AVALIAÇÃO DO TEMPO DE DESCARGA DE FERTILIZANTES EM SILOS: ESTUDO EXPERIMENTAL E DE SIMULAÇÃO EMPREGANDO ELEMENTOS DISCRETOS

Y. A. MELO¹, B. C. SILVÉRIO², K. G. SANTOS¹ e J. L. VIEIRA NETO¹

¹ Universidade Federal Do Triângulo Mineiro, Departamento de Engenharia Química

² Universidade Federal Do Triângulo Mineiro, Departamento de Engenharia de Alimentos

E-mail para contato: jose.neto@uftm.edu.br

RESUMO – Silos são estruturas usadas no armazenamento de fertilizantes. Para prever a dinâmica das partículas no interior dos mesmos podem ser empregados modelos computacionais. No estudo de escoamentos de sólidos o Método de Elementos Discretos, empregando abordagem Lagrangeana, exerce um papel importante, já que, considera a interação individual entre as partículas. No presente trabalho, realizou-se um estudo numérico para calibração de parâmetros de um destes modelos, o de *Hertz-Mindlin*, onde os tempos simulados foram comparados com o tempo de descarga experimental em várias condições de um planejamento composto central. Assim, considerando as simulações realizadas e as análises estatísticas, identificaram-se quais parâmetros influenciam no tempo de descarga definindo-se a melhor calibração.

1. INTRODUÇÃO

Os silos são empregados no armazenamento de fertilizantes a granel, pois, oferecem preservação da qualidade dos mesmos e segurança no processo. Assim, conhecer a dinâmica das partículas nesses equipamentos pode aperfeiçoar operações de transporte, descarga e armazenagem, bem como, evitar acidentes devido ao projeto inadequado. Os principais problemas que afetam a descarga de silos encontram-se relacionados à geometria, às propriedades do produto, ao modo o qual o produto é depositado no silo e ao tipo de fluxo durante a descarga. A agilidade na obtenção de resultados, a facilidade de acesso a programas prontos, e a variedade de propriedades que podem caracterizar o objeto de estudo, são pontos vantajosos do emprego de simulações computacionais para solução de problemas complexos.

1.1. Objetivos

Este trabalho tem como objetivo obter a melhor condição de calibração dos parâmetros do modelo de *Hertz-Mindlin* adotado nas simulações desenvolvidas no *software* EDEM *Academic*, bem como, a validação destes resultados numéricos confrontando com o tempo experimental de descarga de partículas de fertilizantes em um silo cônico-cilíndrico.

2. MÉTODOS

O Método de Elementos Discretos (DEM) desempenha importante papel no estudo do escoamento de sólidos. Empregando a abordagem Lagrangeana, esse método baseia-se na interação individual entre as partículas. Um estudo numérico para a calibração dos parâmetros do modelo *Hertz-Mindlin* foi então realizado no presente trabalho. As simulações foram executadas no *software* EDEM *Academic* com um passo no tempo equivalente a 20% do passo de tempo de Rayleigh e um tamanho de célula igual a 3Rmin.

Na descarga do fertilizante foram previamente simulados 1,10016s (com saída do silo fechada) para empacotar os grãos. A partir da simulação de silo empacotado, os parâmetros do modelo de *Hertz-Mindlin* foram então alternados e as simulações de descarga (com saída inferior aberta) foram feitas para obter a melhor calibração.

Através de 27 simulações geradas, segundo um planejamento composto central (PCC), os tempos simulados foram comparados com o tempo de descarga experimental de fertilizantes em um silo. Os seguintes parâmetros foram avaliados: módulo de cisalhamento (G), coeficiente de restituição (η), coeficiente de atrito estático (μ_s) e coeficiente de atrito de rolamento (μ_{rol}), conforme a Tabela 1 apresentada a seguir.

Tabela 1 – Níveis das variáveis reais e codificadas empregadas no PCC

Variáveis	Variáveis codificadas	Níveis				
		-1,547	-1	0	+1	+1,547
G (Pa)	X_1	1,36E+06	3,00E+06	6,00E+06	9,00E+06	1,06E+07
η	X_2	0,036	0,2	0,5	0,8	0,964
μ_s	X_3	0,0407	0,15	0,35	0,55	0,659
μ_{rol}	X_4	0,0407	0,15	0,35	0,55	0,659

2.1. Parâmetros do Modelo

Coeficiente de restituição: Considerando que a resistência oferecida pelo ar pode ser desprezada, Aryaei *et al.* (2010), mostraram que o coeficiente de restituição (η) pode ser dado pela Equação 1, sendo h_0 e h_1 a altura inicial e de rebote respectivamente.

$$\eta = \sqrt{\frac{h_1}{h_0}} \quad (1)$$

Coeficiente de atrito estático e cinético: Junior (2015) relaciona o coeficiente de atrito estático (μ_s) à força mínima necessária para iniciar o movimento, enquanto que o coeficiente de atrito cinético encontra-se relacionado à força mínima para manter o deslizamento.

Coeficiente de atrito de rolamento: Coeficiente de atrito de rolamento (μ_{rol}) é definido como a resistência causada ao movimento de rolamento de uma partícula esférica, onde a Lei de Coulomb pode ser utilizada.

Módulo de cisalhamento: O módulo de cisalhamento, indicado por G , é um parâmetro elástico definido para o esforço de cisalhamento como indicado na Equação 2, na qual τ é a tensão cisalhante e γ indica a deformação elástica de cisalhamento do corpo de prova.

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad (2)$$

2.2. Materiais

Um fertilizante de liberação lenta, conhecido como Osmocote 14-14-14 (importado dos EUA), geralmente usado por floricultores no cultivo de orquídeas foi empregado no presente trabalho. Ele foi escolhido por possuir algumas boas características para comparar a descarga experimental com as simuladas, tais como, partículas esféricas, não quebradiças, e não apresentar tendência de formar aglutinados. O fertilizante foi caracterizado e obteve-se um diâmetro médio (d_p) de 0,313cm, densidade (ρ_p) de 1612 kg/m³, e a porosidade (ε) de 27%.

O silo foi disposto sobre uma balança digital e carregado com 0,305 kg de fertilizantes até que a parte cônica e somente essa, estivesse preenchida. A descarga das partículas foi filmada, de forma a possibilitar o acompanhamento da massa que deixava o silo em cada instante de tempo, bem como, o tempo total necessário para a descarga de todo o material particulado. Essa etapa deu-se em triplicata.

A Figura 1 mostra o fertilizante Osmocote 14-14-14 e o silo empregados neste estudo.

Figura 1 – Materiais: a) Fertilizante Osmocote, b) Silo utilizado para descarga experimental.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Equação 3 representa o tempo de descarga em diferentes condições de parâmetros do modelo de contato. Nota-se uma maior influência do atrito estático (X_3), seguida do atrito de rolamento (X_4). Há ainda efeitos quadráticos do atrito de rolamento e interações entre estes parâmetros. As superfícies de resposta na Figura 2 evidenciam esse resultado.

$$t = 3,5263 + 1,1227X_3 + 0,2178X_4 - 0,1739X_4^2 - 0,0600X_2X_3 + 0,2062X_3X_4 \quad (3)$$

Figura 2 – Superfície de resposta para descarga do fertilizante em função dos coeficientes: (a) atrito de rolamento (X_4) e atrito estático (X_3), (b) atrito estático (X_3) e restituição (X_2)

A partir dos resultados das simulações pode-se observar na Figura 3 que os tempos de descarga mais próximos do valor experimental ($t_{exp} = 4,10s$) foram obtidos nas simulações do PCC 3, 15, 11 e 7 (Figura 3c), em que o coeficiente de atrito estático está no nível +1 (com $\mu_s = 0,55$) e o coeficiente de atrito de rolamento está no nível -1 (com $\mu_{rol} = 0,15$), apresentando erros relativos entre 0,73 e 4,39% quando comparados ao valor experimental.

Figura 3 – Comparação dos perfis de descarga de fertilizantes experimental e simulado.

4. CONCLUSÕES

Foi possível identificar, pelas simulações e análises estatísticas, os parâmetros para a melhor calibração da descarga do fertilizante Osmocote 14-14-14 em silo, com valores de módulo de cisalhamento (G) de 3.10^6 Pa, coeficiente de restituição (η) de 0,2, coeficiente de atrito estático (μ_s) de 0,55 e coeficiente de atrito de rolamento (μ_{rol}) de 0,15. Os coeficientes de atrito estático e de rolamento são os fatores que mais influenciam no tempo de descarga

5. REFERÊNCIAS

- ARYAEI, A.; HASHEMNIA, K.; JAFARPUR, K. Experimental and numerical study of ball size effect on restitution coefficient in low velocity impacts. *International Journal of Impact Engineering*, v. 37, n. 10, p. 1037-1044, 2010.
- JUNIOR, M. M. *Influência da topografia na força de atrito em papeis para embalagem*. Tese (Doutorado em Engenharia Química), UFSC, Florianópolis, 2015.

6. AGRADECIMENTOS

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