ESTUDO EXPERIMENTAL E DE SIMULAÇÃO CFD-DEM DO ESCOAMENTO DE GRÃOS DE FERTILIZANTES EM UM DISCO GIRATÓRIO

D.D.L. COSTA¹, D.L. SOUZA¹, K.G. SANTOS¹, J.L. VIEIRA NETO^{1*}

¹ Universidade Federal Do Triângulo Mineiro, Departamento de Engenharia Química
E-mail para contato: jose.neto@uftm.edu.br

RESUMO – Na indústria de fertilizantes a granulação é uma operação essencial. O produto granulado tem várias propriedades aprimoradas e atende a requisitos de tamanho e forma. Este trabalho teve como objetivo analisar o comportamento de grãos de fertilizantes escoando em um disco rotativo. Assim, simulações foram realizadas através das técnicas de Dinâmica de Fluidos Computacionais (CFD) e Elementos Discretos (DEM), para avaliar parâmetros: coeficiente de restituição (η), coeficiente de fricção (μ) e coeficiente de elasticidade (k) do modelo linear *spring-dashpot*. Também foram avaliadas as variáveis, velocidade de rotação do eixo e grau de preenchimento, sobre os regimes experimentais de escoamento: rolamento, cascata e centrifugação. Além disso, verificou-se qual o ângulo de repouso dinâmico.

1. INTRODUÇÃO

Na produção de fertilizantes a granulação é uma etapa essencial para formar grânulos de boa qualidade. Este trabalho visa estudar a fluidodinâmica de grãos de fertilizantes em um granulador tipo disco rotativo avaliando algumas variáveis, tais como, rotação do eixo e grau de preenchimento, e observando a existência dos regimes: rolamento, cascata e centrifugação.

As técnicas de modelagem dependem da escolha de uma abordagem contínua Euleriana ou discreta Lagrangiana para as fases líquida e sólida. A primeira abordagem computacional Lagrange para partículas, denominada Modelo de Elementos Discretos (DEM), foi feita por Cundall e Strack (1979). A ideia básica do DEM é que a trajetória de cada partícula dentro do sistema é calculada, considerando todas as forças que atuam sobre ela e integrando a segunda lei de movimento de Newton e as equações cinemáticas para posição e orientação. Fluxos granulares foram reproduzidos com sucesso por simulações DEM de processos, incluindo leito de jorro (Bortolotti *et al.* 2013); leito empacotado (Garg *et al.* 2012) e discos rotativos (Silvério *et al.* 2014), dentre outros.

Di Renzo e Di Maio (2004) testaram a precisão de três diferentes modelos de força de contato, comparando os resultados, microscopicamente, com soluções analíticas quase exatas e, macroscopicamente, com resultados experimentais. Os resultados mostraram que o modelo *spring-dashpot* apresentou bons resultados para previsão de forças de contato. O termo "*spring*" refere-se à contribuição da resposta às forças elásticas enquanto o termo "*dashpot*" se refere à dissipação devido à deformação plástica. Assim, apenas colisões friccionais e elásticas são consideradas, avaliadas pelos seguintes parâmetros: coeficientes elásticos normais (K_n) e tangenciais (K_t), o coeficiente de fricção (μ_f) e o coeficiente de restituição (η).

2. MÉTODO

2.1. Metodologia Experimental

A Figura 1 mostra o aparato utilizado no estudo de fluidodinâmica. O dispositivo foi instalado no Laboratório da UFTM.

Figura 1 - Disco rotativo usado nos testes experimentais: (a) Vista frontal; (b) Vista lateral.

O disco rotativo tem 0,6 m de diâmetro e 0,06 m de altura, com um eixo rotativo acionado por um motor com 775 W, 90 V e rotação máxima de 4300 rpm. Uma conexão entre o motor e o disco foi feita por acoplamento a um redutor de velocidade, que controla a rotação e permite trabalhar dentro da faixa desejada para processos de granulação. As partículas neste estudo foram fertilizantes *HERINGER*, sob a forma de superfosfato único granular (GSS), com 2,99 mm de diâmetro médio Sauter e densidade de 1863 kg.m^{-3} . Os testes fluidodinâmicos foram conduzidos com o disco inclinado a 45 graus.

2.2. Metodologia de Simulação

A malha computacional tridimensional com 41.398 células foi obtida a partir do software Gambit® e foi construída para garantir que o tamanho das células fosse pelo menos três vezes maior do que o diâmetro da esfera de tamanho de partícula igual (d_p).

Neste trabalho, foi utilizada a equação governante do modelo Euleriano para simulação CFD da fase gasosa usando o pacote *Fluent*®. Uma vez resolvidas as equações de transporte para a fase contínua (fase gasosa), foi simulada a fase discreta (fase particulada) de acordo com uma abordagem Lagrangiana usando o Método de Elementos Discretos (DEM). *ANSYS Fluent*® permite usar o DEM como parte do modelo de fase discreta (DPM). O acoplamento entre as fases e seu impacto em ambos os caminhos da fase discreta e o fluxo de fase contínua está incluído nos cálculos. Por CFD-DEM calcula-se o campo de velocidade para a fase fluida e usa esses dados para calcular a fase particulada. Neste caso, utilizou-se o ar estagnado proposto, de modo que a interação do fluido de gás foi de pouca relevância, ou seja, foi usado DEM com uma ferramenta CFD. As equações dos modelos adotados neste trabalho foram descritas em estudos anteriores [6].

As seguintes condições foram utilizadas nas simulações: passo de tempo para a fase contínua 0.001; passo de tempo para a fase discreta 0,0001 e número de partículas injetadas 30.670 (para representar a massa de partículas de 803,5 g). As paredes foram consideradas uma condição limite de anti-deslizamento (*no slip*) e a rotação para cada regime foi definida por uma velocidade de rotação (rpm) na parede. Os resíduos foram de 10^{-3} e o tempo simulado variou entre 12 a 40 segundos para cada condição. O acoplamento entre velocidade e pressão definida pelo algoritmo SIMPLE. Para a discretização espacial foi empregada o modelo QUICK e a discretização temporal pelo modelo implícito FIRST ORDER.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As Figuras 2 e 3 apresentam os regimes experimentais observados para dois graus de enchimento diferentes do disco rotativo com massa de fertilizantes: 803,5 g (Fig. 2) e 1.607 g (Fig. 3), respectivamente. Comparando as Figuras 2 e 3, verificou-se que para um grau de enchimento mais elevado (1607 g de fertilizantes), as partículas iniciaram os regimes de rolamento e cascata com velocidades de rotação ligeiramente menores, a 11 e 27 rpm, do que observado para o menor grau de enchimento (803,5 g de fertilizantes) a 13 e 34 rpm. Enquanto que para o regime de centrifugação não houve diferença, obtido com 51 rpm.

Figura 2 - Regimes no disco rotativo para o primeiro grau de enchimento, 803,5 g de fertilizantes: (a) rolamento a 13 rpm; (b) cascata a 34 rpm; (c) centrifugação a 51 rpm.

Figura 3 - Regimes no disco rotativo para o segundo grau de enchimento, 1.607g de fertilizantes: (a) rolamento a 11 rpm; (b) cascata a 27 rpm; (c) centrifugação a 51 rpm.

Observou-se que os parâmetros mostrados na Fig. (4a) não levaram à centrifugação e as partículas ficaram posicionadas na parte inferior do disco. Na disposição da Fig. (4c) quase se obteve a condição de centrifugação, que ficou mais evidenciada na Fig. (4b) com os parâmetros: $k = 400$, $\eta = 0,5$, $\mu_f = 0,5$.

Além disso, uma boa concordância foi encontrada na Figura 5 para o ângulo dinâmico experimental de repouso (50°) e o resultado simulado (55°) para melhor disposição dos parâmetros do modelo spring-dashpot ($k = 400$, $\eta = 0,5$, $\mu_f = 0,5$) com desvio de quase 10%. Estes resultados foram obtidos na faixa de rolamento com 13 rpm e menor massa de partículas (803,5 g).

Figura 4 - Condição centrifugação (51 rpm, 803,5 g), parâmetros do modelo *spring-dashpot*:
(a) $k = 400$, $\eta = 0,8$, $\mu_f = 0,2$; (b) $k = 400$, $\eta = 0,5$, $\mu_f = 0,5$; (c) $k = 400$, $\eta = 0,8$, $\mu_f = 0,9$.

Figura 5 - Ângulo de repouso dinâmico para condição de rolamento (13 rpm) com 803,5 g:
(a) Valor experimental ($\phi = 50^\circ$), (b) Valor simulado ($\phi = 55^\circ$) com $k = 400$, $\eta = 0.5$, $\mu_f = 0.5$.

4. CONCLUSÃO

A abordagem CFD-DEM apresentou resultados satisfatórios para descrever o escoamento de grãos de fertilizantes em disco rotativo, desde que, os parâmetros do modelo sejam calibrados para que possam prever os regimes típicos deste equipamento. Também foi possível encontrar o ângulo de repouso dinâmico característico do regime de rolamento com boa concordância entre os resultados simulados e experimentais.

5. REFERÊNCIAS

- BORTOLOTTI, C.T.; SANTOS, K.G.; FRANCISQUETTI, M.C.C.; DUARTE, C.R.; BARROZO, M.A.S. Hydrodynamic Study of a Mixture of West Indian Cherry Residue and Soybean Grains in a Spouted Bed. *Can. J. Chem. Eng.*, v. 91, p. 871-1880, 2013.
- CUNDALL, P.A.; STRACK, O.D.L. A discret numerical model for granular assemblies. *Geotech.*, v. 29, p. 47-65, 1979.
- DI RENZO, A.; DI MAIO, F.P. Comparison of contact-force models for the simulation of collisions in DEM-based granular flow codes. *Chem. Eng. Sci.*, v. 59, p. 525-541, 2004.
- LI, T.; GARG, R.; GALVIN, J.; PANNALA, S. Open-source MFIx-DEM software for gas-solids flows: Part II – Validation studies, *Powder Technol.*, v. 220, p. 138-150, 2012.
- SILVERIO, B.C.; SANTOS, K.G.; DUARTE, C.R.; BARROZO, M.A.S. Effect of the friction, elastic and restitution coefficients on the fluid dynamics behavior of a rotary dryer operating with fertilizer. *Ind. & Eng. Chem. Res.*, v.53 p.8920-8926, 2014.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem suporte do CNPq (460513/2014-1) e da Fapemig (APQ-01139-14).