

ANÁLISE COMPUTACIONAL DE ESCOAMENTOS BIFÁSICOS COM TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA TÉRMICA E DE MASSA

**Bernardo Alan de Freitas Duarte, Universidade Federal de Uberlândia, be.duarte@hotmail.com
Aristeu da Silveira Neto, Universidade Federal de Uberlândia, aristeus@mecanica.ufu.br**

Resumo. *O objetivo desse trabalho é desenvolver e implementar uma formulação matemática diferencial para escoamentos bifásicos com transferência de energia térmica e de massa. Utilizou-se o código AMR-3D (executado em paralelo) e desenvolveu-se um critério de refinamento adaptativo em função do gradiente de temperatura. Foi implementada a formulação para transferência de energia térmica e realizou-se a verificação numérica por meio da metodologia de solução manufaturada. Conduziu-se em seguida um caso monofásico afim de validar a transferência de energia térmica no código e os resultados preliminares indicam boa aproximação do número de Nusselt entre o modelo computacional e a solução analítica disponível na literatura.*

Palavras chave: *número de Nusselt, mudança de fase, número de Rayleigh*

1. INTRODUÇÃO

Escoamentos bifásicos estão presentes na maioria dos fenômenos naturais e também nas aplicações industriais da atualidade. Entre os exemplos de escoamentos bifásicos oriundos de fenômenos naturais, destacam-se: a chuva, a formação de gotas e bolhas entre os oceanos e a atmosfera, bem como explosões vulcânicas, que envolvem também os processos de transferência de massa e energia térmica (Tryggvason et al., 2011).

Entre os exemplos de escoamento bifásicos presentes na indústria, destaca-se a classe de problemas que envolvem o processo de vaporização. De acordo com Tanguy et al. (2014), escoamentos envolvendo processo de vaporização são tópicos de interesse em várias aplicações industriais, tais como: sprays de refrigeração, trocadores de calor, aplicações criogênicas, armazenamento de fluidos sob micro-gravidade para aplicações espaciais.

Prever de forma acurada o comportamento de escoamentos bifásicos é um problema de imenso interesse industrial e científico (Tryggvason et al., 2011). De acordo com Tsui et al. (2014), escoamentos bifásicos do tipo líquido-vapor podem ser encontrados em diversos processos industriais e naturais. Conforme Haelssig et al. (2010), há diversos processos envolvendo escoamentos bifásicos que precisam ser melhor compreendidos. Tryggvason et al. (2011) ressaltam que os estudos nessa classe de escoamentos ainda está em estágio embrionário e que atualmente, o controle da maioria dos processos industriais que envolve escoamentos bifásicos é meramente rudimentar e esse controle comumente se baseia em intuição e observações empíricas. Haelssig et al. (2010) comentam que a Dinâmica dos Fluidos computacional é uma ferramenta poderosa para se avançar nesse tema e conforme (Tryggvason et al., 2011), progressos científicos podem implicar no aprimoramento de processos industriais e assim conduzir atividades com maior eficiência e controle.

De acordo com Akhtar e Kleis (2013), vários processos industriais utilizam a energia envolvida na ebulição e condensação de escoamentos em diversas aplicações como refrigeração de componentes eletrônicos, refinamento de óleo na indústria petrolífera, armazenamento de energia e diversas outras. Esses autores ainda destacam que o mecanismo físico fundamental envolvido em processos de ebulição ocorre em pequenas escalas, onde há simultaneamente o processo de mudança de fase ocorrendo em altas taxas, sendo ainda pouco compreendido.

De acordo com Nikolopoulos et al. (2007), o processo de mudança de fase líquido-vapor cumpre uma importância grande em diversas aplicações tecnológicas como em motores de combustão, sistemas de resfriamento de equipamentos e em ciclos de refrigeração. Nessas aplicações mencionadas é necessário se determinar o comportamento dinâmico do impacto de gotas juntamente com a transferência de energia térmica envolvida nessa interação para se verificar a quantidade de massa transferida no processo de mudança de fase. De acordo com Tryggvason et al. (2005), o processo de ebulição é uma das maneiras mais eficientes de se remover energia térmica de superfícies sólidas aquecidas. Equipamentos industriais que realizam esses processos podem sofrer consequências catastróficas caso não sejam corretamente projetados, devido a grande mudança de volume e temperaturas. Strotos et al. (2011) também ressaltam que a evaporação de gotas é um fenômeno importante ocorrendo em várias aplicações de engenharia, bem como na natureza.

De acordo com Yang et al. (2014), sistemas de ebulição nucleada em piscina são amplamente estudados por serem de interesse em diversas aplicações químico-industriais no domínio de refrigeração, resfriamento de componentes eletrônicos e de aplicações aero-espaciais. De acordo com Tryggvason et al. (2005), a grande maioria dos sistemas em engenharia envolvem o regime de ebulição nucleada. A motivação dos estudos nessa área decorrem do fenômeno de crise de ebulição.

Esse fenômeno resulta da interação das instabilidades de Taylor, na interface vapor-líquido normal ao vetor aceleração da gravidade, e as instabilidades de Helmholtz, na interface vapor-líquido de uma coluna de vapor vertical, que serve de via de escape para o vapor. Quando a velocidade dos jatos de vapor atinge um valor crítico, a instabilidade de Helmholtz acarretará no colapso dos mesmos, impedindo sua saída e criando uma película de vapor.

Finalmente, Yang et al. (2014) acrescentam que nos últimos anos, com o estabelecimento da Estação Espacial Internacional, houve um rápido interesse e desenvolvimento na física de escoamentos bifásicos com transferência de massa e energia térmica submetidos à influência da microgravidade, o que tem demonstrado um novo campo de estudos totalmente original.

2. METODOLOGIA

Foi utilizado o código AMR3D, cujo processamento ocorre em paralelo, desenvolvido ao longo dos últimos anos no Laboratório de Mecânica dos Fluidos (MFLab-FEMEC-UFU), o qual resolve as equações de Navier-Stokes na forma tridimensional transiente utilizando malha multi bloco com adaptatividade local.

A equação da energia foi implementada na forma conservativa de acordo com a Eq. (1) e sua solução é obtida de forma implícita por meio do solver Multigrid.

$$\frac{\partial(\rho C_p T)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho C_p \vec{V} T) = \vec{\nabla} \cdot (k \vec{\nabla} T) + \phi \quad (1)$$

A remalhagem adaptativa em função dos gradientes de temperatura foi implementada em seguida, conforme Fig. (1). A seguir ilustra-se um exemplo desse recurso computacional que permite que áreas de grande gradiente de temperatura sejam mais refinadas que outras áreas sem grandes gradientes.

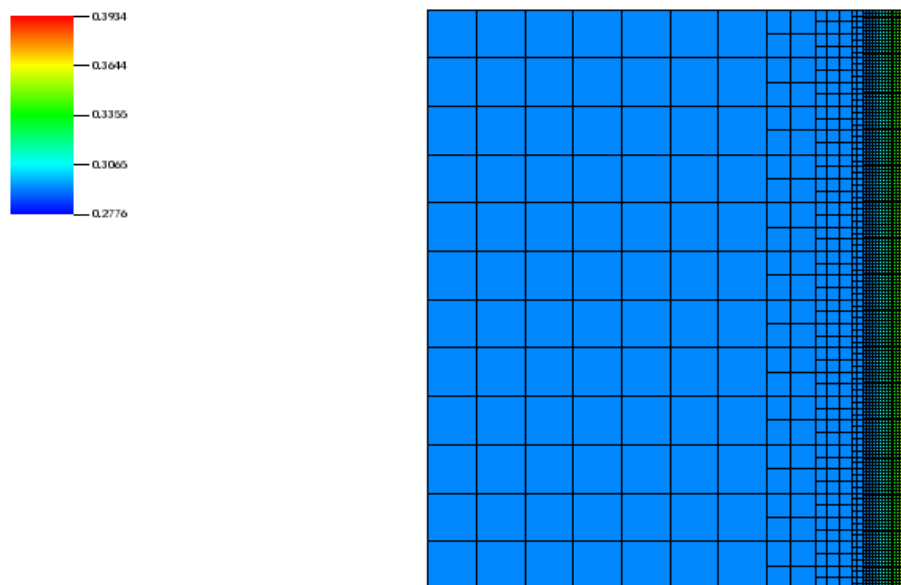


Figura 1. Campo de temperatura em plano transversal ao escoamento de um canal com uma parede aquecida

Foi conduzida uma verificação numérica por meio do método de solução manufaturada, e em seguida simulou-se um problema monofásico, cujos detalhes podem ser obtidos em Deen e Kuipers (2013). Foi considerado um canal com paredes aquecidas (0,393K) e com um fluido que entra a temperatura de 0,293K a uma velocidade de 0,1m/s (regime laminar). Calculou-se o número de Nusselt na parede (conforme calculado por Deen e Kuipers (2013) e confrontou-se os dados com a literatura.

3. RESULTADOS

O escoamento se tornou termicamente desenvolvido após 15 segundos físicos de simulação, conforme Fig. (2) a seguir:

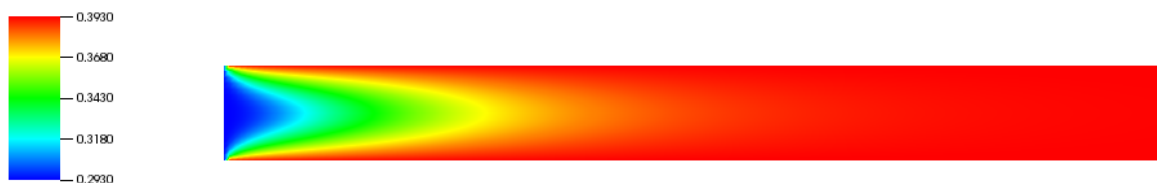


Figura 2. Campo de temperatura no plano central transversal ao escoamento

O número de Nusselt obtido foi de 2,94, enquanto que o valor analítico para esse problema é de 2,98.

4. CONCLUSÕES

Conclui-se que houve bom acordo entre o valor do número de Nusselt encontrado e o valor analítico. Além disso, concluiu-se que a malha adaptativa com o critério de refinamento baseado nos gradientes de temperatura é uma ferramenta importante em problemas dessa natureza, já que favorece a convergência com menor tempo de simulação que uma malha uniforme exigiria.

5. REFERÊNCIAS

- Akhtar, M. W. and Kleis, S. J., 2013, “Boiling flow simulation on adaptive octree grids”, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 53, pp. 88–99.
- Deen, N. G. and Kuipers, J. A. M., 2013, “Direct numerical simulation of wall-to liquid heat transfer in dispersed gas-liquid two-phase flow using a volume of fluid approach”, *Chemical Engineering Science*, Vol. 102, pp. 268-282.
- Haelssig, J. B., Tremblay, A. Y., Thibault, J., and Etemad, S. G., 2010, “Direct numerical simulation of interphase heat and mass transfer in multicomponent vapour-liquid flows”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, pp. 3947–3960.
- Nikolopoulos, N., Theodorakakos, A., and Bergeles, G., 2007, “A numerical investigation of the evaporation process of a liquid droplet impinging onto a hot substrate”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, pp. 303–319.
- Stroos, G., Gavaises, M., Theodorakakos, A., and Bergeles, G., 2011, “Numerical investigation of the evaporation of two-component droplets”, *Fuel*, pp. 1492 - 1507.
- Tanguy, S., Sagan, M., Lalanne, B., Couderc, F., and Colin, C., 2014, “Benchmarks and numerical methods for the simulation of boiling flows”, *Journal of Computational Physics*, Vol. 264, pp. 1–22.
- Tryggvason, G., Esmaeili, A., and Al-Rawahi, N., 2005, “Direct numerical simulations of flows with phase change”, *Computers and Structures*, Vol. 83, 445–453.
- Tryggvason, G., Scardovelli, R. And Zaleski, S., 2011, “Direct numerical simulations of gas-liquid multiphase flows”, Cambridge University Press, 315 p.
- Tsui, Y., Lin, S., and Wu, F., 2014, “Phase change calculations for film boiling flows”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 70, pp. 745–757.
- Yang, Y., Pan, L., and Xu, J., 2014, “Effects of microgravity on marangoni convection and growth characteristic of a single bubble”, *Acta Astronautica*, Vol. 100, pp. 129–139.

6. AGRADECIMENTOS

Agradecemos o apoio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, ao Laboratório de Mecânica dos Fluidos (Mflab), ao CNPQ e à Petrobras para realização desse trabalho.

7. ABSTRACT

The purpose of this work was to develop and implement a mathematical formulation for multiphase flows with energy and mass transport. The code AMR3D (run in parallel) was used and a temperature gradient criteria was developed to adaptative mesh refinement. Numerical verification was conducted by manufactured solution method and finally a monophase case was validated by the calculation of Nusselt number at the wall. Preliminary results shows good agreement between analytical (2,98) and numerical (2,94) results.

8. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.