

MODELO COMPUTACIONAL DO ESCOAMENTO MULTIFÁSICO DO TIPO BOLHA DE TAYLOR EM DUTOS VERTICAIS

Erijanio N. da Silva¹; André Luís N. Mota²; Victor W. F. de Azevedo³

¹Universidade Federal Rural do Semiárido, Departamento de Ciências Ambientais e Tecnológicas
– engenheiro.mecanico.erijanio@outlook.com

²Universidade Federal Rural do Semiárido, Departamento de Ciências Ambientais e Tecnológicas
– andre.mota@ufersa.edu.br

³Universidade Federal Rural do Semiárido, Departamento de Ciências Ambientais e Tecnológicas
– victorwfreire@ufersa.edu.br

No presente trabalho é apresentado um estudo e análise de um escoamento multifásico no Padrão Slug ou Bolha de Taylor. Em Mecânica dos Fluidos comumente se estuda escoamentos em tubulações com apenas um único fluido, com uma única fase, mas, na prática, como na indústria petrolífera, por exemplo, os escoamentos são em sua maioria fluxos que envolvem mais de um fluido, fluido acompanhado de partículas ou com diferentes fases. Os fluxos multifásicos são caracterizados por padrões, o objeto de estudo deste Projeto é o Padrão Slug. A Bolha de Taylor é de suma importância no processo de elevação do petróleo de maneira que tem influência significativa no gradiente de pressão. O estudo e modelagem desenvolvidos neste trabalho tiveram como principal base a abordagem VOF [Volume of Fluid]. As simulações foram feitas no software ANSYS CFX a fim de se analisar os parâmetros e características hidrodinâmicas do comportamento da bolha em uma tubulação de 200 mm de diâmetro em um intervalo de tempo de 1,5 s. Os resultados obtidos das interações dos fluidos no escoamento multifásico no padrão Slug descrevem o perfil de tensão de cisalhamento nas paredes da tubulação e no gradiente de pressão por atrito comparado com o método analítico proposto por Al-Sarkhi et al (2016). O perfil dos vetores velocidade na região do slug de gás demonstra o seu sentido na espessura do filme de líquido.

1. INTRODUÇÃO

Os modelos computacionais são utilizados para auxiliar os projetos mecânicos, de forma a prever o comportamento dos sistemas, o que torna a simulação numérica uma ferramenta de auxílio 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 fluxos multifásicos são caracterizados por padrões [MARINHO, 2008], que mudam à medida que a fração e velocidade do gás mudam. 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.

Quando acontece a transição entre regime disperso de bolhas resultando o escoamento intermitente de bolhas de aproximadamente o diâmetro da tubulação diz-se que essas bolhas em forma de um projétil são chamadas de bolhas de Taylor ou Slug de gás. Outra forma de caracterizar esse padrão é quando muitas bolhas de a aumentam seu volume devido a queda de pressão atingindo a pressão de saturação, o gás que estava em solução começa a sair, ao longo de um tubo vertical resultando numa enorme bolha da ordem de 60% do diâmetro da tubulação também podem ser designadas por Slugs de gás [GARCIA, 2005 e ANICETO, 2007]. À medida que o escoamento é desenvolvido, as forças viscosas presentes do escoamento atuam de forma a deformar o “slug”.

Este estudo tem por finalidade geral desenvolver um modelo computacional no ANSYS CFX, que possa ser utilizado para estudar como o petróleo se comporta em uma situação de escoamento com a Bolha de Taylor de aproximadamente o diâmetro do duto e comprimento maior que o diâmetro.

Com a obtenção dos resultados é possível analisar o comportamento de rastro de gás na zona do Slug de líquido deixada pela bolha à medida que a mesma escoar no duto, podendo ser obtido também o comportamento da tensão de cisalhamento na parede do filme de líquido ao redor da bolha.

1.1. Considerações sobre escoamento multifásico

Segundo Marinho et al. [2008], o escoamento multifásico se caracteriza como um fluxo formado por mais de um fluido presente que podem ser separados por uma interface, podendo ser constituído de uma fase contínua [meio líquido ou gasoso] e uma fase dispersa [bolhas de gás, gotas de líquido ou partículas sólidas], as quais podem ser compostas por diferentes espécies químicas, ou ainda, por duas fases contínuas.

De acordo com Brill e Mukherjee [1999], para escoamento vertical ascendente os padrões de escoamento são classificados em quatro tipos mostrados na Figura 1. Iniciando de bolhas dispersas de tamanhos e formas diferentes e aleatórias. Depois

intermitente com Slugs de gás decorrente de um aumento da fração volumétrica e velocidade superficial do gás. Transição ou agitado entre Slug e Anular. E por fim, anular onde a fase gás ocupa maior espaço no domínio deixando somente uma fina película de líquido na parede.

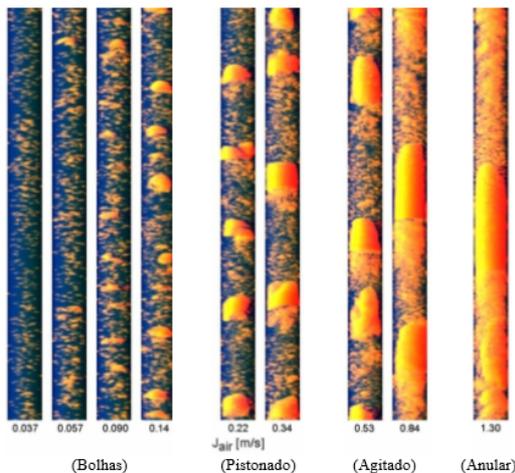


Figura 1: Padrões de Escoamento Vertical.

1.2 Bolha de Taylor e suas características

O Slug ou Bolha de Taylor está representado ilustrativamente na Figura 2. As zonas que caracterizam esse tipo de padrão são mostradas.

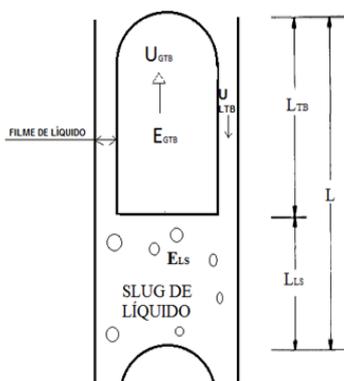


Figura 2: Ilustração da Bolha de Taylor.

Em que:

L_{TB} : Comprimento do Slug de Gás.

L_{LS} : Comprimento do Slug de

Líquido.

E_{GTB} : Retenção de Gás.

E_{LS} : Retenção de Líquido.

U_{GTB} : Velocidade do Slug de gás.

U_{LLS} : Velocidade do slug de líquido.

U_{LTB} : Velocidade do líquido no filme de líquido

De acordo com Duckler et al [1994] a retenção de determinada fase em uma região é conseguida a partir da equação 1

$$E_{fase} = \frac{A_{fase}}{A} \quad [1]$$

Alguns autores também chamam de fração de vazio da fase. O termo A é a área da sessão transversal, no caso da fase A_{fase} é a área ocupada pela fase.

Entre a bolha e a parede existe uma fina camada denominada filme e líquido, nesta região ocorre um escoamento descendente do fluido devido instabilidades. Esta velocidade descendente desenvolve uma tensão de cisalhamento nas paredes de maneira a agir na mesma direção do escoamento. Na zona do Slug de líquido devido a flutuações caóticas e turbulência de vórtices ocorre aumento de tensão de cisalhamento nas paredes em relação as zonas onde se tem apenas óleo [ZHENG; HE; CHE et al, 2007]. Duckler et al (1983) chama de zona do Slug de Líquido

onde é deixado um rastro de gás devido a forças que agem no escoamento.

1.3. Abordagem VOF [Volume de Fluido]

Uma das abordagens de métodos numéricos multifásicos é o método de volume de fluido [VOF]. Este é Euleriano-Euleriano, bem como o modelo homogêneo também é, em que todas as fases são tratadas como contínuo, mas ao contrário do VOF que não permite que as fases sejam interpenetrantes. [STENMARK, 2013].

Segundo Lima [2014], no modelo VOF, tem-se escoamento de diferentes fases contínuas imiscíveis e é simulado por meio da solução de uma única equação de momento e das equações das frações volumétricas de cada fase. Adicionalmente, a equação de energia da mistura pode ser incluída no sistema para fenômenos envolvendo fluxo térmico. Aplicações típicas envolvem jatos [jet breakup], movimento de grandes bolhas em líquidos, movimento de líquidos em canais abertos e qualquer fenômeno envolvendo separação nítida de líquido e gás.

O software calcula por meio de análises de volumes finitos as equações no método VOF que são mostradas abaixo:

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

[2]

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

[3]

$$\frac{\partial r}{\partial t} + \nabla \cdot (r U) = 0$$

[4]

Onde $\rho_m = \sum r_k \rho_k$. O subcrito m se refere às propriedades de misturas. Para as equações 2, 3 e 4 tem-se respectivamente conservação da massa, do momento e da fração volumétrica de uma fase.

2. METODOLOGIA

O modelo de escoamento de gás-óleo desenvolvido neste trabalho foi analisado de forma bidimensional, ou seja, em duas coordenadas, o que torna mais simples a simulação e obtenção dos resultados no software. O caso 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]. Ambas as fases são tratadas como contínuas. Esse modelo também é conhecido como Free Surface Model ou Modelo de Superfície Livre.

2.1 A Malha

O tubo tem um diâmetro de 200 mm, e comprimento de 5 m. O número de nós total dessa malha é 550000 e um total de 489159 elementos. A malha é hexaédrica. Uma malha em três dimensões tornaria o custo computacional muito alto e desnecessário. Um caso como este já tem seu tempo bem significativo de solução dado em vista que são 2000 iterações para se atingir um tempo de caso total de 2 s, sendo possível obter resultados para cada instante de tempo de 0,01 s.

As condições são:

Entrada: $Vazão\ de\ óleo = 30\ m^3/h$

Saída:

$Pressão\ Absoluta = 101325\ Pa$.

Os fluidos são ar como gás, com massa específica de $1,185\ kg/m^3$ e viscosidade de $1,831e-5\ Pa\ s$ e óleo com $920\ kg/m^3$ e viscosidade de $1,5\ Pa\ s$. a tensão superficial de óleo é $0,07\ N/m$.

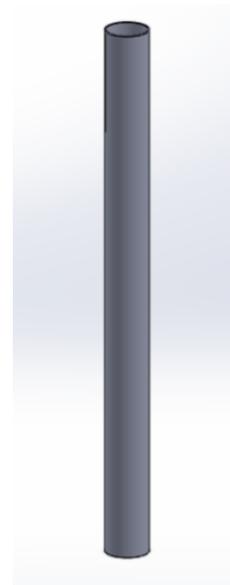


Figura 3: Tubo Vertical

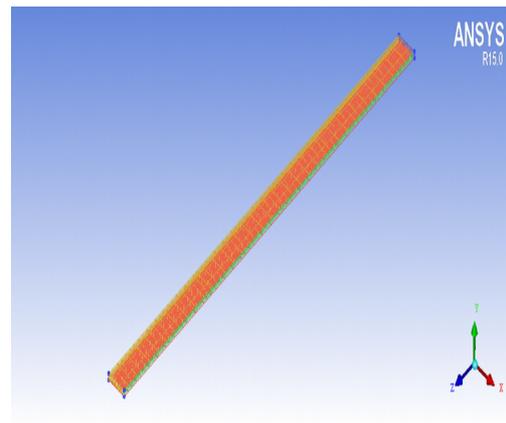


Figura 4: Construção do tubo em um domínio bidimensional

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Ascensão da Bolha de Taylor

A Figura 5 mostra os instantes iniciais da bolha na tubulação. No início de 0,1 s, é mostrada a ascensão da bolha com comprimento igual a $4D$, ou seja, quatro vezes o diâmetro da tubulação. As forças viscosas, de tensão superficial e de inércia começam a agir de maneira a desprender o gás no “Tail” (Cauda). É possível comparar como os

resultados da simulação descrevem o comportamento teórico e prático já conhecido e estudado por outros autores.

A Figura 5 mostra o tempo de subida a partir do instante de tempo de 0,1 s, a cada instante de tempo a velocidade superficial da bolha nos instantes iniciais sofre pequenas variações, pois, o caso é simulado de maneira transiente e a mesma sofre a influencia das forças viscosas e de inércia que provocam instabilidades. A Bolha de Taylor começa a escoar com uma velocidade superficial inicial à uma distância de 1 m da entrada do tubo tomando como referência o centro da bolha. As Linhas amarelas nesta Figura 5 representam as coordenadas no eixo Z

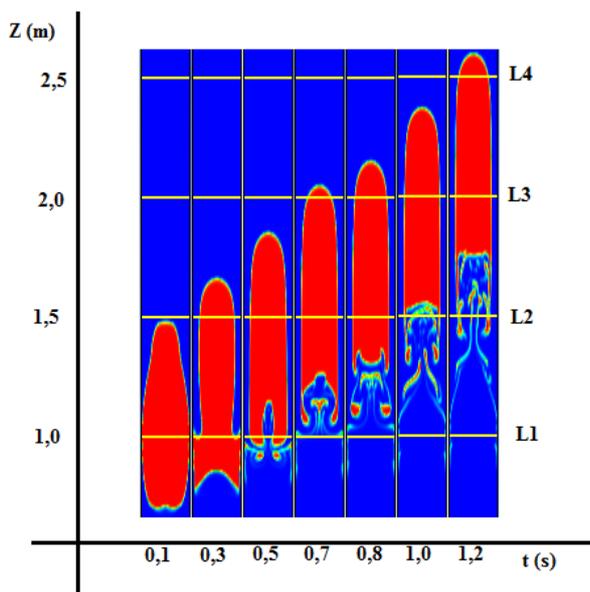


Figura 5: Situação da Bolha de Taylor nos Instantes Iniciais.

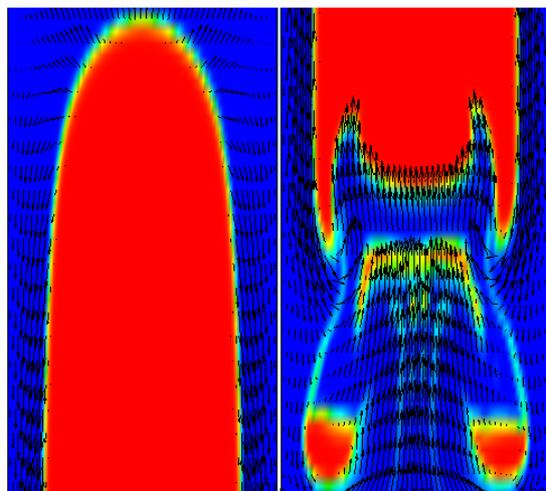
A Figura 5 mostra que o modelo numérico se tornou eficiente ao demonstrar o

formato e desenvolvimento da Bolha de Taylor. No modelo numérico é imposta uma condição onde a bolha inicia o escoamento em um ponto de referência, ou seja, seu centro à um metro de distância da entrada. A partir do instante de 0,5 s o desprendimento de gás na zona do Slug de líquido se torna mais presente. Taha e Cui [2005] explicam que nesta zona ocorre uma recirculação da fase líquida provocando o surgimento de pequenas bolhas devido à turbulência decorrente da velocidade descendente no filme líquido neste local. A Figura 6 [a] mostra os vetores da velocidade superficial do óleo no “nariz” da bolha até o filme de líquido no instante de tempo de 0,8 s. Na Figura 6 [b] é mostrada a simetria, em relação ao eixo axial da tubulação, no início do surgimento de pequenas bolhas na zona do Slug de líquido decorrentes de turbulência nesta região.

Na Figura 6 [a] o filme de líquido tende a ser descendente e acelerado e o líquido próximo a interface gás-líquido move de maneira mais rápida do que o líquido próximo a parede da tubulação devido à tensão de cisalhamento insignificante na interface gás líquido [KAWAJI; DEJESUS; TUDOSE, 1997].

Alguns autores como Zheng; He; Che [2007] mostraram que na região do escoamento do Slug de líquido a tensão cisalhante sofre grandes flutuações devido ao

escoamento caótico e vórtices turbulentos. Al-Sarkhi et al [2016] analisaram a influência que a Bolha de Taylor tem na espessura do filme de líquido com relação ao cisalhamento, nesta região, a direção e sentido do cisalhamento é o mesmo do escoamento ascendente, ou seja, como a velocidade do óleo é descendente a tensão é contrária à velocidade. Na Figura 7 é mostrado os perfis representativos de velocidade no formato de vetores na Bolha de Taylor tomando como referência a Figura 6 [a], a magnitude dos vetores não necessariamente é a magnitude da velocidade. No centro a velocidade alcança um valor de máximo e na superfície da bolha a velocidade é contrária ao escoamento, as forças de tensão superficial agem na interface gás-líquido contribuindo para o desprendimento de gás e sua deformação.



[a]

[b]

Figura 6: [a] Vetores Velocidade na Região do Filme de líquido. [b] pequenas bolhas na região do Slug de líquido.

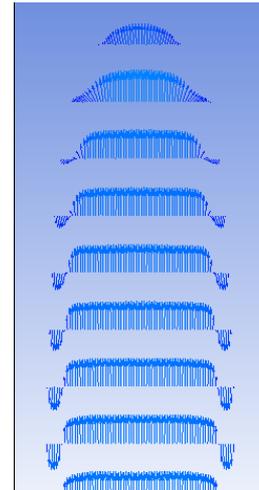


Figura 7: Perfis de Velocidade Superficial do Slug.

3.2 Perfil de Velocidade do Óleo

Na Figura 5 foram inseridas Linhas destacadas por amarelo que tem por finalidade analisar o desenvolvimento do perfil de velocidade superficial do óleo no escoamento e como o deslocamento da bolha de Taylor influencia nesse parâmetro.

No Gráfico 1 é mostrado os perfis de velocidade do óleo para as Linhas L2, L3, L4 e o perfil calculado analiticamente proposto por Çengel e Cimbala (2007) para escoamentos turbulentos denominado Perfil de Velocidade da Lei de Potência. O caso é laminar, porém, foi imposta uma condição inicial no escoamento para que a velocidade do óleo fosse aproximadamente uniforme na sessão transversal.

O Gráfico 1 mostra que a Linha 3 e Linha 4 se sobrepõem perfeitamente demonstrando a uniformidade da velocidade com o comprimento da tubulação e que são

semelhantes e próximos do perfil calculado analiticamente para este instante de tempo. O perfil da Linha 2 se mostra perfeitamente influenciado pelo deslocamento da bolha, ou seja, as forças envolvidas no escoamento nesta região tendem a mudar a direção do escoamento do óleo que se torna descendente ao redor da bolha como foi visto na Figura 6 [a].

O Gráfico 2 mostra os perfis para o instante de tempo de 0,8 s. Neste foi conveniente inserir o perfil de velocidade proposto por Çengel e Cimbala (2007) para escoamento laminar, pois o escoamento já se encontra em seu estado completamente desenvolvido.

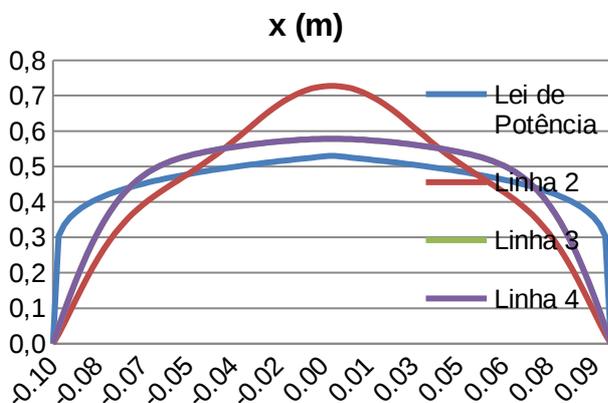


Gráfico 1: Perfis de Velocidade Superficial do Óleo no Instante de tempo de 0,1 s.

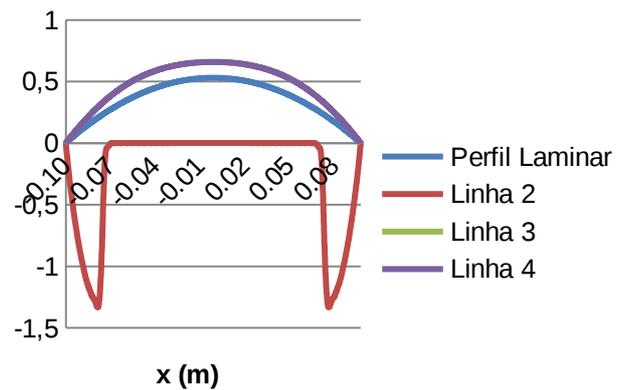


Gráfico 2: Perfis de Velocidade Superficial do Óleo no Instante de tempo de 0,8 s.

O Gráfico 2 mostra que o perfil de velocidade do óleo das Linhas 3 e 4 se tornam completamente desenvolvido devido a tensão de cisalhamento e condição de não-escorregamento nas paredes como é conhecido teoricamente. O perfil referente à Linha 2 mostra o comportamento de velocidade superficial descendente na espessura do filme de líquido.

3.3 Tensão de Cisalhamento na Zona da Bolha

Na Figura 8 é mostrada a escala de cor da tensão de cisalhamento na parede da tubulação. Na região antes da bolha (Slug de Líquido) o perfil da tensão de cisalhamento tem valor positivo e de cor vermelho. Entre a bolha e a tubulação a tensão de cisalhamento tem cor azul, ou seja, cisalhamento mínimo e negativo. A Bolha de Taylor influencia diretamente no escoamento do óleo ao seu

redor causando flutuações no escoamento. A tensão de cisalhamento muda e tende a ser constante a medida que a fase de gás se torna menos presente.

Na Figura 8 a legenda mostra a escala de tensão de cisalhamento na parede. Zheng; He; Che [2007] estudaram a importância de se analisar a tensão de cisalhamento nas paredes no filme de líquido e sua influência na transferência de massa de material do tubo aumentando a possibilidade da ocorrência de corrosão. Este estudo não objetiva analisar a transferência de massa, mas, demonstrar o comportamento do cisalhamento sendo possível a comparação para trabalhos futuros.

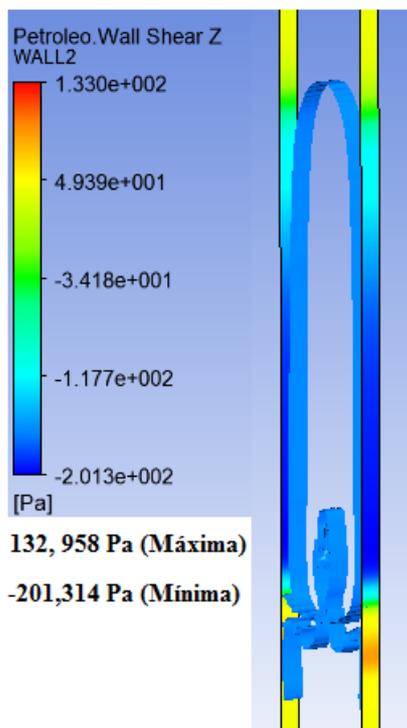


Figura 8: Perfil da Tensão de Cisalhamento na Parede.

No Gráfico 3 é mostrado o perfil de tensão de cisalhamento na região da Bolha de Taylor comparada com o método analítico proposto por Al-Sarkhi et al (2016). A referência inicial tomada no eixo X desse perfil foi a partir do “nose” da Bolha, onde se encontra o início da zona do Slug de maneira descendente. O perfil obtido na simulação numérica mostra de maneira eficiente o que já é esperado teoricamente e empiricamente. O Gráfico 3 mostra o aumento da tensão de cisalhamento a medida que a espessura do filme de líquido diminui. Torna-se conveniente expressar esse valor positivo para uma melhor visualização.

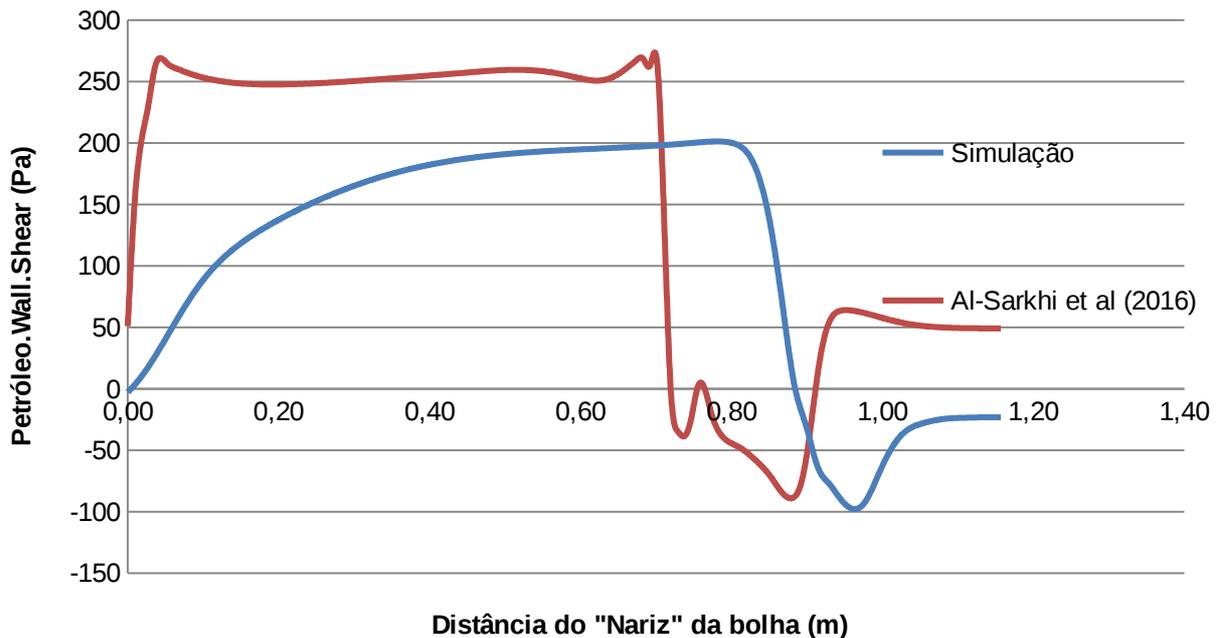


Gráfico 3: Tensão de Cisalhamento Na Região da Bolha de Taylor.

O Gráfico 3 demonstra que o desenvolvimento da tensão de cisalhamento, na parede na região da Bolha de Taylor, calculada e obtida na simulação se comportaram semelhantemente. À medida

4 CONCLUSÕES

Este trabalho destacou como principal objetivo a modelagem numérica e demonstração do comportamento do escoamento da Bolha de Taylor usando a abordagem VOF a fim de mostrar a eficiência do método na demonstração da interface entre as fases.

Para o caso simulado é possível afirmar que o comportamento de desprendimento da fase de gás devido a forças viscosas na região da zona do Slug de líquido foi alcançado de acordo com o exposto em literaturas e

que ocorre o distanciamento do “nose”, ocorre um aumento e à uma distância próxima ao comprimento da bolha o cisalhamento sofre flutuações, ou seja, na região do Slug de Líquido.

trabalhos anteriores, podendo com isso destacar as flutuações de tensão de cisalhamento nas paredes nesta região.

O desenvolvimento do perfil de velocidade da fase líquida na tubulação em diferentes regiões pode ser verificado de maneira eficiente e precisa de acordo com o cálculo analítico proposto para escoamento com uma única fase.

O comportamento da tensão de cisalhamento nas paredes sofre pequenas

diferenças entre os métodos utilizados, porém, são semelhantes inclusive para demonstrar as flutuações na região do Slug de líquido.

A simulação numérica deste trabalho proporcionou satisfatoriamente bons resultados. Para que isso fosse possível é

importante citar o modelo de turbulência utilizado que foi Laminar (None).

Em trabalhos futuros é importante analisar o caso com atenção particular no gradiente de pressão e como este é influenciado pelos parâmetros hidrodinâmicos da Bolha de Taylor.

5 REFERÊNCIAS

AL-SARKHI, et al. *Positive frictional pressure gradient in vertical gas-high viscosity oil slug flow*. International Journal of Heat and Fluid Flow, Dhahran, p.51-53, Feb 19. 2016.

ANICETO, Paulo H. da Silva. *Desenvolvimento de Técnica Baseada em Fluorescência para Medição de Escoamento Bifásico em Regime de Golfada*. 2007, 123p. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica, Pós Graduação em Engenharia Mecânica. Rio de Janeiro, RJ.

BRENNEN, C. E. **Fundamentals of Multiphase Flows**. 1ª ed. California Institute of Technology, 2005, 410p.

BRILL, James P.; MUKHERJEE, Hemanta. **Multiphase Flow in Wells**. 1ª ed. Society Petroleum Engineers Inc, 1999, 149p.

DAMSOHN, M.; PRASSER, H. M. *High-speed liquid film sensor for two-phase flows with high spatial resolution based on electrical conductance*. Flow Measurement and Instrumentation, v. 20, p. 1-14, 2009.

DUCKLER, A. E. et al. *Hydrodynamic Model for Gas-Liquid Slug Flow in Vertical Tubes*. AIChE Journal, Houston, TX, p. 17-18, Nov, 1983.

GARCIA, Valdemar Raul Ramos. *Revisão bibliográfica sobre Escoamento gás-líquido em condutas verticais e inclinadas*. 2005, 241p, Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Lisboa, Portugal.

MARINHO, José Luís Gomes. *Estudo do Escoamento Multifásico Tipo Bolha de Taylor em Dutos e Conexões Curvadas*. 2008, 131p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB.

STENMARK , Elin. *On Multiphase Flow Models in ANSYS CFD Software*. 2013, 75p. Master's thesis, Chalmers University Of Technology. Göteborg, Sweden.

TAHA, Taha; CUI, Z. F. *CFD modelling of slug flow in vertical tubes*. Chemical Engineering

Science, Parks Road, Oxford, p. 679, Jul 4, 2005.

KAWAJI, M; DEJESUS, J. M; TUDOSE, G. *Investigation of Flow Structures in Vertical Slug Flow*. Nuclear Engineering and Design, Toronto, Ont, p. 43, Jun 12, 1997.

ZHENG, Donghong; HE, Xiao; CHE, Defu.. *CFD simulations of hydrodynamics characteristics in a gas-liquid vertical upward slug flow*. International Journal of Heat and Mass Transfer, Xi'an, China, p. 4162-4163, May 8, 2007.