

RELATÓRIO FINAL DE ATIVIDADES DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA

Simulação Numérica do Escoamento Bifásico Ar-Água Horizontal

vinculado ao projeto

Estudo do Escoamento Bifásico Isotérmico Horizontal

Kauê Almeida da Cruz

Voluntário

Engenharia Mecânica

Data de Ingresso no Programa: 08/2023

Prof. Dr. Fabio Kenji Suguimoto

Área do Conhecimento: 3.05.01.02-4

CAMPUS CORNÉLIO PROCÓPIO, 2024

**KAUÊ ALMEIDA DA CRUZ
FABIO KENJI SUGUIMOTO**

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO ESCOAMENTO BIFÁSICO AR-ÁGUA HORIZONTAL

Relatório de Pesquisa do Programa de Iniciação Científica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

CORNÉLIO PROCÓPIO, 2024

SUMÁRIO

RESUMO	3
INTRODUÇÃO	3
MATERIAL E MÉTODOS	4
Padrões de escoamento.	4
Modelo matemático.	6
Modelo VOF	6
Modelo Euleriano.	7
Modelo de turbulência.	7
Modelo de tensão superficial.	8
Geração de malha.	9
Critério de estabilidade	9
Métodos de Solução	10
Dados experimentais.	10
RESULTADOS E DISCUSSÃO	10
CONCLUSÕES	13
AGRADECIMENTOS	13
REFERÊNCIAS	14

RESUMO

Os escoamentos bifásicos desempenham um papel crucial na indústria do petróleo, pois estão presentes no transporte de petróleo bruto e gás natural. Isso torna a análise desses escoamentos fundamental para otimizar e reduzir os custos dos processos de extração. No escoamento bifásico, dois parâmetros importantes são a fração de vazio e os padrões de escoamento. A fração de vazio representa a relação entre o volume ocupado pelo gás e o volume total, enquanto os padrões de escoamento resultam das deformações na interface dos fluidos. Os padrões mais comuns em escoamentos horizontais incluem: Estratificado, Ondulado, Slug, Plug, Anular, Disperso e Bolhas. Este estudo tem como objetivo determinar as frações de vazio, a perda de carga e os padrões de escoamento em uma tubulação horizontal de 2 metros de comprimento e 26 mm de diâmetro, com injeção de água e ar, utilizando o software Ansys Fluent. Serão realizadas duas análises: uma com o modelo Volume de Fluido (VOF) e outra com o modelo Euleriano, e posteriormente, os resultados dos dois modelos serão comparados. Os parâmetros de entrada considerados na simulação incluem a velocidade dos fluidos, a pressão e a temperatura. Os resultados obtidos, assim como o tempo de processamento, serão comparados entre os dois modelos e confrontados com dados experimentais disponíveis na literatura. Espera-se que o modelo VOF forneça, além da perda de carga e fração de vazio, os padrões de escoamento, enquanto o modelo Euleriano deve apresentar apenas a perda de carga e a fração de vazio. Com um refinamento adequado da malha, os resultados devem se aproximar dos dados da literatura.

Palavras-chave: CFD ; escoamento bifásico; escoamento ar-água; VOF; Euleriano.

INTRODUÇÃO

Escoamento bífase é fenômeno onde duas fases fluem juntas, frequentemente encontrado nas indústrias como petrolífera e nuclear. Devido as interações entre as fases e com as paredes da tubulação a formação de padrões de escoamento como estratificado, lesma bolhas alongadas. Tais padrões geram perda de carga e possíveis problemas de operação dependendo da classificação do padrão [1].

Uma vez com a necessidade de previsão do comportamento das fase e com a complexidade dos cálculos, foram essenciais o uso de simulação numérica para escoamentos de fluidos chamados de Dinâmica dos Fluidos Computacional CFD. Dentro desse campo possui dois principais modelos para análise de interfaces, modelo Euleriano e modelo Volume de Fluido (VOF) [2]. Neste estudo foi proposto a utilização do modelo VOF para analisar a fração de vazio de um escoamento horizontal água-ar e a utilização do software comercial de simulação numérica Ansys Fluent [3].

MATERIAL E MÉTODOS

No escoamento bifásico, quando as fases fluem juntas provocam deformações nas interfaces, essas deformações dão a existência a uma variedade de padrões de escoamento. Eles se formam dependendo das variáveis como : vazão das fases, diâmetro do tubo, densidades, viscosidade e tensão superficial. Neste tópico será abordado os padrões de escoamento e suas explicações para escoamento em tubo horizontal também será apresentado as formulações do modelo Euleriano e VOF.

Padrões de escoamento. Os padrões de escoamento gás-líquido em tubos horizontal podem ser encontrados em [4] e a figura 1 mostra a representação características de cada padrão:

- **Estratificado-Suave** - este padrão é separado por gravidade devido as baixas velocidades, a fase da água por ter densidade alta em comparação ao ar fica na parte inferior do tubo.
- **Estratificado-Ondulado** - esse fluxo é semelhante ao suave entretanto o que diferencia são velocidades de ar mais altas que dão melhores formas as ondas.
- **Bolha Alongada** - é caracterizado por variações de grandes volumes de líquido e depois gás. Essas variações geram bolhas de ar com uma fina camada de água na forma estratificada em baixo delas.
- **Lesma** - é parecido com alongada entretanto pela velocidade do gás ser maior à surgimento de redemoinhos e bolhas dispersas de gás na parte da frente da lesma.
- **Anular** - é formado quando tem um fluxo muito grande de ar no centro da tubulação e com finas camadas de líquido paredes.
- **Anular Ondulado** - é próximo ao fluxo anular, porém com velocidades de ar mais baixas, fazendo com que maior parte do líquido se acumule no fundo do tubo. Entretanto ondas inesperadas podem chegar a parte superior e fazendo uma fina camada de água.
- **Bolha Dispersas** - neste padrão a fase do gás é distribuída na forma de pequenas bolhas dentro de um fluxo de água com altas velocidades.

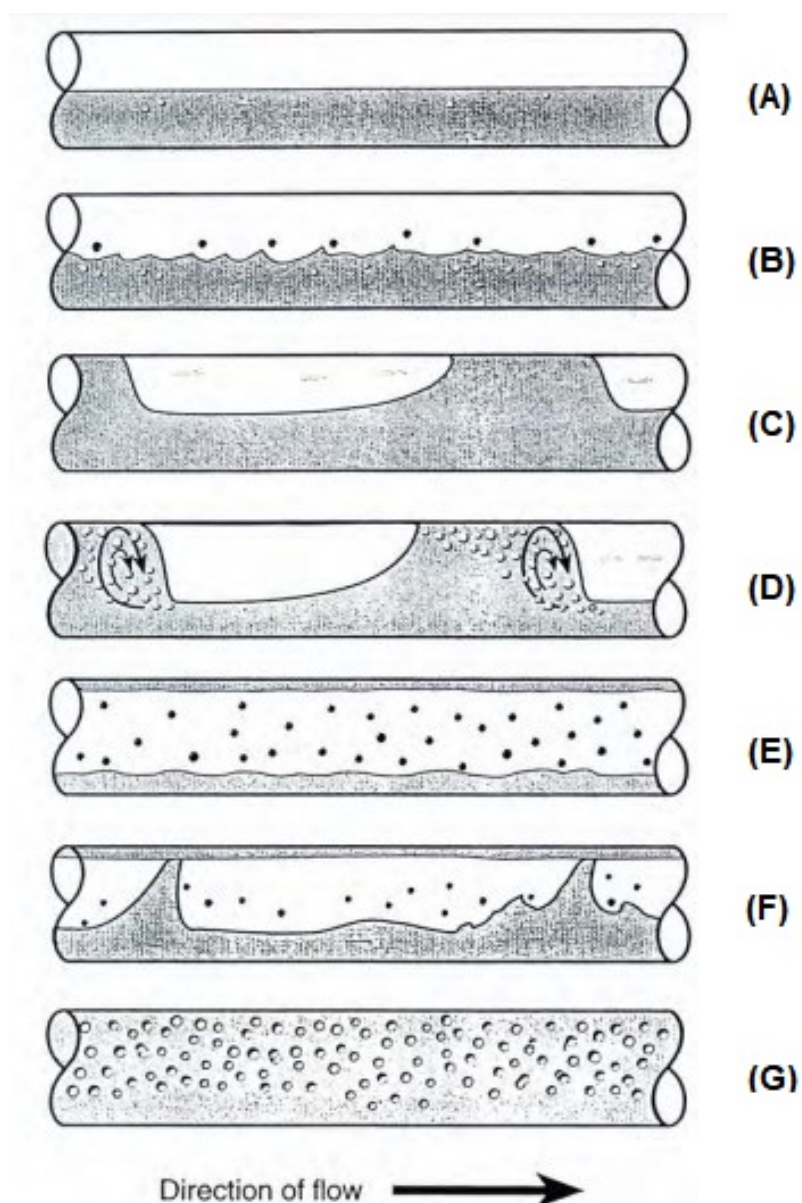


Figura 1. Padrões de escoamento em tubos horizontais
 (A) - Estratificado Suave (B) - Estratificado Ondulado (C) - Bolha Alongada (D) - Lesma
 (E) - Anular (F) - Anular Ondulado (G) - Bolhas Dispersas
 Fonte: [4]

O estudo dos padrões de escoamento visa otimizar os equipamentos, prevenindo grandes variações de pressão, bloqueios e a formação de bolhas indesejadas. Para descrever os padrões em escoamentos bifásicos, foram desenvolvidos mapas de regimes de escoamento, baseados em observações de ensaios experimentais em laboratório. Um dos mapas mais frequentemente utilizados é o de Mandhane et al. (1974), conforme mencionado em [3], na figura 2 mostra o mapa de padrões de Mandhane et al. (1974) adaptado.

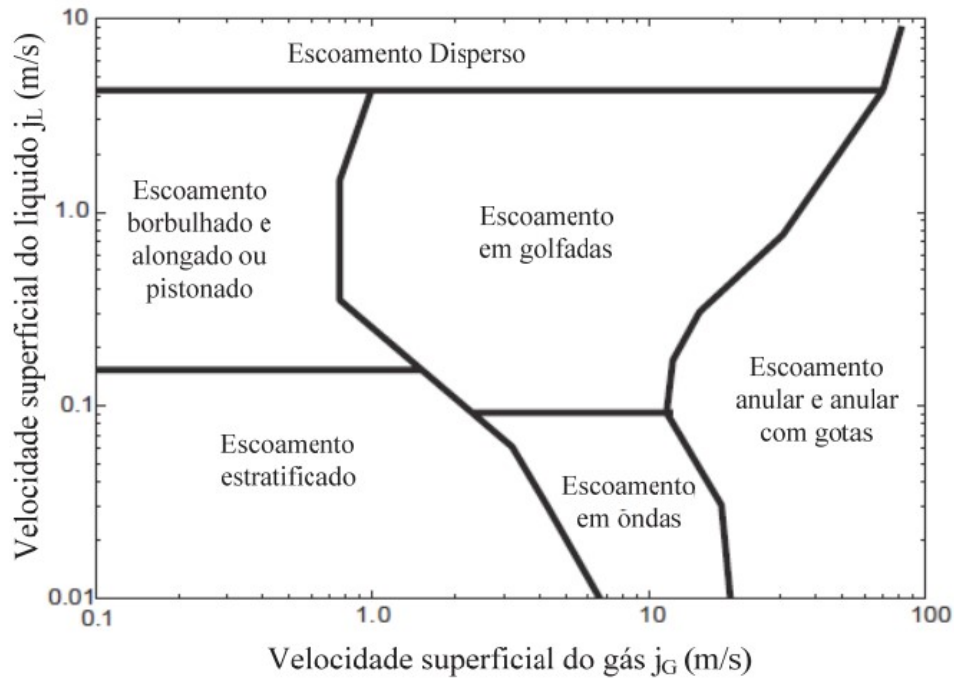


Figura 2. Mapa de Padrões

Fonte: [3]

Modelo matemático. A formulação para escoamento bifásico gás-liquido faz necessário a utilização das equação de transporte de massa, momento e calor [2]. Como [1] será adotado tubulação isotermicas neste estudo, então os modelos Euleriano e VOF utilizaram transporte de massa e momento.

Modelo VOF. O modelo volume de fluido (VOF) é uma técnica que consiste em analisar as interfaces de fluidos imiscíveis. Dessa forma o VOF captura as frações volumétricas de cada fase dentro do volume de controle, a soma das frações de todas as fases é igual à unidade, ou seja, igual 1. O conjunto de equações de momento e continuidade são resolvidos para todas as fases [5].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}) + \nabla \cdot (\rho \bar{u} \bar{u}) = -\nabla P + \rho g + \nabla(\tau + \tau^t) \quad (2)$$

Sendo (P) pressão, (g) a gravidade, (μ) a velocidade superficial, (τ) a tensão molecular e (τ^t) a tensão de turbulência. A (ρ) densidade e (μ) viscosidade da equação de momento (2) são calculadas em função da fração de volume como as equação (3) e (4):

$$\rho = \alpha_2 \rho_2 + (1 - \alpha_2) \rho_1 \quad (3)$$

$$\mu = \alpha_2 \mu_2 + (1 - \alpha_2) \mu_1 \quad (4)$$

Sendo os índices as fases da água e ar e α fração de vazio.

Para resolver as interfaces entre as fases adiciona no modelo VOF a equação da continuidade em função da fração de volume, não precisando conhecer o tamanho da bolha de gás [2].

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \bar{u} \nabla \alpha = 0 \quad (5)$$

Sendo as fases $\alpha = 0$ água e $\alpha = 1$ ar.

Modelo Euleriano. O modelo Euleriano consiste em resolver as equações de momento e continuidade para cada fase separadamente. O acoplamento é feito por uma única pressão entre as fases [6].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_i \rho_i) + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i \bar{u}_i) = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_i \rho_i \bar{u}_i) + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i \bar{u}_i \bar{u}_i) = -\alpha_i \nabla P + \alpha_i g + \nabla [\alpha_i (\tau_i + \tau_i^t) + M_i] \quad (7)$$

Sendo (P) pressão, (g) a gravidade, (α) fração de vazio, (μ) a velocidade superficial, (τ) a tensão molecular e (τ^t) a tensão de turbulência. A (ρ) densidade e (M) é a transferência de momento na interface. Entretanto é necessário uma equação adicional:

$$\sum M_i = 0 \quad (8)$$

Modelo de turbulência. O Modelo SST k-omega (Shear Stress Transport) é um modelo de turbulência comumente utilizado por capturar a transição suave entre o modelo k-omega padrão perto da parede e k-epsilon longe dela, assim unindo o melhor de ambas as famílias Reynolds-averaged Navier Stokes RANS. Sendo utilizada aplicada [7]

O modelo de viscosidade turbulenta possui duas equações k e omega, sendo k a equação da energia cinética e omega a taxa de dissipação

$$\frac{D\rho k}{Dt} = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} [(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j}] \quad (9)$$

$$\frac{D\rho \omega}{Dt} = \frac{\gamma \rho}{\mu t} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} [(\mu + \alpha_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j}] + 2(1 - F_1) \frac{\rho \alpha_\omega^2}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (10)$$

Onde F_1 é função de mistura, que pode ser determinada:

$$F_1 = \tanh(\arg_1^4) \quad (11)$$

$$\arg_1 = \min[\max(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega}), \frac{4\rho\sigma_{\omega} k}{CD_{k\omega} y^2}] \quad (12)$$

Sendo y a distância até a superfície mais próxima e $CD_{k\omega}$ é a representando positiva do termo difusivo da equação (10):

$$CD_{k\omega} = \max(2\rho\sigma_{\omega} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-20}) \quad (13)$$

Sendo viscosidade turbulenta μ_t :

$$\mu_t = \frac{\rho \alpha_1 k}{\max(\alpha_1 \omega, \Omega F_2)} \quad (14)$$

Sendo Ω valor absoluto da vorticidade e F_2 função de mistura:

$$F_2 = \tanh(\arg_2^2) \quad (15)$$

$$\arg_2 = \max(\frac{2\sqrt{k}}{\beta * \omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega}) \quad (16)$$

Modelo de tensão superficial. O modelo CFS (continuum surface force) é formulado para modelar os efeitos de tensão superficial nas interfaces dos fluidos dentro da célula, é utilizado junto ao modelo VOF adicionado junto a equação de momento, proposto por [8]:

$$F_{vol} = \sigma_{ij} \frac{\rho k_i \nabla \alpha_i}{\frac{1}{2}(\rho_i + \rho_j)} \quad (17)$$

Sendo (σ) o coeficiente de tensão superficial e (k) a curvatura, onde a curvatura é definida por:

$$k = \nabla \cdot \hat{n} \quad (18)$$

$$\hat{n} = \frac{n}{|n|} \quad (19)$$

$$n = \nabla \alpha_q \quad (20)$$

$$k_i = -k_j \quad (21)$$

$$\nabla \alpha_i = -\nabla \alpha_j \quad (22)$$

Sendo \hat{n} a normal da superfície, definida como o gradiente de fração de volume da

q-ésima fase, α_q [Ansys FLuent Users Guide, 2017].

Geração de malha. O método de solução CFD possui a necessidade de uma malha para resolver as equações diferenciais parciais dos modelos apresentados anteriormente, sendo a malha a geometria da tubulação dividida diversos volumes de controle. Assim existe diversos arranjos para dividir a geometria da tubulação, no entanto parâmetros como convergência, exatidão e velocidade de solução são estabelecidos para escolha da malha para o caso estudado [2]. Sendo assim foi escolhida uma geometria 2D, como junção em T dividida com elementos triangulares e a seção retangular com elementos quadrilátero, utilizado por [7]. As dimensões da tubulação são diâmetro de 26 mm (aproximadamente 1 polegada) e comprimento aproximadamente 60D que é a distância para que o padrão lesma se torne constante segundo [9]. Para o domínio 2D foram modeladas três condições de contorno: duas entradas com condição de velocidade de entrada, uma saída com condição de pressão de saída, nas paredes condição de não deslizamento com refinamento maior próximo as paredes para melhor captura nessa região.

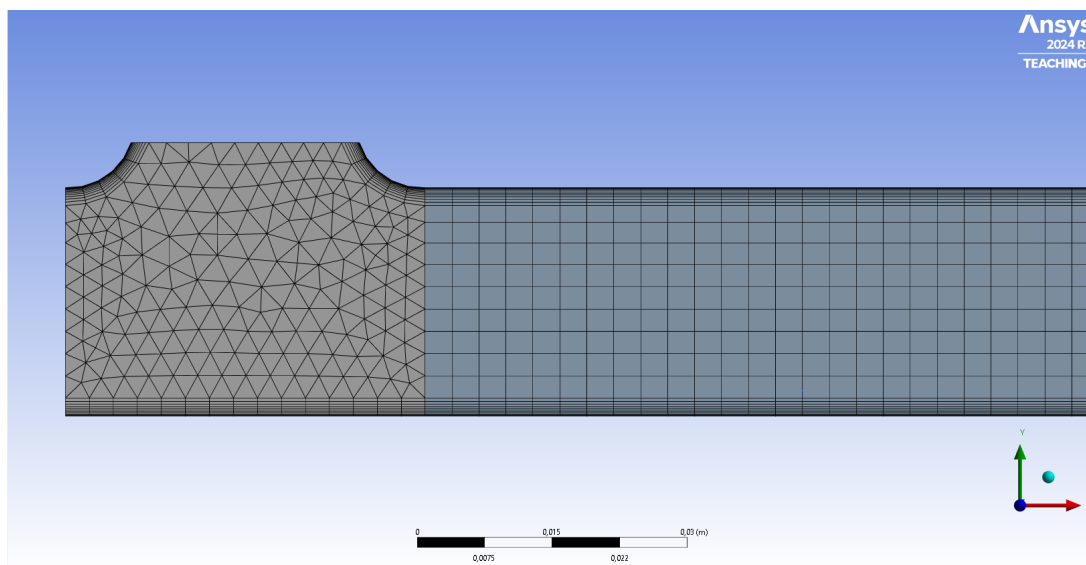


Figura 3. Malha 2D do Tubo

Fonte: Autoria Própria

Critério de estabilidade. Para garantir a estabilidade da simulação, foi utilizado o critério CFL. Como o regime é transiente e o avanço das iterações depende do passo de tempo, o CFL foi empregado para calcular o passo de tempo em cada caso simulado.

$$C = u_G \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (23)$$

Sendo as variáveis C o número de Courant e seu valor é fornecido pelo software (padrão

$C=0,25$), Δt passo de tempo e Δ_G tamanho da célula. Já u_G é a velocidade total do gás, que pode ser determinada pelo modelo Drift-flux, utilizado por [2] e [1].

$$u_G = (1,2 + \frac{0,8}{1 + 10e^{-8} Re_s^{2,55}}) u_M + 0,35 \sqrt{gD} \quad (24)$$

A variável D é o diâmetro do tubo, g é a gravidade e Re é o número de Reynolds da fase líquida é:

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (25)$$

E onde ρ densidade da água, v velocidade superficial da água, μ viscosidade da água u_M velocidade de mistura:

$$u_M = u_l + u_g \quad (26)$$

Sendo u_l velocidade superficial da fase líquida e u_g velocidade superficial da fase gasosa.

Métodos de Solução. O Ansys-Fluent utiliza a discretização baseado em células centradas para resolver as equações diferenciais parciais acopladas não lineares de alta ordem. Foi aplicado um solver baseado em pressão com modelo de turbulência SST e formulação implícita que resolve as equações a cada iteração. O acoplamento pressão-velocidade foi resolvido usando o método PISO conforme recomendado por [Ansys FLuent Users Guide, 2017] para escoamento transiente, enquanto um esquema implícito de primeira ordem foi adotado para as derivadas temporais e esquemas de segunda ordem para as equações de momento. No caso, o efeito da gravidade foi considerado para $y = -9,81 \text{ m/s}^2$, e o modelo VOF foi empregado para simular o fluxo bifásico gás-líquido. O modelo de turbulência $k - \omega$ SST foi utilizado, juntamente com o esquema de segunda ordem upwind para calcular a energia cinética turbulenta e o momento. A tensão superficial foi modelada com valores de 0,072 N/m como é utilizado por [10] e [11].

Dados experimentais. Com o objetivo simular e validar, foi utilizados os resultados experimentais adquiridos por [3]. As condições de operação, velocidades superficiais da água e ar, fração de vazio α e padrão de escoamento. Mostrados na tabela 1.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A tabela 2 mostra os dados gerados pela simulação em duas malhas com refinamentos diferentes com tamanho da célula, quantidade de elementos, passo de tempo

Caso	Jg (m/s)	Jl (m/s)	(α)	Pressão Ambiente (Pa)	Padrão de Escoamento
1	0,055	0,942	0,523	101000	Estratificado

Tabela 1. Dados experimentais

Fonte: [3]

(time step) e frações de vazio coletadas de cada uma.

Malha	Tamanho da Célula	Elementos	Time Step	α
Malha 1	0,005	11375	0,0009	0,5761
Malha 2	0,004	14547	0,0007	0,5777

Tabela 2. Dados gerados da Simulação

Fonte: Autoria Própria

No gráfico da figura 4 pode ser vista a comparação visual das fração de vazio de cada malhas, sendo possível ver que a partir de 6,5 s de escoamento as variações entre as malhas são insignificante. Para tabela 2 e os cálculos de erros são utilizado os dados deste ponto.

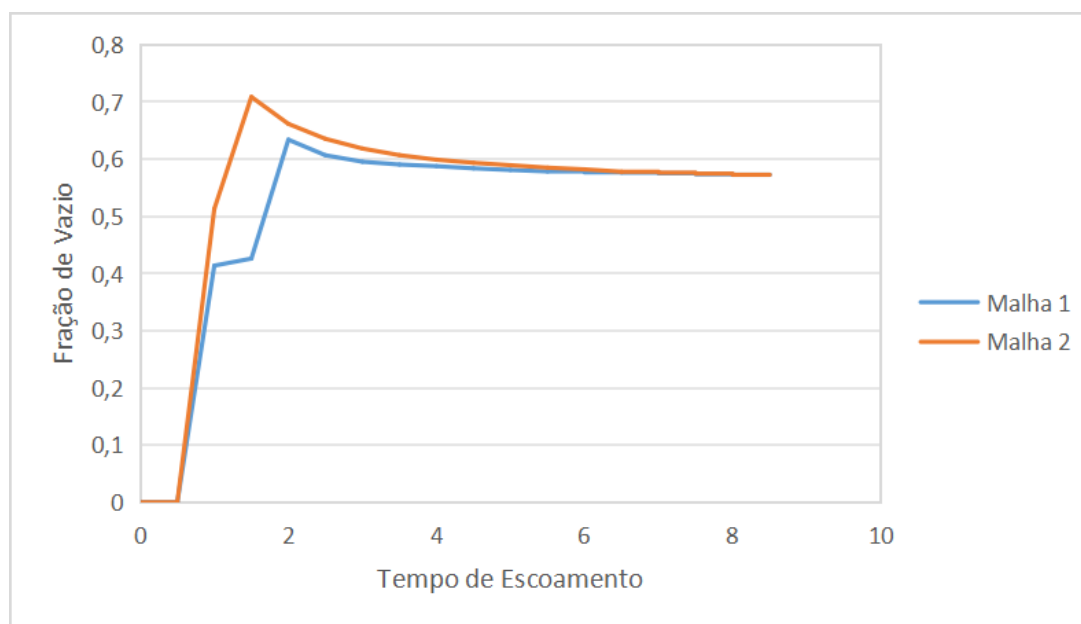


Figura 4. Comparação Entre as Malhas

Fonte: Autoria Própria

A figura 5 mostra o gráfico de contorno do padrão de escoamento estratificado das malhas.

Após simulado e com as frações de cada malha foi possível calcular o erro entre as malhas pela equação 27.

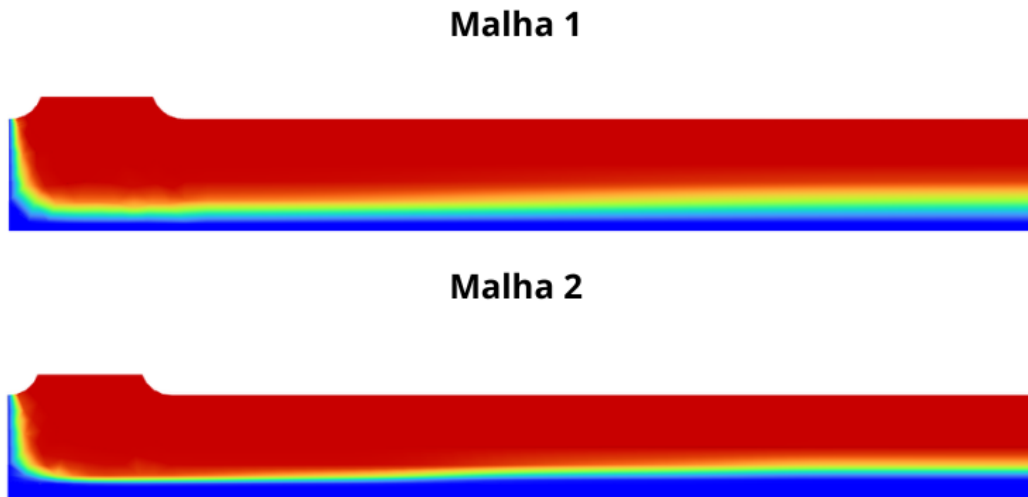


Figura 5. Padrão de Escoamento Estratificado

Fonte: Autoria Própria

$$erro = \frac{malha(n) - malha(n - 1)}{malha(n - 1)} * 100 \quad (27)$$

Na tabela 3 é mostrado o resultados dos erros.

-	Malha 1 - Malha 2
α	0,9137

Tabela 3. Erros entre as malhas

Fonte: Autoria Própria

Também foi comparado o resultado experimentai com o simulado, para essa comparação foi ultizado os dados da malha com mais refinamento. Pode ser calculado pela equação 28.

$$erro = \frac{CFD - experimental}{experimental} * 100 \quad (28)$$

Erro entre eles é representado na tabela 4.

-	Experimental	Simulação	Erro [%]
α	0,523	0,5777	10,466

Tabela 4. Erros entre experimental e simulação

Fonte: Autoria Própria

Observa-se que o erro entre o simulado e experimental é relativamente alto e a um gradiente grande nas interfaces das fases, um fator que pode ter influenciado o desvio é a falta do teste de independência de malha, uma vez que não determinado causa resultados divergente e faz com que a difusão numérica entre as fases seja grande. O tempo de escoamento atingiu corretamente o regime permanente como esperado, visto na figura 4.

CONCLUSÕES

A simulação numérica do modelo VOF aplicada em conjunto com os modelos apresentados para o escoamento bifásico horizontal de tubo de 26 mm. Simulado através do software Ansys Fluent com geometria 2d, foi comparado com os dados obtidos com os da literatura. Apresentou coerência com o padrão de escoamento do experimental, porém houve um desvio significativo na fração de vazio de aproximadamente 10%. Como proposta para análise futura, indica-se o teste de independência de malha para que a influência desta não afete os resultados. A verificação dos métodos de solução pois a formulação implícita resolve a equação a cada iteração e a explícita resolve uma vez apenas, acreditar-se que a medida que os refinamentos vão aumentando pela formulação implícita o tempo de simulação vai aumentar, recomendar-se essa análise para ver se tal método é adequado para malhas mais refinadas e resolva com tempo de simulação aceitável.

AGRADECIMENTOS

- Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Fábio Kenji Suguimoto, pela paciência e dedicação de me orientar nesta etapa da vida, onde esteve presente em todos os momentos e as vezes além do que precisava estar.
- Agradeço ao Prof. Dr. Marcos Antonio de Souza Lourenço e ao Prof. Dr. Ricardo Lopes Ferreira pelos conselhos que foram de excelente ajuda.
- Aos meus pais e irmãs, que me apoiaram e proporcionaram condições de estar aqui presente.
- E a todos que fizeram parte dessa jornada até o momento.

REFERÊNCIAS

- [1] BORGES, Guilherme Martinez. *Simulação Numérica do Escoamento Bifásico Ar-Água Vertical*. Cornélio Procópio, PR: [s. n.], 2020. Relatório Final de Atividades de Iniciação Científica, vinculado ao projeto Estudo do Escoamento Bifásico Isotérmico Vertical, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. Orientador: Prof. Dr. Fábio Kenji Suguimoto.
- [2] GUERRERO, Esteban, MUÑOZ, Felipe e RATKOVICH, Nicolás. Comparison Between Eulerian and VOF Models for Two-Phase Flow Assessment in Vertical Pipes. *Journal of Oil, Gas and Alternative Energy Sources*, Universidad de los Andes, Bogotá D.C., Colombia, 2017. Received: Apr. 04, 2016; Accepted: Aug. 24, 2017. eprint: e.guerrero911@uniandes.edu.co.
- [3] COSTA, Camilo Augusto Santos. *Estudo Numérico e Experimental da Formação de Escoamentos Gás-Líquido Intermitentes em um Tubo Horizontal*. 2016. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC. Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica para a obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Mecânica. Orientador: Prof. Ph.D. Jader Riso Barbosa Junior.
- [4] SHOHAM, Ovadia. *Mechanistic Modeling of Gas-Liquid Two-Phase Flow in Pipes*. Society of Petroleum Engineers: Society of Petroleum Engineers, 2006. Published: June 27, 2013; Paperback, 408 pages; ISBN-10: 155563107X; ISBN-13: 978-1555631079; Dimensions: 7 x 0.84 x 10 inches; Item Weight: 1.55 pounds. ISBN 978-1-61399-936-3.
- [5] PTC. *Considerações Especiais para o Método VOF*. [S. l.: s. n.], 2024. https://support.ptc.com/help/creo/creo_pma/r9.0/portuguese_br/index.html#page/simulate/cfd/SpclConsiderationsVOF.html. Acesso em setembro de 2024.
- [6] PTC. *Modelos Eulerianos*. [S. l.: s. n.], 2024. https://support.ptc.com/help/creo/creo_pma/r9.0/portuguese_br/index.html#page/simulate/cfd/EulerianModels.html. Acesso em setembro de 2024.
- [7] BORGES, Guilherme Martinez. *Simulação de Escoamento Bifásico Vertical em CFD*. Cornélio Procópio, PR: [s. n.], 2022. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à disciplina TCC 2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel. Orientador: Prof. Dr. Fábio Kenji Suguimoto.

- [8] BRACKBILL, J. U., KOTHE, D. B. e ZEMACH, C. A Continuum Method for Modeling Surface Tension. *Journal of Computational Physics*, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico, v. 100, p. 335–354, 1992. Received August 30, 1990; revised July 29, 1991.
- [9] CHIDAMOIO, Joao, AKANJI, Lateef e RAFATI, Roozbeh. Prediction of Optimum Length to Diameter Ratio for Two-Phase Fluid Flow Development in Vertical Pipes. *Advances in Petroleum Exploration and Development*, v. 14, n. 1, p. 1–17, 2017. DOI: [10.3968/9886](https://doi.org/10.3968/9886).
- [10] ABUL, Mohamed Z. *et al.* Computational Analysis of Two-Phase Flow in Horizontal Pipeline. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, v. 07, n. 08, p. 4450, 2020. ISO 9001:2008 Certified Journal, Impact Factor: 7.529. ISSN 2395-0056. Disponível em: <https://www.irjet.net>.
- [11] YAO, Jun e YAO, Yufeng. Transient CFD Modelling of Air–Water Two-Phase Annular Flow Characteristics in a Small Horizontal Circular Pipe. *MDPI*, School of Engineering, Frenchay Campus, University of the West of England, Coldharbour Lane, Bristol BS16 1QY, UK, 2024.