

SIMULAÇÃO DO VAZAMENTO DE ÓLEO A PARTIR DE UM RECIPIENTE AFUNILADO SUBMERSO EM ÁGUA

T. SIMIONI¹, M. B. QUADRI¹, N. ULIAN¹, D. R. SIMIONI¹

¹ Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos

E-mail para contato: taysnarasimioni@gmail.com, mbq1959@hotmail.com

RESUMO – O vazamento de óleo, muitas vezes presente nas operações *offshore* da indústria do petróleo, apresenta uma série de consequências negativas, tanto ambientais como econômicas. A Fluidodinâmica Computacional (*Computational Fluid Dynamics - CFD*) aplicada aos escoamentos multifásicos tem-se mostrado muito útil para o estudo desse tipo de problema, permitindo descrever os padrões de escoamento do óleo bem como prever os volumes de óleo vazado em caso de acidente. Com esta motivação, propõe-se a modelagem e a simulação do vazamento de óleo a partir de um recipiente submerso em água segundo a geometria de um funil com o bico virado para cima. Para isso, além das equações de *Navier-Stokes* e da equação da conservação da massa, emprega-se o método *Level Set* para acompanhamento da interface. A técnica numérica utilizada é a de elementos finitos. Os resultados obtidos envolvendo a cinética de vazamento se mostraram adequados frente aos resultados experimentais.

1. INTRODUÇÃO

O vazamento de óleo no oceano é um dos temas mais preocupantes no âmbito da poluição marítima, pois causa grandes danos à vida marinha, à saúde humana, e aos recursos naturais (Zhu *et al.*, 2014). Acidentes envolvendo a captura de óleo podem ocorrer não apenas nas unidades de produção *offshore* (plataformas e navios de produção), como também no transporte do óleo, seja ele através de dutos ou de navios. A recuperação do ambiente afetado pode levar dezenas de anos, e os danos ao ambiente podem ser irreversíveis, afetando as esferas econômica, ecológica e social (Feller, 2012).

Uma previsão rápida e precisa do derramamento e dispersão do óleo poderia fornecer informações úteis para a criação de barreiras de contenção a fim de minimizar as consequências ambientais e os prejuízos financeiros gerados por estes acidentes (Oliveira, 2009; Zhu *et al.*, 2014). Neste contexto, a Fluidodinâmica Computacional (CFD) tem-se apresentado como uma ferramenta muito útil, pois permite, não só a monitorização e acompanhamento da situação, mas também a previsão do comportamento do óleo derramado nas horas seguintes (Lamine e Xiong, 2013; Pierozan, 2011).

A ferramenta CFD utiliza-se de recursos computacionais e engloba um conjunto de técnicas matemáticas, numéricas e computacionais empregadas para realizar o estudo preditivo dos fenômenos de transporte (Mariano, 2008; Pierozan, 2011). A realização de simulações apresenta diversas vantagens quando comparada com a realização de testes reais, pois normalmente o desenvolvimento das simulações computacionais é muito mais barato e

mais rapidamente reproduzido. Além disso, a simulação CFD fornece informações mais detalhadas do que as obtidas através das medições e permite ainda simular condições difíceis de serem geradas na prática (Pierozan, 2011).

São vários os *softwares* disponíveis no mercado que permitem a modelagem e simulação de fenômenos físicos. A escolha do *software* depende da avaliação de uma série de fatores: facilidade de uso, capacidade de gerar geometrias e malhas, eficiência e robustez das técnicas numéricas implementadas, etc (Feller, 2012). Dentre as opções, o software COMSOL *Multiphysics* merece destaque devido ao fato de apresentar diversos métodos e modelos numéricos capazes de simular escoamentos de forma bastante real.

Os modelos baseiam-se nas equações de conservação de massa, momento de impulso (*Navier-Stokes*) e energia (Oliveira *et al.*, 2009). O *solver* deste *software* baseia-se no Método dos Elementos Finitos (MEF) para a discretização e resolução das simulações, o que proporciona a obtenção de resultados precisos (Feller, 2012; Pierozan, 2011).

O presente trabalho propõe a modelagem e a simulação do vazamento de óleo a partir de um recipiente submerso em água segundo a geometria de um funil com o bico virado para cima. Para tanto, utilizou-se o método *Level Set* para acompanhamento da interface, através do *software* COMSOL *Multiphysics* versão 4.3 b. Além disso, pretende-se avaliar a viabilidade da modelagem frente a um estudo experimental, considerando as mesmas condições do problema simulado.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Estudo experimental

A obtenção de dados experimentais, para dar suporte ao desenvolvimento de um modelo computacional adequado, fez-se através da montagem de um aparato para a visualização dos fenômenos envolvidos no vazamento de óleo a partir de um recipiente submerso em água destilada. Trata-se de um funil de vidro, com o bico voltado para cima, inicialmente preenchido com óleo Spindura na temperatura ambiente (~ 20 °C).

A haste do funil utilizado (parte mais fina) tem diâmetro interno de 5,8 mm e altura de 70,0 mm. Já o bocal do funil (parte cônica) apresenta diâmetro interno de 70,7 mm e altura de 60,0 mm. O recipiente utilizado nos experimentos apresenta diâmetro interno de 17 cm e utilizou-se uma altura de água destilada de 21,5 cm.

A fim de melhorar a visualização da interface, foi adicionado ao óleo Spindura, tinta a óleo da cor azul (Acrilex). A Figura 1 apresenta uma imagem do aparato experimental montado.

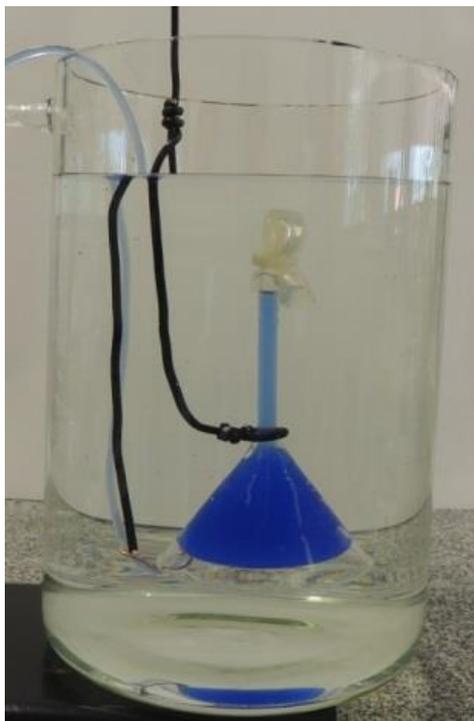


Figura 1 – Aparato experimental: funil invertido submerso em água e retendo óleo

2.2. Estudo computacional

As simulações apresentadas neste trabalho foram desenvolvidas através do *software* COMSOL *Multiphysics* versão 4.3b. Em todas as simulações, assumiu-se que o escoamento é laminar e isotérmico (20°C). A discretização das equações diferenciais que regem o fenômeno é feita através da técnica dos elementos finitos.

A interface do escoamento bifásico água-óleo foi modelada através do método *Level Set*, no qual a interface é representada por um isocontorno de uma função global definida, a função *Level Set* ϕ . A ϕ varia de 0 em um domínio até 1 no outro, onde através da interface, existe uma transição suave entre esses dois valores (COMSOL *Multiphysics* v. 4.3 b, 2014; Olsson e Kreiss, 2005; Feller, 2012).

Equações governantes: Para o escoamento laminar, envolvendo duas fases, com a interface governada pelo modelo *Level Set*, o transporte de massa e momento é regido pelas equações incompressíveis de *Navier-Stokes* apresentadas pelas Equações 1 e 2, respectivamente.

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot [-pI + \mu(\nabla u + \nabla u^T)] + F_g + F_{st} + F_{ext} + F \quad (1)$$

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (2)$$

Onde u é a velocidade (m/s), ρ é a densidade (kg/m³), p é a pressão (Pa), I é a matriz identidade, μ é a viscosidade dinâmica (Pa.s), T é a temperatura (K), F_s é a força da gravidade

(N/m³), F_{st} é a força de tensão superficial na interface dos dois fluidos (N/m³), F_{ext} é a força proveniente da energia livre externa (N/m³) e F é a campo vetorial de força (N/m³).

O modelo *Level Set* acrescenta ainda a Equação 3, em sua forma não conservativa, que rege a ϕ e oferece a possibilidade de determinação dos parâmetros associados à esta função.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + u \cdot \nabla \phi = \gamma \nabla \cdot (\epsilon \nabla \phi - \phi(1 - \phi) \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|}) \quad (3)$$

O parâmetro ϵ , determina a espessura da região onde a ϕ varia de zero a um. O parâmetro γ determina a quantidade de reinicializações ou estabilizações da ϕ . Esse parâmetro precisa ser ajustado para cada problema específico, pois está relacionado com a estabilidade da interface (COMSOL Multiphysics v. 4.3 b, 2014; Olsson e Kreiss, 2005; Feller, 2012).

Definição do modelo: Para a implementação das equações apresentadas no item anterior, o primeiro passo é a criação de uma geometria adequada para o problema. A geometria foi construída com base no modelo experimental, a fim de obterem-se resultados de simulação comparáveis aos dados experimentais, conforme Figura 2.

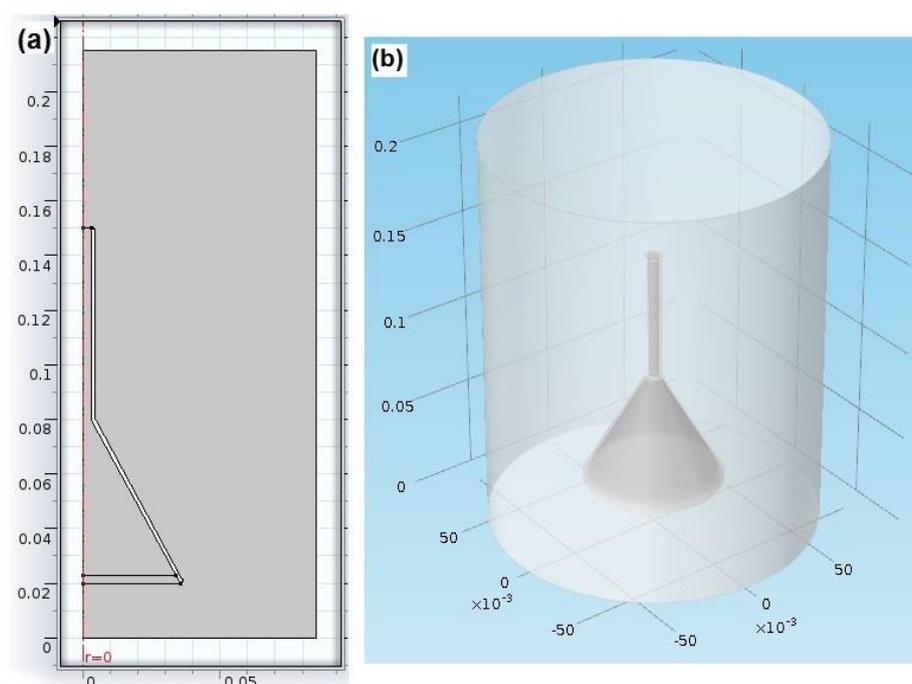


Figura 2 – Geometria: (a) 2D axissimétrico e (b) 3D

A geometria é composta por dois domínios. O domínio 1 corresponde ao Béquer que contém água destilada. O domínio 2 corresponde ao funil e está, inicialmente, preenchido por óleo Spindura.

Propriedades dos materiais: Utilizaram-se as mesmas propriedades dos fluidos empregados nos ensaios experimentais, previamente determinadas a ~20°C. Para o óleo Spindura, considerou-se viscosidade de 0,0175 Pa·s e densidade de 830 kg/m³. Já para a água

destilada, foi considerada viscosidade de 0,0010 Pa·s e densidade de 998 kg/m³. Para a tensão interfacial água destilada/óleo Spindura adotou-se 0,03291 N/m.

Parâmetros do Level Set: Para o problema em questão, adotou-se o valor de 1 m/s para γ e $tpf.hmax/2$ m para ϵ ($tpf.hmax$ corresponde à maior dimensão do maior elemento da malha); ambos correspondem ao valor de *default* sugerido pelo *software*.

Condições de contorno: Uma condição de parede molhada (ângulo de contato da interface água/óleo com a parede de vidro igual a 90°) na face interna do funil foi adotada. Nas demais paredes, utilizou-se a condição de não deslizamento. Considerou-se que, inicialmente, o sistema está em repouso, adotando-se um perfil de pressão vertical ao longo dos domínios, conforme apresentado na Tabela 1, de modo a considerar o efeito da gravidade.

Tabela 1 – Perfil de pressão nos domínios do problema

	Perfil de pressão	Unidade
Domínio 1	$tpf.rho1 * g_const * (0.4 - z)$	Pa
Domínio 2	$tpf.rho1 * g_const * (0.4 - z) + tpf.rho2 * g_const * (0.2 - z)$	Pa

Definição da malha: A malha construída para o domínio em estudo está apresentada na Figura 3. Foi definida uma malha normal, composta por 9167 elementos.

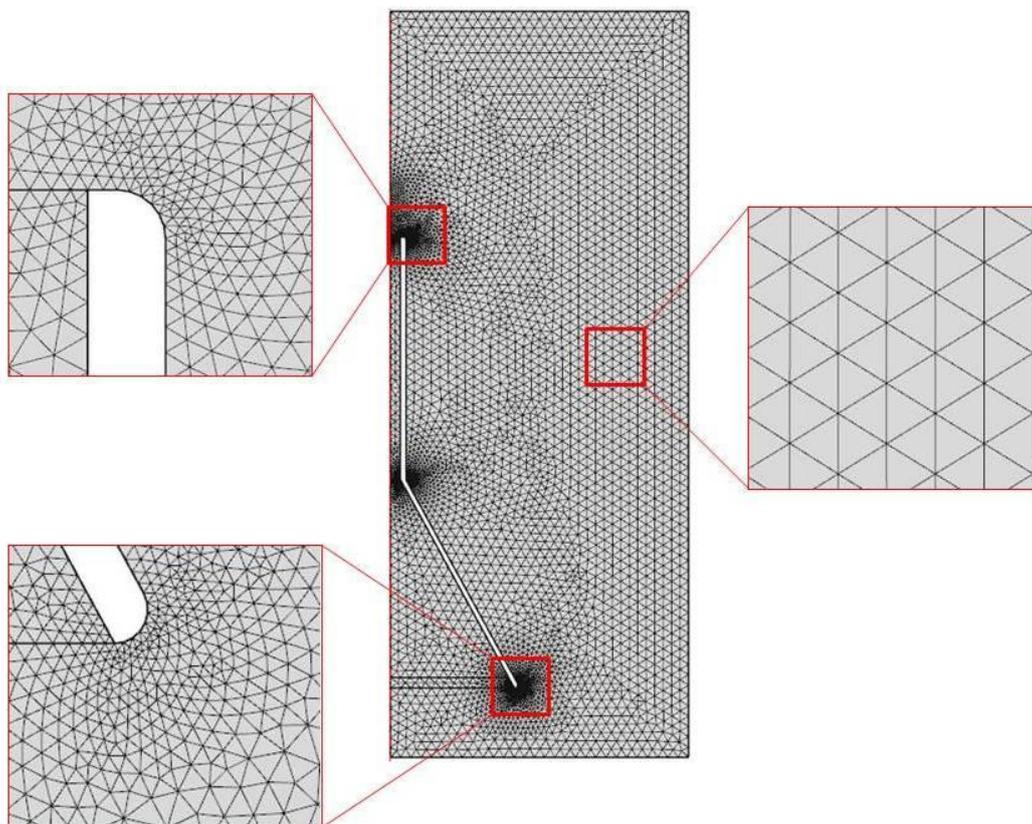


Figura 3 – Malha gerada para a solução do problema

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 4 apresenta a evolução do escoamento com o tempo observado tanto no ensaio experimental, quanto na simulação.

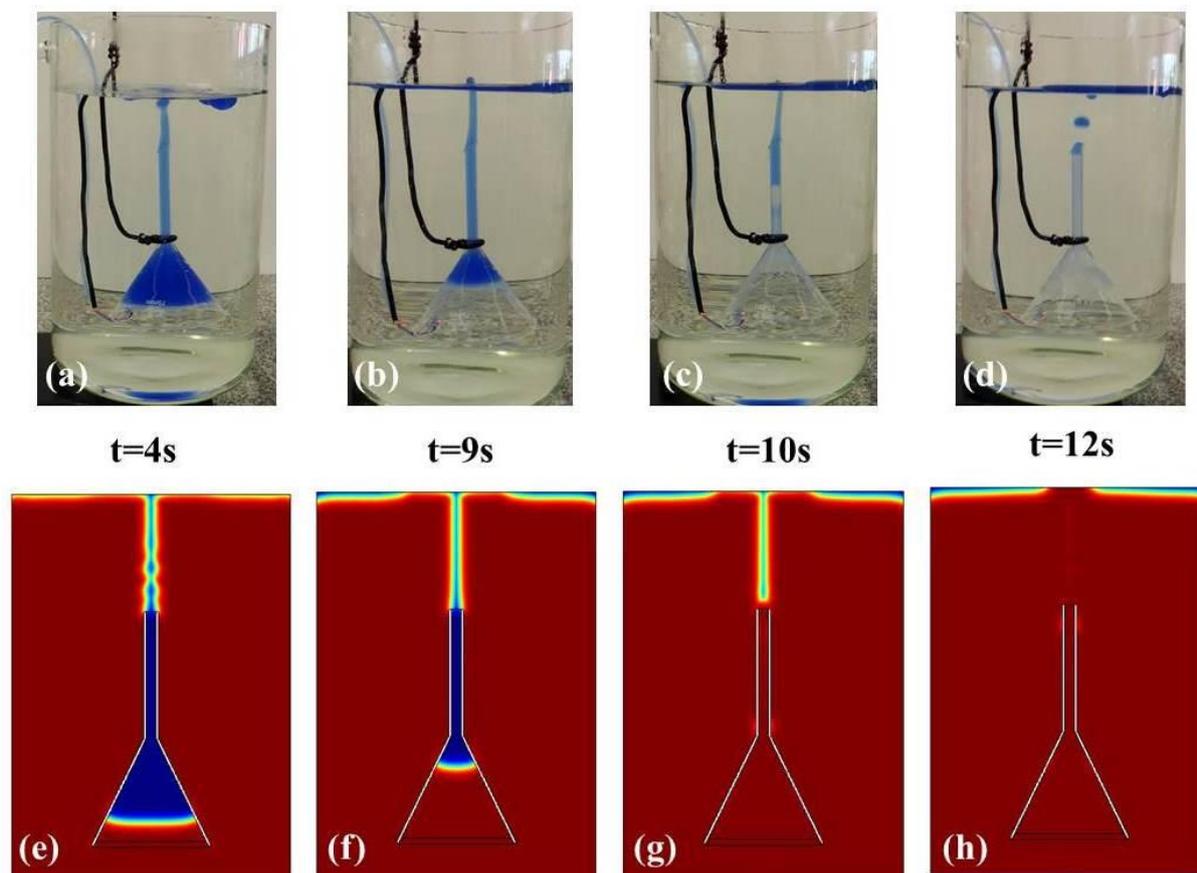


Figura 4 – Evolução do escoamento para diferentes tempos: experimental (a), (b), (c), (d) e simulado (e), (f), (g), (h)

O escoamento do óleo produzido na simulação foi muito semelhante ao observado experimentalmente. Nos primeiros 9 segundos, não são observadas divergências qualitativas significativas entre os dois estudos. Passado esse tempo, o experimental apresenta algumas gotas aderidas à parede do funil, que se desprendem vagarosamente, o que pode estar sendo produzido pela composição das forças interfaciais água/óleo e forças de adesão desses fluidos com a parede de vidro (Oliveira *et al.*, 2009).

De acordo com Zhu *et al.* (2014), o escoamento de óleo é diretamente influenciado pela ação conjunta da gravidade, força inercial, flutuabilidade e tensão de cisalhamento. Feller (2012) afirma que, na ausência de forças externas, a diferença de densidades entre a água e o óleo é a principal promotora do deslocamento das fases. Isto está de acordo com o que pode ser observado na Figura 4, onde o óleo, menos denso que a água, ascende e ocupa a posição superior à medida que deixa o recipiente submerso.

A cinética de vazamento está apresentada na Figura 5 através de um gráfico comparativo entre as vazões de óleo observadas no estudo experimental e na simulação.

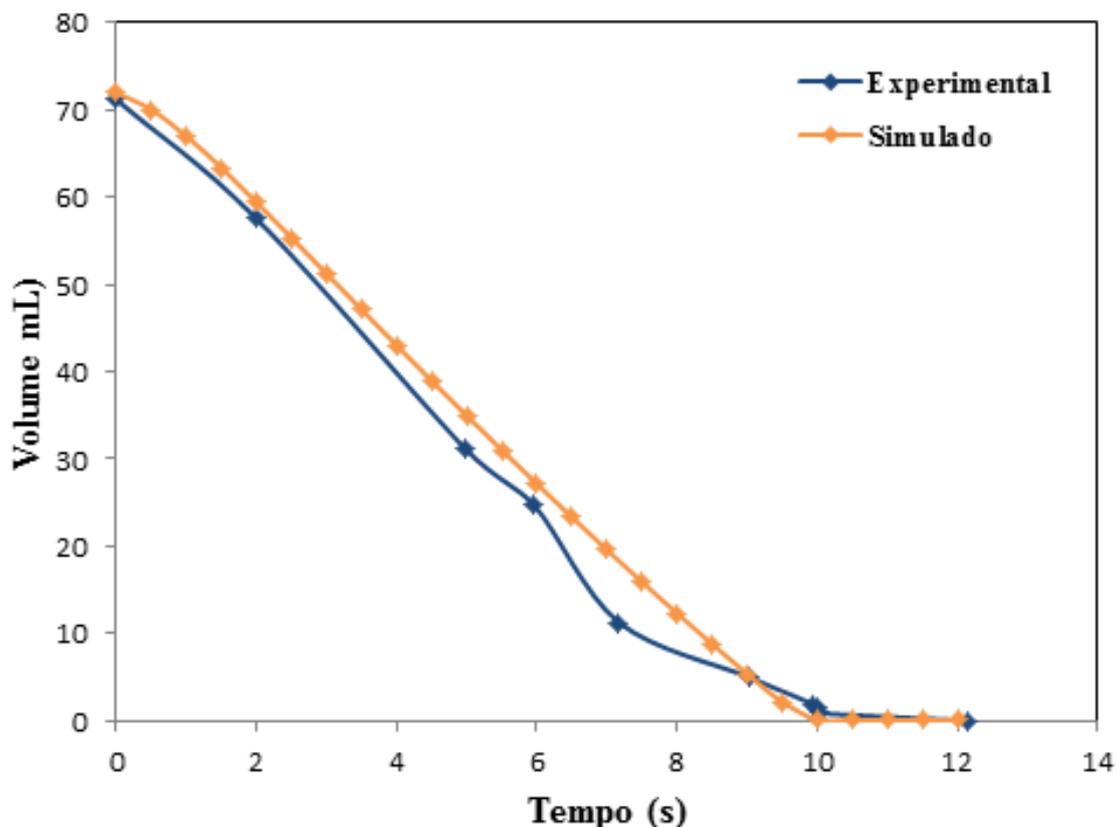


Figura 5 - Gráfico comparativo das vazões observadas

Os dados de vazão coletados no estudo experimental e na simulação são bastante próximos, validando o método empregado. Já no início do vazamento, verifica-se que a vazão de óleo tende a se tornar constante, seguindo assim até que quase todo o óleo tenha se esgotado. Para o caso experimental, os últimos pontos evidenciam uma queda da vazão, possivelmente devido ao pouco óleo restante no final do vazamento e aos efeitos viscosos na seção cilíndrica do funil, não perfeitamente representados pelo modelo. A Tabela 2 apresenta a vazão média de óleo observada para os dois casos (experimental e simulado), bem como o erro experimental.

Tabela 2 – Vazão média de óleo (experimental e simulado) e desvio da simulação

Vazão média (mL/s)		
Experimental	Simulado	Desvio (%)
5,8519	5,9879	+2,32

A proximidade entre os valores de vazão média experimental e simulado, com baixo desvio percentual, atestam o bom desempenho do modelo. A pequena discrepância entre os valores pode ser atribuída a perturbações externas ao sistema introduzidas durante o manuseio do material, e também, como já assinalado, devido à forma simplificada como os efeitos de viscosidade e de tensão interfacial são considerados pelo modelo.

4. CONCLUSÃO

O modelo fundamentado nas equações de *Navier-Stokes* e no método *Level Set* para acompanhamento da interface mostrou-se capaz de descrever de forma coerente o comportamento físico do escoamento água/óleo, observado no sistema experimental. Desde o início do escoamento, o óleo apresentou a tendência de ascender e formar uma camada sobrenadante na superfície. Este é o comportamento físico esperado, devido ao óleo ser menos denso que a água e ser esta diferença de densidade a principal promotora do deslocamento das fases. O estudo computacional realizado permitiu ainda simular de modo satisfatório a cinética de vazamento do óleo. Os dados de vazão coletados no estudo experimental e na simulação foram bastante próximos, o que, aliado ao baixo desvio percentual observado entre os valores encontrados nos dois estudos, valida o método empregado.

Conclui-se que o modelo proposto tem potencial para auxiliar no desenvolvimento de ferramentas preditivas para o projeto e controle de processos envolvendo o escoamento água/óleo. Prevê-se que se aplicado em escala real, esta abordagem proporcionaria informações importantes com relação ao escoamento imiscível do óleo, auxiliando na contenção e na minimização dos prejuízos, no caso de vazamento em ambiente subaquático.

5. REFERÊNCIAS

- COMSOL Multiphysics 4.3b. **COMSOL Documentation**, Março 2014.
- FELLER, R. Estudo do vazamento e captura de óleo em ambiente subaquático, UFSC/Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC (Dissertação de mestrado), 2012.
- LAMINE, S; XIONG, D. Guinean environmental impact potential risks assessment of oil spills simulation. *Ocean Eng.*, v. 66, p. 44-57, 2013.
- MARIANO, G. Estudo do escoamento imiscível água/óleo mediante experimentação em Célula de Hele-Shaw e Simulação CFD, UFSC/Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC (Dissertação de mestrado), 2008.
- OLIVEIRA, B.; MARIANO, G.; QUADRI, M. Um estudo CFD de vazamento de óleo a partir de dutos submersos. VII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica, 2009.
- Olsson e Kreiss, 2005
- PIEROZAN, M. Validação de modelo para predição do coeficiente de descarga de um tanque esférico por dinâmica de fluidos computacional, UFRGS/Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS (Trabalho e conclusão de curso), 2011.
- ZHU, H.; LIN, P.; PAN, Q. A CFD (computational fluid dynamic) simulation for oil leakage from damaged submarine pipeline. *Energy*, v. 64, p. 887-899, 2014.