



AVALIAÇÃO NUMÉRICA DA EVAPORAÇÃO NO CÁLCULO DO COEFICIENTE DE ARRASTO PARA GOTA DINÂMICAMENTE ISOLADA

Jamille Késsia Martins¹, Abgail Paula Pinheiro², João Marcelo Vedovoto³

RESUMO: Em diversos dispositivos práticos industriais o processo de vaporização ocorre em altas temperaturas convectivas tornando a correção para o cálculo do coeficiente de arrasto em modelagens de fluxo bifásico necessária. Este trabalho tem como objetivo avaliar duas correlações sugeridas na literatura para o caso de uma única gota de n-heptano desacelerando. Para simulação foi utilizada uma abordagem lagrangiana e como método de conversão Range-Kutta de quarta ordem. Ambas correlações avaliadas se demonstraram próximas para o intervalo de Reynolds analisado.

PALAVRAS-CHAVE: Evaporação de gota . Coeficiente de arrasto . Simulação numérica.

NUMERICAL EVALUATION OF DRAG COEFFICIENT CALCULATION FOR EVAPORATING DROPLETS

ABSTRACT: In several industrial applications the vaporization process occurs at high environmental temperatures and velocities, which makes for the adequate drag coefficient calculation in biphasic flow modeling crucial. This work aims to evaluate two correlations suggested in the literature for correction of the traditional drag coefficient for solid spherical particles in order to account for the influence of the evaporation process on the drag force. The simulated case consists of a single drop of n-heptane decelerating . The Lagrangian approach is used to model droplet heating, evaporation and displacement and the Runge-Kutta method is used to integrate the differential equations throughout time. Both correlations evaluated are closely demonstrated for the analyzed Reynolds interval.

KEYWORD: Droplet evaporation . Drag coefficient . Numerical simulation.

1.0 INTRODUÇÃO

A natureza dos processos que ocorrem em combustores com injeção direta de combustível líquido como foguetes, ramjet, combustores de turbinas a gás e fornos é do tipo heterogenia, abrangendo a vaporização e combustão de uma nuvem de gotículas que interagem tanto com um ambiente gasoso como também entre si (Chiang *et al.*, 1992). A alta taxa de vaporização de gotículas presente nestas aplicações industriais, as quais apresentam números intermediários de Reynolds (Haywood *et al.*, 1989), tem sido amplamente discutido na literatura (Clift *et al.*, 1978; G.M. Faeth, 1983; CL Yeh, KK Kuo, 1996; Lefebvre, A. H., 1989; Abramzon, 1989; Aggarwal *et al.*, 1998; Griffiths *et al.*, 1995; Borman *et al.*, 1998; Sirignano *et al.*, 2010; Michaelides *et al.*, 2003), inferindo e avaliando a necessidade de uma nova correlação para o coeficiente de arrasto.

O objetivo deste estudo é, portanto, avaliar duas correlações propostas referentes ao cálculo do coeficiente de arrasto para uma gota isolada evaporando. A gotícula inicialmente evapora no ar a 800 K e pressão de 1 atm. A temperatura inicial da gota é 298 K com número inicial de Reynolds igual a 100. São comparados os resultados de Haywood et al (1989) para ambas correlações, e posteriormente analisadas para condição que desconsidera o efeito de evaporação.

2.0 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Modelo de Evaporação

A evaporação de gotículas é modelada levando-se em consideração dois processos-chave: transferência de massa e energia. Esses processos são descritos por equações diferenciais, que expressam as mudanças temporais da massa (m_d), diâmetro (D_d) e temperatura (T_d) da gota:

$$\frac{dm_d}{dt} = -\dot{m}_d, \quad (1)$$

onde m_d é a massa de gotículas e \dot{m}_d é a taxa de evaporação de gotículas que leva diretamente à redução do tamanho das gotículas:

$$\frac{dD_d}{dt} = -\frac{2\dot{m}_d}{\pi\rho_l D_d^2}, \quad (2)$$

e

$$\frac{dT_d}{dt} = \frac{Q_s}{m_d c_{pl}}, \quad (3)$$

onde c_{pl} é o calor específico do líquido e Q_s é a energia transferida para promover a variação de energia térmica de gotículas por unidade de tempo, a qual é transferida na forma de calor. No presente trabalho, \dot{m}_d e Q_s são modelados com o modelo de Abramzon e Sirignano (1989).

2.2 Modelo de Deslocamento

Para aplicações de engenharia envolvendo sprays evaporativos, a força de arrasto de gotículas e a força peso são predominantes, quando comparadas às outras forças, como Basset, massa adicionada, Magnus, Saffman e gradiente de pressão (Shirokar *et al.*, 1996). Sob essas condições e considerando a abordagem lagrangiana, a equação de deslocamento da gotícula é dada por:

$$\frac{du_d}{dt} = \frac{u_g - u_d}{\tau_d} + g \quad (4)$$

onde u_d é a velocidade da gotícula e u_g a velocidade do gás, e g a aceleração gravitacional. O tempo de resposta da gotícula, τ_d , é determinado por:

$$\tau_d = \frac{4 \rho_l D_d}{3 \rho_g C_d |u_g - u_d|} \quad (5)$$

onde ρ_l e ρ_g respectivamente se referem as densidades das fases líquida e gasosa. O coeficiente de arrasto, C_d , é dado por correlações semi-empíricas em que consideram ou não determinados efeitos. Uma correlação proposta por Renksizbulut et al (1983) que incorpora o efeito de evaporação é dada por:

$$C_d(1 + B_M)^{0,2} = \frac{24}{Re_g} [1 + 0,2Re_g^{0,63}], \quad se \quad 10 \leq Re_g \leq 300 \quad (6)$$

onde B_M é o número de transferência de massa de Spalding dado por:

$$B_M = \frac{Y_{vs} - Y_{vg}}{Y_{vs}}, \quad (7)$$

em que Y_{vs} e Y_{vg} são a fração de massa de vapor na superfície da gotícula e distante dela, respectivamente, Já o Re_g é o número de Reynolds do gás, definido como:

$$Re_g = \frac{\rho_g D_d |u_g - u_d|}{\mu_g} \quad (8)$$

onde μ_g é a viscosidade dinâmica do gás. Outra correlação é proposta por Sazhin et al. (2005), dado por:

$$C_d(1 + B_M)^{\alpha M} = \frac{24}{Re_g} [1 + 0,2Re_g^{0,63}], \quad se \quad 10 \leq Re_g \leq 300 \quad (9)$$

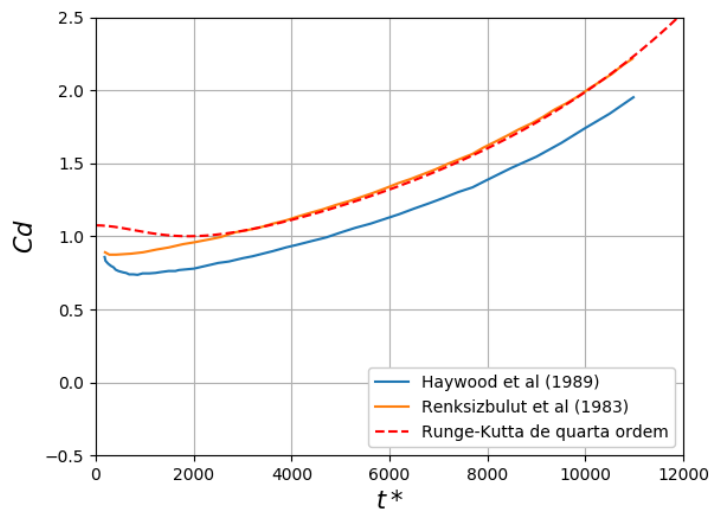
onde αM é dado por:

$$\alpha M = \begin{cases} 1, & se \quad B_M < 0.78 \\ 0.75, & se \quad B_M \geq 0.78 \end{cases} \quad (10)$$

3.0 RESULTADOS

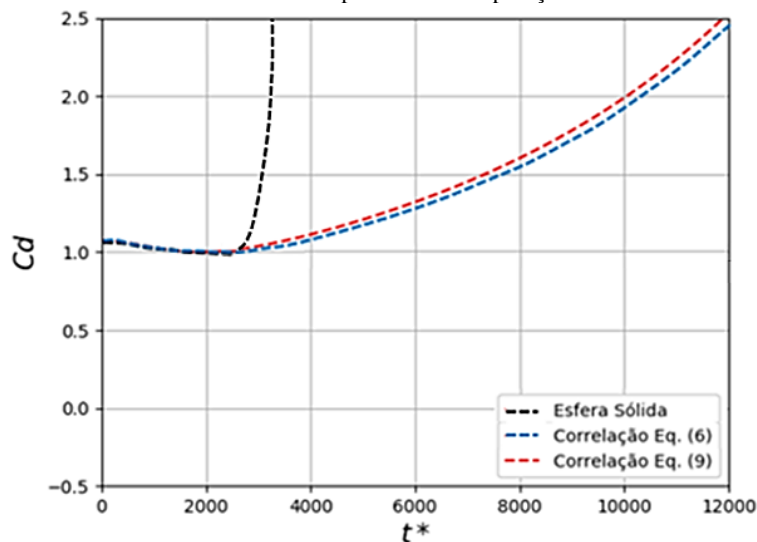
A evolução temporal do coeficiente de arrasto definida pela Equação (6), foi exposta na Fig. 1, onde foi comparada aos resultados numéricos obtidos previamente por Haywood *et al* (1989) e Renksizbulut *et al* (1983).

Figura 1 – Evolução do coeficiente de arrasto dado por Eq. (6), em comparação com outros dados da literatura.



A curva se demonstrou bem ajustada aos resultados numéricos de Renksizbulut et al (1983), entretanto o comportamento inicial se demonstrou distante, que foi interpretado devido a consideração de algum efeito inferido por Abramzon e Sirignano (1989) e negligenciado por Haywood *et al* (1989), que na faixa de Reynolds condizente à dispersão, a incorporação do efeito é significativa. Já na Fig.2 as correlações foram comparadas para esfera sólida.

Figura 2 – Evolução do coeficiente de arrasto para as diferentes correlações propostas na literatura considerando ou não a influência do processo de evaporação.



É possível notar a proximidade de ambas correlações para o intervalo de Reynolds proposto, entretanto a correlação exposta pela Eq. (9) foi a que mais se demonstrou próxima da condição de esfera sólida. O comportamento único para três condições analisadas até aproximadamente $t^* = 2000$ foi interpretada como sendo a respectiva fase latente da gotícula onde o efeito da evaporação no coeficiente de arrasto pode ser negligenciado, já que o calor envolvido se concentra na sua mudança de fase. A diminuição do coeficiente de arrasto com a incorporação do efeito é esperada devido a formação da camada de vapor.

4.0 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para correlação proposta Renksizbulut et al (1983), a validação se demonstrou semelhante a do Haywood *et al* (1989), entretanto o comportamento inicial da gota infere a necessidade de revisão do código e da literatura utilizada. A comparação das correlações avaliadas com relação a condição de esfera sólida se demonstrou condizente com que foi esperado.

5.0 REFERÊNCIAS

- ABRAMZON, B.; SIRIGNANO, W. A. Droplet vaporization model for spray combustion calculations. **International journal of heat and mass transfer**, v. 32, n. 9, p. 1605-1618, 1989.
- AGGARWAL, Suresh K. A review of spray ignition phenomena: present status and future research. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 24, n. 6, p. 565-600, 1998.
- BORMAN, G. L.; RAGLAND, K. W. Combustion Engineering McGraw-Hill. **New York**, p. 323-374, 1998.
- CHIANG, C. H.; RAJU, M. S.; SIRIGNANO, W. A. Numerical analysis of convecting, vaporizing fuel droplet with variable properties. **International journal of heat and mass transfer**, v. 35, n. 5, p. 1307-1324, 1992.
- CLIFT, R.; GRACE, J. R.; WEBER, M. E. Bubbles, drops and particles New York. 1978.
- FAETH, G. M. Evaporation and combustion of sprays. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 9, n. 1-2, p. 1-76, 1983.
- GRIFFITHS, J. F.; BARNARD, J. A. Flame and combustion, 1995.
- HAYWOOD, R. J.; NAFZIGER, R.; RENKSIZBULUT, M. A detailed examination of gas and liquid phase transient processes in convective droplet evaporation. **Journal of heat transfer**, v. 111, n. 2, p. 495-502, 1989.
- LEFEBVRE, A. H. 1989, Atomization and Sprays, Taylor and Francis, Bristol, PA.
- MICHAELIDES, Efstathios E. Hydrodynamic force and heat/mass transfer from particles, bubbles, and drops—the Freeman scholar lecture. **Journal of fluids engineering**, v. 125, n. 2, p. 209-238, 2003.
- RENKSIZBULUT, M.; YUEN, M. C. Numerical study of droplet evaporation in a high-temperature stream. **Journal of Heat transfer**, v. 105, n. 2, p. 389-397, 1983.
- SAZHIN, S. S. et al. Models for droplet transient heating: effects on droplet evaporation, ignition, and break-up. **International journal of thermal sciences**, v. 44, n. 7, p. 610-622, 2005.
- SHIROLKAR, J. S.; COIMBRA, C. F. M.; MCQUAY, M. Queiroz. Fundamental aspects of modeling turbulent particle dispersion in dilute flows. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 22, n. 4, p. 363-399, 1996.
- SIRIGNANO, William A. **Fluid dynamics and transport of droplets and sprays**. Cambridge University Press, 2010.
- YEH, Chun-Liang; KUO, K. K. Ignition and combustion of boron particles. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 22, n. 6, p. 511-541, 1996.