

MODELO COMPUTACIONAL DO ESCOAMENTO GÁS-ÓLEO NO PADRÃO DE BOLHA DE CAPA ESFÉRICA ÚNICA ASCENDENTE EM DUTO VERTICAL

Rafael Leandro Fernandes Melo², rafael.melo@ifce.edu.br²

E. N. Silva¹, engenheiro.mecanico.erijanio@outlook.com¹

João Dehon da Rocha Júnior, joaodehonjunior@hotmail.com¹

Shyrlei da Silva Oliveira, shyrlei.arquiteta@gmail.com¹

Thiago da Silva Andre, thiago.andre@ifce.edu.br²

Fernanda Monique da Silva, fernanda.monique@ifce.edu.br²

¹¹Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, Avenida Hermes Fonseca - s/n Museu Camara CA, RN, 59084-100.

²Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Rua Pedro Bezerra de Menezes, 387 - Bairro Manoel Costa Moraes, Jaguaribe - CE, 63475-000.

Resumo: O presente trabalho apresenta um estudo e análise de um escoamento multifásico usando simulação numérica. Na Mecânica dos Fluidos é comum se deparar com escoamentos em tubulações com apenas um único fluido e uma única fase. Na prática, por exemplo, na indústria petrolífera os escoamentos são em sua maioria fluxos que envolvem mais de um fluido, fluido acompanhado de partículas ou com diferentes fases. Esses fluxos multifásicos são caracterizados por padrões. O objeto de estudo deste projeto é a bolha de capa esférica o qual ocorre quando se tem uma bolha de gás de diâmetro relativamente ao diâmetro da tubulação grande. A análise de simulação numérica propõe a diminuição de custos no projeto visando o ganho de tempo no e a melhoria de qualidade. Portanto, a simulação numérica para determinação do comportamento do fluxo é um método bastante eficaz para se minimizar o alto custo de experimentos. O estudo e modelagem desenvolvidos neste trabalho tiveram como principal base a abordagem VOF (Volume of Fluid). As simulações foram feitas utilizando o software ANSYS CFX a fim de se analisar os parâmetros e características hidrodinâmicas do comportamento da bolha no fluxo. Os resultados obtidos das interações dos fluidos no escoamento multifásico no topo de bolha de capa esférica podem descrever como as interações dos fluidos afetarão o gradiente de pressão na tubulação. A velocidade da bolha no caso simulado se mostra satisfatória na correlação empírica de Davies-Taylor. Os demais casos de 50% e 80% serviram como comparação para análise do gradiente de pressão. O aumento do diâmetro da bolha diminui o gradiente de pressão total e aumenta a parcela do gradiente de pressão devido ao atrito.

Palavras-chave: Simulação Numérica; Bolha de capa esférica; Escoamento Multifásico, Gradiente de pressão, Superfície Livre.

1. INTRODUÇÃO

A indústria do petróleo obteve, ao longo da história, um enorme crescimento em termos de movimentação financeira. Todos os dias diversas formas de melhorar a produção – diminuindo as perdas – são desenvolvidas e aplicadas. O custo experimental, no desenvolvimento dos projetos, representa um dos pontos de maior atenção para a empresa, dado o custo elevado dos mesmos. A realização de simulações numéricas é uma alternativa que vem ganhando cada vez mais espaço no que se refere a diminuição de custos (AZEVEDO, 2012).

Os modelos computacionais auxiliam projetos, de forma melhorar a visualização do comportamento de sistemas. Muitas vezes, são simulados casos que seriam muito difíceis de descrever experimentalmente, o que torna a simulação numérica uma ferramenta facilitadora no projeto.

No processo de produção do petróleo, o óleo vem muitas vezes acompanhado por gás no escoamento, o que caracteriza uma situação de escoamento multifásico. Os escoamentos multifásicos já foram bastante estudados e diversos modelos foram desenvolvidos. Os fluxos multifásicos são caracterizados por padrões (MARINHO, 2008), que mudam à medida que a fração e velocidade do gás muda. Esses padrões também dependem da geometria e direção do duto, tendo em vista que acontece pouca variação da posição vertical para horizontal. Os padrões variam desde escoamento com bolhas na fase contínua (líquido) até o padrão anular, passando pelo slug. Segundo Brennen (2008), duas abordagens para o modelo e suas equações hidrodinâmicas são estudadas em escoamentos multifásicos, que são a abordagem Euler-Euler e Euler-Lagrange. A abordagem considerada no estudo deste projeto é a abordagem VOF (Volume of Fluid), uma “sub-abordagem” de Euler-Euler onde ambas as fases são consideradas continua.

A bolha de capa esférica – objeto de estudo do presente trabalho – é caracterizado pela formação de uma bolha grande de gás – geralmente da ordem do diâmetro do duto – que escoia juntamente com a parte líquida do escoamento. À medida que o escoamento é desenvolvido, as forças viscosas presentes do escoamento atuam de forma a deformar o “slug”. Essa deformação provoca alterações no escoamento, que provocam alterações na perda de carga.

A pretensão deste foi desenvolver um modelo computacional usando o ANSYS CFX, mostrando o comportamento do fluxo de dois fluidos distintos em fase, o gás sendo ar e o líquido sendo um fluido com propriedades de óleo, por exemplo, viscosidade relativamente alta.

A partir disso, é possível verificar a influência do diâmetro da bolha no gradiente de pressão total do escoamento e o perfil de tensão de cisalhamento nas paredes do tubo. É realizado a simulação de três casos variando o diâmetro da bolha.

2. PROCEDIMENTO COMPUTACIONAL

O modelo desenvolvido é analisado de forma bidimensional, ou seja, em duas coordenadas, o que torna mais simples a simulação e obtenção dos resultados no software. O modelo é analisado de forma isotérmica, ou seja, sem a necessidade da equação de energia, os fluidos são incompressíveis, não ocorre reação química no processo e as propriedades físicas são constantes. O efeito gravitacional é considerado e não ocorre transferência de massa interfacial. A abordagem usada para modelar o escoamento dessa bolha de gás foi o VOF (Volume of Fluid). As equações abaixo são calculadas pelo software a partir das condições do problema inseridas no mesmo para este caso:

- Equação da Conservação da massa

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m U) = 0 \quad (1)$$

- Equação da Conservação de momento linear

$$\frac{\partial (\rho_m U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m U U) = -\nabla P + \nabla \tau + \rho_m g \sin(\theta) + S = 0 \quad (2)$$

Ambas as fases são tratadas como contínuas. Esse modelo também é conhecido como *Free Surface Model* ou Modelo de Superfície Livre, o índice m indica mistura (ANSYS CFX Reference and Theory Manual, 2010), por exemplo na massa específica que é calculada com a equação abaixo:

$$\rho_m = \sum r_k \rho_k \quad (3)$$

Sendo assim, o software calcula através do método de volumes finitos, as equações que regem o modelo. A forma geométrica é um tubo com 200 mm de diâmetro e 5 m de comprimento. Todo o procedimento é realizado em uma malha bidimensional mostrada na Figura 1.

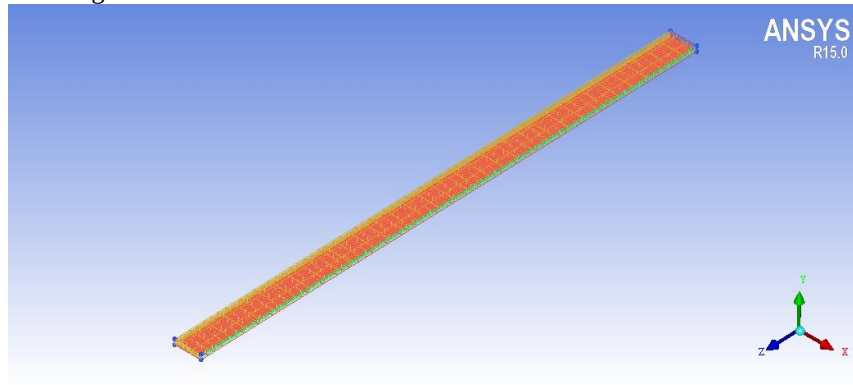


Figura 1: Construção do tubo em um domínio bidimensional.

As informações da malha com diâmetro de 200 mm estão listadas abaixo:

- Na direção z encontra-se o comprimento com 5 m (550 nós);
- Na direção x encontra-se o diâmetro com 200 mm (100 nós);
- Na direção y encontra-se uma medida de espessura que não importa tão significativamente, pois a análise é apenas no plano XZ o valor é de 0,04 m (10 nós);
- O número de nós total dessa malha é 550000.
- Um total de 489159 elementos.

O número de nós foi estipulado de maneira bem aleatória, pois, este trabalho não tem como objetivo um estudo de refino de malha ou mostrar a influência da variação do número de nós.

As condições de contorno são mostradas na Tabela 1:

Tabela 1. Condições de entrada e saída

Condições de contorno	Entrada	Saída
Tipo de Fronteira (Boundary Type)	Inlet	Opening
Velocidade Normal/Pressão Relativa	VSL	0
Fração Volumétrica do Gás	0	-
Fração Volumétrica do Oleo	1	-

Onde:

$$VSL = Q/A$$

(4)

As propriedades dos fluidos no estado de referência de temperatura e pressão à 25 °C e 1 atm respectivamente, estão abaixo na Tabela 2:

Tabela 2. Propriedades físico-química dos fluidos.

Propriedades	Óleo	Gás (Ar à 25 °C)
Massa Específica (Kg/m^3)	920	1,185
Massa Molar (Kg/mol)	100,2	28.96
Viscosidade Dinâmica (Kg/ms)	1,5	1,831e-05
Tensão superficial (N/m)	0,07	-

Os valores das propriedades físico-químicas da Tabela 2 foram baseados de acordo com a pesquisa de Marinho (2008).

A vazão volumétrica de óleo inicial na entrada da tubulação foi imposta da seguinte forma:

$$Q = 30 \text{ m}^3/h$$

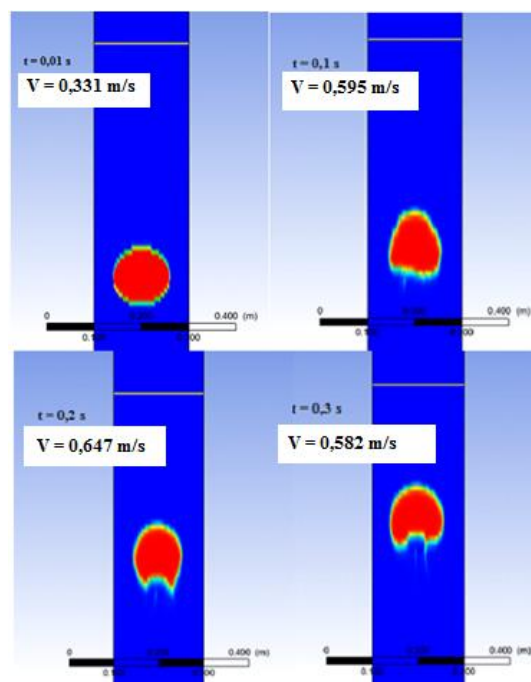
(5)

A pressão relativa na saída é considerada como sendo zero, sendo assim a pressão absoluta na saída é igual a pressão de referência, neste caso considera-se a atmosférica.

O caso é simulado para escoamento ascendente de forma que a pressão em baixo (entrada) é maior que em cima (saída).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O escoamento se inicia com a bolha de gás a uma distância de 1 m de entrada, essa consideração é feita a fim de verificar a deformação que a mesma sofre no decorrer do tempo. Tal deformação é causada por forças de interação entre os dois fluidos. Na Figura 2 é mostrado os instantes iniciais de escoamento para a bolha com 60% do diâmetro da tubulação.

**Figura 2: Início de deformação da bolha de gás.**

O caso foi simulado para um tempo total de 1 segundo. Nos instantes iniciais a velocidade de ascensão da bolha sofre pequenas variações, isso ocorre pelo fato de que o formato da mesma interage com o óleo se adequando ao escoamento e alcançando uma velocidade convergente. A Figura 1 mostra a velocidade da simulação e o modelo analítico-experimental adotado por David-Taylor.

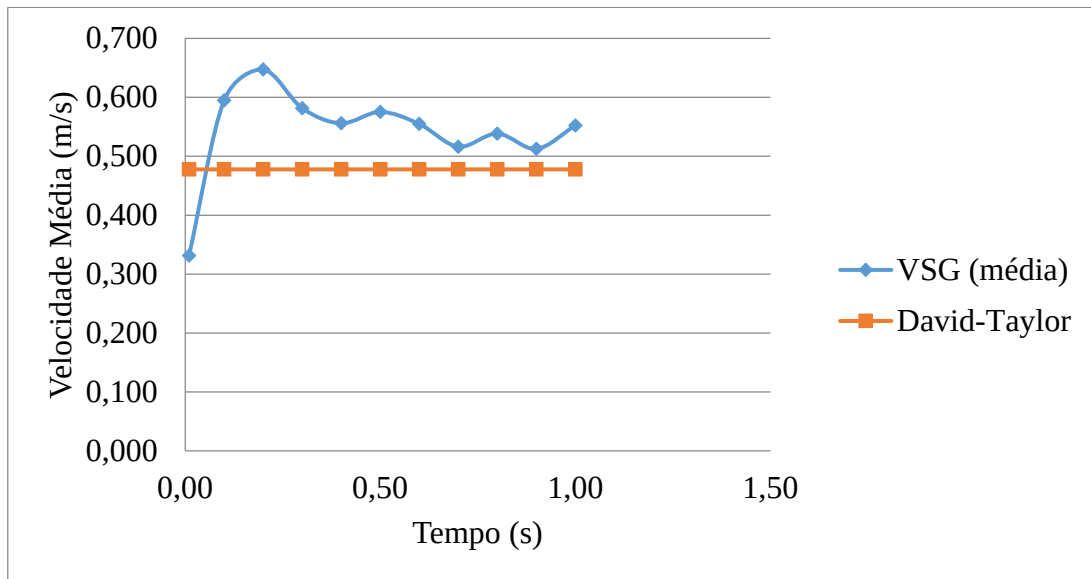


Figura 2: Velocidade Superficial do gás (Simulação) e Modelo Davies-Taylor de 0,01 à 1 s.

O modelo de Davies-Taylor (1950 apud ELLENBERGER et al. 1998), nos diz que para o escoamento de uma única bolha de capa esférica a velocidade é dada pela equação

$$V_b^0 = 0.71\sqrt{gd_b}(SF) \quad (6)$$

O subscrito 0 indica uma velocidade de referência, ou seja, uma velocidade inicial de ascensão da bolha. O fator SF pode ser calculado da seguinte forma

$$SF = 1.13 \exp\left(\frac{-d_b}{D_T}\right) \text{ Para } 0,125 < \frac{d_b}{D_T} < 0,6 \quad (7)$$

Portanto, a Figura 1 mostra que no modelo a medida que ocorre o caso a bolha tende a se adequar a uma velocidade de ascensão que depende do diâmetro desta e da relação com o diâmetro do tubo o qual foi observado de forma experimental por Davies-Taylor.

Além da demonstração do comportamento da velocidade de ascensão para a bolha de $0,6D$ torna-se imprescindível também a comparação e demonstração de alguns coeficientes adimensionais hidrodinâmicos e do perfil de tensão de cisalhamento causado por cada uma das bolhas.

Na Tabela 3 é mostrado o valor dos coeficientes adimensionais hidrodinâmicos para cada bolha, uma com 50%, a segunda com 60% e a terceira com 80% do diâmetro do tubo. Tal variação implica em mudanças nas forças de interação entre os fluidos e é discutido mais adiante.

Tabela 3. Parâmetro Hidrodinâmicos da Simulação

Número Adimensional	50%	60%	80%
Reynolds Óleo	24,53	21,46	21,95
Euler	162,51	216,04	520,32
Froude	0,3061	0,2867	0,2349
Weber	790,41	592,571	243,62
Eötvös	5150,61	5150,61	5150,61
Capilaridade	8,30	6,42	2,91
Morton do Líquido	157,17	157,178	157,17

Percebe-se que a partir da variação da fração volumétrica de gás no local as forças que agem no escoamento passam a influenciar de maneiras diferentes, por exemplo, o número de capilaridade diminuiu com o aumento do diâmetro da bolha, ou seja, a viscosidade da mistura diminuiu, diminuindo as forças viscosas. O número de Euler aumenta com o aumento do diâmetro da bolha, ou seja, ocorre uma diminuição da massa específica da mistura, diminuindo as forças de

inércia, apesar da diminuição do gradiente de pressão que será discutido no decorrer deste trabalho. Os números que são constantes em relação ao diâmetro da bolha são Reynolds do líquido, Eötvös e Morton do líquido, logo porque estão mais associados as propriedades dos fluidos de maneira separada.

White e Beardmore (1962, apud MARINHO, 2008) estudaram a velocidade de uma bolha de ar ascendente através de um líquido em um duto vertical e identificaram o efeito dos números adimensionais Eötvös (E_o), Morton (M) e Froude (Fr), sobre as características da bolha de *Slug*. Estes parâmetros influenciam a forma da bolha quando os números de Eötvös e Morton estão dentro da faixa: $3 < E_o < 400$ e $10^{-12} < Mo < 10^3$. Esses autores concluíram que as forças viscosas são desprezíveis se $\rho^2 g D^3 / \mu^2 > 3 \times 10^5$ os efeitos interfaciais são desprezíveis se $E_o > 70$, e os efeitos de inércia são desprezíveis se $Fr < 0.05$.

A Figura 3 mostra os escoamento das três bolhas para um intervalo de tem entre 0,3 s e 0,7 s. Um fato interessante mostrado nesta figura é que a bolha de 80% se aproxima melhor no seu formato com a Bolha de Taylor. Dos três casos a bolha com 80% mostra em sua “cauda” uma tendência do gás se desprender, autores como Zheng; He; Che. (2007) mostram a influência do formato da bolha em relação a mudanças em números adimensionais como o de Eötvös, por exemplo, quanto maior esse parâmetro a tendência ao desprendimento na “cauda” da bolha se mostra maior.

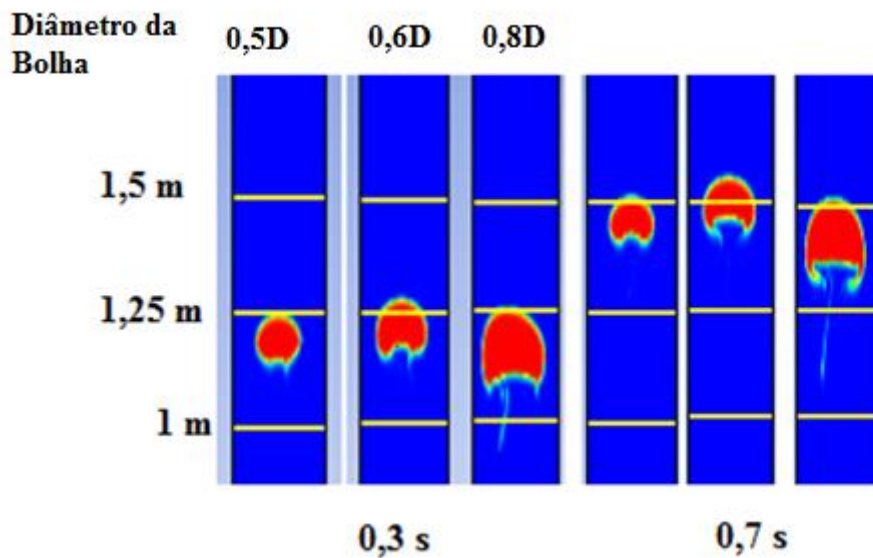


Figura 3: Comparação dos três casos.

A Figura 3 mostra a distribuição da tensão de cisalhamento ao longo do eixo Z . A bolha causa uma “perturbação” na zona de escoamento resultando em vórtices e flutuações no líquido ocasionando tensão de cisalhamento nas paredes pela zona do *Slug* de Líquido. Tomando como referência Z a partir de 1 metro ($\frac{z}{D} = 0$ na figura) e fazendo intervalos para dividir pelo diâmetro da tubulação até 2 metros ($\frac{z}{D} = 5$ na figura) a fim de simplificar a análise, obtemos a relação mostrada.

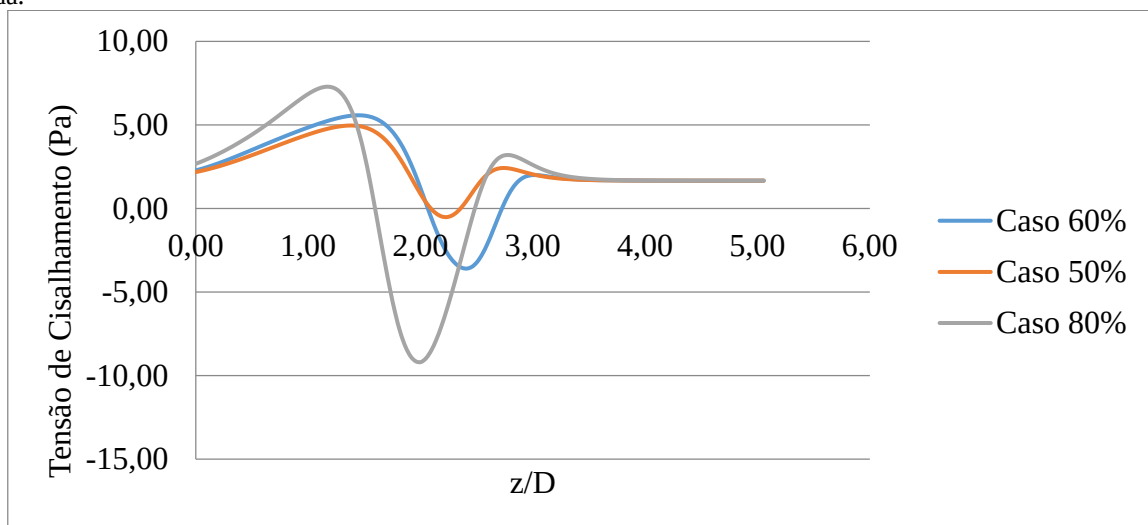


Figura 3: Tensão de Cisalhamento provocada nas paredes do tubo.

O modelo numérico prova de maneira clara a influência que o diâmetro da bolha causa em relação às perdas por atrito, principalmente na zona do filme de líquido onde o aumento da fração ou volume de gás influencia o cisalhamento de

maneira mais intensa, ou seja, a partir de análises preliminares pode-se afirmar que com a diminuição da espessura do filme de líquido ou aumento da relação diâmetro da bolha e diâmetro da tubulação, o gradiente de pressão por atrito aumenta na região do *Slug* de Gás.

O gradiente de pressão em função de todas as parcelas para cada caso é mostrado na figura 4.

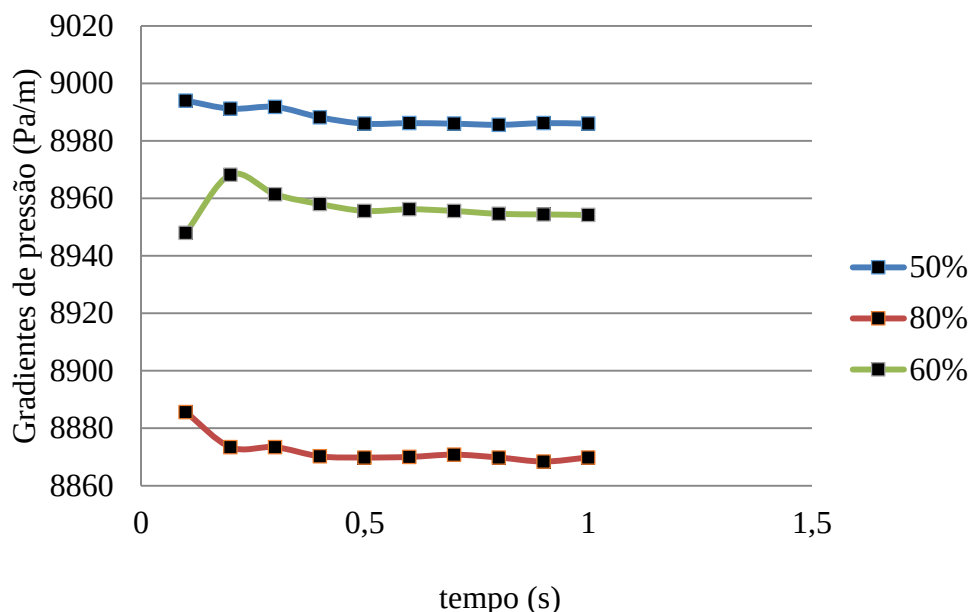


Figura 4: Comparação dos três casos em relação a o Gradiente de Pressão Total

A Figura 4 mostra de maneira simples o que já é conhecido na prática, uma diminuição da massa específica média dos fluidos com aumento da fração de gás, por exemplo, um dos métodos usados na indústria do petróleo que tem esse objetivo é o Gás-Lift. Segundo Rizzo Filho (2011), teoricamente a pressão hidrostática dos fluidos diminui, contribuindo para uma diminuição do gradiente de pressão resultando na diminuição da pressão necessária para deslocar o fluido. Logo para o presente trabalho as condições de simulação foram as mesmas para os três casos e nota-se na Figura 4 que para uma “simples” variação no tamanho do *Slug* de gás o gradiente mostra uma considerável mudança de comportamento. Se o caso fosse simulado de maneira intermitente (ou seja, com várias bolhas de *Slug* de gás) esperaria que esse gradiente caísse bem mais consideravelmente, mas, esse não é o ponto central do trabalho, visto que o foco é uma “introdução” a esse tipo de escoamento.

4. CONCLUSÃO

Na prática, em escoamento multifásico, é muito difícil encontrar uma única bolha no domínio. O caso simulado deste trabalho visa mostrar de maneira um pouco “detalhada” a influência que a fase de gás tem na região do líquido ocupado no domínio.

A velocidade média de ascensão se mostra satisfatória tendendo a correlação experimental e empírica de Davies-Taylor. O formato da bolha alcançada durante sua ascensão e a relação de 60% do diâmetro do tubo mostrou que a bolha se caracteriza como um *Slug* de Gás e que tem as características de influência no escoamento esperadas.

A demonstração da variação do diâmetro da bolha para analisar a influência no gradiente de pressão, mostra que com aumento desse diâmetro diminui o gradiente de pressão hidrostática e aumenta na região do *Slug* de Líquido (antes da bolha) a tensão de cisalhamento nas paredes e no filme de líquido o cisalhamento na direção do escoamento é bem mais acentuado esse aumento. Logo com uma vantagem de menor pressão para o deslocamento do fluido ocorre ao mesmo tempo uma desvantagem na parcela de atrito.

5. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi apoiado pela Agencia Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) através do Programa de Recursos Humanos – PRH 56 e pela Universidade Federal Rural do Semiárido – UFRSA.

6. REFERÊNCIAS

- ANSYS., 2010, “ANSYS CFX Reference and Theory Manual”, Cannonsbourg, PA, USA.
- AZEVEDO, V. W. F., 2012, “Simulação do escoamento multifásico no interior de bombas de cavidades progressivas metálicas”, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, RN, Brasil. (Dissertação de mestrado).
- BRENNEN, C. E., 2005, “Fundamentals of Multiphase Flows”, 1ª ed. California Institute of Technology.
- DAVIES, R.M., & TAYLOR, G.I., 1950, “The mechanics of large bubbles rising through extended liquids and through liquids in tubes”. Proc. Roy. Soc. London, A200, 375—390.
- ELLENBERGER, J. et al., 1998, “Rise velocity of a swarm of large gas bubbles in liquids”, Chemical Engineering Science, Amsterdam, Netherlands, Sept 2.
- MARINHO, José Luís Gomes., 2008, “Estudo do Escoamento Multifásico Tipo Bolha de Taylor em Dutos e Conexões Curvadas”, Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB, Brasil. (Dissertação de mestrado).
- RIZZO FILHO, Haroldo dos Santos., 2011. “A otimização de gás lift na produção de petróleo: avaliação da curva de performance do poço”, Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- WHITE, E. T.; BEARDMORE, R. H., 1962. “The Velocity of Rise of Single Cylindrical Air Bubbles Through Liquid Contained in Vertical Tubes”, Chemical Engineering Science, V. 17, nº 5, p. 351- 361.
- ZHENG, Donghong; HE, Xiao; CHE, Defu, 2007, “CFD simulations of hydrodynamics characteristics in a gas-liquid vertical upward *Slug* flow”, International Journal of Heat and Mass Transfer, Xi'an, China, May 8.

7. RESPONSABILIDADE AUTURAL

“Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho”.

COMPUTATIONAL MODEL OF GAS-OIL BLEEDING ON THE STANDARD OF SINGLE SPHERICAL BOWL UP UP IN VERTICAL PIPE

Rafael Leandro Fernandes Melo², rafael.melo@ifce.edu.br²
E. N. Silva¹, engenheiro.mecanico.erijanio@outlook.com¹
João Dehon da Rocha Júnior, joaodehonjunior@hotmail.com¹
Shyrlei da Silva Oliveira, shyrlei.arquiteta@gmail.com¹
Thiago da Silva Andre, thiago.andre@ifce.edu.br²
Fernanda Monique da Silva, fernanda.monique@ifce.edu.br²

¹Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, Avenida Hermes Fonseca - s/n Museu Camara CA, RN, 59084-100.

²Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Rua Pedro Bezerra de Menezes, 387 - Bairro Manoel Costa Moraes, Jaguaribe - CE, 63475-000.

Abstract. The present paper presents a study and analysis of a multiphase flow using numerical simulation. In Fluid Mechanics, it is common to find single-phase, single-fluid flow in pipes. In practice, for example, in the oil industry the streams are mostly flows involving more than one fluid, fluid accompanied by particles or with different phases. These multiphase flows are characterized by patterns. The object of study of this design is the spherical cap bubble which occurs when one has a gas bubble of diameter relative to the diameter of the large pipe. The numerical simulation analysis proposes the reduction of costs in the project aiming at the gain of time in and the improvement of quality. Therefore, numerical simulation for flow behavior determination is a very effective method to minimize the high cost of experiments. The study and modeling developed in this paper had as main base the VOF (Volume of Fluid) approach. The simulations were performed using the ANSYS CFX software to analyze the parameters and hydrodynamic characteristics of the bubble behavior in the flow. The results obtained from the interactions of the fluids in the multiphase flow at the top of the spherical cap bubble can describe how the interactions of the fluids will affect the pressure gradient in the pipeline. The velocity of the bubble in the simulated case is shown to be satisfactory in the Davies-Taylor empirical correlation. The other cases of 50% and 80% served as a comparison for analysis of the pressure gradient. The increase in bubble diameter decreases the total pressure gradient and increases the portion of the pressure gradient due to friction.

Keywords: Numerical Simulation; Spherical shell bubble; Multiphase Flow, Pressure Gradient, Free Surface.