RUMO À PREDIÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE GOTAS EM DISPERSÃO MECÂNICA SUBMARINA VIA MÉTODO DO RETICULADO DE BOLTZMANN

Breno Vargas Gemelgo, Luiz Adolfo Hegele Júnior

INTRODUÇÃO

A dispersão mecânica submarina é uma estratégia de resposta a vazamentos submarinos de óleo, na qual jatos de água de alta velocidade são empregados para reduzir o tamanho das gotas formadas durante a liberação submarina, influenciando o transporte e o destino da fase oleosa na coluna d'água (Brandvik et al., 2023). A distribuição de tamanho de gotas é, portanto, central para a caracterização desse processo. Sua predição numérica, entretanto, é particularmente desafiadora, pois a fragmentação do óleo envolve a formação de estruturas interfaciais com escalas muito distintas, desde grandes ligamentos até gotas de dimensões significativamente menores que o diâmetro inicial do jato. A representação simultânea dessas escalas em simulações tridimensionais impõe elevados requisitos de resolução espacial e custo computacional. Neste trabalho, investiga-se o uso de uma formulação multifásica regularizada do método do reticulado de Boltzmann (LBM) baseada na representação por momentos (MR) para avançar em direção à predição da distribuição de tamanho de gotas em dispersão mecânica submarina. São apresentados a verificação da metodologia em problemas interfaciais, resultados quantitativos preliminares de dispersão mecânica submarina e as limitações e estratégias associadas à obtenção de distribuições de tamanho de gotas convergidas.

DESENVOLVIMENTO

A metodologia atualmente empregada combina uma formulação regularizada do LBM em representação por momentos (MR-LBM) (Vardhan et al., 2019) para a hidrodinâmica e um modelo de campo de fase baseado na equação de Allen–Cahn conservativa (Chiu; Lin, 2011) para a evolução da interface difusa. A representação por momentos reduz substancialmente o conjunto de variáveis hidrodinâmicas persistentemente armazenadas em memória em relação ao LBM convencional baseado em populações. Além desse ganho de armazenamento, a implementação em CUDA/C++ explora o paralelismo massivo das unidades de processamento gráficas (GPUs) e emprega decomposição espacial do domínio para execução em múltiplas GPUs. Em conjunto, essas características ampliam a escala das simulações tridimensionais acessíveis. A modelagem por interface difusa é avaliada por problemas de referência tridimensionais. O equilíbrio entre tensão superficial e pressão é verificado por meio da lei de Young–Laplace em gotas estáticas para diferentes razões de densidade e viscosidade, enquanto a capacidade de representar grandes deformações e mudanças de topologia é avaliada pela instabilidade de Rayleigh–Taylor. Após essas verificações, a metodologia é aplicada a uma configuração tridimensional de dispersão mecânica submarina baseada em condições experimentais obtidas no âmbito do projeto SUBJET, em parceria com o SINTEF Ocean. A caracterização quantitativa da fragmentação requer a identificação das estruturas desconectadas da fase oleosa e a determinação de seus volumes, a partir dos quais se calcula o diâmetro esférico equivalente e a distribuição de tamanhos. Entretanto, na abordagem de interface difusa atualmente empregada, as menores escalas representáveis permanecem diretamente condicionadas à resolução espacial e à espessura numérica da interface. Consequentemente, a presença de uma estrutura fragmentada na solução numérica não implica, por si só, que seu tamanho esteja suficientemente resolvido para compor uma distribuição quantitativamente convergida. Para reduzir essa limitação, encontra-se em desenvolvimento uma formulação de interface nítida baseada no acoplamento entre os métodos *volume of fluid* e *level set* (CLSVOF) (Sussman; Puckett, 2000), combinando conservação volumétrica estrita das fases com uma interface geometricamente

localizada, diminuindo a influência da espessura interfacial sobre a resolução das gotas e preservando uma representação suave. Como prova de conceito, a implementação é avaliada pela translação de uma gota circular em domínio periódico, permitindo verificar a conservação de volume e a preservação da geometria durante a advecção, e pelo vórtice de Rider–Kothe (Rider; Kothe, 1998), que submete a interface a forte deformação antes de conduzi-la novamente à configuração inicial.

RESULTADOS

Para a modelagem por interface difusa, a verificação pela lei de Young–Laplace apresentou erro relativo médio de 2,02% e erro máximo de 2,36% na tensão superficial reconstruída, considerando razões de densidade de até 10^4 e de viscosidade de até 10^3. Na instabilidade de Rayleigh–Taylor, as trajetórias da bolha, espícula e ponto de sela foram comparadas aos dados de referência de Hamzehloo et al. (2021), apresentando erros quadráticos médios equivalentes a 1,62%, 1,44% e 0,45% do comprimento característico, respectivamente, com erro absoluto máximo inferior a 3% ao longo de toda a evolução analisada. Na aplicação à dispersão mecânica submarina, o diâmetro volumétrico mediano D_{v50} foi reduzido de aproximadamente 2,20 mm na condição sem dispersão para 1,32 mm na simulação, enquanto o experimento do SINTEF apresenta $D_{v50} \approx 0{,}248$ mm. A discrepância está associada à limitação de resolução espacial da simulação. Na formulação atual, a espessura da interface difusa e o espaçamento da malha determinam um diâmetro mínimo resolvível de aproximadamente 0,45 mm; reduzir esse valor exige refinamento e maior custo computacional. Os dados experimentais, entretanto, incluem gotas de até 0,053 mm. A Figura 1 apresenta a comparação entre as distribuições experimental, simulada e sem dispersão. Para a modelagem por interface nítida, os testes de translação periódica e de Rider–Kothe em precisão simples apresentaram erros máximos relativos de conservação de volume de $2{,}1 \times 10^{-8}$ e $1{,}5 \times 10^{-6}$, respectivamente, com erros normalizados de recuperação geométrica de $2{,}7 \times 10^{-4}$ e $7{,}4 \times 10^{-3}$.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos indicam que a formulação multifásica empregada reproduz adequadamente a dinâmica interfacial nas escalas resolvidas, conforme demonstrado pelas verificações de Young–Laplace e Rayleigh–Taylor. Na aplicação à dispersão mecânica submarina, a simulação capturou o deslocamento da distribuição de tamanho de gotas para menores diâmetros em relação à condição sem dispersão, embora ainda superestime o tamanho característico das gotas quando comparada aos dados experimentais. Essa diferença evidencia que a resolução espacial e a representação difusa da interface ainda limitam a descrição quantitativa das menores escalas de fragmentação. Os testes iniciais com CLSVOF demonstraram elevada conservação volumétrica e boa recuperação geométrica, indicando a viabilidade da estratégia de interface nítida para superar parte dessas limitações. A continuidade do trabalho será direcionada à combinação dessa abordagem com refinamento localizado da malha e, posteriormente, com uma descrição híbrida Euleriana–Lagrangiana, visando ampliar a faixa de escalas resolvidas e avançar para a obtenção de distribuições de tamanho de gotas numericamente convergidas.

Agradecimentos: Este estudo faz parte do projeto “Modelagem física e numérica de jato submarino de óleo baseada em experimentos”, um acordo de cooperação entre UDESC e Petrobras (número 0050.0125248.23.9), regulamentado pelas cláusulas de investimento em P, D&I da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, Resolução 918/2023).

Palavras-chave: MR-LBM; escoamento multifásico; dispersão submarina; CLSVOF.

ANEXOS

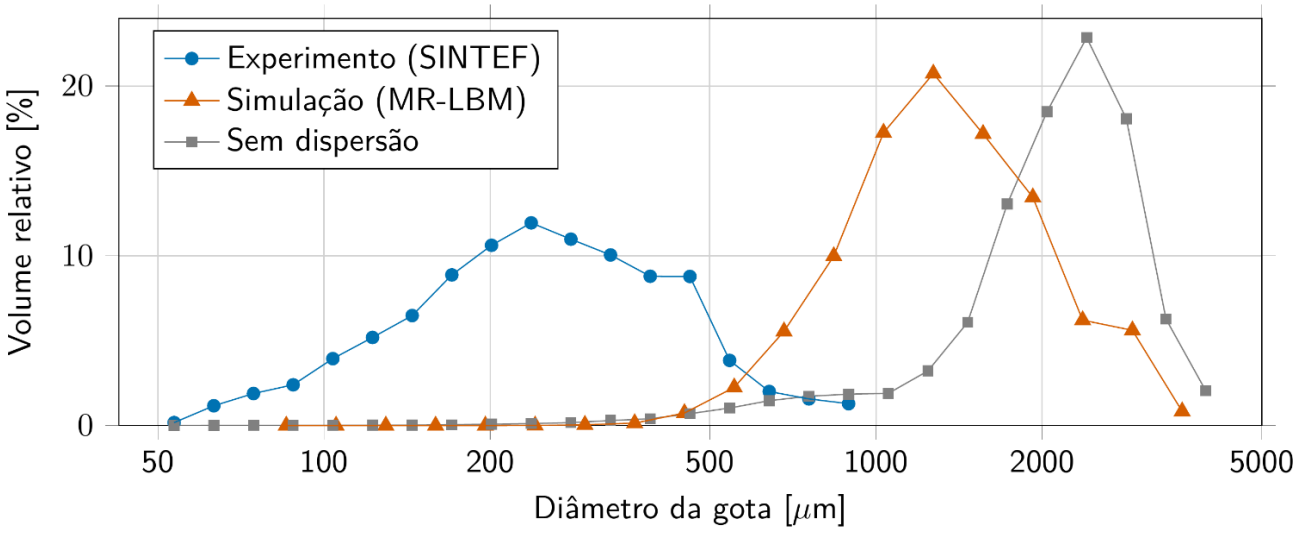


Figura 1. *Distribuição volumétrica de diâmetros das gotas para dispersão mecânica submarina.*



Figura 2. *Fragmentação do jato de óleo durante a simulação da dispersão mecânica submarina.*

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRANDVIK, Per Johan; DAVIES, Emlyn J.; KRAUSE, Daniel F.; LEIRVIK, Frode; DALING, Per S. Reducing oil droplet sizes from a subsea oil and gas release by water jetting: a laboratory study performed at different scales. **Marine Pollution Bulletin**, v. 193, art. 115009, 2023. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2023.115009.

CHIU, Pao-Hsiung; LIN, Yan-Ting. A conservative phase field method for solving incompressible two-phase flows. **Journal of Computational Physics**, v. 230, n. 1, p. 185–204, 2011. DOI: 10.1016/j.jcp.2010.09.021.

HAMZEHLOO, Arash; BARTHOLOMEW, Paul; LAIZET, Sylvain. Direct numerical simulations of incompressible Rayleigh–Taylor instabilities at low and medium Atwood numbers. **Physics of Fluids**, v. 33, n. 5, 054114, 2021. DOI: 10.1063/5.0049867.

RIDER, William J.; KOTHE, Douglas B. Reconstructing volume tracking. **Journal of Computational Physics**, v. 141, n. 2, p. 112–152, 1998. DOI: 10.1006/jcph.1998.5906.

SUSSMAN, Mark; PUCKETT, Elbridge Gerry. A coupled level set and volume-of-fluid method for computing 3D and axisymmetric incompressible two-phase flows. **Journal of Computational Physics**, v. 162, n. 2, p. 301–337, 2000. DOI: 10.1006/jcph.2000.6537.

VARDHAN, Madhurima; GOUNLEY, John; HEGELE, Luiz; DRAEGER, Erik W.; RANDLES, Amanda. Moment representation in the lattice Boltzmann method on massively parallel hardware. In: INTERNATIONAL CONFERENCE FOR HIGH PERFORMANCE COMPUTING, NETWORKING, STORAGE AND ANALYSIS (SC), 2019. **Proceedings [...]**. [S. l.]: IEEE, 2019. art. 34. DOI: 10.1145/3295500.3356204.