

ESTUDO EXPERIMENTAL E DE SIMULAÇÃO CFD DO GOTEJAMENTO DE ÓLEO A PARTIR DE UMA PEQUENA FONTE CILÍNDRICA SUBMERSA EM ÁGUA

D. R. SIMIONI¹, M. B. QUADRI¹, A. BOLZAN¹

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

E-mail para contato: m-quadri@enq.ufsc.br, debora.simioni@hotmail.com.br

RESUMO – A exploração de petróleo *offshore* em profundidade está sujeita a condições que afetam propriedades físico-químicas dos fluidos. Tanto em situações de operação como de vazamentos acidentais, o estudo destas propriedades e padrões de escoamento é importante. Com essa motivação, desenvolve-se um estudo do escoamento óleo/água a partir de experimentos e simulações CFD em geometria tridimensional por meio do *software* COMSOL *Multiphysics* 4.3b. Além das equações de Navier-Stokes e equação da conservação da massa, emprega-se o método *Level Set* de acompanhamento da interface. Sendo a técnica numérica de elementos finitos. Os experimentos consistiram na injeção, por meio de um bocal cilíndrico, de óleo de soja, em água destilada à 22°C. Os aspectos avaliados foram: altura de gotejamento do óleo, diâmetro médio das gotas e tempo entre liberação de gotas. As simulações contemplaram três velocidades de injeção do óleo e reproduziram adequadamente o comportamento experimental. O diâmetro médio das gotas simuladas apresentou desvio máximo de $\pm 1,3\%$. Os resultados representaram adequadamente, tanto qualitativa quanto quantitativamente, o comportamento fluidodinâmico dos experimentos, atestando a pertinência da metodologia utilizada e estabelecendo este tipo de modelo como um excelente ponto de partida para a consideração de problemas de escoamento de óleo a partir de uma fonte submersa.

1. INTRODUÇÃO

O interesse pelo estudo da fluidodinâmica e de propriedades físicas de sistemas óleo/água se justifica pela ampla gama de aplicações na engenharia das operações *offshore* de petróleo. Situações de vazamento geradas por falhas em equipamentos e tubulações, além das características geológicas dos sítios de exploração que podem levar ao fenômeno da exsudação de óleo, são exemplos de eventos que exigem soluções efetivas de combate aos danos ambientais e redução de prejuízos na produção. Quando ocorre um vazamento em estágio de gotejamento, pode-se identificar uma sucessão de etapas até o óleo chegar à superfície da água: (1) a formação inicial da gota; (2) o crescimento da gota junto à borda do orifício; (3) a formação de um

prolongamento (pescoço) na base da gota; e (4) o desprendimento da gota de sua fase de origem e ascensão através da fase contínua, (TIMGREN et.al., 2007). Este tipo de fenômeno tem sido modelado através da dinâmica de fluidos computacional (CFD) por diferentes pesquisadores, tais como Li, et.al.,(2012) e Kobayashi, (2007). As principais forças que atuam sobre uma gota antes da sua separação estão esquematicamente representadas na Figura 1. As forças são descritas como, força de tensão interfacial F_{σ} ; a força F_{Stat} que está alinhada com a força F_{γ} ; Força de Empuxo F_E ; força de sustentação dinâmica F_D ; força de arrasto do viscoso F_R ; força de momento linear F_1 , (ZHI et.al., 1999). Dentre essas forças, F_{σ} é uma força de retenção, enquanto F_{Stat} , F_E , F_D , F_R e F_1 são forças que promovem o destacamento da gota. O aumento em $F_{\sigma} - F_{Stat}$ irá aumentar o diâmetro das gotas no momento do desprendimento, ao passo que o aumento da F_E , F_D , F_R e F_1 irá diminuir o diâmetro das gotas.

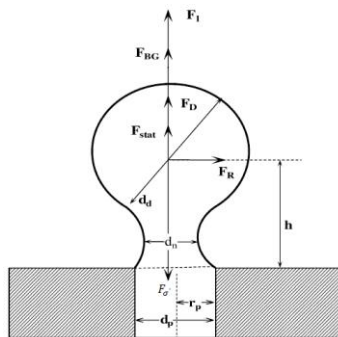


Figura 1-Diagrama esquemático das forças atuantes na gota. Fonte: Adaptado de XU et. al.,2005.

Assim, este trabalho tem por objetivo desenvolver um estudo teórico/experimental do vazamento por gotejamento de óleo em meio subaquático no que tange aos aspectos de formação, desprendimento e ascensão da gota em direção à superfície. Busca-se representar de forma realística essa sucessão de fenômenos físicos por meio da fluidodinâmica computacional (CFD), a fim de contribuir com os esforços de modelagem e simulação aplicados às situações reais de vazamentos subaquáticos.

2.MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Etapa Experimental

Neste subitem são apresentadas as avaliações das propriedades físico-químicas dos fluidos que apresentam significativa importância na formação da gota, diâmetro médio, altura de gotejamento e nos aspectos fenomenológicos do escoamento bifásico, que fazem parte deste estudo. Também é apresentado o aparato e os procedimentos experimentais seguidos.

Determinação da Tensão Interfacial: utilizou-se o método da gota pendente invertida, realizada no goniômetro Ramé-Hart, modelo-250-F1. As análises foram realizadas em triplicata a 22°C. O resultado foi obtido pela média dos valores após a estabilização da tensão interfacial.

Ângulo de contato: utilizou-se o mesmo equipamento utilizado para tensão interfacial. As análises foram realizadas em duplicata a 22°C. O resultado foi obtido pela média dos ângulos de contato para gotas com cerca de 25mm³.

Determinação da Viscosidade: As análises de viscosidade foram realizadas em um viscosímetro Brookfield Digital Modelo DV-III, utilizando geometria para baixas viscosidades. Os ensaios foram realizados em triplicata a temperatura de 22°C.

Determinação da Densidade: A avaliação da densidade do óleo foi realizada a temperatura de 22°C, com densímetro flutuante.

Aparato e procedimentos experimentais: utilizou-se um recipiente cilíndrico encamisado, com diâmetro interno de 0,04 m e altura de 0,4 m. Este recipiente tem uma abertura na parte inferior com rolha de silicone transpassada por uma agulha de 0,0006 m de diâmetro interno; na parte superior o recipiente é aberto. Com a coluna preenchida com água destilada, o óleo é injetado através da agulha que é conectada a uma seringa através de uma mangueira. As velocidades de injeção de óleo testadas foram: 0,225 m/s, 0,333 m/s e 0,446 m/s. Os diâmetros médios experimentais das gotas formadas no sistema de injeção, bem como as alturas de gotejamento, foram calculados com base em fotografias obtidas durante os experimentos. Os diâmetros e alturas de gotejamento obtidos nas simulações foram quantificados a partir das imagens construídas com o *software* de simulação utilizado.

2.2. Etapa de Modelagem

O Método dos Elementos Finitos foi utilizado para a discretização e resolução das equações do escoamento e de acompanhamento da interface, empregando-se para isso a plataforma fornecida pelo *software* COMSOL *Multiphysics 4.3b*. As equações da continuidade e de Navier-Stokes para fluidos incompressíveis, incluindo o tensor interfacial, descrevem o escoamento do sistema bifásico. Os dois líquidos envolvidos neste problema podem ser considerados incompressíveis. Para este caso, a equação de Navier-Stokes é dada por:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot [-\rho \mathbf{I} + \mu(\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T)] + \mathbf{F}_g + \mathbf{F}_\sigma + \mathbf{F}_E + \mathbf{F}_A \quad (1)$$

Onde: ρ é a densidade (kg/m³), μ é a viscosidade dinâmica (Pa.s), \mathbf{u} é a velocidade (m/s), p é a pressão (Pa), \mathbf{F}_g é a força da aceleração gravitacional, \mathbf{F}_σ é a força da tensão interfacial, \mathbf{F}_E é a força de empuxo e \mathbf{F}_A é a força de arraste na interface, tendo envolvida em sua formulação a função delta Dirac (δ) que só não é nula na interface. Na formulação diferencial das equações de Navier-Stokes, a localização das forças de tensão superficial singulares, são representadas por uma função delta de Dirac, (TORNBERG, ENGQUIST, 2000). Para problemas de escoamento multifásicos é importante a localização e acompanhamento da interface, sendo que para isso foi utilizado o método *Laminar Two-Phase Flow Level Set* (OLSSON e KREISS, 2005). Este método utiliza um reinicializador γ , para preservar a equação do método *Level Set*, que descreve a convecção na interface dos fluidos. O contorno de 0,5 da função *Level Set* (Φ) define a

interface entre os fluidos. Em uma camada de transição próxima à interface, ϕ é suavizado de 0 até 1. A interface se move com o fluido a mesma velocidade, u . A equação que descreve a convecção de reinicialização da Função *Level Set* é dada por:

$$\frac{\partial \phi}{\partial \tau} + u \cdot \nabla \phi = \gamma \nabla \cdot \left(\varepsilon \nabla \phi - \phi(1 - \phi) \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \right) \quad (2)$$

O parâmetro γ determina o incremento da reinicialização, sendo que seu valor máximo adequado deve ser da mesma magnitude da máxima velocidade atingida pelo sistema. Paralelamente à definição da interface, a função *Level Set* usa um suavizador de densidade e viscosidade que é aplicado na transição através da interface.

Geometria: o domínio de simulação é constituído de um cilindro de 0,03m de altura e 0,012 m de diâmetro. Na parte superior do domínio tem-se uma camada de 0,0025m de óleo e centralizado na base do domínio posicionou-se outro pequeno cilindro (agulha) de 0,0006m de diâmetro interno e altura de 0,0025 m. Foi adicionado um *work plane* na altura de saída do bocal, com geometrias circulares distribuídas, para refinar a malha na região onde ocorre o escoamento das gotas.

Condições Iniciais e de Contorno: Inicialmente, o óleo de soja ocupa os subdomínios no interior da agulha e na camada superior de óleo livre; o restante é ocupado pela água. Um perfil hidrostático foi aplicado a todo o domínio. Na base da agulha prescreve-se a entrada com velocidade de injeção especificada; já a saída, no limite superior do domínio, tem prescrita a condição de pressão zero. Para as paredes internas e borda do bocal da agulha adotou-se a condição de parede molhada, com ângulo de contato θ especificado. As demais paredes foram consideradas sem escorregamento ($u = 0$).

Malha: As malhas utilizadas nas simulações foram construídas de forma estruturada com elementos hexaédricos, totalizando 204.544 elementos. Essa escolha é justificada pelo estudo de malha realizado previamente.

Simulações: As simulações foram realizadas com o emprego do *software* COMSOL *Multiphysics 4.3b*®, em um computador com processador Core i7, 4700MQ, com 16GB de RAM e placa de vídeo dedicada com 2Gb. Após identificar os parâmetros de maior influência, estes foram ajustados e utilizaram-se os que apresentaram melhores resultados de diâmetro médio de gota formada para cada velocidade de injeção. Para todas as velocidades: Parâmetro de reinicialização $\gamma = 0,05$ m/s; Ângulo de contato $\theta = 73^\circ$. Para as velocidades de 0,225 e 0,446 m/s o parâmetro de Tensão interfacial foi de $\sigma = 0,036$ N/m e para velocidade de 0,333 m/s o parâmetro de Tensão interfacial foi de $\sigma = 0,038$ N/m. O ângulo de contato exigiu um estudo próprio e mais detalhado, assim além dos dados experimentais foi realizado um estudo com as simulações para comprovar a sensibilidade do simulador quanto a este parâmetro. Utilizou-se para estas simulações as propriedades físico-químicas avaliadas experimentalmente, velocidade de injeção de 0,0413 m/s, parâmetro de reinicialização $\gamma = 0,05$ m/s, tensão interfacial $\sigma = 0,03$ N/m, fazendo-se variar somente o ângulo de contato θ . Inicialmente avaliou-se de 65° a 85° ,

com intervalo de 5 em 5°, sendo apresentado um valor de máximo entre 70° e 75°, assim este intervalo foi explorado de 1 em 1°. Os resultados percentuais comparativos para o diâmetro médio de gota simulado frente ao experimental são apresentados na Tabela 1.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Propriedades Físico-Químicas dos Fluidos

Os resultados das análises das propriedades físico-químicas dos fluídos a temperatura de 22°C foram: para a Água Destilada, Densidade 997 Kg/m³ e Viscosidade 0,0010 Pa.s; para o Óleo de Soja, Densidade 920 Kg/m³ e Viscosidade 0,0621 Pa.s. O resultado da tensão interfacial entre o óleo de soja/água destilada foi de 0,02013N/m. O resultado do ângulo de contato medido entre o óleo de soja e o aço inoxidável submersos em água destilada foi de 72,7°.

3.2. Etapa de Modelagem e Simulação

Na Tabela 1 são apresentados os resultados do estudo preliminar de sensibilidade do ângulo de contato objetivando reproduzir o diâmetro médio de gota experimental. A definição desse ângulo exigiu um estudo cuidadoso, sendo que o valor que mais se adequou foi de 73°. Simulações posteriores, com melhor ajuste dos demais parâmetros, elevaram o percentual do diâmetro da gota simulada em relação ao experimental para cerca de 98 %.

Tabela 1 – Testes de ângulo de contato para a reprodução do diâmetro médio da gota experimental

Ângulos de contato testados [°]	Percentual do Diâmetro Médio da gota simulada frente ao experimental
65	88,70
70	88,75
71	88,75
72	88,79
73	89,15
74	87,97
75	88,61
80	87,70
85	86,80

Conforme o procedimento apresentado no item 2.1., o ângulo de contato avaliado experimentalmente foi de 72,7°, o que demonstra, apesar das limitações em outros aspectos, a robustez e potencialidade desse tipo de modelo para representação deste sistema experimental.

Os resultados da influência da variação da velocidade de injeção de óleo sobre a altura de gotejamento, diâmetro médio da gota formada e frequência de gotejamento estão apresentados na Tabela 2. Frente a esses resultados, pode ser observado que o aumento da vazão do óleo provoca um aumento da altura e frequência de gotejamento ao mesmo tempo que leva a uma pequena redução no diâmetro das gotas. Em geral, o modelo reproduziu adequadamente o tamanho das gotas. O maior desvio do modelo em relação ao experimento foi observado na tentativa de

reprodução da altura de gotejamento para a menor velocidade de injeção; de fato, os maiores desvios foram encontrados para esse aspecto do fenômeno, o qual está certamente relacionado à frequência do gotejamento. Isto demonstra que o modelo carece de aprimoramentos principalmente na descrição das forças interfaciais, que aqui são consideradas mediante um único valor para a tensão interfacial. Em sistemas dinâmicos, a variação e composição dessas forças atuando ao nível da interface apresentam grande complexidade e são de difícil representação.

Tabela 2 – Resultados experimentais, simulados e desvio percentual para a altura de gotejamento, diâmetro médio da gota formada e tempo entre liberações de gotas

Dados	Vel 0,225 m/s $\sigma = 0,036 \text{ [N/m]}$			Vel. 0,333 m/s $\sigma = 0,038 \text{ [N/m]}$			Vel 0,446 m/s $\sigma = 0,036 \text{ [N/m]}$		
	Exp	Sim	Desvio %	Exp	Sim	Desvio %	Exp	Sim	Desvio %
Altura de gotejamento, mm	2,00	5,31	+165,5	11,00	9,62	-12,55	17,50	14,97	-14,46
Diâmetro médio, mm	5,53	5,52	-0,18	5,24	5,26	+0,38	4,65	4,59	-1,29
Tempo entre Gotas, s	1,32	1,19	-9,85	0,79	0,62	-21,52	0,46	0,50	+8,70

Em seguida são apresentadas as imagens comparativas entre os experimentos e as simulações (Figuras 2 e 3), com imagens obtidas dos experimentos e através do *software* COMSOL que permite visualizar em cinza o isocontorno de fração de volume de 0,5; um corte central em escala de cores para ilustrar as diferentes velocidades apresentadas no domínio a cada instante e em preto os vetores proporcionais de velocidade.

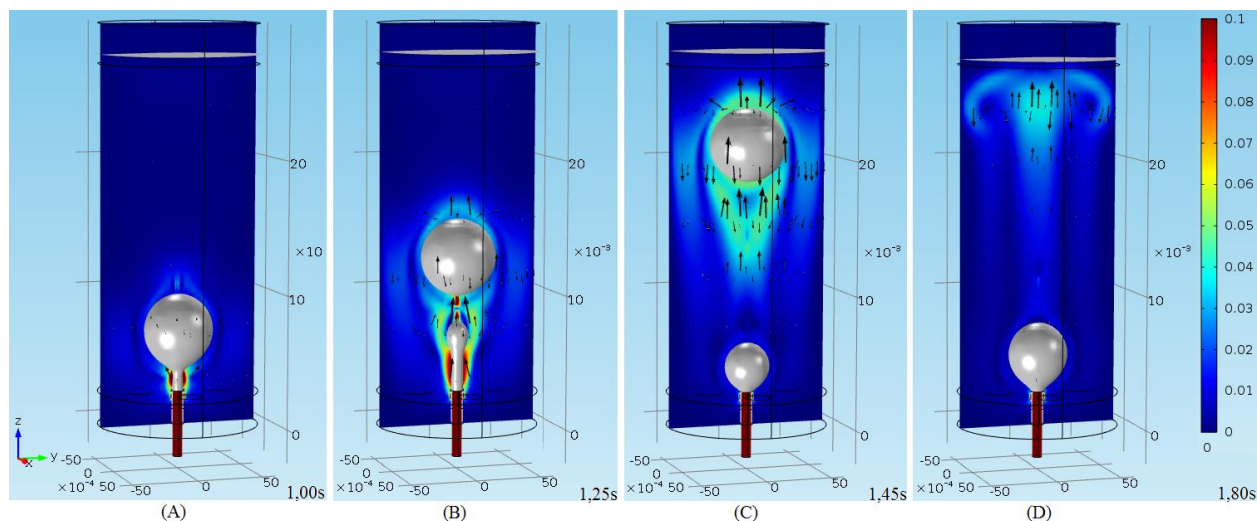


Figura 2 - (A), (B), (C) e (D) Imagens da simulação do escoamento de óleo/água para a velocidade de 0,225 m/s. Nos tempos de 1,0 s; 1,25 s; 1,45 s e 1,8 s

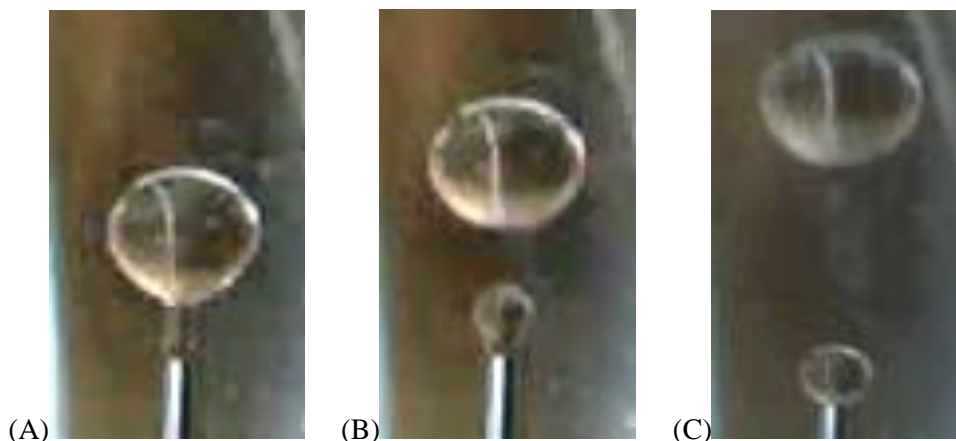


Figura 3 - (A), (B) e (C) Imagens experimentais para os tempos de 1,0 s; 1,25 s e 1,45 s

A Figura 2 A mostra a simulação óleo/água a 22°C injetada através do bocal cilíndrico a velocidade de 0,225 m/s para o tempo de 1,00 s, com a gota sendo formada e com o “pescoço” de óleo sendo delineado. Ainda na Figura 2 A, pode-se visualizar os vetores e a distribuição de velocidades no domínio. Os quadros 2A e 3A dessas figuras permitem tanto a análise quantitativa, (dados apresentados na Tabela 2), quanto qualitativa do momento de formação da gota. No tempo de 1,25 s (Figura 2 B), tem-se o instante do desprendimento de uma massa óleo e pode-se perceber a formação de uma zona de estagnação a certa distância da gota, pois os vetores ascendentes que acompanham o movimento da gota são anulados pelos vetores descendentes que promovem a recirculação do meio contínuo, guardando grande semelhança com a Figura 3 B que representa a realidade do sistema experimental. Na Figura 2 C observa-se o movimento de ascensão da gota e na saída do bocal a formação de uma nova gota; os vetores de velocidade proporcionais são maiores na parte superior da massa em ascensão, sendo este o comportamento físico esperado para o sistema em estudo. Na Figura 2 D tem-se o momento após a coalescência da gota com a fase superior de óleo, onde fica evidente no corte de distribuição de velocidades a recirculação da fase contínua, apresentando simetria bilateral com orientação vertical, o que está de acordo com a disposição física esperada.

4. CONCLUSÕES

Os experimentos foram realizados para o sistema de injeção de óleo de soja em água destilada através do bocal cilíndrico, com três velocidades testadas. Na etapa experimental foram avaliadas as propriedades físico-químicas. O estudo de ângulo de contato apresentou diferença de +0,41% entre o valor simulado e o experimental, demonstrando a adequação do modelo para representar esse aspecto. De posse da caracterização experimental do sistema, foi possível realizar as simulações a partir de parâmetros realísticos, logrando-se obter uma boa representação do fenômeno tanto do ponto de vista qualitativo como quantitativo. Os resultados

obtidos para o diâmetro médio da gota simulada apresentaram desvio máximo de 1,29 %. Para o tempo entre a liberação das gotas, os desvios foram inferiores a 22,0 %.

De outro lado, as simulações permitiram colocar em evidência os padrões de escoamento e distribuição de velocidades durante a formação, desenvolvimento, gotejamento e ascensão das gotas; aspectos esses de difícil quantificação experimental. Assim foi possível visualizar vórtices laterais que se formam quando ocorre a coalescência das gotas com a camada superior de óleo, bem como zonas de estagnação e recirculação junto às paredes do domínio.

Este conjunto de resultados atesta a pertinência da metodologia utilizada, estabelecendo este tipo de modelo como um excelente ponto de partida para a consideração de problemas de vazamento de óleo a partir de uma fonte submersa.

5. REFERÊNCIAS

- KOBAYASHI, I., K. Uemura, *et. al.* CFD analysis of generation of soybean oil-in-water emulsion droplets using rectangular straight-through microchannels. *Food Sci. and Technology Research*, v. 13, p. 187-192, 2007.
- LI Y., JAIN M. e NANDAKUMAR K. Numerical Study of Droplet Formation inside a Microfluidic Flow-Focusing Device. Excerpt from the Proceedings of the 2012 COMSOL Conference in Boston. 2012.
- OLSSON, E.; KREISS, G. A Conservative *Level Set* method for two phase flow. *J. of Comput. Physics*, n. 210, pp. 225-246, 2005.
- TIMGREN A., TRÄGÅRDH G. e TRÄGÅRDH C. CFD modelling of drop formation in a liquid-liquid system. 6th International Conference on Multiphase Flow, ICMF 2007, Leipzig, Germany, July 9 – 13, 2007.
- TORNBERG A., ENGQUIST B.. A finite element based level-set method for multiphase flow applications. *Comput. Visual. Sci.*, 3, p. 93–101. 2000.
- ZHI W., SHICHANG W., SCHROEDER V., SCHUBERT H., Influence of fluid flow on forces acting on droplet and emulsification results in membrane emulsification process. *J. Chem. Ind. Eng. (China)* v.50 (4), p. 505–513, (1999).