

ANÁLISE NUMÉRICA DA TURBOFORESE EM UM ESCOAMENTO TURBULENTO GÁS-SÓLIDO

Jonathan Utzig, FEMEC/UFU, jonathanutzigeq@gmail.com

Francisco José de Souza, FEMEC/UFU, fjsouza@mecanica.ufu.br

Henry França Meier, DEQ/FURB, meier@furb.br

Resumo. O escoamento gás-sólido é muito comumente encontrado nas indústrias farmacêutica, química e do petróleo. A melhoria de performance das operações envolvidas normalmente requer um conhecimento detalhado de fenômenos que ocorrem nos equipamentos. Uma vez que os escoamentos multifásicos têm características peculiares, seu comportamento deve ser extensivamente avaliado. Uma dessas características é a turboforese, que ocorre em escoamentos turbulentos gás-sólido confinados. A fase dispersa concentra-se próxima às paredes e forma um escoamento segregado das partículas, onde efeitos de alto carregamento tornam-se importantes. Assim, neste trabalho a abordagem Euler-Lagrange para malhas numéricas não-estruturadas tridimensionais é utilizada para numericamente avaliar o efeito turboforético. As influências do acoplamento entre as fases (duas e quatro vias) e da rugosidade da parede são consideradas. Os resultados mostram que a deposição das partículas depende do acoplamento entre as fases e da rugosidade da parede. Observou-se a ocorrência de turboforese, que considerar o acoplamento de quatro-vias aumenta o efeito de turboforese e modifica a dinâmica da fase gasosa.

Palavras chave: Escoamento gás-sólido, Turboforese, Acoplamento de duas-vias, Acoplamento de quatro-vias

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a Fluidodinâmica Computacional (CFD) tem se tornado uma ferramenta vital para aperfeiçoar e entender operações industriais, com a predição numérica dos campos de velocidade, pressão, temperatura e espécies químicas em um domínio espacial 3-D e transiente. Apesar de limitada a baixas frações volumétricas, a abordagem Euler-Lagrange tem sido intensivamente utilizada na modelagem matemática do escoamento gás-sólido, uma vez que fornece informação detalhada sobre o comportamento das partículas no nível microscópico. Essa limitação pode ser superada pela inclusão de novos termos e através de modificações adequadas do método (Snider, 2001).

O escoamento turbulento parietal gás-sólido apresenta aspectos peculiares como a modificação da intensidade turbulenta da fase gasosa, que pode ser reduzida ou aumentada, e a deposição de partículas em regiões próximas às paredes. Não é totalmente claro porquê as intensidades turbulentas são modificadas pelas partículas em altos números de Reynolds; assume-se que a energia cinética turbulenta é influenciada pela dissipação da força de arrasto das partículas ou pela produção adicional causada pelas esteiras de vórtice das partículas. Por sua vez, o efeito de deposição ocorre como resultado da força turboforética, que impulsiona partículas em direção às paredes (Vreman, 2007). Nesse fenômeno, as partículas deixam as regiões de alta intensidade turbulenta para regiões com menor intensidade, onde podem alcançar concentrações extremamente altas. Este efeito é indesejável quando ocorre em muitos sistemas termo-químicos, por exemplo, uma vez que pode criar zonas quentes ou pontos de aglomeração, que podem ser perigosos e diminuir a eficiência do processo.

Neste trabalho, o método Euler-Lagrange foi empregado para investigar a turboforese em um escoamento gás-sólido ascendente. Efeitos de colisão das partículas com as paredes, acoplamento com a fase contínua (uma, duas e quatro-vias) e colisões entre partículas são considerados a fim de tornar a análise mais realística possível. Os resultados são apresentados e discutidos, evidenciando-se a capacidade de predição da turboforese em escoamentos gás-sólido.

2. MODELAGEM MATEMÁTICA

2.1. Modelo da fase gasosa

O código computacional “in-house” UNSCYFL3D, resolve as Equações de Navier-Stokes Médias de Reynolds e modelos de turbulência. Esta ferramenta numérica é baseada no Método dos Volumes Finitos para malhas não-estruturadas tridimensionais.

Em todas as simulações, o fluido foi resolvido em estado estacionário. Esquemas de alta ordem para as discretizações espaciais foram empregados, bem como o modelo de turbulência k- ϵ padrão de duas camadas, adequado para escoamentos confinados.

2.2. Modelo da fase particulada

A fase discreta é tratada no contexto lagrangeano. As equações de trajetória, de quantidade de movimento linear e quantidade de movimento angular são resolvidas para cada partícula computacional. O coeficiente da força de arrasto é

avaliado pelas correlações de Schiller e Naumann; a força de Saffman, a força de sustentação induzida por rotação e o campo gravitacional também foram considerados. As influências da rugosidade das paredes e de colisões entre partículas são incluídas no modelo. Nesse sentido, o acoplamento de quatro-vias é tomado em conta.

A solução entre as fases é feita através de sucessivas iterações de acoplamento; 50 iterações são suficientes para a convergência estatística das variáveis. Inseriu-se 50000 partículas computacionais no domínio a cada iteração de acoplamento.

Vale ressaltar que os modelos utilizados no UNSCYFL3D foram validados previamente (Souza et al., 2012).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A fim de investigar o fenômeno da turboforese em escoamentos gás-sólido, simulações Euler-Lagrange de um escoamento gás-sólido ascendente em um duto reto foram realizadas. O diâmetro do duto é $d = 0.0506m$ e o comprimento $l = 150d$, para garantir que o perfil totalmente desenvolvido seja alcançado. O domínio foi discretizado em aproximadamente 238 mil volumes de controle; o nó mais próximo à parede foi localizado em $y^+ = 1$, enquanto que o espaçamento na direção axial foi $\Delta z^+ = 300$. A fase gasosa tem $\rho = 1,3kg/m^3$ e $\mu = 1,98E - 5Pa.s$; as partículas, $\rho_p = 2500kg/m^3$ e $d_p = 20E - 6m$.

Para este caso, o número de Reynolds baseado na velocidade de entrada u_{in} é $Re_{in} = \rho d u_{in} / \mu = 9975$. Na condição de contorno de entrada, um perfil de velocidade uniforme é imposto com intensidade turbulenta $i_{in} = 0,02$ e escala de comprimento turbulenta $l_{\mu, in} = 0.015m$; as partículas são monodispersas. Nas paredes, a condição de não-deslizamento é assumida para o gás, enquanto que as partículas têm condição de deslizamento livre. A gravidade foi considerada no sentido oposto ao escoamento como $g = 9,8m/s^2$ e o carregamento mássico $\eta = 0,6$ define a condição de escoamento diluído. Para avaliar o impacto de modelos e parâmetros na turboforese, neste estudo variamos o acoplamento entre as fases (uma, duas e quarto-vias) e a rugosidade da parede ($\gamma = 1^\circ$ e $\gamma = 5^\circ$).

3.1. Visualização instantânea

A distribuição instantânea de partículas como análise visual nos permite entender mais facilmente o fenômeno da turboforese. Nas simulações, as partículas são uniformemente distribuídas na área de entrada em cada iteração de acoplamento, assim seu escoamento requer uma distância inicial para desenvolver-se. Além disso, a concentração próxima à parede é mais balanceada com outras regiões. A Figura 2 apresenta imagens instantâneas da posição das partículas na seção de desenvolvimento e de escoamento desenvolvido. Na primeira, muitas partículas concentram-se no seio da fase. Na segunda, as partículas são vistas concentradas na região próxima à parede. Picano et al. (2009) encontraram uma distribuição mais irregular, com estrias de partículas; os autores utilizaram da Simulação das Grandes Escalas, que pode capturar tanto maiores quanto menores estruturas turbulentas e assim levar a uma distribuição menos uniforme.

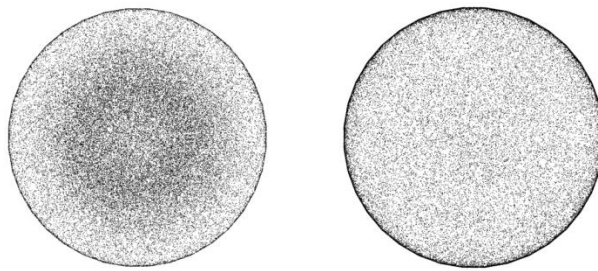


Figura 1. Posições instantâneas de partículas em seções transversais do domínio. À esquerda: distância da entrada 10d; à direita: distância da entrada 100d.

O comportamento das partículas pode ser examinado através do número de Stokes St , que é razão entre o tempo de resposta da partícula $\tau_p = \rho_p d_p^2 / 18\mu$ e a escala de tempo característico do fluido $\tau_e = d / u_{in}$, baseada na velocidade de entrada e no diâmetro do duto como escala especial. Este é o principal parâmetro que define a dinâmica de partículas para um dado escoamento e é definido como $St = \tau_p / \tau_e$. Para a população de partículas utilizada neste trabalho, obtém-se $\tau_p = 0,0028s$ e $St = 0,165$, indicando que as partículas não são pequenas o suficiente para seguir as menores escalas da turbulência, nem grandes o suficiente para ter comportamento balístico, cruzando as estruturas turbulentas. Uma pesquisa na literatura especializada revela que, por volta de $St = 1$, a turboforese é ampliada.

3.2. Dinâmica do escoamento gás-sólido

Os resultados do estudo do escoamento turbulento gás-sólido em duto vertical mostram claramente a influência das

partículas sobre a dinâmica e turbulência da fase contínua. Apesar do carregamento mássico relativamente baixo, o acoplamento de quatro-vias modifica o comportamento das partículas e da fase gasosa. Adiante, todos os perfis apresentados são tomados na região desenvolvida do escoamento, em $l = 140d$.

Na Figura 2, a velocidade axial e a energia cinética turbulenta da fase gasosa são apresentadas. O efeito dos modelos de acoplamento é considerado para o caso de baixa rugosidade da parede, $\gamma = 1^\circ$. Obviamente, para o acoplamento de uma-via, a dinâmica da fase gasosa não é afetada pelas partículas e representa também o escoamento monofásico. Espera-se que os perfis de velocidade dos casos gás-sólido sejam atenuados frente ao monofásico, entretanto, este comportamento não é visto na Figura 2 a) significando que a fase gasosa é acelerada pelas partículas no centro do duto, mesmo em um escoamento ascendente. Nota-se que as velocidades dos casos duas- e quatro-vias são menores na região periférica. Em virtude da conservação da massa, a velocidade axial no centro é ampliada. Similarmente, a energia cinética média da fase contínua é modificada, como apresenta a Figura 2 b). Nesta figura, os picos de energia cinética próximos à parede são a principal razão para a turboforese: quando as partículas são impulsionadas do centro para a parede pela alta intensidade turbulenta, elas não têm energia suficiente para cruzar de volta esta região de alto cisalhamento e permanecem aderidas àquela região.

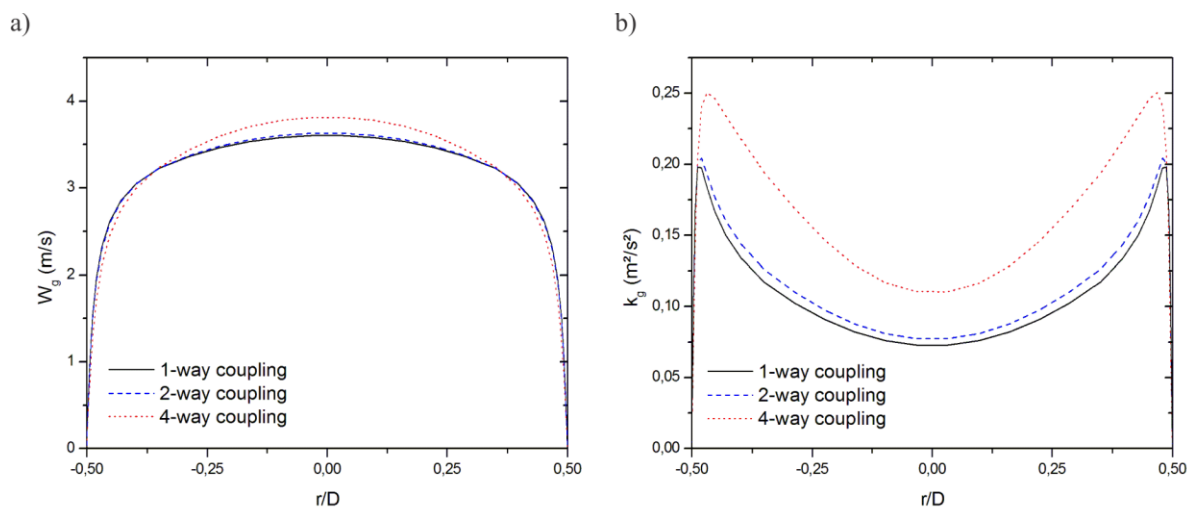


Figura 2. a) Perfis radiais de velocidade axial e b) energia cinética turbulenta da fase gasosa para acoplamentos de uma-, duas- e quatro-vias. $d_p = 20E - 6m$, $\eta = 0,6$, $\gamma = 1^\circ$.

A Figura 3, por sua vez, apresenta a velocidade axial relativa entre as fases e a diferença entre a velocidade axial média da fase gasosa para acoplamentos de duas-/quatro-vias e uma-via. Na subcamada viscosa a velocidade axial média das partículas é maior que do gás – Figura 3 a) – porque elas vêm com alta quantidade de movimento do centro do duto, devido à sua inércia. A diferença torna-se positiva na região central indicando que a velocidade média das partículas é menor que a do gás devido à força gravitacional. A Figura 3 b) mostra que o perfil de velocidade com acoplamento de quatro-vias é maior até 10% comparado ao de uma-via, enquanto que o de duas-vias é menos afetado. A inversão que ocorre entre a região próxima à parede e o centro reflete o comportamento visto da Figura 2 a). Essencialmente, as partículas nesta região sofrem maior arrasto devido à maior velocidade superficial, o que implica em maior quantidade de movimento extraída da fase gasosa.

A concentração de partículas, normalizada pela concentração sobre todo domínio, *versus* a distância a partir da parede $\delta = 0$ até o centro do duto $\delta = 1$ é apresentada na Figura 4. Devido ao fenômeno da turboforese, a concentração é maior próxima à parede. Os efeitos de acoplamento entre as fases e rugosidade da parede são considerados. A Figura 5 a) apresenta a concentração normalizada de partículas para os casos de acoplamento de uma-, duas- e quatro-vias. Uma vez que o carregamento mássico é o mesmo para todos os casos, a interação entre as fases amplia a concentração de partículas na região próxima à parede. O maior acúmulo de partículas no caso de acoplamento de quatro-vias é outra explicação para o perfil de velocidade axial média da fase gasosa modificado mostrado na Figura 2 a): mais partículas causa maior arrasto sobre a fase gasosa, que então percebe o arrasto e desacelera.

O modelo de rugosidade da parede atua apenas sobre as partículas. A influência de paredes rugosas ou lisas é apresentada na Figura 4 b). A maior rugosidade ($\gamma = 5^\circ$) reduz o efeito turboforético. Quando colidem com a parede, as partículas podem retornar com um ângulo mais agudo que o de impacto, sendo mais facilmente reinseridas no escoamento interno.

4. CONCLUSÕES

O escoamento turbulento gás-sólido ascendente em um duto reto foi numericamente analisado. Efeitos de colisão das partículas com as paredes, acoplamento entre as fases e colisões entre partículas foram considerados. Observamos

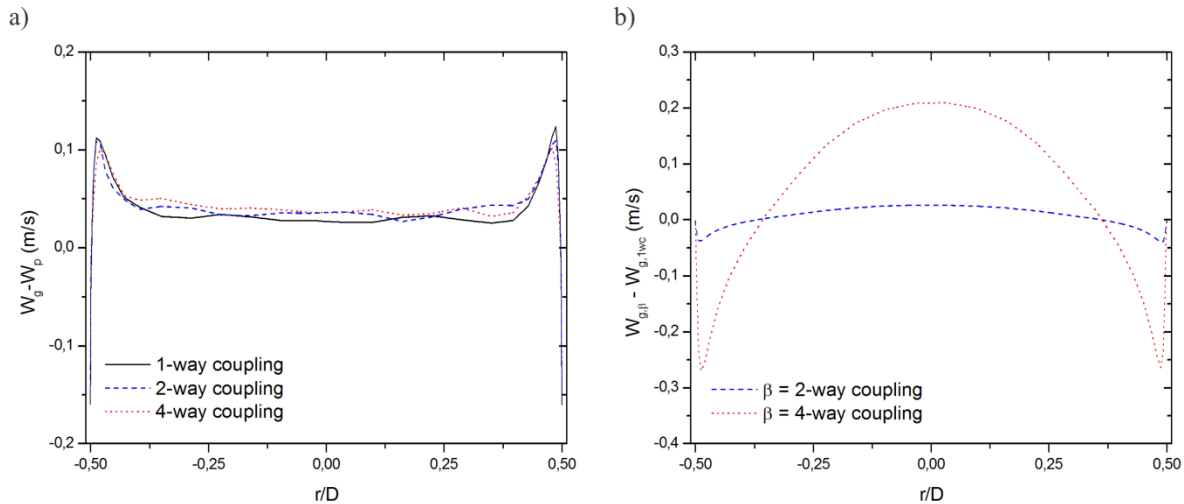


Figura 3. a) Velocidade axial relativa entre a fase particulada e gasosa para acoplamentos de uma-, duas- e quatro-vias. b) Diferença entre a velocidade axial da fase gasosa para acoplamentos de duas-/quatro- e uma-via. $d_p = 20E - 6m$, $\eta = 0,6$, $\gamma = 1^\circ$.

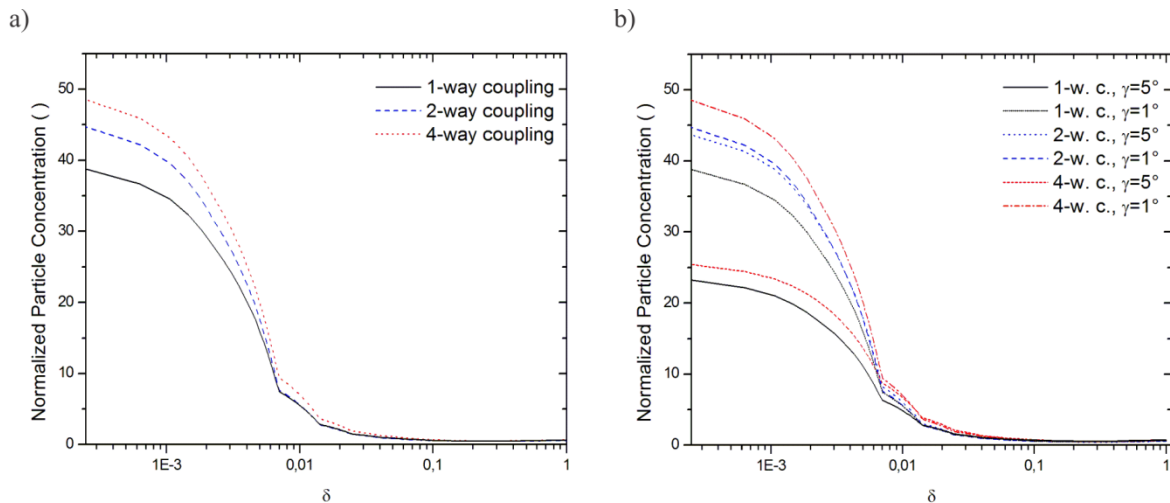


Figura 4. Concentração normalizada de partículas para a) uma-, duas- e quatro-vias de acoplamento e b) também para parede rugosa ($\gamma = 5^\circ$) e parede lisa ($\gamma = 1^\circ$). $d_p = 20E - 6m$, $\eta = 0,6$.

que a deposição de partículas depende do acoplamento entre as fases e da rugosidade da parede. Os efeitos de acoplamento ampliam a turboforese, contrariamente à condição de parede rugosa. A maior concentração causada pelas colisões entre partículas aumenta o arrasto e reduz a velocidade da fase gasosa na região próxima à parede; para manter a conservação da massa, a velocidade no centro é amplificada, ou seja, as partículas aceleram o gás. Este comportamento é peculiar em escoamentos ascendentes, uma vez que é comum partículas desacelerarem a fase carregadora devido à força gravitacional.

REFERÊNCIAS

- Picano, F., Sardina, G., & Casciola, C. M., 2009. Spatial development of particle-laden turbulent pipe flow. *Physics of Fluids*, vol. 21, pp. 093305.
- Snider, D. M., 2001. An incompressible three-dimensional multiphase particle-in-cell model for dense particle flow. *Journal of Computational Physics*, vol. 170, pp. 523–549.
- Souza, F. J., Salvo, R. V., & Martins, D. M. M., 2012. Large Eddy Simulation of the gas-particle flow in cyclone separators. *Separation and Purification Technology*, vol. 94, pp. 61–70.
- Vreman, A. W., 2007. Turbulence characteristics of particle-laden pipe flow. *J. Fluid Mech.*, vol. 584, pp. 235–279.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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