

Simulação de escoamento bifásico vertical em CFD

CFD simulation of two-phase vertical flow

RESUMO

No presente trabalho, o software ANSYS Fluent foi utilizado para simular o fluxo de ar-água através de um tubo vertical de 26 mm de diâmetro interno, a fim de determinar a fração de vazio de fluxo para diferentes padrões de escoamento e comparar os resultados com dados experimentais da literatura. Os resultados mostraram que o modelo adotado foi capaz de prever os padrões de escoamento para os três casos simulados, mas as frações de vazio apresentaram desvios de 21%, 57% e 51% para o escoamento anular, de bolhas e de golfadas respectivamente.

PALAVRAS-CHAVE: CFD. Escoamento bifásico. Simulação numérica. Ar-água

ABSTRACT

In the present work, ANSYS Fluent software was used to simulate the air-water flow through a vertical pipe of 26 mm inner diameter, in order to determine the flow void fraction for different flow patterns and compare the results with experimental data from the literature. The results showed that the chosen model was able to predict the flow patterns for the three simulated cases, but the flow void fractions presented a deviation of 21%, 57% and 51% for the annular, bubble and slug flow, respectively.

KEYWORDS: CFD. Two-phase flow. Numerical simulation. Air-water flow.

Recebido: 19 ago. 2020.

Aprovado: 01 out. 2020.

Direito autoral: Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



INTRODUÇÃO

O escoamento bifásico está presente em diversos processos de diferentes tipos de indústrias, sendo a nuclear e a petrolífera dois grandes exemplos. Devido às razões gás-líquido e à topologia do tubo, vários regimes de escoamento podem ocorrer quando dois fluidos se movimentam dentro de um tubo. O conhecimento dos regimes de escoamento presentes é essencial para evitar problemas de operação, uma vez que uma variação na composição dos fluidos que se movem no interior da tubulação pode implicar em produção descontínua, encerramento ou até mesmo danos ao equipamento (Abdulkadir, 2011). Ao longo dos anos, em resposta a uma crescente necessidade de métodos de previsão mais precisos, os softwares de simulação de escoamento têm sido continuamente testados e aprimorados, a ponto de hoje representar uma ferramenta formidável para a caracterização de fluxos multifásicos.

Diversos estudos mostram que a Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) é uma excelente ferramenta para prever o comportamento de tais fluxos. Guerrero *et al.* (2017) compararam o modelo Volume de Fluido (VOF, por sua sigla em inglês) e o modelo Euleriano em um escoamento vertical ascendente e confirmaram sua capacidade de prever a dinâmica do escoamento bifásico gás-líquido. O modelo CFD usando uma abordagem VOF Multifluido Euleriana-Euleriana, apresentado por Dai *et al.* (2013), foi capaz de capturar e prever quatro regimes de escoamento diferentes, os resultados estavam de acordo com os dados disponíveis e destacaram a aplicação da modelagem CFD para prever os regimes de escoamento e obter um melhor entendimento sobre comportamentos complexos de fluxo em escoamentos verticais gás-líquido

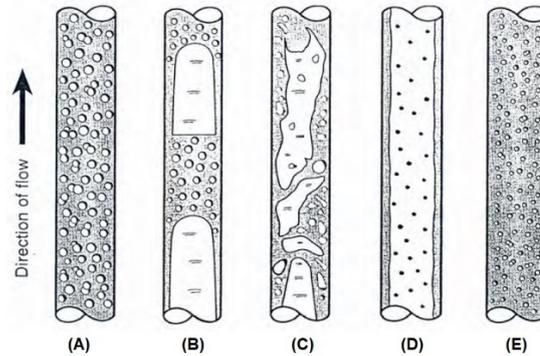
Diferentes modelos físicos são usados para a simulação de escoamentos bifásicos em CFD. Este estudo fará uso do modelo de Volume de Fluido (VOF), que é uma abordagem Euleriana amplamente utilizada para o escoamento bifásico gás-líquido, para obter a fração de vazio de um escoamento vertical ar-água ascendente.

MATERIAL E MÉTODOS

No escoamento bifásico, durante a interação dos fluidos, uma interface deformável pode assumir diversas formas características que são chamadas de padrões de escoamento. Esses padrões têm um papel importante na análise de fluxo.

As cinco configurações de fase principais em tubos verticais estão listadas em (Shoham, 2006) e a representação geral é mostrada na Figura 1:

Figura 1 – Padrões de escoamento em tubos verticais, (A) Bolhas (B) Golfadas (C) Agitado (D) Anular (E) Bolhas Dispersas.



Fonte: Shoham (2006)

A determinação correta do padrão de escoamento é extremamente importante para a análise do escoamento bifásico. Dependendo do tipo de padrão, podem ocorrer variações significativas nos resultados.

O transporte de massa, momento e calor está presente na análise do escoamento gás-líquido. De acordo com Abdulkadir (2011), a suposição de um fluxo isotérmico é razoável em tubos com grande razão de área superficial por volume e temperatura constante. Condições isotérmicas foram assumidas para este estudo, dessa forma o modelo considera apenas a transferência de massa e momento.

No modelo VOF, a soma das frações de volume de todas as fases em cada volume de controle é igual a um e todas as fases são analisadas usando uma equação única para cada fenômeno de transporte. As equações de continuidade e momentum são representadas abaixo:

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

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

onde, P é a pressão, g é a aceleração gravitacional, u é a velocidade superficial, τ é a tensão molecular e τ^t é a tensão de turbulência.

A equação de momento (2) é dependente das frações de volume de todas as fases por meio da densidade (ρ) e da viscosidade (μ):

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

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

onde α é a fração de vazio e os índices 1 e 2 representam as fases.

Resolver a equação de continuidade para a função de fração de volume torna possível traçar a interface entre as duas fases:

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

Onde $\alpha = 1$ a fase da célula é gasosa, enquanto $\alpha = 0$ significa que a fase da célula é líquida.

Para modelar a turbulência o modelo $k - \varepsilon$ padrão (Launder e Spalding, 1974) foi utilizado por ter demonstrado capacidade de simular adequadamente muitos processos industriais, incluindo escoamento multifásico (Hernandez-Perez *et al.*, 2010). O modelo é descrito pelas equações elípticas apresentadas nas Eqs. (6), (7) exigidas como fechamento para as equações RANS (*Reynolds Average Navier Stokes*):

$$\rho u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \mu_t \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \varepsilon \quad (6)$$

$$\rho u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_1 \mu_t \frac{\varepsilon}{k} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \left(\frac{\partial \mu_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \mu_j}{\partial x_i} \right) - C_2 \frac{\varepsilon}{k} \rho \varepsilon \quad (7)$$

onde k é a energia cinética turbulenta e ε é a taxa de dissipação de k . u_i é o componente i da velocidade do fluido u , x_j é a coordenada espacial j , σ_k , σ_ε , C_1 e C_2 são constantes cujos valores são 1.0, 1.3, 1.44 e 1.92 respectivamente. Nas equações de Navier-Stokes, a viscosidade do fluido deve ser corrigida para a turbulência empregando uma viscosidade efetiva $\mu_{eff} = \mu + \mu_t$, onde μ é a viscosidade dinâmica e μ_t é a viscosidade de turbulência.

Uma formulação do modelo de tensão superficial de força superficial contínua (CSF, do inglês *Continuum Surface Force*) proposto por Brackbill *et al.* (1992) foi aplicado no Ansys Fluent. Um termo de origem é adicionado à equação de momentum para incluir a tensão superficial nos cálculos do modelo VOF. A força na superfície pode ser expressa como uma força de volume e se apenas duas fases estiverem presentes em uma célula, ela pode ser escrita como abaixo:

$$F_{vol} = \sigma_{ij} \frac{\rho k_i \nabla \alpha_i}{\frac{1}{2}(\rho_i + \rho_j)} \quad (8)$$

onde σ é o coeficiente de tensão superficial e k é a curvatura, definida em termos da divergência da unidade normal, \hat{n} :

$$k = \nabla \cdot \hat{n} \quad (9)$$

$$\hat{n} = \frac{n}{|n|} \quad (10)$$

$$n = \nabla \alpha_q \quad (11)$$

$$k_i = -k_j \quad (12)$$

$$\nabla \alpha_i = -\nabla \alpha_j \quad (13)$$

A normal da superfície, n , é definida como o gradiente da fração de volume da q -ésima fase, α_q .

Para resolver as equações diferenciais parciais, o método de solução CFD requer uma malha. Duas malhas quadriláteras com quantidades diferentes de elementos foram construídas para um domínio 2D, conforme mostrado na Figura 2.

O presente trabalho fez uso de resultados experimentais obtidos por Rosa *et al.* (2012). Os experimentos foram replicados usando o software ANSYS Fluent. As condições de operação, geometrias, resultados e padrões de escoamento observados pelos autores são descritos no Quadro 1, onde j_i é a velocidade superficial da fase i e α é a fração de vazão. A seção de teste foi um tubo reto

vertical de acrílico transparente, de 26 mm de diâmetro interno e 307D de comprimento.

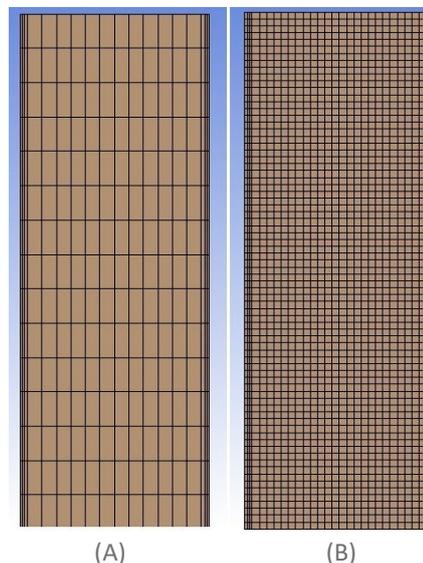
Quadro 1 – Dados experimentais

Caso	j_l [m/s]	j_g [m/s]	α	Padrão de escoamento
1	0,79	0,06	0,05	Bolhas
2	0,30	0,60	0,51	Golfadas
3	0,28	26,43	0,92	Anular

Fonte: Rosa *et al.* (2012).

No presente trabalho, o domínio 2D do tubo mostrado na Figura 2 foi usado para replicar os três casos e duas malhas foram construídas: primeiramente, uma com 7200 elementos para simular o escoamento anular e de golfadas, e em seguida uma com 60000 elementos para simular o escoamento de bolhas. A construção da segunda malha fez-se necessária, pois a primeira, por falta de refinamento, não era capaz de captar com eficácia a fase gasosa do escoamento de bolhas. As malhas apresentadas na Figura 2 foram associadas a quatro condições de contorno: duas entradas com condição de velocidade de entrada e uma saída com condição de pressão de saída. As bordas circundantes usaram uma condição de parede, e a resolução da malha perto da parede foi aprimorada para capturar melhor o fluxo próximo a ela. O domínio foi preenchido com água e, em determinado momento, a água e o ar passaram a fluir com suas respectivas velocidades de entrada. A parede do tubo foi definida como estacionária e sem deslizamento. O método VOF foi usado com o modelo de turbulência $k - \epsilon$ padrão, e o modelo de tensão superficial de força superficial contínua (CSF) foi aplicado com um coeficiente de tensão superficial constante de 0,073 N / m.

Figura 2 – Malhas com diferentes quantidades de elementos, (A) – 7200 elementos (B) – 60000 elementos.



(A) (B)
 Fonte: Autoria própria (2020)

Um comprimento de 2 metros foi escolhido para o domínio do escoamento, regime transiente foi usado para modelar a dinâmica do escoamento, e o passo de tempo para cada caso foi calculado de acordo com o critério CFL, que usa o número de Courant. A representação matemática desse número está descrita a seguir:

$$C = u_G \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (14)$$

Onde C é o número de Courant (0,25 para esse estudo), Δt é o passo de tempo e Δx é o comprimento da célula da malha na direção da maior velocidade de escoamento. A velocidade u_G é a velocidade total do gás e é calculada pelo modelo Drift-Flux (Uejang *et al.*, 2008) descrito a seguir:

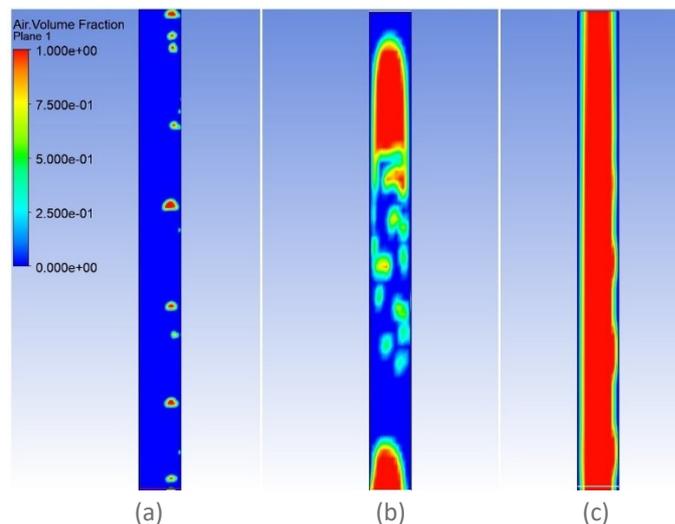
$$u_G = \left(1,2 + \frac{0,8}{1 + 10e^{-8} Re_s^{2,55}} \right) u_M + 0,35 \sqrt{gD} \quad (15)$$

Onde u_M é a velocidade da mistura, Re_s é o número de Reynolds da fase líquida, g é a aceleração da gravidade e D é o diâmetro do tubo.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os casos apresentados no Quadro 1 foram simulados e as frações de vazio obtidas foram comparadas com os valores experimentais. A Figura 3 apresenta os contornos das frações de volume de ar obtidas para cada caso e mostra que os padrões de escoamento estão em conformidade com os observados no experimento.

Figura 3 – Resultados para o contorno das frações de volume, (a) Caso 1 - bolhas (b) Caso 2 - golfadas (c) Caso 3 - anular



Fonte: Autoria própria (2020).

No pós-processamento, um trecho de trinta centímetros na parte superior do tubo foi selecionado e a fração de volume de ar média para vários espaços de tempo foi calculada. Fez-se uma média desses valores para a obtenção da fração de volume média final e os resultados estão presentes no Quadro 2.

Quadro 2 – Comparação entre os resultados e os dados experimentais de fração de vazio.

Caso	α_{CFD}	α_{exp}	Desvio (%)
1	0,0215	0,05	57,00
2	0,2510	0,51	50,78
3	0,7243	0,92	21,27

Fonte: Autoria própria (2020).

Percebe-se que as frações de vazio das simulações não estão em conformidade com os valores experimentais, apresentando um desvio alto para todos os casos. Como não foi conduzido um teste de independência de malha, é possível que o sistema de solução ainda esteja dependente da mesma, gerando divergência nos resultados. Outro fator que pode ter contribuído com o desvio foi o baixo tempo de escoamento: é importante que a simulação rode por tempo suficiente para chegar o mais perto possível do regime permanente e atingir uma frequência constante de passagem de bolhas.

CONCLUSÕES

O modelo VOF foi aplicado para a simular o escoamento bifásico ascendente ar-água em um tubo vertical com diâmetro interno de 26 mm. Um domínio 2D foi criado e três casos foram simulados utilizando o software Ansys Fluent, tendo seus resultados comparados com dados experimentais. Foi observado que o modelo CFD foi capaz de reproduzir os padrões de escoamento com sucesso para todos os casos, porém as frações de vazio apresentaram erros na ordem de 57%, 51% e 21% para o escoamento de bolhas, de golfadas e anular, respectivamente. Acredita-se que dois fatores contribuíram com o desvio obtido: a falta de refinamento nas malhas e o baixo tempo de escoamento simulado. É aconselhável que futuros trabalhos conduzam um teste de independência de malha para remover qualquer dependência da mesma no sistema de solução e que o tempo de escoamento simulado seja o suficiente para atingir o regime permanente.

REFERÊNCIAS

- ABDULKADIR, M. **Experimental and computational fluid dynamics (CFD) studies of gas-liquid flow in bends**. 2011. Phd thesis - University of Nottingham, England, 2011.
- BRACKBILL, J. U., KOTHE, D. B., & ZEMACH, C. A continuum method for modelling surface tension. **Journal of Computational Physics**, v. 100, p. 335-354, 1992.

DAI, Y., DAKSHINAMMORTHY, D., & AGRAWAL, M. CFD **Modeling of Bubbly, Slug and Annular Flow Regimes in Vertical Pipelines**. Offshore Technology Conference, 2013.

GUERRERO, E., MUÑOZ, F. AND RATKOVICH, N. Comparison between eulerian and vof models for two-phase flow assessment in vertical pipes. **CT&F—Ciencia, Tecnología y Futuro**, v. 7, n. 1, p. 73-84, 2017.

HERNANDEZ, V., ABDULKADIR, M. & AZZOPARDI, B.J. Grid generation issues in the CFD modeling of the two-phase flow in a pipe. **Journal of computational Multiphase Flows**, v.3, n. 1, p. 13-26, 2010.

LAUNDER, B. AND SPALDING, D. The numerical computation of turbulent flows. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, v. 3, p. 269–289, 1974.

PARVAREH, A., RAHIMI, M., ALIZADEHDAKHEL, A. AND ALSAIRAFI, AA. CFD and ERT investigations on two-phase flow regimes in vertical and horizontal tubes. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 37, p. 304–311, 2009.

ROSA, E.S., FLORA, B.F., SOUZA, M.A.S.F. Design and performance prediction of an impedance void meter applied to the petroleum industry. **Meas. Sci. Technol.**, v. 23, n. 5, 2012.

SHOHAM, O. **Mechanistic modelling of gas-liquid two-phase flow in pipes**. Richardson: Society Of Petroleum Engineers, 2006.

SUN, X., PARANJAPE, S., KIM, S., OZAR, B. & ISHII, M. Liquid velocity in upward and downward air-water flows. **Annals of Nuclear Energy**, v. 31, p. 357-373, 2004.

UEJANG, P.M., PAN, L., MANFIELD, P.D., LAWRENCE, C.J. & HEWITT, G.F. Prediction of the translational velocity of liquid slugs in gas-liquid slug flow using computational fluid dynamics. **Multiphase Science and Technology**, v. 20, n. 1, p. 25-79, 2008.