

ANÁLISE NUMÉRICA DE UMA BOLHA ASCENDENTE EM REGIME PULSANTE

Franco Barbi, Universidade Federal de Uberlândia - Mflab, frcbarbi@gmail.com

Aristeu da Silveira Neto, Universidade Federal de Uberlândia - Mflab, aristeus@mecanica.ufu.br

Márcio Ricardo Pivello, Universidade Federal de Uberlândia - Mflab, pivello@mecanica.ufu.br

Resumo. O entendimento do escoamento de bolhas em ascensão é crucial para o correto dimensionamento de equipamentos utilizados em diversos tipos de indústrias. Como o problema envolve múltiplas escalas espaciais e temporais, a simulação numérica dos fenômenos físicos atuantes em bolhas ascendentes permitem uma minuciosa análise das características fluido-dinâmicas e um melhor entendimento dos fenômenos presentes. Nesse escopo, o uso de sondas numéricas permitem a obtenção de informações para tratamentos estatísticos que quantificam e identificam padrões de escoamentos turbulentos. O presente trabalho apresenta uma análise estatística do campo de velocidades formado na esteira de uma bolha ascendente em regime pulsante.

Palavras chave: Front Tracking, SAMR, escoamento bifásico, woobling

1. INTRODUÇÃO

A prática de experimentação numérica é uma realidade na comunidade científica graças ao aumento expressivo da tecnologia computacional aliada a avançados métodos numéricos e modelos matemáticos que permitem representar fenômenos físicos com altos níveis de detalhes. Diferente da experimentação material, a experimentação numérica permite que o pesquisador analise os fenômenos representados com maior flexibilidade em relação às escalas de tempo e espaço. Quando os fenômenos físicos são representados dentro dos limites impostos pelo modelo matemático, é possível retirar informações de difícil obtenção através de experimentos materiais.

Na análise de escoamentos borbulhantes por experimentação material, é comum o uso de sondas para a obtenção de informações do escoamento. São encontrados na literatura registros de experimentos para os quais usou-se instrumentação intrusiva (WANG e CHING, 2001) e não intrusiva (LEE; LUO; FAN, 1999). Por se tratar de sondas físicas, existem desvantagens em relação à fragilidade das mesmas, além de limitações em análises tridimensionais. Além disso, existe a óbvia desvantagem no uso de sondas intrusivas em sistemas que representam fenômenos físicos bastante sensíveis à perturbações externas. O uso de sondas virtuais para tratamento estatístico é ainda pouco encontrado na literatura, o que caracteriza uma das inovações no presente trabalho.

2. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA E MÉTODOS NUMÉRICOS

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. 1 - (a) apresenta os blocos dispostos em regiões de alta vorticidade na esteira de uma bolha em ascensão.

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 exatidão. 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. Front Tracking

Métodos de *Front Tracking* (FT) (TRYGGVASON *et al.*, 2001) utilizam malhas diferentes para representar o domínio do escoamento e o domínio da interface. O escoamento é resolvido em uma malha com referencial euleriano, enquanto a interface é representada por um conjunto de marcadores que se movem em um referencial lagrangiano. Estes marcadores geralmente são conectados entre si através de elementos, formando uma malha não estruturada. Embora esta conectividade não seja obrigatória, torna significativamente mais fácil o cálculo de propriedades geométricas como área, volume e curvatura, além da checagem de interseção e realização de operações booleanas.

Para resolver as equações de Navier-Stokes (Eq. 2), outras equações precisam se resolvidas na metodologia FT. Estas equações têm como principal função a interpolação do campo de velocidade do domínio euleriano para o domínio lagrangiano, onde posteriormente a este passo resolve-se a equação do movimento da interface lagrangiana definido a nova posição da interface. Em seguida avalia-se a força interfacial no domínio euleriano. Com a força avaliada, interpola-se a força do domínio lagrangiano para o domínio euleriano. Para maiores informações sobre o método utilizado, vide Pivello (2012).

2.2. Sondas numéricas

A captação de sinais através de sondas pode ser feita durante ou após os cálculos. Quando feita durante, os valores em todos os passos de tempo são registrados e um sinal completo é obtido. Quando a captação dos sinais é feita em pós processamento, os valores limitam-se à frequência de arquivamento dos resultados. No entanto, como os resultados já foram gerados, os sinais são obtidos rapidamente através de scripts que acessam os arquivos salvos. Nos scripts são realizadas operações de cálculo do centróide da bolha ascendente, posicionamento das sondas numéricas, interpolações e registro dos dados. A Fig. 1 - (b) mostra as disposições das sondas que se mantêm fixas em relação ao centróide da bolha. A distância entre os planos é de um diâmetro (d) equivalente da bolha (esférica). Cada plano possui uma sonda alinhada com o centro de massa da bolha, e quatro sondas laterais deslocadas $d/3$ da posição central.

3. RESULTADOS

O caso utilizado para a análise foi simulado por Pivello (2012), onde a bolha entra em regime de *woobling*, mantendo a simetria do escoamento nos instantes iniciais. O domínio computacional tem dimensões de $8d \times 8d \times 80d$, sendo d o diâmetro inicial da bolha esférica, e a malha utilizada é $8 \times 8 \times 80L6$ (malha base de $8 \times 8 \times 80$ com 6 níveis de refinamento). Nessa configuração, o espaçamento do nível mais fino é igual a $d/32$, e foram utilizadas em média 2.000.000 células computacionais para os cálculos. A condição de free-slip foi aplicada para as velocidades das faces laterais perpendiculares à direção de ascensão (z). Na face do topo, a condição de Neumann homogênea é utilizada. Os blocos de refinamento adaptativos são configurados para refinar regiões de alta vorticidade e a região da interface entre os fluidos. Foi utilizado o SBDF para a integração temporal, enquanto um esquema *skew symmetric* é utilizado para a avaliação dos termos advectivos. A Fig. 3.37 ilustra iso-contornos de magnitude de vorticidade, que nos permite visualizar as estruturas turbilhonares formadas.

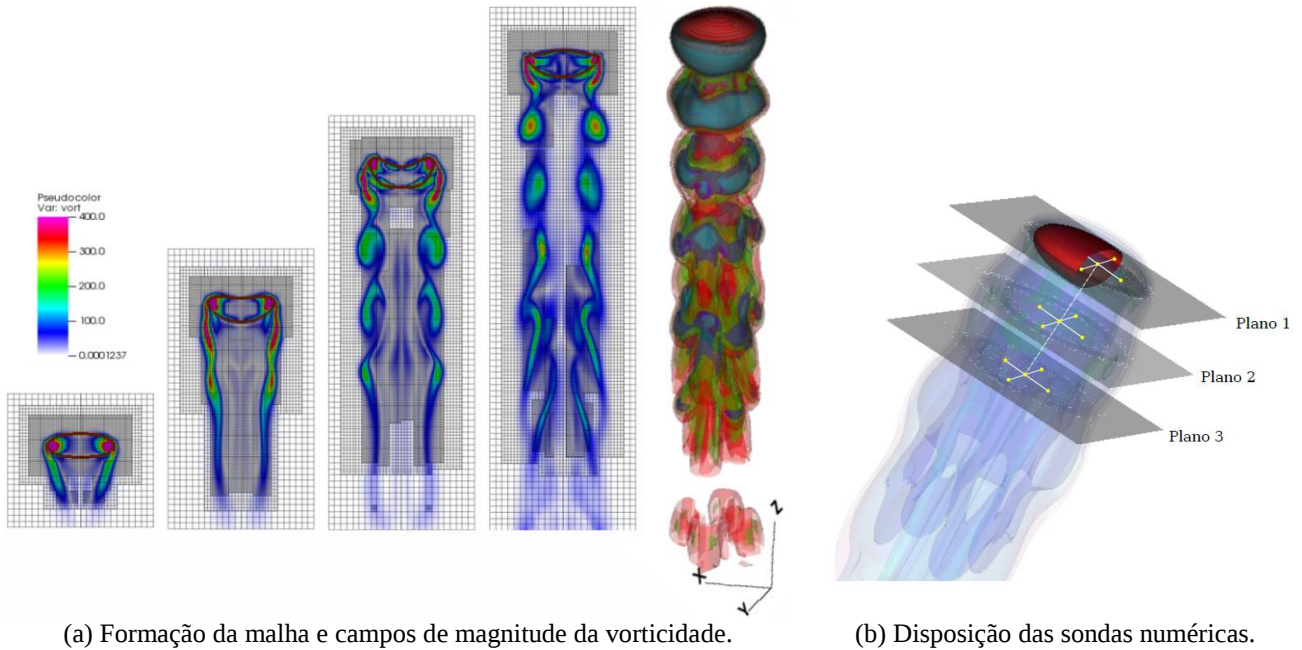
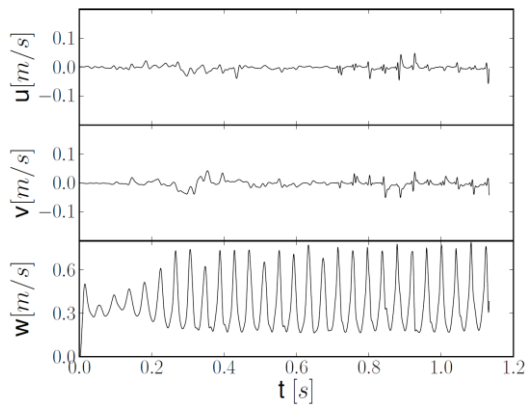
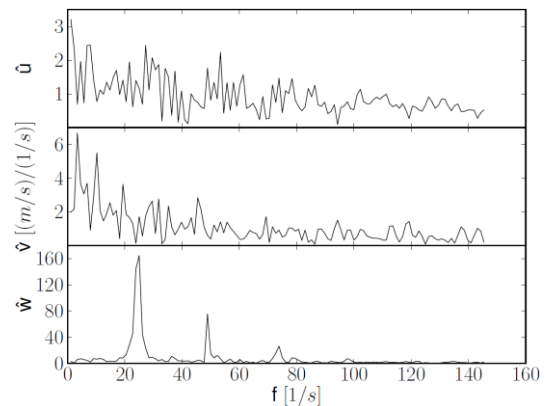


Figura 1. Bolha em regime pulsante e campo de vorticidade identificando estruturas formadas na esteira.

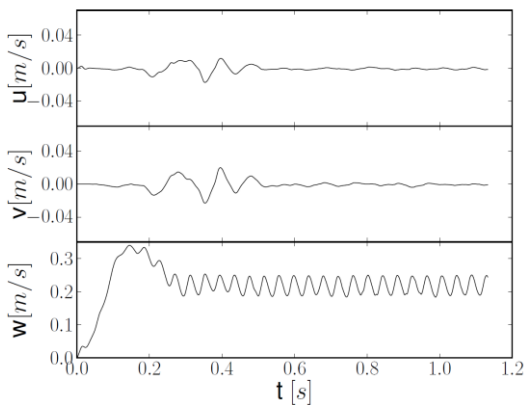
Como constatado por Pivello (2012), a bolha entra em um regime de pulsação aproximadamente axissimétrica, gerando uma esteira com instabilidades fluido-dinâmicas em modo varicoso. As estruturas turbilhonares interagem entre si na esteira e são gradualmente dissipadas a medida que se afastam da bolha ascendente. Observa-se a presença de instabilidades fluidodinâmicas no interior da bolha, assim como na sua esteira. Observa-se ainda o forte estiramento da esteira à medida que a bolha se desloca.



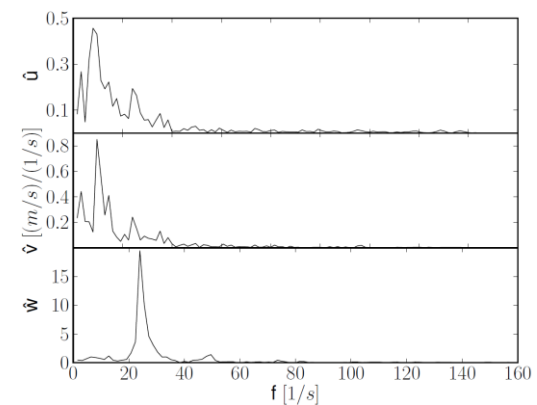
(a) - Velocidades - Sonda do plano 1



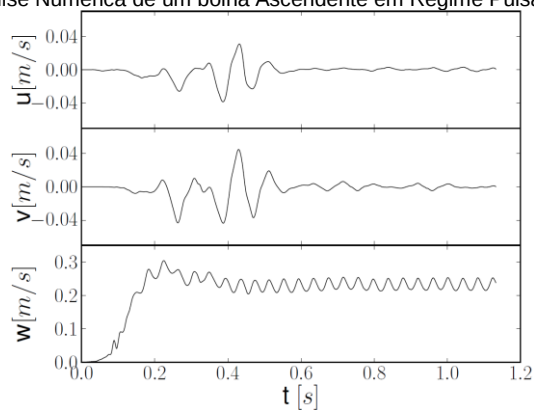
(b) - Espectro de frequências - Sonda do plano 1



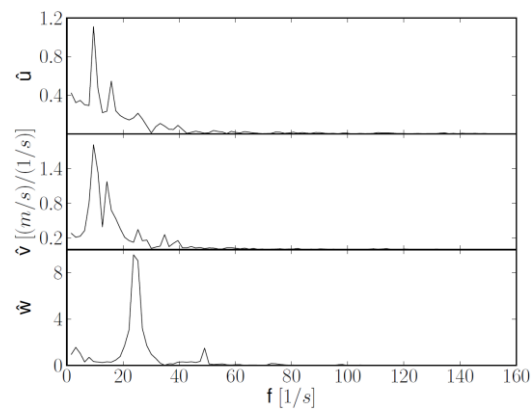
(c) - Velocidades - Sonda do plano 2



(d) - Espectro de frequências - Sonda do plano 2



(e) - Velocidades - Sonda do plano 3



(f) - Espectro de frequências - Sonda do plano 3

Figura 2. Sinais de velocidade (esquerda) e suas respectivas transformadas de Fourier (direita).

A Fig. 2 - (a) mostra os sinais de velocidade obtidos no interior na bolha (plano 1). Fica evidente a natureza oscilatória e instável do escoamento no interior da bolha. As componentes de velocidade transversais à direção de ascensão (u e v) oscilam em torno de zero com uma amplitude na ordem de 0,01 [m/s]. Já a componente de ascensão w apresenta maiores amplitudes de oscilação (ordem de 0,1 [m/s]), com média diferente de zero, aproximadamente 0,35 [m/s], sendo essa a velocidade média de ascensão da bolha. A Fig. 2 - (b) mostra o gráfico obtido com a transformada de Fourier dos sinais da sonda posicionada no centróide da bolha. Vários picos de amplitude relativamente baixas são observados em várias frequências para as componentes transversais à direção de ascensão (u e v). A componente w apresenta frequências dominantes bem definidas aproximadamente nas frequências 23 [1/s], 50 [1/s] e 76 [1/s], com amplitudes de aproximadamente, respectivamente, 160 [(m/s)/(1/s)], 80 [(m/s)/(1/s)] e 40 [(m/s)/(1/s)]. Esses valores sugerem que as estruturas de mais energia do escoamento são as de frequência mais baixa, enquanto as de frequência mais altas carregam menos energia. Observa-se ainda que as direções transversais apresentam uma gama mais rica de frequências, porém com níveis mais baixos de energia. Esses resultados apontam para a transição à turbulência no interior da bolha. Apontam ainda para uma natureza anisotrópica muito elevada do escoamento.

Para as sondas situadas na esteira da bolha (planos 2 e 3), os espectros dos sinais são comparados na Fig. 2 - (d) e (f) para os pontos centrais. Nota-se que as frequências dominantes identificadas são praticamente as mesmas nos planos 2 e 3, com uma diferença expressiva nas amplitudes. A componente w apresenta uma frequência melhor definida em aproximadamente 23 [1/s], com um leve sinal de que há algo em 50 [1/s]. Os efeitos viscosos são evidenciados ao notar o decaimento da amplitude do sinal na frequência dominante 23 [1/s], que cai pela metade do plano 2 para o 3. Por outro lado, observa-se que a energia associada às componentes u e v aumentam ao passar do plano 2 para o plano 3. Isso mostra uma transferência de energia da direção z para as direções x e y , amplificando novas instabilidades e levando o escoamento à transição a turbulência.

4. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou resultados de uma análise estatística realizada em campos do escoamento de uma bolha em regime pulsante obtidos através de simulação numérica. Os resultados possibilitaram identificar instabilidades fluido-dinâmicas presentes em processos de transição à turbulência, além de características do escoamento no interior e exterior da bolha.

5. REFERÊNCIAS

- Ascher, U. M.; Ruuth, S. J.; Wetton, B. T. Implicit{explicit methods for time-dependent pde's. SIAM J. Numer. Anal., v. 32, p. 797.
- Lee, D. J.; Luo, X.; Fan, L. S. Gas disengagement technique in a slurry bubble column operated in the coalesced bubble regime. Chemical Engineering Science, v. 54, p. 2227.
- Pivello, M. R. A Fully Adaptative Front-Tracking Method for the Simulation of 3D Two-phase flows. 131 p. Tese (Doutorado), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2012.
- Tryggvason, G.; Bunner, B.; Esmaeeli, A.; Juric, D.; Al-Rawahi, N.; Tauber, W.; Han, J.; Nas, S.; Jan, Y. J. A front-tracking method for the computations of multiphase flow. Journal of Computational Physics, v. 169, p. 708.
- Wang, G.; Ching, C. Y. Measurement of multiple gas-bubble velocities in gas-liquid flows using hot-film anemometry. Experiments in Fluids, v. 31, p. 428.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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