

EXPERIMENTAÇÃO NUMÉRICA DE BOLHAS ASCENDENTES

Franco Barbi, Mflab, frcbarbi@gmail.com

Aristeu da Silveira Neto, Mflab, aristeus@mecanica.ufu.br

Millena Martins Villar, Mflab, mmvillar@mecanica.ufu.br

Resumo. Os recursos computacionais disponíveis nos dias de hoje permitem que a engenharia recorra à experimentação numérica através do uso de modelos matemáticos completos e métodos numéricos robustos. Problemas envolvendo escoamentos bifásicos estão amplamente presentes na indústria, e resultados numéricos podem fornecer informações confiáveis de difícil obtenção quando o problema é estudado em experimentação material. No entanto, como o problema envolve uma diversidade de escalas e fenômenos físicos, existem diversos modelos de representação desses escoamentos. O presente trabalho apresenta a modelagem do escoamento em bolhas ascendentes através do clássico método VOF – Volume of Fluid. Resultados preliminares são comparados com dados da literatura.

Palavras chave: VOF, bifásico, bolha ascendente

1. INTRODUÇÃO

Colunas de bolhas são utilizadas em diversos processos industriais. Os interesses associados ao uso desse tipo de escoamento variam. Escoamentos borbulhantes promovem turbulência, transferência de calor e massa. Para que as conveniências sejam aproveitadas da melhor forma possível, um dimensionamento adequado das colunas deve ser realizado. Essa não é uma tarefa fácil, já que na grande maioria dos casos o escoamento presente em uma coluna de bolhas contém diversas escalas de tempo e espaço. Além da multiplicidade de escalas, é comum o uso de fluidos a altas temperaturas e pressões, ou prejudiciais à natureza humana, o que dificulta a experimentação física do problema. Além disso, a obtenção de informações de interesse diretamente do escoamento físico torna-se dificultosa devido à alta sensibilidade à perturbações indesejadas e à instabilidade do mesmo. Ao longo dos anos, muitos modelos teóricos foram desenvolvidos para a representação de escoamentos de bolhas em ascensão. A evolução desses modelos, aliado à evolução de recursos computacionais e métodos numéricos, possibilita que pesquisadores utilizem da experimentação numérica para a investigação do escoamento, com grande confiabilidade. Dijkhuizen *et. al.* (2010) investiga a força de arrasto em bolhas isoladas em ascensão através de simulações numéricas e propõe nova correlação para o coeficiente de arrasto. Roghair *et. al.* (2011) realiza experimentos virtuais de população de bolhas em ascensão e propõe uma nova correlação para a força de arrasto em função da fração de vazio do escoamento. Lau *et. al.* (2011) utiliza a correlação de Roghair *et. al.* (2011) e simula escoamentos em uma coluna de bolhas através de formulações estatísticas. Seus resultados indicam a melhor representação do escoamento com a nova correlação, desenvolvida através de experimentos virtuais.

Devido à alta complexidade dos diversos tipos de escoamentos bifásicos, regimes de operação e multiplicidade de escalas, não existe nos dias de hoje uma formulação generalizada para esse tipo de escoamento, e sim diferentes tipos de modelagens, onde cada uma se adequa melhor a um tipo de problema. Podemos separar os modelos quanto ao seu nível de detalhamento na representação de escoamentos borbulhantes. A Fig. 1 apresenta três tipos de modelagens, sendo elas: Euler-Euler, Euler-Lagrange e uma abordagem muitas vezes referenciada pela literatura como Simulação Numérica Direta.

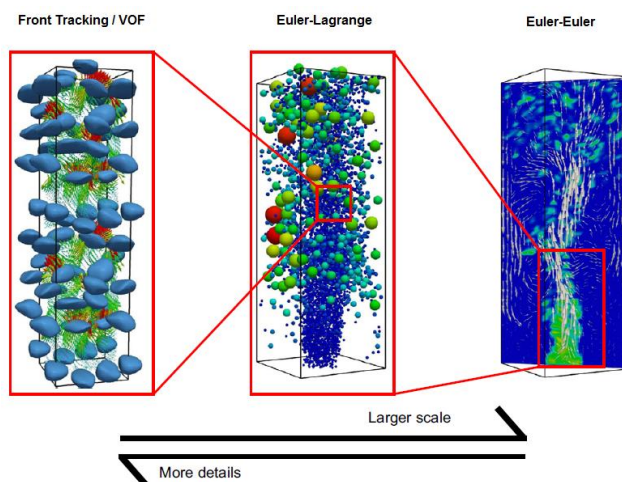


Figura 1. Hierarquia de modelos de representação de escoamentos borbulhantes.

Fonte: Lau *et. al.* (2011)

Modelagem do tipo *Front Tracking* consiste basicamente em resolver a fase contínua (líquida) com uma abordagem euleriana, enquanto interfaces entre as fases são acompanhadas explicitamente com a advecção de pontos lagrangianos. A representação da interface pela abordagem tipo *Front Capturing* é feita em âmbito puramente euleriano, onde uma função é responsável por representar implicitamente a interface. Seu movimento é gerado pela advecção dessa função, e as forças interfaciais são levadas em conta basicamente pelo método *Continuum Surface Force (CSF)*, apresentado por Brackbill, Kothe e Zemach (1992). Entre as técnicas dessa classe, destacam-se a de *Volume of Fluid (VOF)* (HIRT; NICHOLS, 1981).

2. MÉTODOS

O escoamento viscoso, incompressível, isotérmico e tridimensional é modelado através das equações de Navier-Stokes e a equação da continuidade, representadas pelas Eqs. 1 e 2:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0 \quad (1)$$

$$\rho(\phi) \left[\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\vec{V} \vec{V}) \right] = -\vec{\nabla} p + \vec{\nabla} \cdot [\mu(\phi) (\vec{\nabla} \vec{V} + \vec{\nabla}^T \vec{V})] + f \quad (2)$$

onde $\vec{V}$ representa o vetor velocidade, p a pressão, ρ a massa específica, μ a viscosidade e f representa um campo de força interfacial, que só não assume valores nulos na região da interface entre as fases. Nota-se na Eq. 2 que a massa específica é uma função de uma função indicadora ϕ , que é responsável por determinar a disposição das fases e as interfaces do escoamento. Assim, os campos de massa específica e viscosidade são definidos por:

$$\rho(\phi) = \rho_d \phi + \rho_c (1 - \phi) \quad (3)$$

$$\mu(\phi) = \mu_d \phi + \mu_c (1 - \phi) \quad (4)$$

Nas Eqs. 3 e 4, os índices c e d referem-se às fases contínua e dispersa, respectivamente. O campo escalar definido por ϕ assume valor 1 para regiões de fase dispersa e valor 0 para região de fase contínua. A interface entre as fases é localizada onde o campo de ϕ assume valores entre 0 e 1.

O código AMR3D (*Adaptive Mesh Refinement 3D*) utiliza uma hierarquia de malhas bloco-estruturadas refinadas localmente, que consiste em blocos de malhas retangulares com espaçamentos sequencialmente menores. Esses blocos sequenciais serão formados a partir da identificação de pontos onde os erros da solução na malha mais grosseira (malha base) é elevado devido a fenômenos localizados como alta turbulência, vorticidade e presença de interface. A Fig. 2 apresenta os blocos dispostos em regiões de alta vorticidade na esteira de uma bolha em ascensão.

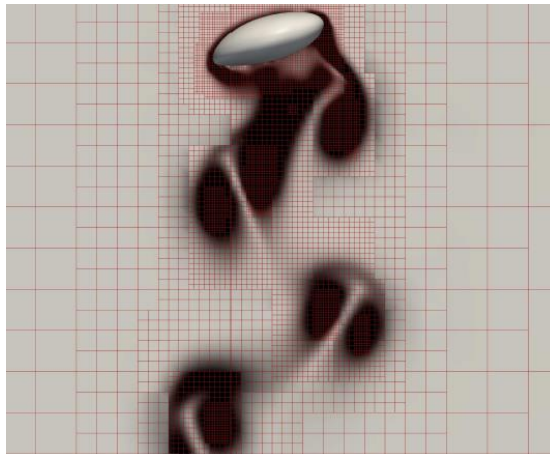


Figura 2. Blocos de refinamento em regiões de alta vorticidade.
Fonte: Pivello (2012)

Juntamente com o esquema de malhas adaptativas, o método Multigrid-Multinível é utilizado na resolução dos sistemas lineares provenientes das equações governantes discretizadas, garantindo uma elevada taxa de convergência e boa acurácia. O acoplamento pressão-velocidade empregado é um método de passos fracionários baseado nas

observações de Chorin (1968). Para o avanço temporal, o código utiliza um método semi-implícito de segunda ordem, como proposto por Ascher *et. al.* (1997).

2.1. Volume of Fluid – VOF

O método VOF (HIRT; NICHOLS, 1981) é um dos mais antigos métodos utilizados na representação de escoamentos com a presença de interface entre diferentes fluidos. Suas primeiras aplicações foram feitas em simulações de escoamentos com superfície livre, e nos dias de hoje, a literatura disponível na comunidade científica apresenta diversos tipos de aplicações do método, como em escoamentos de bolhas, gotas e outros tipos de interfaces entre fluidos.

Conhecida como função coloração, a função C (que é um escalar) é responsável por definir em que posições do domínio se encontra os diferentes tipos de fluido e a(s) interface(s) que o(s) separa(m), como indicado pela igualdade na Eq. 5. Considerando um sistema bifásico gás/líquido descrito em uma malha cartesiana, a função C assume valor unitário para os volumes que contém a fase líquida, e zero para os volumes da fase gasosa. A interface entre as fases é descrita através de volumes que armazenam valores intermediários da função C , representando uma fração volumétrica de certa fase contida no volume em questão. A função C é advectada a partir do campo de velocidades do escoamento, como representa a Eq. 6.

$$\phi = C \quad (5)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \vec{\nabla})C = 0 \quad (6)$$

Para a advecção da função coloração, utiliza-se o esquema PLIC – *Piecewise Linear Interface Calculation*. Esse esquema promove a reconstrução da interface entre as fases em cada passo de tempo, sendo todo o processo de reconstrução e advecção realizados por cálculos geométricos. Essa é uma maneira eficaz de se transportar o campo da função escalar C garantindo uma boa conservação de volume entre as fases.

O cálculo da força interfacial é realizado pelo CSF – *Continuous Surface Force* apresentado por Brackbill *et. al.* (1992). Nesse método, a força interfacial é calculada a partir da curvatura k , da tensão superficial σ , de uma função δ concentrada em uma dada interface e da normal n :

$$f = \sigma k \delta n \quad (7)$$

3. RESULTADOS

A Tabela 1 apresenta resultados preliminares de bolhas isoladas em ascensão. Os formatos finais são comparados entre resultados numéricos de Hua (2007) e Pivello (2012), que utilizam o método *Front Tracking* para a representação da interface entre os fluidos. Calcula-se um desvio ε entre o número de Reynolds obtido numericamente e o calculado experimentalmente por Bhaga (1981).

Medidas de coeficientes de arrasto C_D são mostradas na Fig. 3. Os resultados foram obtidos para bolhas em diferentes níveis de deformações. Na legenda, poucas deformações referenciam bolhas ovaladas. A legenda de maiores deformações referenciam casos em que as bolhas assumem formato de disco e o formato *skirted*.

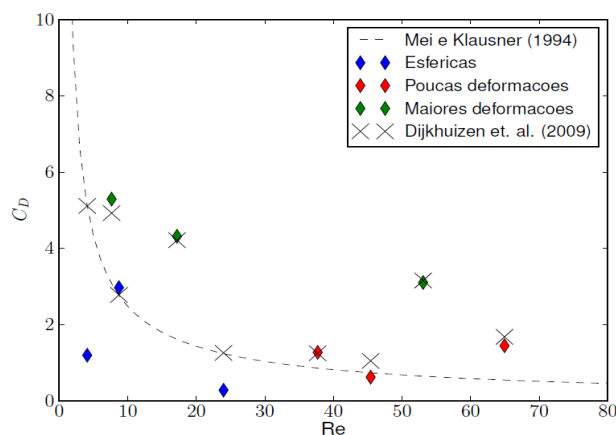
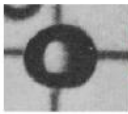
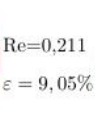
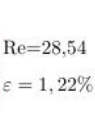


Figura 3. Comparações de coeficientes de arrasto obtidos numericamente com correlações da literatura.

Tabela 1. Resultados preliminares de validação da metodologia VOF (presente trabalho) e *Front Tracking*.

Bhaga	Hua	Pivello	VOF
$Eo=17,7$ $Mo=711$ $Re=0,232$			
	$Re=0,211$ $\varepsilon = 9,05\%$	$Re=0,212$ $\varepsilon = 8,62\%$	$Re=0,191$ $\varepsilon = 17,8\%$
$Eo=32,2$ $Mo=8,2e-3$ $Re=55,3$			
	$Re=52,96$ $\varepsilon = 4,23\%$	$Re=53,2$ $\varepsilon = 3,80\%$	$Re=53,07$ $\varepsilon = 4,0\%$
$Eo=243$ $Mo=266$ $Re=7,77$			
	$Re=8,40$ $\varepsilon = 8,07\%$	$Re=7,61$ $\varepsilon = 2,06\%$	$Re=7,64$ $\varepsilon = 1,67\%$
$Eo=339$ $Mo=43,1$ $Re=18,30$			
	$Re=17,91$ $\varepsilon = 2,13\%$	$Re=17,06$ $\varepsilon = 6,78\%$	$Re=17,18$ $\varepsilon = 6,12\%$
$Eo=641$ $Mo=43,1$ $Re=30,3$			
	$Re=28,54$ $\varepsilon = 1,22\%$	$Re=31,47$ $\varepsilon = 5,81\%$	$Re=28,8$ $\varepsilon = 4,95\%$

4. CONCLUSÕES

Os resultados preliminares mostram boa concordância com os dados presentes na literatura, indicando que o presente método está adequado para a realização de experimentos numéricos de bolhas em ascensão a baixos números de Reynolds.

5. REFERÊNCIAS

Ascher, U. M, Ruuth, S. J. E e Wetton, B. T., 1997, “Implicit-explicit methods for time-dependent pde's”. *SIAM J. Numer. Anal.* 32, 797-823.

Bhaga, D. e Weber, M. E., 1981, “Bubbles in viscous liquids: shapes, wakes and velocities”. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 105, p. 61-85, 1981.

Brackbill, J. U.; Kothe, D. B.; Zemach, C., 1992, “A continuum method for modeling surface tension”. *Journal of Computational Physics*, v. 100, p. 335.

Dijkhuizen, W., Roghair, I., Van Sint Annaland, M., Kuipers, J.A.M., 2010, “DNS of gas bubbles behaviour using an improved 3D front tracking model—Drag force on isolated bubbles and comparison with experiments”, *Chemical Engineering Science*, Volume 65, Issue 4, Pages 1415-1426,.

Hirt, C. W.; Nichols, B. D., 1981, “Volume of Fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries”. *J. Comput. Phys.*, v. 39, p. 201–225.

Hua, J.; Lou, J., 2007, “Numerical simulation of bubble rising in viscous liquid”. *Journal of Computational Physics*, v. 222, n. 2, p. 769-795.

Lau, Y.M., Roghair, I., Deen, N.G, Van Sint Annaland, M, Kuipers, J.A.M., 2011, “Numerical investigation of the drag closure for bubbles in bubble swarms”. *Chemical Engineering Science*, v. 66, p. 3309 – 3316.

Pivello, M. R., 2012, “A fully adaptive *Front_tracking* method for the simulation of 3D two-phase flows”. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia,.

Roghair, I., Lau, Y.M., Deen, N.G., Slagter, H.M., Baltussen, M.W., Van Sint Annaland, M., Kuipers, J.A.M., 2011, “On the drag force of bubbles in bubble swarms at intermediate and high Reynolds numbers”, *Chemical Engineering Science*, Volume 66, Issue 14, 15, Pages 3204-3211.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

O(s) autor(es) é (são) os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.