



# Simulação de escoamento bifásico aplicando a técnica da fluidodinâmica computacional

Simulation of biphasic flow applying the computational fluid dynamics technique

S. S. A. Silva<sup>1\*</sup>; L. F. S. Jesus<sup>1</sup>; P. L. de Santana<sup>1</sup>; A. S. Silva<sup>1</sup>, R. L. Pagano<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Programa de pós-graduação em Engenharia Química /Laboratório de Modelagem e Simulação/CCET, Universidade Federal de Sergipe, 49100-000, São Cristóvão/SE, Brasil

\*saviosayanne@hotmail.com

(Recebido em 25 de julho de 2017; aceito em 12 de junho de 2018)

Escoamentos bifásicos podem ser encontrados nas mais diferentes áreas da indústria química, alimentícia, de conversão energética, processamento de materiais, bem como nas de petróleo e gás. Nesta última em particular, em setores como produção e transporte, esses escoamentos percorrem grandes distâncias em trechos ascendente ou descendente, resultando em modificações nas propriedades da mistura. O correto entendimento do comportamento dessa mistura em cada trecho do escoamento é de fundamental importância para que problemas relacionados com a garantia do escoamento possam ser previstos e antecipados, assegurando também viabilidade técnica e econômica do campo petrolífero. Devido aos recentes avanços tecnológicos em áreas como modelagem e simulação, aplicações de técnicas alternativas como a fluidodinâmica computacional (CFD) vêm sendo valia nessas investigações, devido principalmente ao seu baixo custo financeiro quando comparado com a construção de aparatos experimentais. Diante deste contexto, este trabalho teve como finalidade a aplicação da técnica de fluidodinâmica computacional para a reprodução do escoamento bifásico presente em tubulações industriais, tendo como base a implementação de um modelo algébrico interfacial (AIAD).

Palavras-chave: CFD, AIAD, coeficiente de arrasto.

Two-phase flows can be found in the most different fields of the chemical, food, energy conversion, materials processing, as well as in the oil and gas industry. In this last one, in particular, in sectors such as manufacturing and transport, these flows travel great distances in lines upward or downward, resulting in changes in the mixture properties. The correct understanding of this mixture behavior in each section of the flow has fundamental importance in order that problems related to the assurance of the flow could be foreseen and anticipated, also providing technical and economic viability of the oil field. Due to recent technological advances in areas such as modeling and simulation, application of alternative techniques such as computational fluid dynamics (CFD) has been of great value in these investigations, mainly due to its low cost when compared with the construction of experimental apparatus. In this context, the purpose of this work was to apply computational fluid dynamics to reproduction of the biphasic flow present in industrial pipes, based on the implementation of an interfacial algebraic model (AIAD).

Keywords: CFD, AIAD, drag coefficient

## 1. INTRODUÇÃO

A presença de escoamentos multifásicos em setores da indústria de petróleo é comum em toda linha de produção e transporte. Sua ocorrência se mostra predominante desde a extração do petróleo das rochas sedimentares, passando pelos *risers* até nas linhas de transferência para unidades de refino [1]. Com a crescente demanda por fontes de energia e devido às recentes descobertas de petróleo em camadas do pré-sal, setores de exploração e produção de empresas petrolíferas têm realizado grandes investimentos em estudos direcionados a esses escoamentos, visto que o conhecimento fenomenológico do mesmo é de fundamental importância na predição da viabilidade técnica e econômica de um determinado campo petrolífero, principalmente em plataformas *offshore*, onde longas distâncias estão envolvidas [2].

Durante esses escoamentos, diferentes padrões podem ser produzidos a depender das condições operacionais (pressão e vazão), propriedades físicas dos fluidos e configuração geométrica do tubo. O padrão estratificado é um desses padrões comumente encontrado em poços de petróleo e

gasoduto [1]. Esse padrão tem como principal característica uma interface que separa ambas as fases, onde devido à gravidade na região acima da interface tem a predominância da fase menos densa. As turbulências geradas próximo essa interface ocasionam a formação de pequenas oscilações, comumente chamada de ondas.

Na literatura vários modelos interfaciais têm sido explorados, porém a grande maioria, embora sejam sensíveis a transferências de movimento próximo à interface, ainda não são capazes de descrever de forma completa todas as informações morfológicas, como a formação de bolhas e gotas. No entanto, recentemente, um modelo proposto por Hohne e Vallee (2009) [3] mostrou-se capaz na descrição dessas características morfológicas, esse novo modelo denominado *Algebraic interfacial Area Density* (AIAD) tem como base a definição de um novo coeficiente de arrasto oriundo de um conjunto de funções e correlações.

A busca por um correto entendimento acerca dos fenômenos presente nesses escoamentos, gera a necessidade de um conhecimento mais aprofundado do seu comportamento em campos teóricos e experimentais. Porém a construção de aparatos experimentais para reprodução desses estudos requer custos bastante elevados. Logo, a solução para problemas dessa natureza está no emprego de técnicas alternativas, a fluidodinâmica computacional (CFD) é uma delas. Trata-se de uma técnica bastante utilizada em meios acadêmicos, tendo sua aplicação facilmente encontrada na literatura para descrição dos mais diversos estudos como de turbulência [4] a otimização da produção de hidrogênio [5], e nos últimos anos vem recebendo também grande atenção de diversos setores industriais devido a possibilidade da obtenção detalhada de informações físicas de um determinado campo de escoamento tridimensional (3D).

Diante desse cenário e com o propósito de contribuir para a pesquisa e desenvolvimento de sistemas em que seja possível garantir o escoamento e transporte do fluido produzido, este trabalho tem como objetivo principal simular através da técnica de fluidodinâmica computacional (CFD), o comportamento interfacial dos escoamentos bifásicos em tubulações industriais a partir da implementação de um modelo *Algebraic interfacial Area Density* (AIAD).

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

O modelo desenvolvido no trabalho trata-se de um tubo horizontal com escoamento bifásico líquido-gás [3]. A configuração do tubo retangular contém duas entradas, onde ambos os fluidos são injetados de modo concorrentes sendo separados por uma lâmina de 1 mm de espessura. As propriedades físicas do líquido e do gás usados na simulação são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Propriedades físico-químicas dos fluidos.

Propriedades Físicas	Óleo	Ar
Densidade	920 kg/m <sup>3</sup>	1,185 kg/m <sup>3</sup>
Viscosidade dinâmica	1,5 Pa.s	1,8x10 <sup>-5</sup> Pa.s
Tensão superficial	0,97 N.m	

A simulação foi realizada utilizando o pacote computacional da ANSYS Inc. versão 14. Inicialmente para a criação do volume de controle foi utilizado o sub-pacote *Design Modeler* do software CFX. As dimensões físicas adotadas estão listadas na Tabela 2.

A distribuição geométrica de entrada foi definida de forma que se tenha uma injeção separada dos fluidos para dentro do tubo retangular. O ar flui através da parte superior e o óleo através da parte inferior, proporcionando perfis de velocidade homogêneos. Ambos os fluidos, entram em contato no final da extremidade da lamina de 0,15 m de comprimento. A seção livre de cada fase pode ser controlada inclinando a lâmina para cima ou para baixo. Sendo assim é possível minimizar a perturbação causada pelo primeiro contato entre as fases, ou se necessário introduzir perturbações.

Tabela 2: Dimensões utilizadas para construção do tubo retangular.

Dimensões	Dados
Espessura	0,03 m
Comprimento	2,40 m
Altura	0,10 m
Comprimento da lâmina	0,15 m
Espessura da lâmina	0,001 m

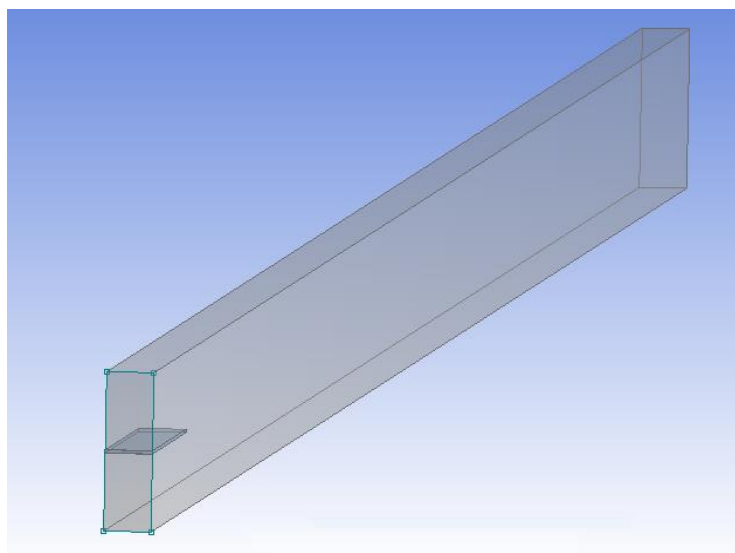


Figura 1: Geometria do tubo retangular

Utilizando o sub-pacote *Meshing* inicialmente foi gerada a malha, a partir da geometria elaborada no *Design Modeler*. A malha criada pelo *Meshing* para o domínio foi do tipo não estruturada, ou seja, não se tem uma distribuição regular dos elementos. A malha construída apresenta aproximadamente 217 mil elementos hexaédricos e pode ser visualizada na Figura 2.

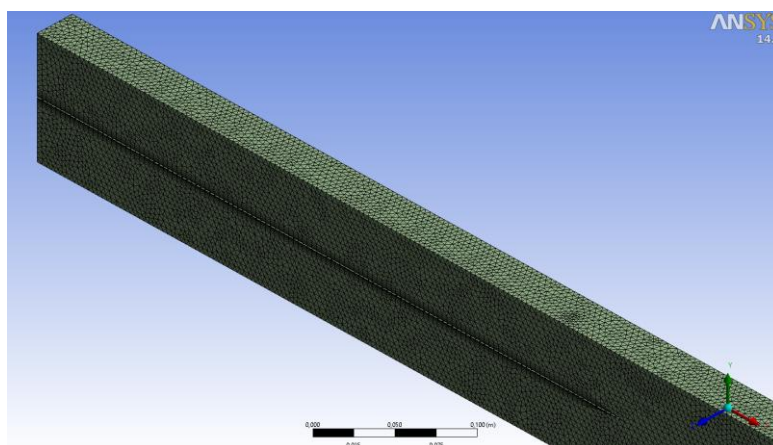


Figura 2: Estrutura de malha do tubo retangular próximo à lâmina

## 2.1 Modelagem Matemática

As hipóteses adotadas para a resolução das equações matemáticas de conservação foram as seguintes: sistemas de coordenadas cartesianas; os fluidos foram considerados newtonianos e incompressíveis; escoamento em regime transiente, tridimensional e turbulento; sistema isotérmico; sem geração e consumo de espécies. As hipóteses adotadas têm como principal finalidade reduzir o esforço computacional viabilizando a análise do problema. As equações de

conservação de massa e de quantidade de movimento utilizadas são definidas pelo pacote computacional *ANSYS/CFX* versão 14, e descritas a partir de um modelo de dois fluidos onde para cada fase presente tem-se um conjunto de equações. Vale ressaltar também que o modelo assim estabelecido possibilita a análise do escoamento sem a utilização do balanço de energia. A seguir é apresentada as equações utilizadas pelo software da *ANSYS Inc*.

$$\frac{\partial(\alpha_L \rho_L)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_L \rho_L \vec{v}_L) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\alpha_G \rho_G)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_G \rho_G \vec{v}_G) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\alpha_L \rho_L)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_L \rho_L \vec{v}_L \vec{v}_L) = -\alpha_L \nabla P_L + \alpha_L \rho_L \vec{g} + \nabla(\bar{\tau}_L) \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\alpha_G \rho_G)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_G \rho_G \vec{v}_G \vec{v}_G) = -\alpha_G \nabla P_G + \alpha_G \rho_G \vec{g} + \nabla(\bar{\tau}_G) \quad (4)$$

Onde  $\frac{\partial(\alpha_{L,G} \rho_{L,G})}{\partial t}$  indica a transferência da quantidade de movimento ou massa devido transporte advectivo em um volume de controle,  $\nabla \cdot (\alpha_{L,G} \rho_{L,G} \vec{v}_{L,G} \vec{v}_{L,G})$  faz referência a transferência da quantidade de movimento devido transporte convectivo,  $\alpha_{L,G} \rho_{L,G} \vec{g}$  é o termo de força gravitacional,  $\alpha_{L,G} \nabla P_{L,G}$  é o divergente de contribuição da pressão e  $\nabla \bar{\tau}_{L,G}$  o tensor referente a cada fase.

## 2.2 Amortecimento da Turbulência

O modelo de turbulência utilizado para a simulação foi o  $k - \omega$  devido ao seu tratamento mais preciso em regiões próximo à parede do sólido. Porém, devido aos elevados gradientes de velocidade na superfície livre, especialmente na fase gasosa, tem-se a produção de uma elevada turbulência ao longo do escoamento bifásico, mesmo quando se utiliza modelos como o  $k - \epsilon$  ou  $k - \omega$  [6]. Deste modo para uma descrição e aplicação correta do modelo interfacial algébrico (AIAD) é necessária uma expressão para o amortecimento da turbulência em regiões próximo da interface.

Egorov [7] propôs um procedimento de amortecimento simétrico possuindo correlação direta entre o dimensionamento dos elementos de cada malha. Este procedimento fornece um amortecimento para a turbulência na parede em ambas as fases. Ele baseia-se na modificação da equação de  $\omega$  do modelo de turbulência  $k - \omega$  descrito por Wilcox [8]. A fim de imitar o amortecimento da turbulência próximo a superfície livre, Egorov introduziu o seguinte termo no lado direito das equações de ambas as fases:

$$s_{D,(L,G)} = A \Delta y \beta \rho_{L,G} \left( B \frac{6 \mu_{L,G}}{\beta \rho_{L,G} \Delta n^2} \right)^2 \quad (5)$$

Sendo  $\Delta y$  um comprimento característico local,  $B$  um coeficiente,  $\Delta n$  é o tamanho específico da malha no qual a interface permeia,  $\mu$  e  $\rho$  a viscosidade e densidade da fase correspondente. O fator  $A$  referente a densidade de área interfacial, ativa este termo somente próximo a superfície livre, isto é feito a partir da substituição do termo  $\omega$  de dissipação  $(-\alpha_{L,G} \beta \rho_{L,G} \omega_{L,G}^2)$  pelo novo termo fonte [3].

## 2.3 Modelagem da Superfície Livre

A modelagem fluidodinâmica da superfície livre foi feita a partir de uma abordagem Euler-Euler presente no *ANSYS/CFX*, onde ambas as fases presentes são tratadas matematicamente como contínuas e interpenetrantes. Além disso, um modelo interfacial proposto por Egorov [7] e descrito

por Hohne [3] em seu artigo foi adotado, trata-se de um modelo que permite detectar a mudança morfológica de cada fase presente no escoamento, esse modelo é denominado *Algebraic Interfacial Area Density (AIAD)*.

Na abordagem do modelo AIAD, inicialmente é definido a partir das frações volumétricas presente as funções de mistura, deste modo é possível agora diferenciar matematicamente as morfologias da superfície livre, das gotas e das bolhas dispersas no escoamento.

$$f_D = [1 + e^{\alpha_D(\alpha_L - \alpha_{D,limit})}]^{-1} \quad (6)$$

$$f_B = [1 + e^{\alpha_B(\alpha_G - \alpha_{B,limit})}]^{-1} \quad (7)$$

$$f_{FS} = 1 - f_B - f_D \quad (8)$$

Nas expressões acima temos como  $f_D$  e  $f_B$  sendo os coeficientes de mistura para gotas e bolhas, respectivamente e  $\alpha_{D,limit}$  e  $\alpha_{B,limit}$  sendo os limitadores da fração volumétrica. Tendo os valores de  $\alpha_{D,limit} = \alpha_{B,limit} = 0,3$  e  $f_D = f_B = 0,70$  respectivamente como descrito por Hohne [3,9]. Para o presente trabalho foi adotado que as morfologias das gotas e bolhas iriam assumir formas esféricas com diâmetros invariáveis. Assim é possível determinar a densidade de área interfacial (IAD) para bolhas a partir da equação abaixo, o cálculo para de gotas é similar.

$$A_B = \frac{6\alpha_G}{d_B} \quad (9)$$

Sendo o  $d_B$  é o diâmetro da bolha. A densidade de área interfacial (IAD) da superfície livre é definida como o valor absoluto do gradiente da fração de líquido nas direções x, y e z.

$$A_{FS} = |\nabla\alpha_L| = \sqrt{\left(\frac{\partial\alpha_L}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial\alpha_L}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial\alpha_L}{\partial z}\right)^2} \quad (10)$$

A densidade da área interfacial local é calculada pelo somatório da área  $A_j$  de cada morfologia, ponderado por suas respectivas funções de mistura  $f_j$ :

$$A = \sum_j f_j A_j, \quad j = FS, B, D \quad (11)$$

Em simulações envolvendo superfície livre, normalmente equações clássicas como a da força de arrasto não demonstram um modelo físico realista, isso ocorre devido à grande similaridade entre as velocidades de ambos os fluidos próximos à interface. A fim de corrigir essa discrepância, Hohne [3] assumiram em seu trabalho que a tensão de cisalhamento perto da superfície comporta-se de forma similar à tensão de cisalhamento próxima à parede.

$$\tau_w = \mu \left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{y=0} \quad (12)$$

A determinação dos componentes do vetor normal à superfície livre é realizada a partir do gradiente da fração de vazios nas direções x, y, z. Como resultado, a expressão para o coeficiente de arrasto da superfície livre pode ser definida como:

$$C_{D,FS} = \frac{2(\alpha_L \tau_{W,L} + \alpha_G \tau_{W,G})}{\rho |v_L - v_G|^2} \quad (13)$$

O modelo AIAD faz uso de três coeficientes de arrasto:  $C_{D,B} = 0,44$  para bolhas,  $C_{D,D} = 0,44$  para gotas e  $C_{D,FS}$  que é definido pela equação 13. O coeficiente de arrasto total é calculado de forma similar ao da densidade de área interfacial, com a soma ponderada dos coeficientes de arrasto para todas as morfologias:

$$C_D = \sum_j f_j C_{Dj}, \quad j = FS, B, D \quad (14)$$

Todo processo de simulação foi realizado em um servidor IBM Torre x3500M4 Intel Xeon E5-2620 Six-Core 2,0GHz 8GB. Para os cálculos da simulação foi implementada como condição uma velocidade inicial superficial de entrada para a fase gasosa de 5,0 m/s e para a fase líquida de 1,0 m/s. A condição de saída do tubo foi definida como sendo controlada pela pressão. Uma outra implementação também importante principalmente para o tempo computacional é a condição de simetria adicionada a algumas paredes do tubo. O cálculo para o regime transiente com o intervalo de 5,0 segundos de simulação necessitou de 4 dias para ser processado. A implementação do modelo AIAD e funções de amortecimento de turbulência no CFX foram feitos através da linguagem de comando CCL (CEL, Expressões). Na Tabela 3 é possível identificar outras condições adicionais implementadas anteriormente a simulação.

Tabela 3: Configurações adicionais implementadas no SETUP.

Configurações	Tubo Retangular
Morfologia dos fluidos	Fluido contínuo
Regime de escoamento	Subsônico
Pressão	1 bar
Temperatura	25°C
Intensidade da turbulência de entrada para ambas as fases	Medium (Intensity=5%)
Método de discretização	High Resolution
Critério de convergência	RMS (Raiz do desvio Quadrático Médio)
Resíduo para convergência	$1 \times 10^{-4}$
Time step	0,001 s
Tempo total	5 s

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com a simulação da superfície livre no tubo retangular é possível visualizar pequenas instabilidades da interface, resultado da variação da densidade de área interfacial. As sequências de imagens na Figura 3 demonstram o comportamento qualitativo da criação e propagação das ondas ao longo do tubo.

É possível visualizar na sequência de imagens que a primeira onda desenvolvida no tempo de 0,5 s possui uma distribuição geométrica côncava além de uma interface longa, isto ocorre principalmente devido à viscosidade relativamente alta da fase líquida. Em regiões do tubo onde se tem altas frações da fase líquida, as transferências da quantidade de movimento próximo a interface são relativamente menores se comparadas com regiões onde se tem a predominância da fase gasosa,

porém isto é comum devido a essa transferência da quantidade de movimento ser induzida principalmente pela diferença de velocidade com que as fases escoam num determinado momento. À medida que a simulação se desenvolve a distribuição da fração de líquido começa a predominar ao longo do tubo, fazendo com que agora as ondas produzidas inicialmente transfiram essa quantidade de movimento, gerando o fenômeno da propagação, ou seja, começa a se ter a produção de ondas menores e mais rápidas que as produzidas inicialmente, em seguida elas se aglomeram ao final do tubo.

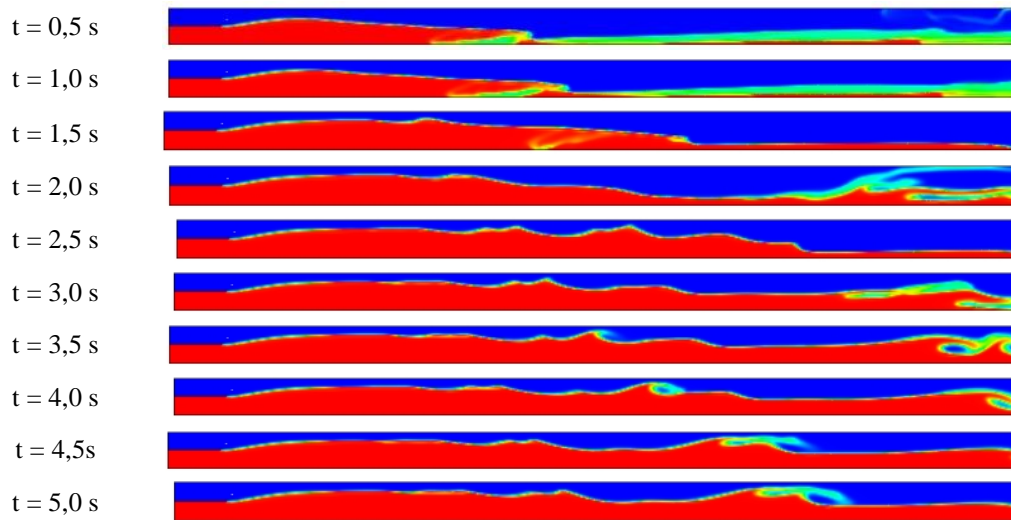


Figura 3: Sequência de imagens da  $Var=5\text{ m/s}$  e  $Vóleo=1\text{m/s}$  ao longo do tubo retangular.

É interessante pontuar que a formação das ondas produzidas pode ser também induzida por alguma perturbação oriunda nos primeiros metros do tubo após a lamina. Quanto maior a distância da lamina, maior a amplitude das ondas geradas, conseqüentemente maior a transferência de movimento entre as fases. Na Figura 4 é descrito com detalhes o comportamento da fração de óleo durante o instante de tempo de 3,72 s, as regiões com baixa fração de líquido localizadas bem à frente da onda representam a possível presença de gotas, devido a sua densidade e a pressão exercida sobre a região essas gotas incidem e em seguida coalescem sobre a superfície livre.

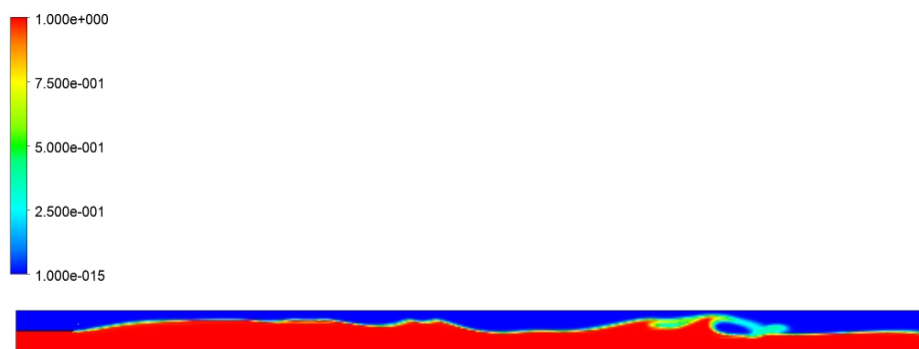


Figura 4: Detalhes da fração volumétrica de óleo na formação das ondas em  $t = 3,72\text{ s}$ .

#### 4. CONCLUSÃO

O entendimento do comportamento físico que a interface assume durante o escoamento em tubulações é extremamente importante para a indústria petrolífera, pois com este tipo de estudo é possível não só garantir o escoamento dos fluidos, como também determinar melhores condições operacionais para seu transporte. Diante disto, os resultados apresentados nessa simulação com a implementação do modelo de AIAD é um avanço na predição dos fenômenos interfaciais recorrente nesses tipos de escoamento. O comportamento de geração e propagação de ondas foram bem

reproduzidos, porém se faz necessário um estudo experimental para que seja possível uma comparação não só qualitativa, mas também quantitativa detalhada. Simulações envolvendo diferentes fluidos e outras dimensões geométricas estão sendo planejados.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao ao Dr. Thomas Hohne do Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR) Institute of Fluid Dynamics, a Capes, PETROBRAS, PRH-ANP 45 e ao PEQ/UFS pelo suporte financeiro e colaboração.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Shoham O. Mechanistic modeling of gas-liquid two-phase flow in pipes. The society of petroleum Engineers; 2005.408 p.
2. Souza AD. Estudo da perda de carga em escoamento multifásico utilizando técnicas de inteligência artificial com ênfase no escoamento de petróleo [Dissertação]. Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE, Brasil; 2011. 152 p.
3. Hohne T, Vallee C. Modelling of stratified two phase flows using an interfacial area density model. WIT transactions on engineering sciences. 2009 Jun;63:123-133, doi:10.2495/MPF090111
4. Sant'Anna MCS, Sarmento SM, Silva GF, Medronho RA, Lucena S. Escolha do modelo de turbulência para um leito fluidizado. *Sci Plena*. 2015;11(10), doi:10.14808/sci.plena.2015.104203
5. Netto LDS, Reis TCG, Guimarães AS, Silva AS, Santana PL, Pagano RL. Otimização da produção de hidrogênio utilizando o algoritmo genético. *Sci Plena*. 2016 Abr 10;12(5), doi:10.140808/sci.plena.2016.054205
6. Ansys CFX. Ansys cfx user Manual. Canonsburg: Ansys Inc; 2006. 407 p.
7. Egorov Y. Validation of CFD codes with PTS-relevant test cases. Evol-Ecora-D07, disponível em <<https://domino.grs.de/ecora.nsf>>, data de acesso 10/11/2016.
8. Wilcox D.C. Turbulence modelling for CFD. La Cañada, California: DCW Industries Inc; 1994.
9. Hohne T, Mehloop JP. Validation of closure for interfacial drag and turbulence in numerical simulations of horizontal stratified gas-liquid flows. *Journal Computational Multiphase Flows*. 2014 Jun;62:1-16, doi:10.1016/j.ijmultiphaseflow.2014.01.012