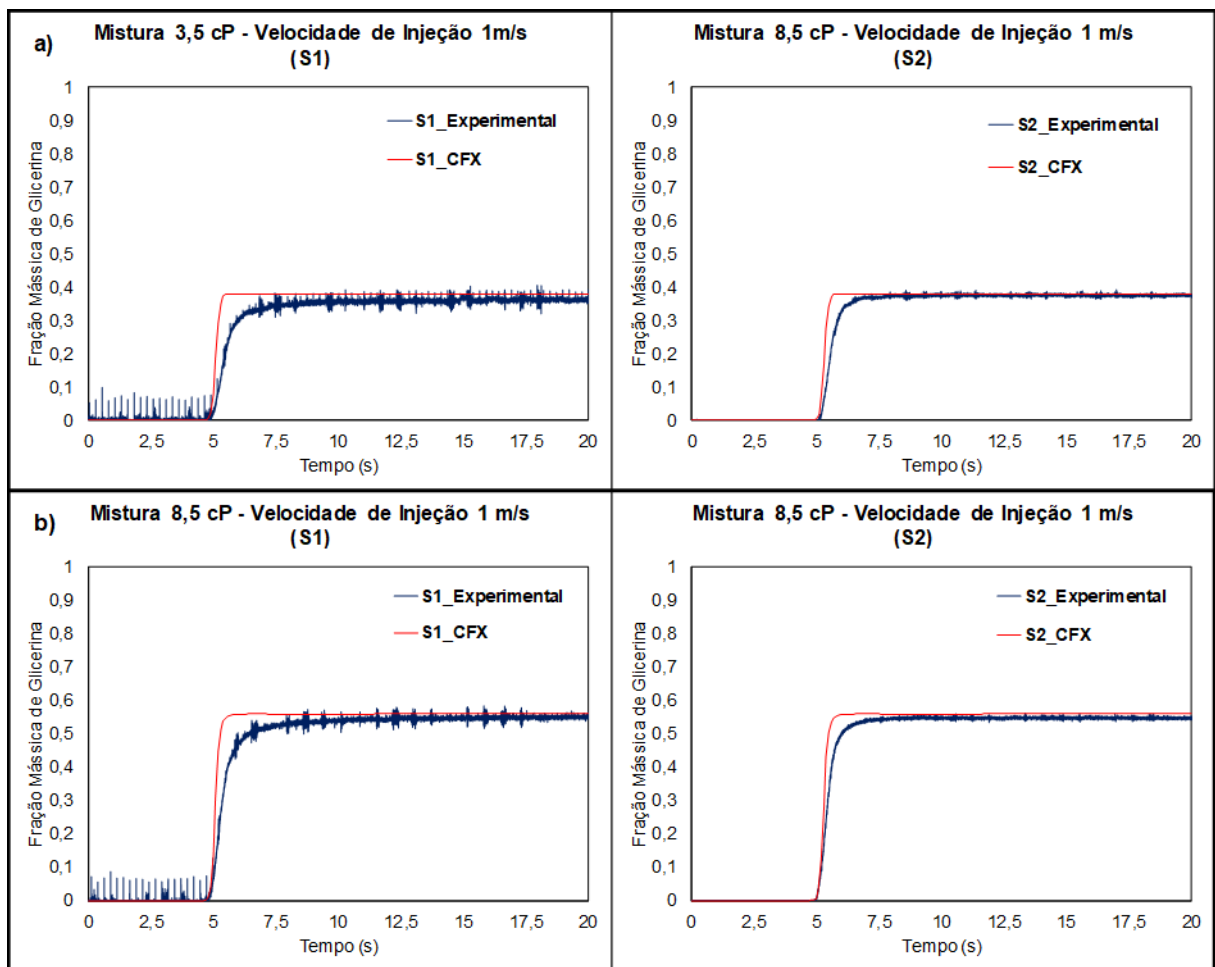
Fonte: autoria própria.

Pelos gráficos da Figura 17 verifica-se que os dados experimentais para ambas as misturas foram bem representados pelo modelo de turbulência em estudo

para a velocidade de injeção da mistura 0,5 m/s, já que não há grandes desvios entre as curvas que representam os dados experimentais e os dados obtidos pela simulação.

Em relação as curvas para a velocidade de 1 m/s, mostradas na Figura 18, comparando com velocidade de injeção da mistura 0,2 e 0,5 m/s, verifica-se um desvio evidente na inclinação da curva. Esse desvio pode ser explicado pelo aumento da turbulência que pode não ter sido capturado de forma efetiva pelo modelo transicional em estudo.

Figura 18. Comparação entre os dados experimentais e da simulação para velocidade de injeção de 1 m/s nas mistura com viscosidade (a) de 3,5 cP e (b) de 8,5 cP na posição dos sensores S1 e S2.



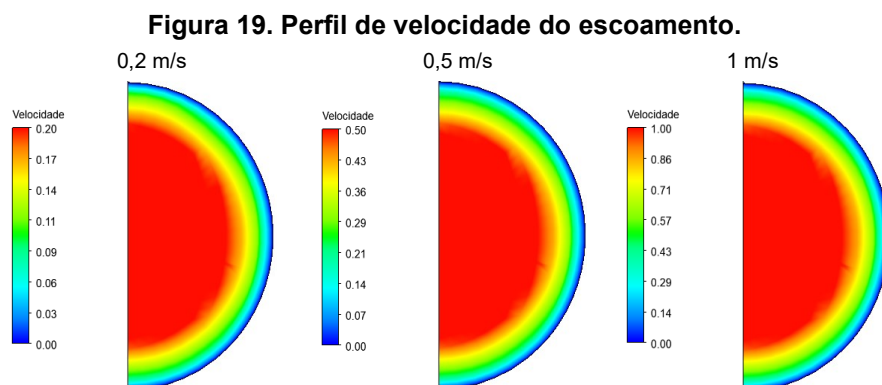
Fonte: autoria própria.

De forma geral, depois da análise do conjunto de dados exposto, por meio do modelo de turbulência SST Gamma-Theta pode ser utilizado para simulação de

fenômenos relacionados ao deslocamento de fluidos. No entanto, cabe mais análises relacionadas ao efeito da turbulência no escoamento para altas velocidades de injeção do fluido.

6.2 Análise do escoamento

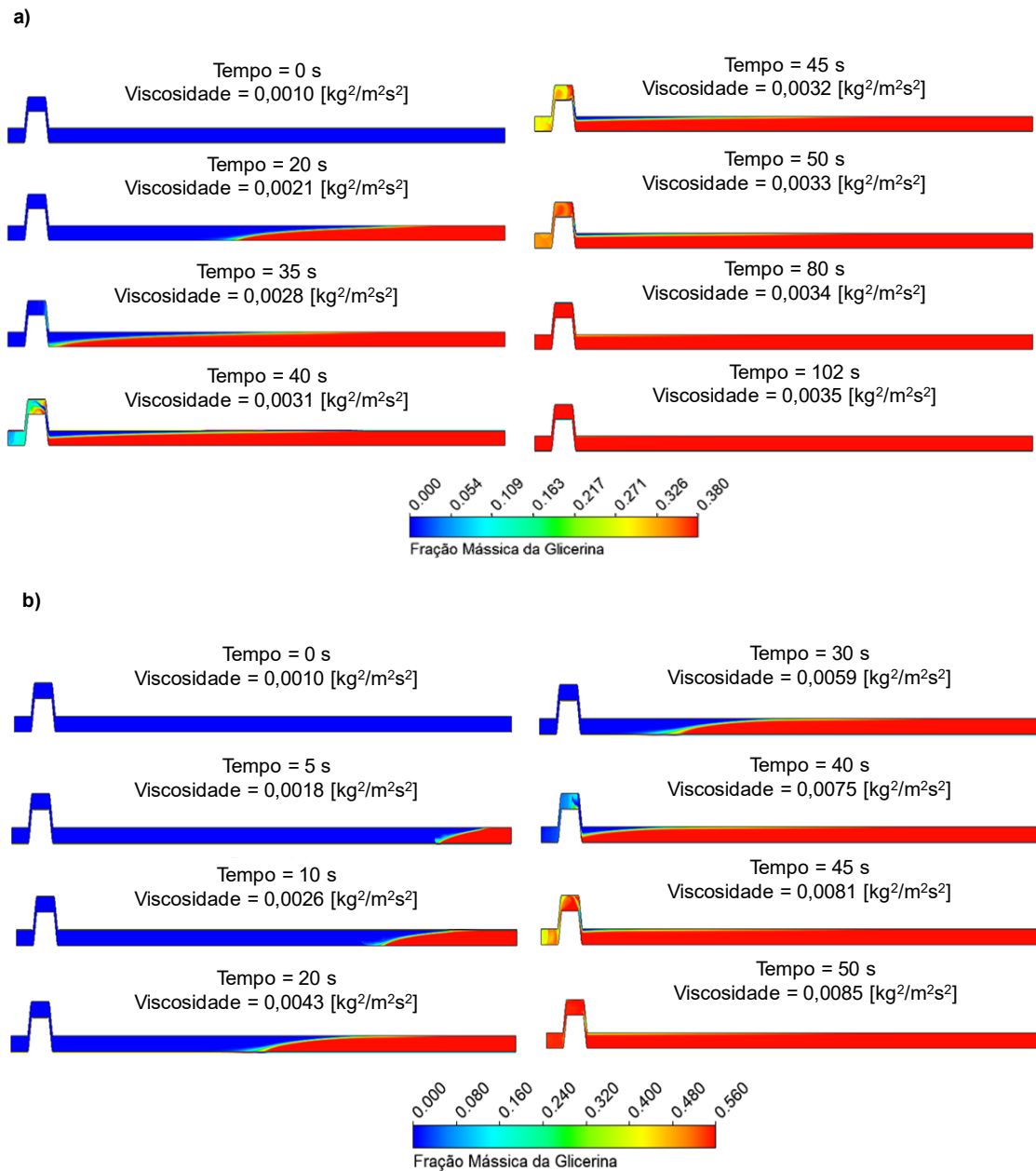
A partir da Figura 19 é possível visualizar o perfil de velocidade frontal do escoamento. Nota-se pela escala de cores que a condição de contorno adotada para as paredes de não deslizamento foram satisfeitas, tendo em vista que a velocidade do escoamento na parede foi zero. Além disso, a velocidade de injeção da mistura adotada como condição de entrada também foi satisfeita, já que na Figura 19 a cor vermelha representa a velocidade de injeção máxima atingida durante o escoamento.



Fonte: autoria própria.

Analisando imagens do experimento e da simulação, observou-se que dependendo da velocidade de injeção da mistura e do número de Fr , o padrão do escoamento se altera. Para as baixas velocidades (0,2 e 0,5 m/s) e número de Fr abaixo ou muito próximos de 2, houve a formação de um escoamento estratificado em ambas as misturas, o que representa um deslocamento de fluidos estável. Já para as altas velocidades (1 m/s) e número de Fr acima de 2, o escoamento não apresentou um padrão definido, porém mostrou-se turbulento e se deu em uma espécie de *plug*. A Figura 20 apresenta o padrão estratificado do escoamento para a velocidade de injeção da mistura deslocante de 0,2 m/s para ambas as viscosidades.

Figura 20. Padrão de escoamento estratificado para a velocidade de injeção da mistura água e glicerina 0,2 m/s a) para mistura com viscosidade 3,5 cP e b) para mistura com viscosidade 8,5 cP.



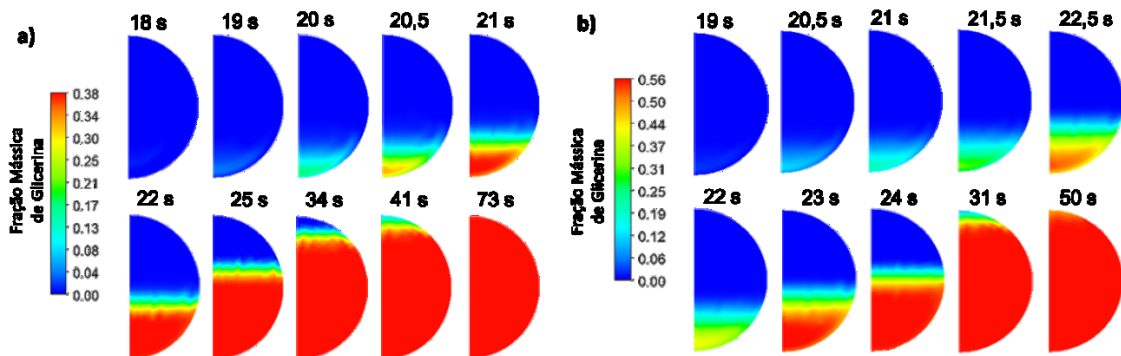
Fonte: autoria própria.

O experimento em questão foi realizado com líquidos miscíveis com baixas viscosidades (1-10 cP), porém, o comportamento do padrão de escoamento estratificado, mostrado na Figura 20 para baixas velocidades, refletiu os dados descritos na literatura para líquidos imiscíveis como água e óleo de baixa viscosidade.

Segundo Angeli e Hewitt (2000), o padrão de escoamento óleo-água é influenciado pelo diâmetro e orientação da tubulação, velocidade, fração volumétrica, densidade e viscosidade dos componentes e pelas características da parede da tubulação. Dessa forma, comprovando a influência destes parâmetros, Abubakar *et al.* (2015) realizou experimentos com água e óleo de baixa viscosidade e observou que para a velocidade de injeção da mistura 0,1 m/s e fração volumétrica de óleo entre 0,4 e 0,9, os padrões de escoamento encontrados foram estratificados liso e ondulado. O padrão estratificado ondulado também apareceu nas velocidades de 0,1 m/s e 0,2 m/s com fração volumétrica de óleo entre 0,1 e 0,3 e 0,3 e 0,9, respectivamente.

Com a finalidade de analisar a configuração da interface durante o escoamento, foi traçado um plano frontal a 4 m da entrada da tubulação. As interfaces são zonas anisotrópicas, em que as propriedades estruturais e dinâmicas são muito diferentes das propriedades do seio das faces e a disposição dos fluidos depende do tipo de escoamento estudado (SANTOS, 2003). Dessa forma, para a velocidade de injeção da mistura de 0,2 m/s, como mostra a Figura 21, foi possível avaliar a disposição das fases em que a mistura deslocante permanece na parte inferior (vermelho) e a água na parte superior (azul) e também uma interface bem definida. Ainda na Figura 21 (b) nota-se que o escoamento não atingiu a fração mássica de glicerina de 0,56, que corresponde uma limpeza total da tubulação, no tempo máximo simulado de 50 s.

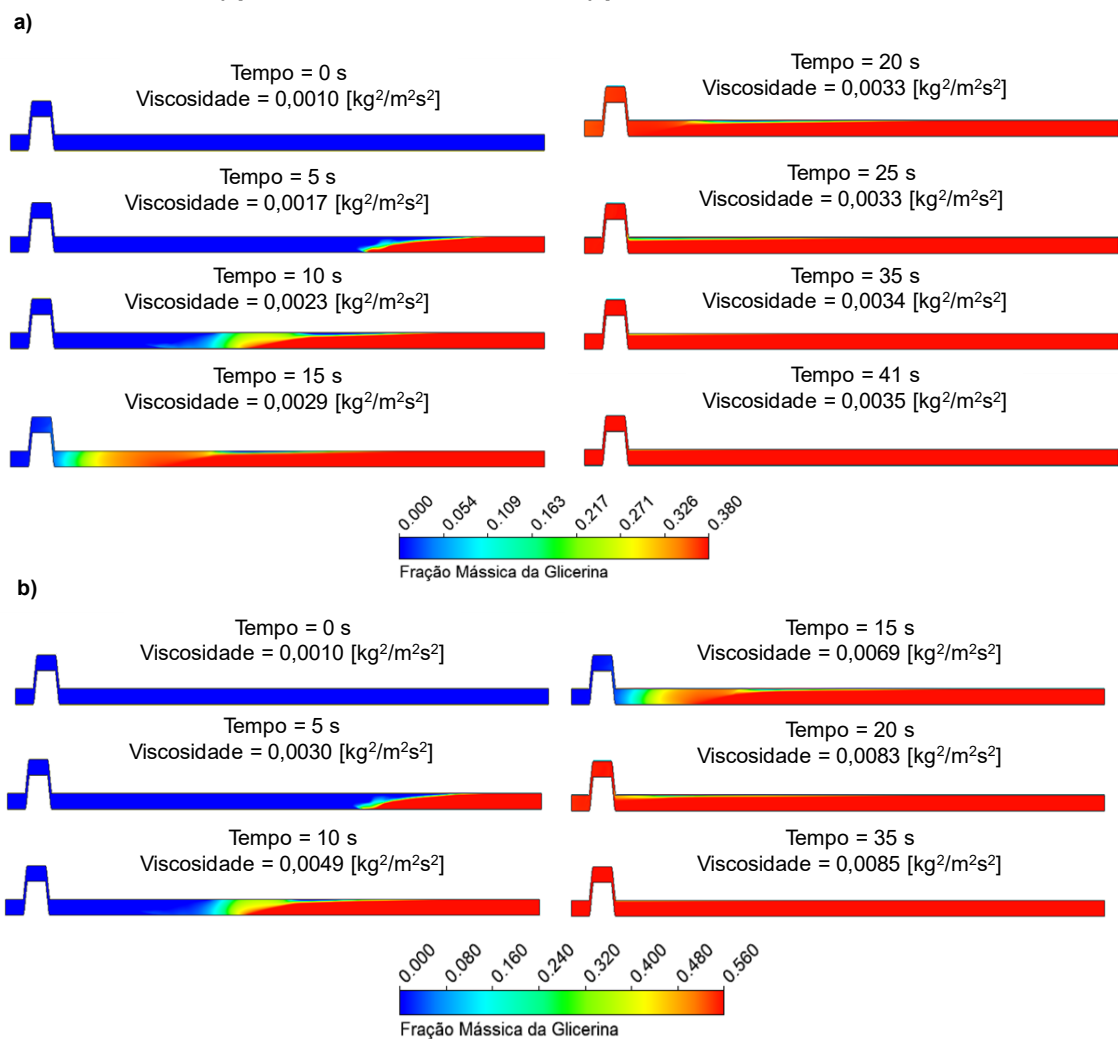
Figura 21. Formação da interface ao longo do escoamento para a velocidade de injeção da mistura água e glicerina de 0,2 m/s a) para a mistura de 3,5 cP e b) para a mistura de 8,5 cP.



Fonte: autoria própria.

Para a velocidade de injeção de 0,5 m/s foi observado um padrão de escoamento estratificado, porém com uma região de mistura acima da interface. O comportamento do escoamento observado na Figura 21 refletiu um deslocamento de fluidos miscíveis instável mostrando a instabilidade interfacial que pode ter se desenvolvido devido à diferença de velocidade entre as camadas de fluido ou a diferença na viscosidade de uma camada para outra (ETRATI; ALBA; FRIGAARD, 2018). A Figura 22 apresenta o desenvolvimento do escoamento ao longo da tubulação com velocidade de injeção da mistura água e glicerina de 0,5 m/s para ambas as viscosidades analisadas.

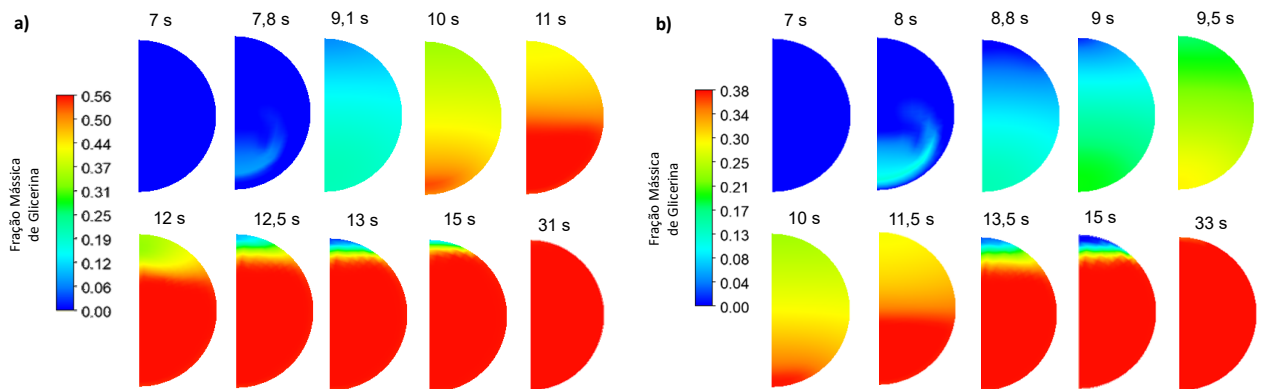
Figura 22. Desenvolvimento do escoamento com velocidade de injeção da mistura de 0,5 m/s a) para a mistura de 3,5 cP e b) para a mistura de 8,5 cP.



Fonte: autoria própria.

Ao investigar a formação da interface através da análise da fração mássica da glicerina no escoamento frontal como mostra a Figura 23, para ambas as viscosidades, nota-se que não há interface bem definida no início do desenvolvimento do escoamento, ou seja, há apenas a difusão de um fluido em outro.

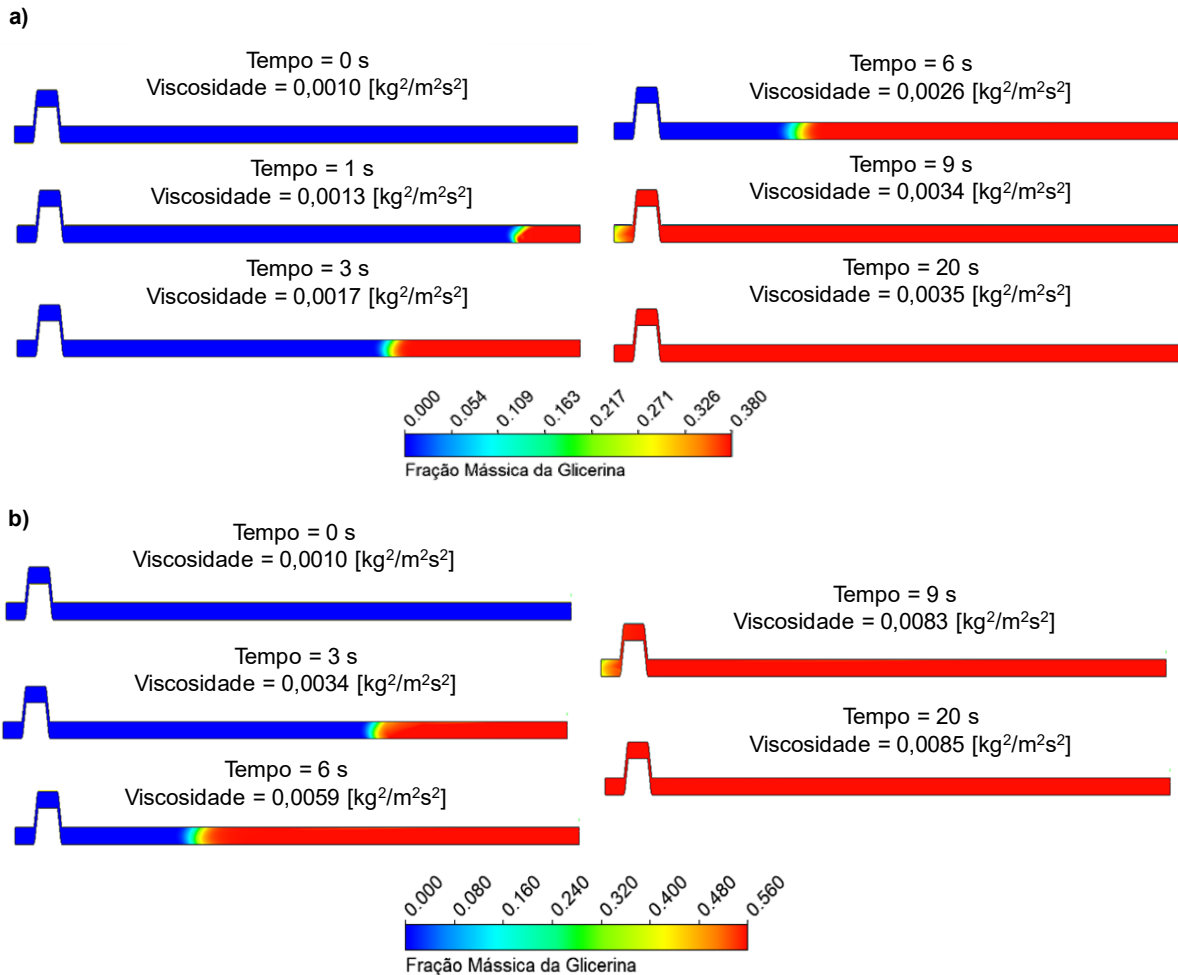
Figura 23. Formação da interface ao longo do escoamento para a velocidade de injeção da mistura água e glicerina de 0,5 m/s a) para a mistura de 3,5 cP e b) para a mistura de 8,5 cP.



Fonte: autoria própria.

Já para a velocidade de injeção de 1 m/s, o comportamento do escoamento mostrou-se turbulento e se deu em uma espécie de *plug*. No entanto, de acordo com estudo de Etrati; Alba; Frigaard (2018) apresentou características de deslocamento de fluidos miscíveis instável sem formação de interface definida, como pode ser visto na Figura 24.

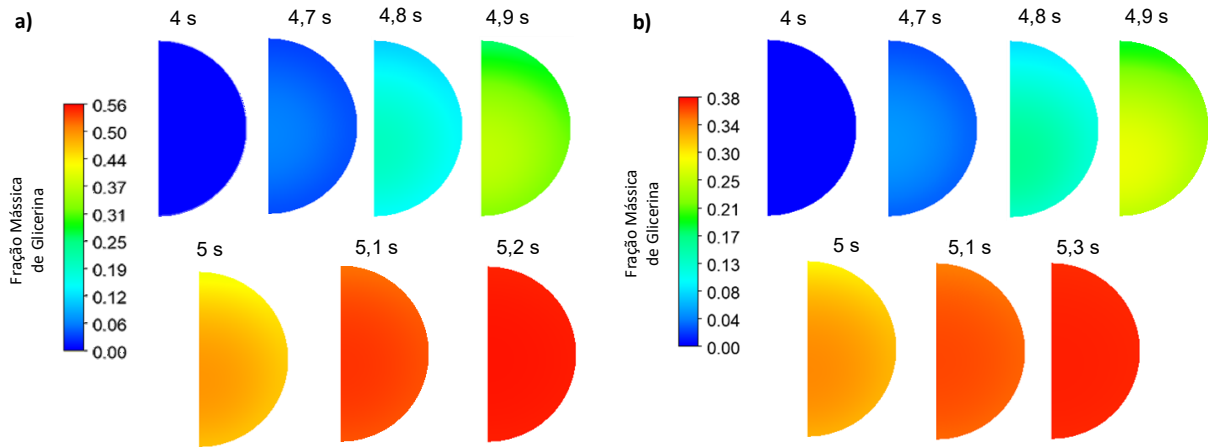
Figura 24. Desenvolvimento do escoamento com velocidade de injeção da mistura de 1 m/s a) para a mistura de 3,5 cP e b) para a mistura de 8,5 cP.



Fonte: autoria própria.

Para esta mesma velocidade de injeção da mistura deslocante, diferentemente da velocidade de 0,5 m/s que apresentou influência do efeito da difusão e uma interface estável em determinado tempo do escoamento, não há formação de interface durante o desenvolvimento do escoamento, como mostra a Figura 25. Neste caso fica evidente apenas o efeito da difusão no deslocamento de fluidos.

Figura 25. Efeito da difusão ao longo do escoamento para a velocidade de injeção da mistura de 1 m/s para a) mistura de 3,5 cP e b) mistura 8,5 cP.



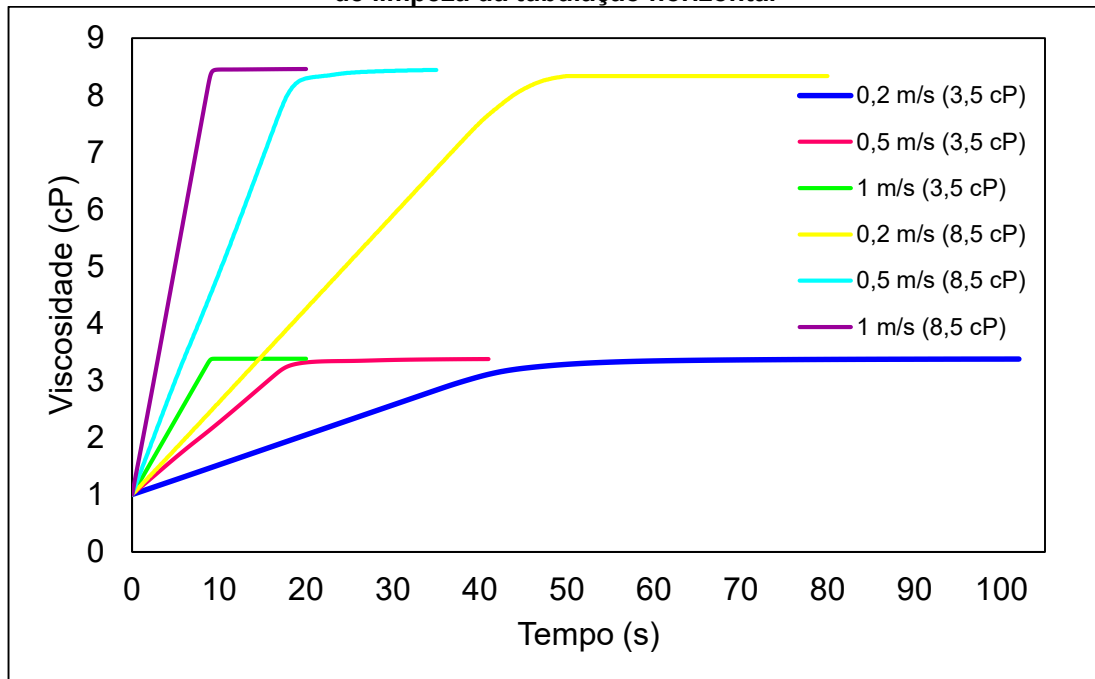
Fonte: autoria própria.

6.3 Influência dos parâmetros viscosidade e velocidade no tempo de limpeza da tubulação horizontal

O tempo de limpeza de uma tubulação foi relacionado com a viscosidade da mistura deslocante utilizada para deslocar a água da seção de teste. Segundo relatos de Leuchtenberger *et al.* (2021) que analisou a relação da viscosidade de óleo mineral com o tempo de limpeza da água em tubulações horizontais, os limites especificados de limpeza no segmento de saída foram atingidos mais rapidamente no cenário de alta viscosidade, tendo em vista que, possivelmente, houve uma mudança na dominância das forças que regem o escoamento (viscoso sobre flutuante). No entanto, o último valor especificado de limpeza demorou mais tempo para ser atingido com óleo de alta viscosidade devido a formação de uma fina película de óleo remanescente que apresentou atraso para ser varrido.

Além da relação com a viscosidade, a velocidade de injeção da mistura água e glicerina também interferiu no tempo de limpeza da tubulação. Ainda no estudo de Leuchtenberger *et al.* (2021), o aumento da velocidade de injeção da água diminuiu o tempo de limpeza da tubulação para ambas as viscosidades analisadas. Sendo assim, a partir da análise dos dados simulados neste estudo, ficou evidente que os resultados do tempo de limpeza relacionado viscosidade e a velocidade de injeção da mistura água e glicerina se mostraram de acordo com a literatura, como pode ser visto no gráfico da Figura 26.

Figura 26. Efeito da viscosidade e da velocidade de injeção da mistura água e óleo no tempo de limpeza da tubulação horizontal



Fonte: autoria própria.

De acordo com o gráfico da Figura 26, ficou evidente que a maior velocidade de injeção da mistura (1 m/s) com viscosidade 8,5 cP levou o menor tempo para limpeza da tubulação, o que já era esperado segundo a literatura. Em seguida, observou-se que mesmo tendo baixa viscosidade, a mistura com velocidade de 1 m/s limpou a tubulação mais rápido, indicando a predominância do efeito da velocidade. Sendo assim, os resultados obtidos através da simulação foram coerentes com a literatura.

7 CONCLUSÃO

A utilização do petróleo como matéria prima em diversos setores da sociedade tem se mostrado de grande importância para o setor energético e econômico. Por esse motivo, nos dias atuais, a indústria do petróleo passou a explorar novas tecnologias para garantir um desenvolvimento ainda maior do setor. Dessa forma, a utilização da fluidodinâmica computacional tornou-se uma ferramenta essencial neste ramo, já que através dela é possível prever e investigar fenômenos pouco estudados. Sendo assim, o presente estudo teve como objetivo investigar o deslocamento de fluidos miscíveis pelo *flushing* verificando as características do escoamento e comparando com a literatura. Além disso, também foi investigado as variáveis que influenciam no tempo de limpeza de uma tubulação horizontal. Ademais, o modelo de turbulência SST Gamma - Theta foi validado por meio da comparação dos dados experimentais com os dados retirados pela simulação.

Como resultado deste estudo de caso, ficou evidente que o modelo de turbulência SST Gamma - Theta conseguiu descrever o comportamento do escoamento de forma satisfatória, já que os dados retirados da simulação se mostraram de acordo com a literatura. Ademais, foi possível analisar o efeito da viscosidade e da velocidade no tempo de limpeza da tubulação horizontal. Dessa forma, concluiu-se que o aumento da velocidade provocou um aumento da turbulência o que promoveu de forma efetiva a limpeza da tubulação. Além disso, a alta viscosidade da mistura água e glicerina alterou a dominância das forças que regem o escoamento e, por isso, este cenário limpou a tubulação mais rapidamente. Todos os resultados obtidos relacionados ao tempo de limpeza também foram previstos na literatura.

Sendo assim, através do desenvolvimento do estudo de caso em questão ficou evidente a importância da utilização de ferramentas como a fluidodinâmica computacional para estudar fenômenos essenciais, como o *flushing*, presentes dentro da indústria do petróleo. Ademais, os resultados obtidos no estudo de caso mostraram-se satisfatórios, tendo em vista que foi possível comparar com dados retirados da literatura. Mesmo assim, o deslocamento de fluidos pelo *flushing* utilizando líquidos miscíveis ainda é pouco descrito na literatura, dessa forma, dentro

deste estudo caso, ainda cabem diversas análises úteis para descrever mais detalhadamente os fenômenos estudado.

7.1 Sugestão de trabalhos futuros

Como trabalho futuro sugere-se o refinamento da malha nas paredes visando obter um resultado melhor do que o observado neste estudo de caso. Além disso, sugere-se também análises do tamanho da frente de propagação e da velocidade na linha de centro com o objetivo de verificar se o modelo validado reproduziu as condições experimentais de forma correta.

REFERÊNCIAS

ABUBAKAR, A. *et al.* Effect of low interfacial tension on flow patterns, pressure gradients and holdups of medium-viscosity oil/water flow in horizontal pipe. **Experimental Thermal And Fluid Science**, v. 68, p. 58-67, nov. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2015.02.017>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0894177715000436>. Acesso em: 10 out. 2022.

ALFONSI, G. Reynolds-Averaged Navier–Stokes Equations for Turbulence Modeling. **Applied Mechanics Reviews**, v. 62, n. 4, p. 1-20, 4 jun. 2009. ASME International. <http://dx.doi.org/10.1115/1.3124648>. Disponível em: <https://asmedigitalcollection.asme.org/appliedmechanicsreviews/article-abstract/62/4/040802/443737/Reynolds-Averaged-Navier-Stokes-Equations-for?redirectedFrom=fulltext>. Acesso em: 10 set. 2022.

ANDERSON, J.D. Basic Philosophy of CFD. **Computational Fluid Dynamics**, p. 3-14, 2009. Springer Berlin Heidelberg. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-85056-4_1.

ANDERSON, J.D. Governing Equations of Fluid Dynamics. **Computational Fluid Dynamics**, p. 15-51, 2009. Springer Berlin Heidelberg. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-85056-4_2.

ANGELI, P., HEWITT, G. Pressure drop measurements in oil and water prewetted pipes, in: **Proceedings of the International Symposium on Liquid–Liquid Two-Phase Flow and Transport Phenomena**, Antalya, Turkey, 1997.

ANSYS ICEM CFD. Introduction to ANSYS ICEM CFD. 2021. Disponível em: https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v211/en/icm_user/iuser_intro.html. Acesso em: 30 ago. 2022.

ANSYS ICEM CFD. Introduction to ANSYS ICEM CFD. 2021. Disponível em: https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v211/en/icm_user/iuser_intro.html. Acesso em: 30 ago. 2022.

AZEVEDO, H. S. de. **Estudo Numérico e Experimental do escoamento Bifásico Líquido-Gás em um Rotor Centrífugo**. 2019. 214 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais (PPGEM), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

BERGMAN, T L., LAVINE, A. S. **Incropera - Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. Grupo GEN, 2019. E-book. 9788521636656. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521636656/>. Acesso em: 26 ago. 2022.

BLOTTNER, F.G., Chemical Nonequilibrium Boundary Layer, **AIAA Journal**, Vol. 2, No. 2, Feb. 1964, pp. 232–239.

British Petroleum Statistical Review of World Energy. **Report 2011**. 60º Edição. Disponível em: <http://large.stanford.edu/courses/2011/ph240/goldenstein1/docs/bp2011.pdf>. Acesso em: 02 ago. 2022.

British Petroleum Statistical Review of World Energy. **Report 2022**. 71º Edição. Disponível em: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf>. Acesso em: 02 ago. 2022.

RODRIGUES, C. C. **Estudo numérico e experimental do escoamento bifásico líquido-gás em um distribuidor**. 2019. 164 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2019. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/4851/3/CT_PPGEM_M_Rodrigues%20c%20Carolina%20Cimarelli_2019.pdf. Acesso em: 02 nov. 2022.

CAGNEY, T.; HARE, S.; SVEDEMAN, S. J. Hydrate Inhibition of Subsea Jumpers During Shut-in. In: SPE ANNUAL TECHNICAL CONFERENCE AND EXHIBITION., 2006, San Antonio, Texas. **Conferência**. San Antonio, Texas, 2006. p. 1-11. Disponível em: <https://onepetro.org/SPEATCE/proceedings-abstract/06ATCE/All-06ATCE/SPE-102330-MS/139806>. Acesso em: 09 ago. 2022.

CHENG, N. S. Formula for the Viscosity of a Glycerol-Water Mixture. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 47, n. 9, p. 3285-3288, 21 mar. 2008. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/ie071349z>. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ie071349z>. Acesso em: 31 ago. 2022.

COSTA, J A da Silva. **Exploração de petróleo: Perfurações marítimas e os impactos ambientais provenientes**. 2018. 55 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro Universitário do Sul de Minas, Varginha, 2018. Disponível em: <http://repositorio.unis.edu.br/bitstream/prefix/594/1/MONOGRAFIA%202018%20JONATHAN.pdf>. Acesso em: 03 ago. 2022.

DELLECASE, E., et al., Hydrate Inhibitor Displacement Experiments in Jumper-Like Pipe Configurations in 16th **International Conference on Multiphase Production Technology 2013**, BHR Group: Cannes. Disponível em: <https://onepetro.org/BHRICMPT/proceedings-abstract/BHR13/All-BHR13/BHR-2013-D1/234>. Acesso em: 03 ago. 2022.

ELLISON, D. **Investigation of pipe cleaning methods**. Denver: Awwa Research Foundation And American Water Works Association, 2003

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Matriz Energética e Elétrica**. 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica#ENERGETICA>. Acesso em: 02 ago. 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Decimal de Expansão de Energia para 2026**. 2022. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-40/topico-77/Cap11_Texto.pdf. Acesso em: 02 ago. 2022.

EJEH, C. J *et al.* Computational fluid dynamic analysis for investigating the influence of pipe curvature on erosion rate prediction during crude oil production. **Experimental And Computational Multiphase Flow**, v. 2, n. 4, p. 255-272, 4 jan. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s42757-019-0055-5>. Disponível em: Computational fluid dynamic analysis for investigating the influence of pipe curvature on erosion rate prediction during crude oil production. Acesso em: 07 ago. 2022.

ETRATI, A.; ALBA, K.; FRIGAARD, I. A. Two-layer displacement flow of miscible fluids with viscosity ratio: experiments. **Physics Of Fluids**, v. 30, n. 5, p. 052103, maio 2018. AIP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1063/1.5026639>. Disponível em: <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.5026639>. Acesso em: 10 out. 2022.

FARAH, M. A. **O Petróleo e seus Derivados**. Grupo GEN, 2012. 978-85-216-2151-5. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/978-85-216-2151-5/>. Acesso em: 02 ago. 2022.

FAY, J.A., RIDDELL, F.R., Theory of Stagnation Point Heat Transfer in Dissociated Air, **Journal of the Aeronautical Sciences**, Vol. 25, No. 2, Feb. 1958, pp. 73–85.

FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, Philip J.; MICHELL, John W. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**, 9ª edição. Grupo GEN, 2018. E-book. 9788521635000. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521635000/>. Acesso em: 31 ago. 2022.

GAUTO, M. A. *et al.* **Petróleo e gás: princípios de exploração, produção e refino (Tekne)**. Grupo A, 2016. 9788582604021. E-book. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788582604021/>. Acesso em: 03 ago. 2022.

GRAVES, R.A., Computational Fluid Dynamics: The Coming Revolution. **Astronautics and Aeronautics**, Vol. 20, No. 3, March 1982, pp. 20–28

GUO, B. *et al.* **Offshore pipelines**. Elsevier, 2005

KAUSHAL, P; SHARMA, HK. Concept of Computational Fluid Dynamics (CFD) and its Applications in Food Processing Equipment Design. **Journal Food Process Technology**. Doi:10.4172/2157-7110.1000138. Disponível em: <https://www.walshmedicalmedia.com/open-access/concept-of-computational-fluid-dynamics-cfd-and-its-applications-in-food-processing-equipment-design-32365.html&cd=3&hl=pt-BR&ct=clnk&gl=br>. Acesso em: 04 ago. 2022

KOPAL, Z., **Tables of Supersonic Flow Around Cones**, Depart of Electrical Engineering, Center of Analysis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 1947.

LANGTRY, R. B.; MENTER, F. R. Transition Modeling for General CFD Applications in Aeronautics. **Aiaa Aerospace Sciences Meeting And Exhibit**, Nevada, v. 13, n. 10, p. 1-14, jan. 2005. Disponível em: <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2005-522>. Acesso em: 02 set. 2022.

LAUNDER, B. E.; SPALDING, D. B. The numerical computational of turbulent flows. **Computer Methods In Applied Mechanics And Engineering**, Londres, v. 3, p. 269-288, ago. 1973. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0045782574900292>. Acesso em: 31 ago. 2022.

LEUCHTENBERGER, R. F. *et al.* Experimental Analysis of Water/Oil Displacement Tests in Horizontal Pipe. **Spe Journal**, v. 26, n. 05, p. 2993-3010, 16 mar. 2021. Society of Petroleum Engineers (SPE). <http://dx.doi.org/10.2118/205356-pa>. Disponível em: <https://onepetro.org/SJ/article-abstract/26/05/2993/460815/Experimental-Analysis-of-Water-Oil-Displacement?redirectedFrom=fulltext>. Acesso em: 03 ago. 2022

LIGHTFOOT, N. R.; BIRD, R B.; STEWART, W. E. **Fenômenos de Transporte**, 2ª edição. Grupo GEN, 2004. E-book. 978-85-216-1923-9. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/978-85-216-1923-9/>. Acesso em: 31 ago. 2022.

MENTER, F. R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications. **AIA A Journal**, v. 32, n. 8, p. 1598-1605, ago. 1994. Disponível em: <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/3.12149>. Acesso em: 02 set. 2022.

MENTER, F.R. *et al.* A CORRELATION-BASED TRANSITION MODEL USING LOCAL VARIABLES PART I – MODEL FORMULATION. **Proceedings Of Asme Turbo Expo**, Vienna, p. 1-11, jun. 2004. Disponível em: <https://asmedigitalcollection.asme.org/turbomachinery/article-abstract/doi/10.1115/1.2184352/476594/A-Correlation-Based-Transition-Model-Using-Local?redirectedFrom=fulltext>. Acesso em: 10 set. 2022.

NASCIMENTO, B. N. do; RAMLI, M. Composite Abrasive Technology: A Key Part of New Sustainable Commissioning & Process. In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE-ASIA., 2014, Kuala Lumpur. **Conferência**. Kuala Lumpur, 2014. p. 1-13. Disponível em: <https://onepetro.org/OTCASIA/proceedings-abstract/14OTCA/All-14OTCA/OTC-24987-MS/173195>. Acesso em: 08 ago. 2022

PETROBRAS. **Exploração e Produção de Petróleo e Gás**. 2022. Disponível em: <https://petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/areas-de-atuacao/exploracao-e-producao-de-petroleo-e-gas/>. Acesso em: 03 ago. 2022.

SANTOS, R G., **Avaliação da molhabilidade de superfícies de oleodutos através de medidas de ângulo de contato: Efeito de asfaltenos e de ácidos naftênicos.** Dissertação (Mestrado), São Paulo, 105p. 2003.

SCHALDACH, G. et al. Computer simulation for fundamental studies and optimisation of ICP spray chambers. **ISAS (Institute of Spectrochemistry and Applied Spectroscopy) Current Research Reports, Berlin, Germany, 2000.**

SCHUMANN, H. *et al.* Liquid-Liquid Displacement in a Horizontal and Inclined Pipe Section. In: 9TH NORTH AMERICAN CONFERENCE ON MULTIPHASE TECHNOLOGY, 9., 2014, Canadá. **Conferência.** Canadá, 2014. p. 1-12. Disponível em: <https://onepetro.org/BHRNACMT/proceedings-abstract/BHR14/All-BHR14/BHR-2014-A1/258>. Acesso em: 07 ago. 2022.

SEGUR, J. B.; OBERSTAR, H. E. Viscosity of glycerol and its aqueous solutions. *Ind. Eng. Chem.* **1951**, 43 (9), 2117-2120.

SIRINGI, D. O.; HOME, P. G.; KOEHN, E. Cleaning Methods for Pipeline Renewals. **International Journal Of Engineering And Technical Research**, v. 2, n. 9, p. 44-47, set. 2014. Disponível em: https://www.erpublication.org/published_paper/IJETR022421.pdf. Acesso em: 09 ago. 2022.

SONG, *et al.* Studies on water carrying of diesel oil in upward inclined pipes with different inclination angle. **Journal Of Petroleum Science And Engineering**, v. 157, p. 780-792, ago. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.petrol.2017.07.076>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0920410517306265>. Acesso em: 09 ago. 2022.

SOUZA, R. M. **O método dos elementos finitos aplicados ao problema de condução de calor.** Apostila da Universidade Federal do Pará do Centro Tecnológico do Departamento de Engenharia Civil – Núcleo de Instrumentação e Computação Aplicada à Engenharia. Belém. Maio, 2003.

TAYLOR, G.I., MACCOLL, J.W., The Air Pressure on a Cone Moving at High Speed, **Proceedings of the Royal Society (A)**, Vol. 139, 1933, p. 278

TERRON, L. R. **Propriedades dos Fluidos Derivados de Petróleo.** Grupo GEN, 2017. 9788521634089. E-book. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521634089/>. Acesso em: 03 ago. 2022.

XIA, B.; SUN, D-W. Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the food industry: a review. **Computers And Electronics In Agriculture**, p. 5-24, jan. 2002. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168169901001776>. Acesso em: 03 ago. 2022

XU, G. L. *et al.* Trapped water displacement from low sections of oil pipelines. **International Journal Of Multiphase Flow**, v. 37, n. 1, p. 1-11, jan. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2010.09.003>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301932210001485>. Acesso em: 09 ago. 2022.

YAKHOT, V. *et al.* Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique. **Physics Of Fluids A: Fluid Dynamics**, v. 4, n. 7, p. 1510-1520, jul. 1992. AIP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1063/1.858424>. Disponível em: <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.858424>. Acesso em: 10 set. 2022.

YEO, L. *et al.* Optimization of hole cleaning in horizontal and inclined wellbores: a study with computational fluid dynamics. **Journal Of Petroleum Science And Engineering**, v. 205, p. 108993, out. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.petrol.2021.108993>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0920410521006525>. Acesso em: 09 ago. 2022.

ZHENG, J. *et al.* CFD simulation and experimental study of water-oil displacement flow in an inclined pipe. **International Journal Of Heat And Technology**, v. 35, n. 3, p. 663-667, 30 set. 2017. International Information and Engineering Technology Association. <http://dx.doi.org/10.18280/ijht.350326>. Disponível em: <https://www.iieta.org/journals/ijht/paper/10.18280/ijht.350326>. Acesso em: 03 ago. 2022

ANEXO A - Código computacional para o cálculo da viscosidade em *Python*

Código escrito em *Python* baseado em no Código Original em MatLab desenvolvido por Chris Westbrook, disponível em: http://www.met.reading.ac.uk/~sws04cdw/viscosity_calc.html

```
#!/usr/bin/env python3

"Glycerol_calculator.py"
__author__ = "Matthew Partridge"
__license__ = "GPL"
__version__ = "1.0"
__credits__ = "Chris Westbrook"

#Required packages -----
import numpy
import math

#Variables -----
T = 20          #temperature (degrees Celsius)
waterVol = 3    #volume of water required (ml)
glycerolVol = 0.75 #volume of glycerol used (ml)

#Densities -----
glycerolDen = (1273.3-0.6121*T)/1000          #Density of glycerol (g/cm3)
waterDen = (1-math.pow(((abs(T-4))/622),1.7)) #Density of water (g/cm3)

#Fraction calculator -----
glycerolMass=glycerolDen*glycerolVol
waterMass=waterDen*waterVol
totalMass=glycerolMass+waterMass
mass_fraction=glycerolMass/totalMass
vol_fraction= glycerolVol/(glycerolVol+waterVol)

print ("Mass fraction of mixture =", round(mass_fraction,5))
print ("Volume fraction of mixture =", round(vol_fraction,5))

#Density calculator -----

##Andreas Volk polynomial method
contraction_av = 1-math.pow(3.520E-8*((mass_fraction*100)),3)+math.pow(1.027E-6*((mass_fraction*100)),2)+2.5E-4*(mass_fraction*100)-1.691E-4
contraction = 1+contraction_av/100

## Distorted sine approximation method
```



```

#contraction_pc =
1.1*math.pow(math.sin(numpy.radians(math.pow(mass_fraction,1.3)*180)),0.85)

#contraction = 1 + contraction_pc/100
density_mix=(glycerolDen*vol_fraction+waterDen*(1-vol_fraction))*contraction
print ("Density of mixture =",round(density_mix,5),"g/cm3")

#Viscosity calculator -----
glycerolVisc=0.001*12100*numpy.exp((-1233+T)*T/(9900+70*T))
waterVisc=0.001*1.790*numpy.exp((-1230-T)*T/(36100+360*T))
a=0.705-0.0017*T
b=(4.9+0.036*T)*numpy.power(a,2.5)
alpha=1-mass_fraction+(a*b*mass_fraction*(1-
mass_fraction))/(a*mass_fraction+b*(1-mass_fraction))
A=numpy.log(waterVisc/glycerolVisc)
viscosity_mix=glycerolVisc*numpy.exp(A*alpha)
print ("Viscosity of mxiture =",round(viscosity_mix,5), "Ns/m2")

```