

Efeito da Colisão Inter-Partícula em Escoamentos Diluídos

Diego Nei Venturi*, Francisco José de Souza

*Laboratório de Mecânica dos Fluidos - MFLab, diegoventuri@gmail.com

Palavras-chave

colisão, partícula, escoamento

1. INTRODUÇÃO

A predição de escoamentos multifásicos gás-sólido por ferramentas computacionais é de grande importância para a indústria, e já acumula muitos benefícios agregados à adoção desta prática, por exemplo: predições de regiões de erosão; projeto e otimização de separadores ciclônicos gás-sólido; otimização da distribuição de catalisadores sólidos em risers de craqueamento catalítico; entre outros.

Neste tipo de simulação, um importante parâmetro a se considerar é o acoplamento entre as fases gasosa (fluida) e particulada (sólida). Diz-se um acoplamento de uma via quando apenas a influência da fase fluida sobre a fase sólida é calculada; quando leva-se em conta também a influência contrária, i.e. da fase particulada sobre o escoamento, denomina-se acoplamento de duas vias. A simulação mais completa fisicamente leva em conta todos estes efeitos mais as colisões entre as próprias partículas, à qual nomeia-se acoplamento de quatro-vias.

A razão de se utilizar acoplamentos de uma ou duas vias, em lugar do mais completo quatro vias, é economia de tempo de processamento. Existe consenso razoável na comunidade científica em relação a quando uma ou outra simplificação é aceitável de acordo com a carga mássica de sólido (vide, por exemplo, o mapa de Elgobashi). No entanto, tem-se percebido que efeitos geométricos têm feito com que o acoplamento mais completa deva ser usado mesmo em baixas cargas mássicas, por exemplo em simulações de erosão em curvas (Duarte et al., 2017). Neste trabalho apresenta-se um dos casos que aponta nesta direção.

2. METODOLOGIA

Nesta seção é descrita a modelagem usada pelo código computacional UNSCYFL3D v2.3, código utilizado para a realização deste trabalho. Mais detalhes da modelagem usada pelo código podem ser encontrados em outros trabalho do grupo, por exemplo de Souza et al. (2014). Também é apresentada a configuração da simulação realizada.

2.1. Modelagem da Fase Fluida

Para a fase fluida é utilizada uma abordagem euleriana, resolvendo-se ambas as equações de balanço para massa total e quantidade de movimento linear. Para o fechamento da turbulência utiliza-se a abordagem URANS (*Unsteady Reynolds-Averaged Navier Stokes*) com o modelo k- ϵ de duas camadas. Este modelo aplica o modelo k- ϵ padrão para o seio do escoamento, enquanto que uma relação melhorada é utilizada para regiões parietais (Chen e Patel, 1988).

O algoritmo de solução segregada SIMPLE é usado para resolver o acoplamento das equações de pressão e velocidade. Arranjo co-localizado é usado para todas as variáveis, juntamente com o esquema de interpolação convencional de Rhie-Chow. O processo de discretização pelo método dos volumes finitos (MVF) gera um sistema linear de equações para cada variável em cada volume de controle. Os métodos de gradientes bi-conjugados e multigrid algébrico são usados para solução do sistema. Esquema de interpolação upwind de segunda ordem é usado para os termos advectivos e diferenças centradas para os termos difusivos.

2.2. Modelagem da Fase Sólida

A fase sólida é resolvida utilizando-se uma abordagem lagrangiana, onde três equações vetoriais são resolvidas: trajetória, quantidade de movimento linear, e quantidade de movimento angular. Para as equações de quantidade de movimento linear são consideradas as seguintes forças: força de arrasto, força de sustentação induzida pelo gradiente de velocidade, e a força de sustentação induzida pela rotação da partícula. A velocidade do fluido utilizada para o cálculo das forças é corrigida por um modelo de dispersão turbulenta do tipo Langevin (Sommerfeld, 2001) por conta da utilização da modelagem URANS. Nas equações de quantidade de movimento angular o torque exercido pelo fluido na partícula também é considerado.

As colisões inter-partículas são avaliadas por um modelo estocástico de esfera rígida proposto por Sommerfeld (2001). Para cada parcela computacional (representação unitária de um dado número de partículas) um parceiro de colisão é gerado, e a probabilidade de colisão é calculada com base na teoria cinética dos gases. Para a geração do parceiro fictício, distribuições gaussianas de velocidade e diâmetro são amostradas a partir das parcelas reais.

Colisões partícula-parede são tratadas de acordo com as equações da mecânica clássica, mas utilizando uma correção no ângulo de saída em função da rugosidade da parede. Assume-se que o ângulo instantâneo de impacto é composto pelo ângulo da trajetória da partícula mais uma componente aleatória proveniente de uma distribuição gaussiana (Huber e Sommerfeld, 1998). Esta distribuição tem significado físico e representa o desvio padrão da distribuição de ângulos de rugosidade da parede, a qual pode ser medida experimentalmente.

2.3. Configuração Numérica e Procedimento

Um caso foi selecionado para simulação a partir dos experimentos materiais apresentados por Tsuji e Morikawa (1982). O equipamento utilizado pelos autores é um duto circular de diâmetro interno $D = 30,5$ mm e comprimento $L = 3,56$ m na posição horizontal, e foi modelado desta mesma maneira nas simulações. O fluido é ar nas condições atmosféricas e as partículas tem massa específica $\rho_p = 1000$ kg/m³ e distribuição de diâmetros com o diâmetro médio $d_p = 210$ μm. Note-se que na simulação a distribuição foi utilizada, e não apenas um diâmetro médio. A carga mássica deste caso é de 0,4 kg de partícula/kg de ar.

O duto do experimento material é de vidro para possibilitar a visualização e medição do escoamento, o que caracteriza um duto liso. Porém, uma pequena rugosidade deve ser adicionada para que as partículas não fiquem presas nas regiões parietais de baixa velocidade, o que causaria um acúmulo não físico de material nas paredes laterais e superior. Neste trabalho, um desvio padrão de 0,8° no ângulo de impacto foi utilizado para caracterizar a rugosidade da parede.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para avaliação dos resultados, perfis de velocidade de ambas as fases, e de diâmetro e concentração das partículas, foram retirados em uma linha vertical no final do duto (garante-se que o escoamento esteja desenvolvido nesta posição). Estes dados estão apresentados na Fig. 1, onde a posição do eixo vertical $y/R = -1$ indica a base do duto e a posição $y/R = 1$ indica o topo.

O perfil de velocidade da fase fluida (Fig. 1a) para os três acoplamentos apresenta boa concordância com os dados de referência. Entende-se, a partir de experiência com outras simulações, que em casos diluídos como este a presença das partículas altere pouco o perfil da fase fluida. No entanto, o perfil de velocidade das partículas (Fig. 1b) mostra influência do acoplamento de quatro vias sobre os demais. Mesmo uma pequena melhora, como esta mostrada, é relevante. Novamente, este resultado concorda com experiências prévias de outras simulações, os quais mostram que uma melhora posterior pode ser atingida utilizando-se melhores modelos de fechamento da turbulência, como o RSM por exemplo.

O perfil de concentração (Fig. 1c) clarifica o efeito da colisão inter-partículas sobre os demais casos. Nota-se que há uma redistribuição das partículas da região de alta concentração (base) para regiões de menor concentração (topo). Isto ocorre pois o modelo de colisão prevê um aumento de probabilidade proporcionalmente ao aumento da concentração, refletindo a física.

Por fim, pode-se verificar a influência do acoplamento no perfil de diâmetros (Fig. 1d). Esta comparação evidencia um comportamento não físico nos acoplamentos de uma e duas vias em que as partículas maiores (e mais pesadas) estabelecem-se na região superior do duto enquanto que as menores (e mais leves) são levadas à região inferior. Este comportamento só é corrigido com a adoção do acoplamento de quatro vias, que uniformiza o perfil. Note-se que este é o único caso, dentre vários já simulados pelo grupo, a apresentar tal comportamento. Usualmente, simulações de uma e duas vias geram resultados bons mesmo para o perfil de diâmetros.

4. CONCLUSÃO

Este estudo evidenciou um comportamento não convencional (e não físico) em que partículas maiores e mais pesadas migram para regiões superiores ao invés das menores (e mais leves). Note-se que este comportamento é facilmente corrigido utilizando-se o acoplamento mais completo entre as fases.

Ainda assim, este efeito é intrigante pois nunca foi reportado em nenhuma das simulações anteriores do grupo, e também de outros pesquisadores. Neste sentido, a única hipótese levantada até o momento é de que este comportamento não usual seja causado pelo pequeno diâmetro da tubulação. Esta suposição é feita com base em conhecimento de outras simulações já realizadas, em que a única diferença substancial é propriamente o diâmetro do duto. Este fenômeno carece de mais investigação.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o auxílio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq.

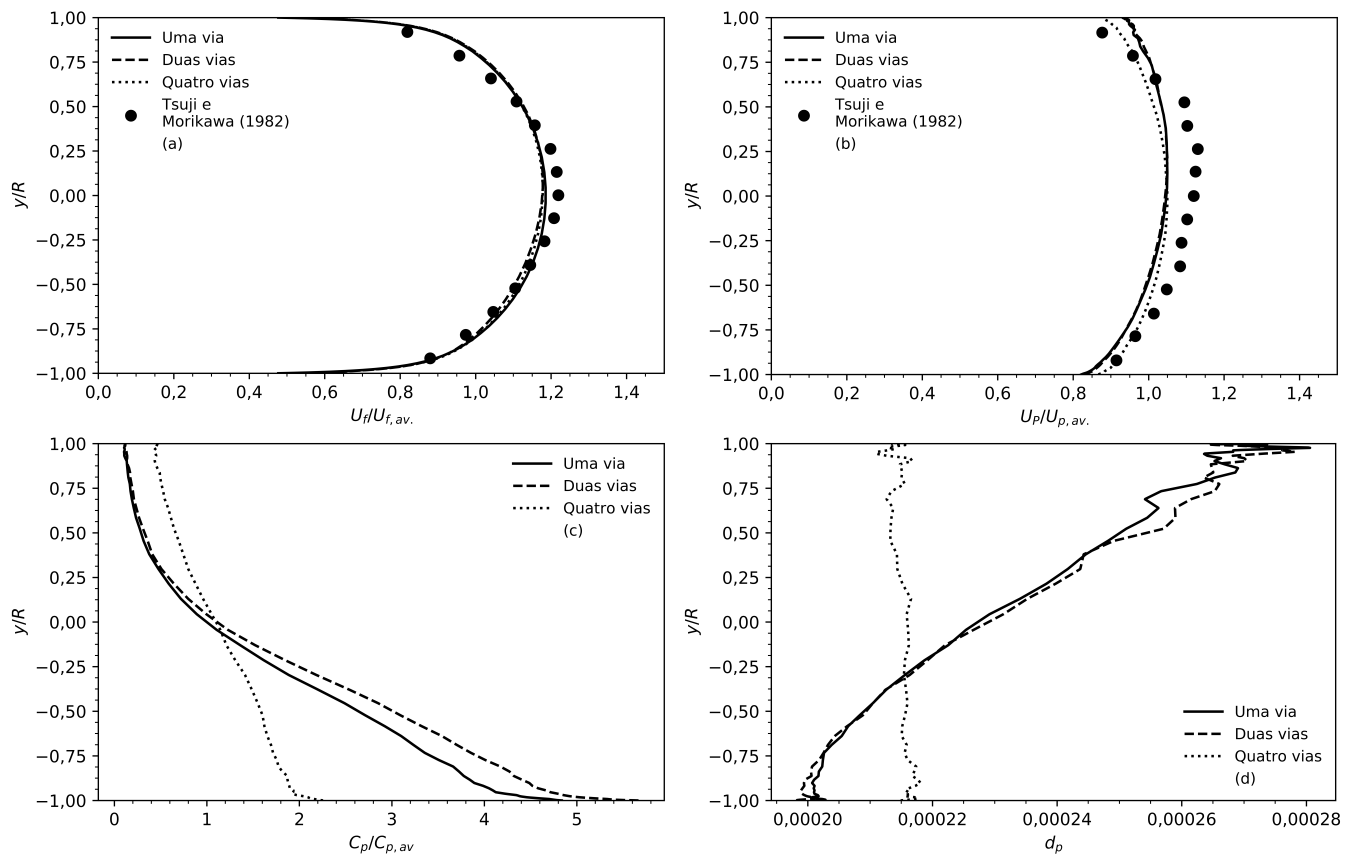


Figura 1: Perfis retirados em uma linha vertical no fim do duto: (a) velocidade do fluido; (b) velocidade das partículas; (c) concentração das partículas; (d) diâmetro médio das partículas.

6. REFERÊNCIAS

- Chen, H. C. e Patel, V. C. Near-wall turbulence models for complex flows including separation. *AIAA J.*, 26(6):641–648, 1988. doi: 10.2514/3.9948.
- de Souza, F. J., Silva, A. L., e Utzig, J. Four-way coupled simulations of the gas–particle flow in a diffuser. *Powder Technol.*, 253:496–508, 2014. doi: 10.1016/j.powtec.2013.12.021.
- Duarte, C. A. R., de Souza, F. J., Salvo, R. d. V., e dos Santos, V. F. The role of inter-particle collisions on elbow erosion. *Int. J. Multiphas. Flow*, 89:1–22, 2017. doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2016.10.001.
- Huber, N. e Sommerfeld, M. Modelling and numerical calculation of dilute-phase pneumatic conveying in pipe systems. *Powder Technol.*, 99(1):90–101, 1998. doi: 10.1016/S0032-5910(98)00065-5.
- Sommerfeld, M. Validation of a stochastic Lagrangian modelling approach for inter-particle collisions in homogeneous isotropic turbulence. *Int. J. Multiphas. Flow*, 27(10):1829–1858, 2001. doi: 10.1016/S0301-9322(01)00035-0.
- Tsuji, Y. e Morikawa, Y. LDV measurements of an air—solid two-phase flow in a horizontal pipe. *J. Fluid Mech.*, 120:385–409, 1982. doi: 10.1017/S002211208200281X.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.