

# MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO IMISCÍVEL DE ÁGUA E ÓLEO ATRAVÉS DE UM CANAL SOB DIFERENTES CONDIÇÕES OPERACIONAIS

F. MIOTTO<sup>1</sup>, M. B. QUADRI<sup>1</sup>, C. S. GONÇALVES<sup>1</sup> e D. P. TRAMONTIN<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos

E-mail para contato: fabio.miotto@posgrad.ufsc.br

**RESUMO** - O escoamento multifásico em dutos e canais é de extrema importância na indústria do petróleo, envolvendo desde operações de exploração até de transporte. A complexidade deste tipo de problema consiste em se descrever a movimentação da interface e a fluidodinâmica das fases. O escoamento de óleo e água, através de um canal de seção constante, produz uma interface líquido-líquido. O comportamento dessa interface é analisado com o emprego do método *Level Set* e das equações de *Navier-Stokes* e da continuidade, segundo um esquema de elementos finitos implementado no *software COMSOL Multiphysics 4.3b*. Três geometrias foram consideradas, avaliando-se: a influência da velocidade de injeção, a perturbação causada pela presença de uma placa de orifício, o efeito da proporção dos fluidos no domínio e os padrões de escoamento resultantes. O modelo reproduziu comportamentos análogos aos apresentados por outros autores, observando-se escoamentos dos seguintes tipos: ondas rolantes, estratificado liso e ondulado.

## 1. INTRODUÇÃO

O escoamento multifásico em dutos e canais são comuns na indústria de petróleo, principalmente na extração e transporte em oleodutos. A complexidade deste tipo de escoamento é inerente à diversidade de arranjos espaciais que as fases podem apresentar (AL-WAHAIBI *et al.*, 2012; Xu, X.-X., 2007).

As características onde ocorre o escoamento, sejam elas condições operacionais, geométricas e propriedades físicas das fases combinadas, determinam certas classes de configurações interfaciais, normalmente denominadas regime ou padrão de escoamento multifásico (Paiva, 2011).

É desejável conhecer o tipo de escoamento em determinado sistema, para, desta forma, adaptar o sistema e minimizar o impacto causado pela ocorrência de problemas decorrentes do escoamento multifásico.

## 2. MODELAGEM E SIMULAÇÃO

A modelagem e simulação do escoamento multifásico foi realizada com o emprego do *software COMSOL Multiphysics 4.3b*. O método *Level Set*, que é capaz de tratar eficazmente

mudanças topológicas e/ou descontinuidades que podem incidir no decorrer da propagação de curvas e superfícies em diferentes cenários físicos, como é o caso de uma interface entre dois líquidos imiscíveis (COMSOL, 2013; Osher e Fedkiw, 2003; Sapiro, 2001; Sethian, 1988;).

O padrão de fluxo depende principalmente das velocidades, fração das fases, disposição e geometria do duto onde ocorre o escoamento e das propriedades dos fluidos (AL-WAHAIBI et al, 2012). A Figura 1 apresenta os diferentes padrões de fluxo observados em experimentos de escoamentos horizontais com diferentes velocidades de água e óleo (YUSUF et al, 2012)

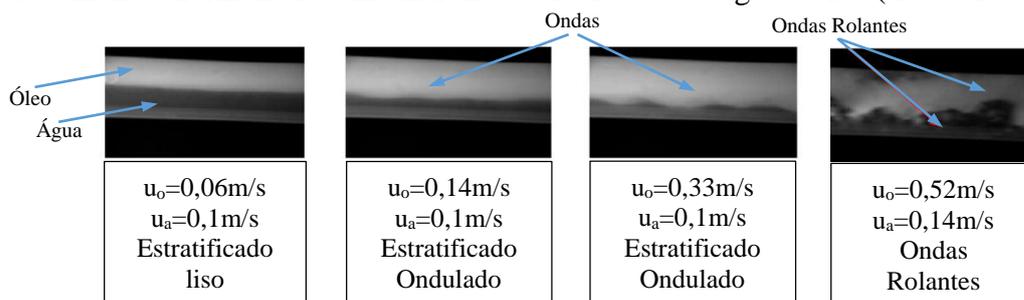


Figura 1 –Padrões de escoamento bifásico água-óleo

O comportamento da interface é analisado estabelecendo várias velocidades de entrada de óleo e de água, velocidades iguais e diferentes dos fluidos em dois modelos deslocando a interface. Um terceiro domínio foi considerado, uma passagem de um escoamento multifásico por um orifício ou estrangulamento.

## 2.2. O método Level Set e Escoamento

O fenômeno de escoamento de cada fase é governado pela equação de Navier-Stokes modificada e equação da continuidade para fluidos incompressíveis, conforme Equações 1 e 2, respectivamente. A Equação 1 é resolvida para cada uma das fases.

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} = \nabla \cdot [-p \mathbf{I} + \mu(\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T)] + \rho \mathbf{g} + F_{st} + F \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

No método Level Set, a interface é representada por um conjunto denominado nível ou isocontorno de uma função definida globalmente, a função Level Set  $\phi$ . No COMSOL *Multiphysics*,  $\phi$  é uma função de passo liso que é igual a zero (0) e de um domínio de um (1) na outra. Do outro lado da interface, existe uma transição suave a partir de zero a um. A interface é definida pela linha de isocontorno 0,5, ou o Level Set, de  $\phi$  (COMSOL, 2013).

O mecanismo da advecção no método Level Set não é feito de modo conservativo, isto implica que a zona delimitada pelo conjunto de nível 0 não é conservada. O movimento é analisado por convecção dos “valores” (níveis) da função, com o campo de velocidade. A Equação 3 que governa o sistema é a equação elementar Level Set (COMSOL, 2013). O modelo Level Set usa um reinicializador, que conserva o método para descrever a convecção na interface entre os fluídos, modificando a equação elementar conforme a Equação 4:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \phi = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \phi = \Upsilon \nabla \cdot \left( \varepsilon \nabla \phi - \phi(1 - \phi) \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \right) \quad (4)$$

No modelo apresentado as forças de campo, gravidade, são consideradas através da Equações de Navier-Stokes modificada e equação da continuidade, Equações 1 e 2. Estas são resolvidas de forma acoplada às equações do método Level Set, Equações 3 e 4. Desta forma, as forças de campo são compartilhadas através do vetor velocidade, comum aos dois conjuntos de equações.

### 2.3. Escoamento Laminar Bifásico utilizando o método Level Set

A análise deteve-se em baixas velocidades de escoamento, onde o método Level Set para escoamento laminar pode ser utilizado. O domínio contém apenas duas entradas e uma saída. Em cada uma das entradas foram definidas a velocidade e fração de cada um dos fluídos. Na saída optou-se por definir pressão zero. A Figura 2 apresenta o domínio, entradas, saídas, interface inicial e paredes definidas na modelagem e simulação.

A interface foi deslocada em um dos casos e o estrangulamento aparece em apenas um dos casos. Em todos os modelos estudados utilizou-se condição de não deslizamento na parede, o que é pertinente para este tipo de escoamento.

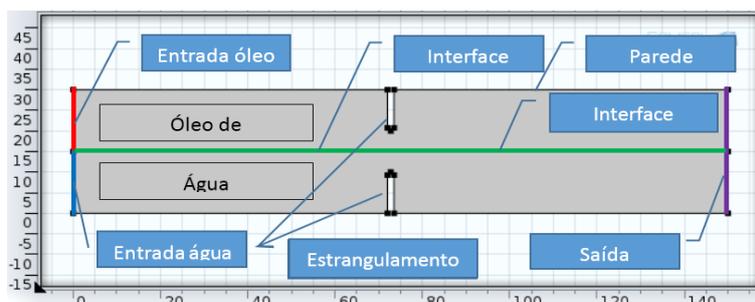


Figura 2 – Geometria do canal

### 2.4. Malha

Para os dois modelos, a malha utilizada foi estabelecida manualmente definindo-se o elemento máximo (0.6mm) em cada um dos domínios e, para obter melhor definição na interface, utilizou-se elementos mais refinados (0.3mm). Nas duas paredes definidas no modelo foram especificados elementos retangulares, mais adequados para esta parte do domínio. Com as considerações citadas obteve-se uma malha com 49152 elementos.

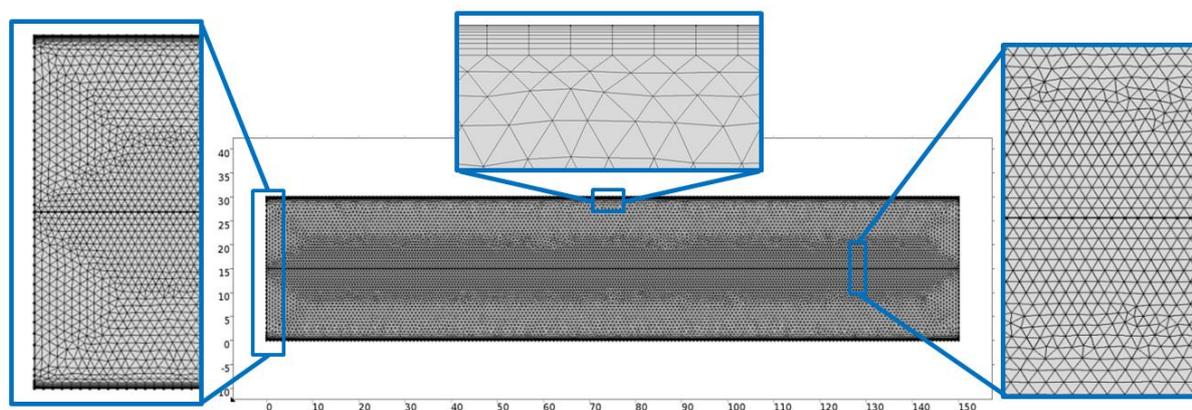


Figura 3: Malha para o modelo de escoamento bifásico no software COMSOL

Testes anteriores com malha mais grosseira não apresentaram resultado satisfatório, com interface espessa e mal definida. Poderia ser optado por malha mais refinada, porém o ganho não seria muito maior para o resultado, não justificando o custo computacional, e o modelo foi suficiente para fins de observação na disciplina. A Figura 3 apresenta a malha em todo o domínio e um corte nesta para observar melhor os elementos da malha.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta abordagem, o escoamento multifásico concorrente foi avaliado variando a velocidade de cada um dos fluidos, com velocidades baixas e pouco mais elevadas. Foram utilizadas velocidades iguais e diferentes para os dois fluidos. Em cada um dos escoamentos é possível analisar o padrão de escoamento apresentado e compará-lo aos encontrados na literatura.

#### 3.1. Escoamento Água-Óleo Em Um Canal

Escoamento água-óleo - configuração 01. A primeira configuração avaliada descreve a velocidade de entrada de óleo: 0,05m/s e velocidade de entrada de água: 0,05m/s. A Figura 4 apresenta o resultado da simulação 5 segundos após a condição inicial.

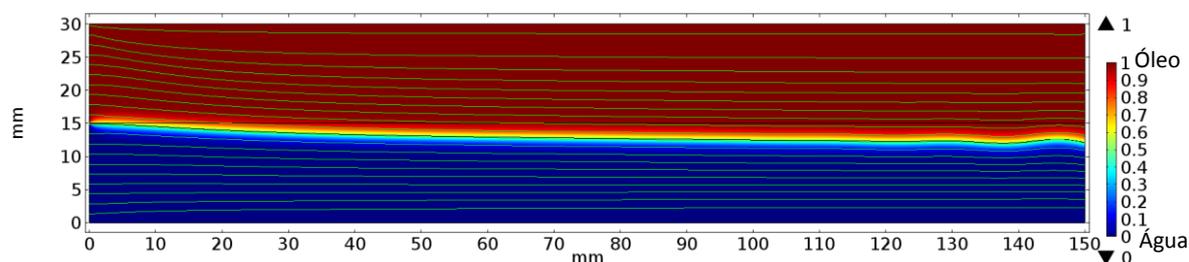


Figura 4: Escoamento Água-Óleo – Configuração 01

A fase óleo, por ser mais viscosa, ocupa um espaço maior do domínio deslocando a água e fazendo com que esta aumente sensivelmente a sua velocidade. A interface, com exceção das extremidades, tem o formato estratificado liso que pode ser comparado aos padrões de escoamento apresentados por Al-Wahaibi *et al*, (2012) e Yusuf *et al*, (2012).

Após o processamento, é possível analisar a distribuição de velocidades do escoamento no domínio (Figura 5). Observa-se que o fluxo é reduzido junto às paredes e maior no centro, pouco deslocado pra baixo. É possível verificar que gradualmente ocorre uma aceleração da fase água, menos viscosa, devido à redução do espaço disponível para o escoamento desta, forçada pelo óleo, mais viscoso.

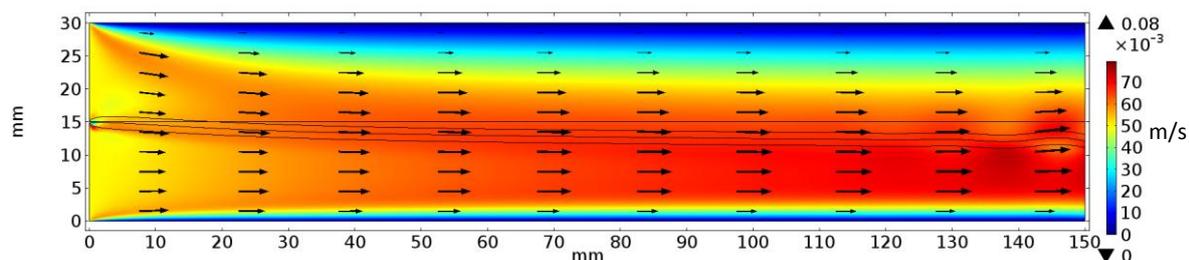


Figura 5 – Distribuição de velocidades no escoamento Água-Óleo - Configuração 01

Escoamento água-óleo - configuração 02. A segunda configuração avaliada descreve a velocidade de entrada de óleo: 0,5m/s e a velocidade de entrada de água: 0,05m/s.

Nesta configuração, o óleo é alimentado a uma velocidade 10 vezes maior que a velocidade da água, o que gera instabilidades e recirculações que acabam arrastando a água. A Figura 6 apresenta o padrão de escoamento obtido com 5 segundos de simulação. Até próximo à metade do caminho, a interface apresenta comportamento ondulado. Com o aumento da velocidade do óleo, na interface formam-se ondas, que avançam formando cristas “rolantes” e que podem se desprender da interface ou se deslocar juntamente com a fase óleo. Este padrão de escoamento apresentado é facilmente comparado às ondas rolantes, conforme citado por Paiva (2011), Al-Wahaibi *et al*, (2012) e Yusuf *et al*, (2012).

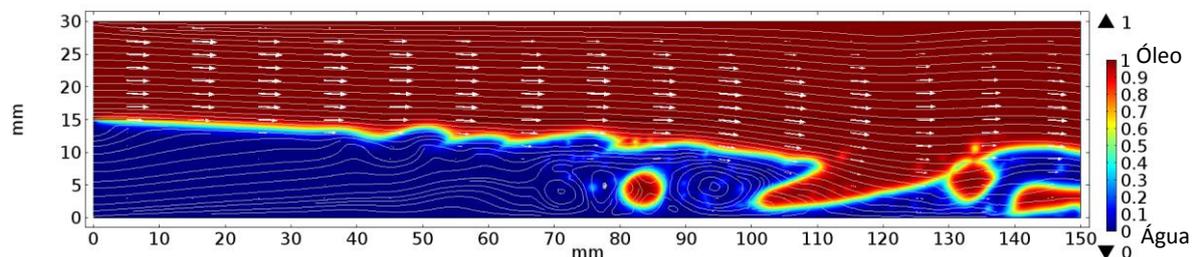


Figura 6: Escoamento Água-Óleo – Configuração 02

A Figura 7 apresenta a correspondente distribuição de velocidades do escoamento no domínio. Observa-se que o fluxo é reduzido junto às paredes e maior no centro do canal. Gradualmente ocorre a aceleração da fase água, impulsionada pelo óleo que é alimentado em uma velocidade maior. Ocorrem também recirculações mesmo em regime laminar.

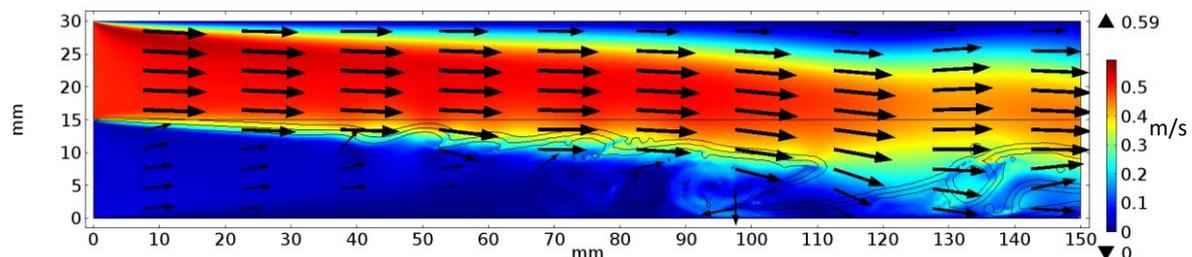


Figura 7 – Distribuição de velocidades no escoamento Água-Óleo – Configuração 02

Escoamento água-óleo - configuração 03. Esta configuração descreve a velocidade de entrada de óleo: 0,25m/s e a velocidade de entrada de água: 0,05m/s, com a interface deslocada a fim de avaliar a diferença da posição da interface e da proporção de fluidos no escoamento.

Na Figura 8 a interface é apenas deslocada para baixo devido à diferença de viscosidade e velocidade dos fluidos, apresentando comportamento estratificado liso. Após a fase inicial de acomodação e aceleração da água, esta atua como um “lubrificante” no escoamento do óleo por ser menos viscosa, flui mais facilmente e forma uma camada na parede (PAIVA, 2011; AL-WAHAIBI; ANGELI, P., 2011; AL-WAHAIBI *et al*, 2012).

A Figura 9 apresenta a distribuição correspondente de velocidades do escoamento água-óleo no canal. O fluxo é reduzido junto às paredes e maior no centro do canal, porém a faixa

de baixa velocidade é consideravelmente menor na parte inferior do domínio junto à parede, onde o fluido menos viscoso atua como um “lubrificante”.

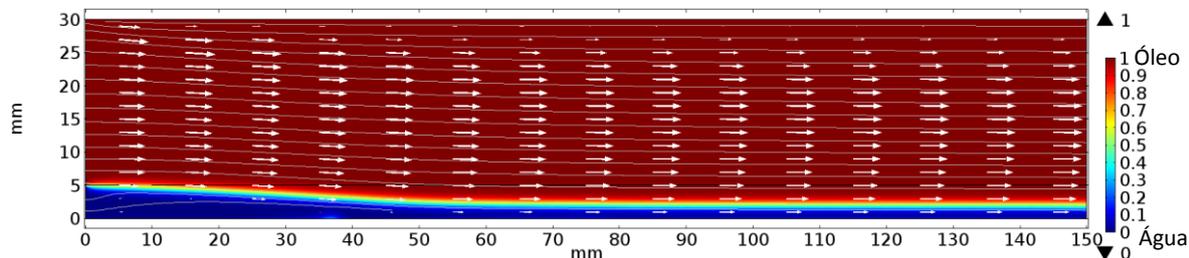


Figura 8: Escoamento Água-Óleo – Configuração 03

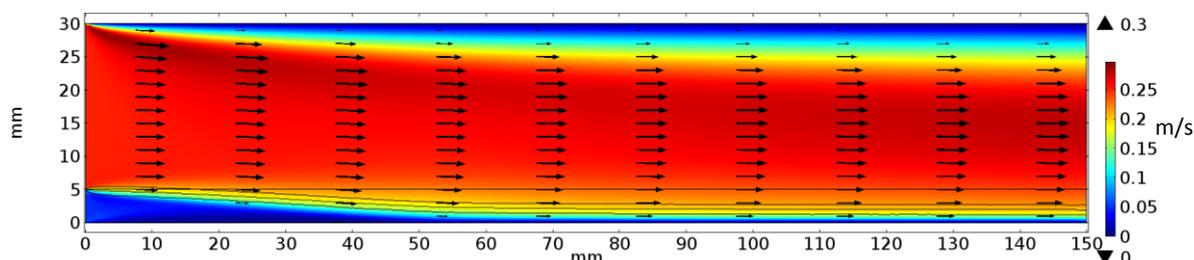


Figura 9 – Distribuição de velocidades no escoamento Água-Óleo – Configuração 03

Escoamento água-óleo - configuração 04. Nesta configuração é possível avaliar as consequências sobre o escoamento causadas pela presença de um estrangulamento. Para a utilização do módulo *Level Set* laminar, as velocidades de entrada de óleo: 0,01m/s e de entrada de água: 0,01m/s, precisaram ser menores que nos outros casos estudados, isto devido à elevada perda de carga e formação de instabilidades.

Na Figura 10 observa-se a formação de vários vórtices, ou instabilidades laminares, após o orifício, e a presença de duas zonas mortas, onde o fluido permanece praticamente parado, já que o estrangulamento modifica as linhas de fluxo e o fluido é forçado a passar pelo orifício. A partir do estrangulamento, a interface começa a formação de ondas impulsionadas pelos vórtices formados e pela perturbação gerada no orifício.

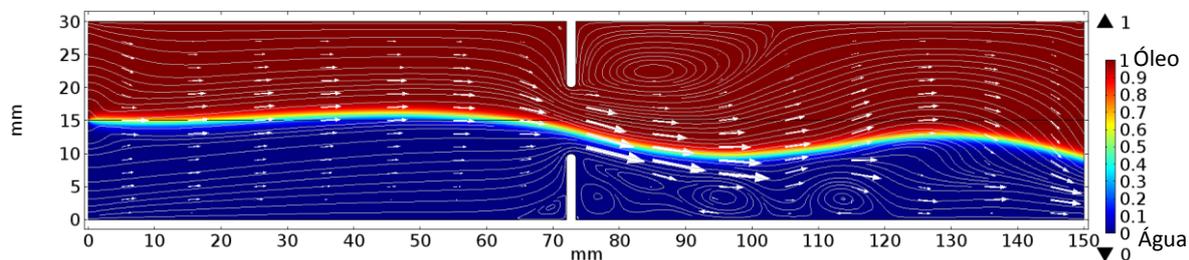


Figura 10: Escoamento Água-Óleo – Configuração 04

Observa-se na Figura 11, que o fluxo é reduzido junto às paredes e maior no centro do canal. Neste caso, a velocidade de injeção é igual para os dois fluidos, porém, devido à diferença de viscosidade, o fluxo é ligeiramente deslocado para baixo, no sentido do fluido menos viscoso. Observa-se que a Magnitude da velocidade é muito maior na interface, e várias correntes de retorno ocorrem, principalmente na parte inferior do domínio.

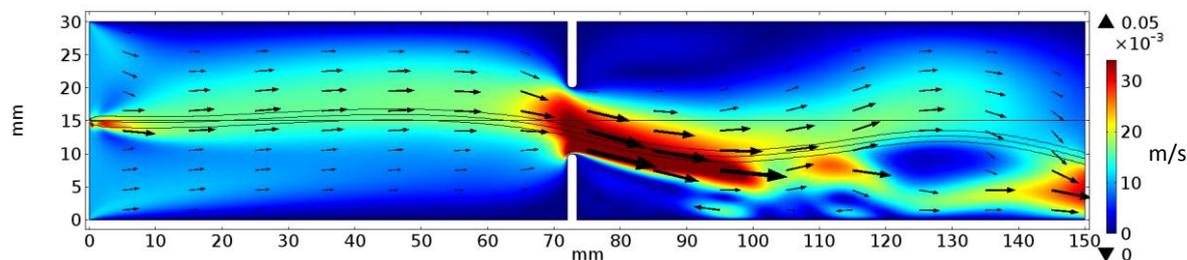


Figura 11 – Distribuição de velocidades no escoamento Água-Óleo – Configuração 04

Escoamento Água-Óleo - Configuração 05. Esta configuração é semelhante à anterior, apenas aumentando-se a velocidade de entrada de óleo para 0,02m/s e mantendo a entrada de água em 0,01m/s.

A diferença mais significativa em relação ao caso anterior, é que com o aumento da velocidade do óleo, ocorreu uma redução considerável no tamanho do vórtice formado na fase óleo (Figura 12). Com isso, a interface é ligeiramente deslocada para cima, ao contrário do ocorrido anteriormente.

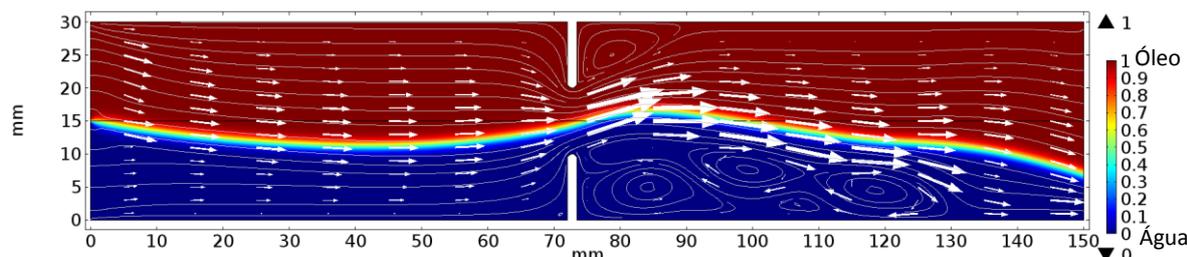


Figura 12: Escoamento Água-Óleo – Configuração 05

Observa-se na Figura 13 que o fluxo é muito semelhante ao apresentado anteriormente. Como, neste caso, a velocidade de injeção do óleo é o dobro daquela utilizada para a água, o fluxo de óleo é intensificado na região da linha média, após passar pelo orifício.

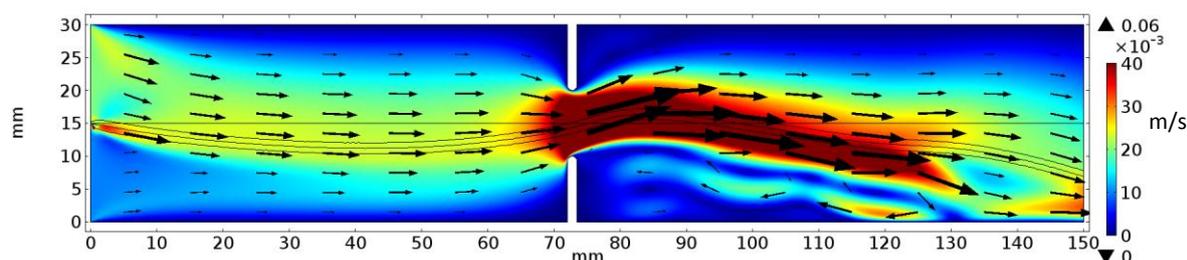


Figura 13 – Distribuição de velocidades no escoamento Água-Óleo – Configuração 05

## 4. CONCLUSÃO

O escoamento estratificado água/óleo através de um canal pode ser comparado com padrões de escoamento multifásico disponíveis na literatura. Alguns padrões como ondas rolantes, regimes estratificado liso e estratificado ondulado puderam ser observados nos casos estudados. Também foi possível constatar a influência da velocidade de injeção dos fluidos, a

perturbação causada pela presença de um estrangulamento e o impacto sobre a distribuição de velocidades no escoamento estratificado.

## 5. VÁRIÁVEIS

Variável	Descrição	Unidade
$\rho$	Densidade	kg/m <sup>3</sup>
$\mathbf{u}$	Vetor velocidade	m/s
$p$	Pressão	Pa
$g$	Gravidade	m/s <sup>2</sup>
$T$	Temperatura	K
$t$	Tempo	s
$\mu$	Viscosidade	Pa/s
$F_{st}$	Tensão interfacial	N/m
$F$	Força	N/m
$\phi$	Função Level Set	0 a 1
$\gamma$	Parâmetro de reinicializações	m/s
$\varepsilon$	Espessura onde $\phi$ varia de 0 a 1	m

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AL-WAHAIBI, T.; ANGELI, P. Experimental study on interfacial waves in stratified horizontal oil–water flow. *International Journal of Multiphase Flow*, 2011.
- AL-WAHAIBI, T., et al. "Experimental study on the transition between stratified and non-stratified horizontal oil–water flow." *International Journal of Multiphase Flow*, 2012.
- YUSUF, N., et al. "Effect of oil viscosity on the flow structure and pressure gradient in horizontal oil–water flow." *Chemical Engineering Research and Design*, 2012.
- BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. *Transport Phenomena*. Second Edition, John Wiley & Sons, Inc. 2002, 56 p.
- COMSOL. Rising Bubble. Disponível em: <http://www.comsol.com/model/rising-bubble-177>. Acesso em 07/11/2013.
- OSHER, S. J.; FEDKIW, R. P. *Level Set Methods and Dynamic Implicit Surfaces*. Number 153 in *Applied Mathematical Sciences*. Springer, 2003.
- OSHER, S.; SETHIAN, J. A. Fronts propagating with curvature-dependent speed: Algorithms based on hamilton-jacobi formulations. *J. Comp. Phys.*, 1988.
- PAIVA, T. A. Aplicação de técnicas ultra-sônicas para análise de escoamentos multifásicos do tipo líquido-sólido e líquido-sólido-gás. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Itajubá: Instituto de Engenharia Mecânica. 2011
- SAPIRO, G. *Geometric Partial Differential Equations and Image Analysis*. Cambridge, 2001.
- SETHIAN, J. A. *Level Set Methods and Fast Marching Methods*. Volume 3 of *Cambridge Monographs on Applied and Computational Mathematics*. Cambridge, 1999.
- Xu, X.-X. "Study on oil–water two-phase flow in horizontal pipelines." *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2007.