

Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics

Validação do Método dos Elementos Discretos para o escoamento de grãos de soja

Rodolfo França de lima¹Oleg Khatchatourian²Manuel Osório Binelo³Vanessa Faoro⁴Rodrigo Luiz Antoniazzi⁵Eliezer José Balbinot⁶

Departamento de Ciências Exatas e Engenharia, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, UNIJUÍ, Ijuí, RS

Resumo. A modelagem matemática do fluxo de grãos é um problema difícil de ser modelado, dada a natureza discreta do meio. Algumas pesquisas recentes estão sendo direcionadas para a análise do escoamento de materiais granulares em silos e secadores de grãos. Pesquisadores tem se dedicado a estudar a modelagem do fluxo de grãos, através de simulações numéricas, entre algumas técnicas de simulação está o Método dos Elementos Discretos (MED). Neste trabalho foram criadas simulações numéricas do comportamento do fluxo de grãos de soja em uma geometria tridimensional reduzida que imita, parcialmente, características de um secador de fluxo misto. De maneira a confrontar e validar os dados gerados pelas simulações foi construído um aparato experimental idêntico ao modelo usado nas simulações. Por fim conclui-se que o MED implementado no pacote de software Yade modelou corretamente o fluxo de soja dentro de uma geometria não-trivial, análogo ao usado no secador de fluxo misto. Os resultados das simulações foram muito satisfatórios, concordando com os experimentos não apenas sobre o tempo de descarga, mas também sobre os padrões de escoamento da massa de grãos ao longo do processo de descarga.

Palavras-chave. Fluxo de Grãos, Método dos Elementos Discretos.

1 Introdução

Conhecer o fluxo de grãos é fundamental em uma rede armazenadora, pois sua irregularidade pode produzir uma secagem não uniforme do grão e, em alguns casos, aumentar o risco de incêndio no interior do secador [1].

¹rodolfofrancadelima@gmail.com

²olegkha@unijui.edu.br

³manuel.binelo@gmail.com

⁴vanefaoro@yahoo.com.br

⁵rantoniazzi@unicruz.edu.br

⁶eliezer.balbinot@hotmail.com

A modelagem do fluxo de grãos é um problema difícil, dada à natureza discreta do meio, ou seja, as interações de grãos individuais. Algumas técnicas de simulação têm sido estudadas, entre elas está o Método dos Elementos Discretos (MED). De acordo com [2], autores têm-se dedicado a simular computacionalmente o problema da geração de um pacote granular denso em um silo (seja ele bi ou tridimensional) e sua posterior descarga por um orifício usando o MED.

Com intuito de averiguar detalhes do fluxo de grãos, o objetivo principal deste trabalho é a validação do MED com a modelagem matemática do fluxo de grãos de soja em um secador com calhas. Além do objetivo principal citado, alguns objetivos secundários do trabalho são descritos a seguir:

- Realizar experimentos para determinar as características do fluxo de grãos de soja.
- Implementar o MED para a simulação numérica do fluxo de grãos de soja em um secador com calhas.
- Estimar os parâmetros usados no MED de acordo com os experimentos realizados.

2 Materiais e Métodos

Como parte deste artigo foram criadas simulações numéricas do comportamento do fluxo de grãos de soja em uma geometria tridimensional reduzida que imita, parcialmente, características de um secador de fluxo misto com calhas. De maneira a confrontar e validar os dados gerados pelas simulações computacionais foi construído um aparato experimental idêntico ao modelo usado nas simulações.

2.1 Método dos Elementos Discretos

O Método dos Elementos Discretos é um método de simulação numérica do movimento de um grande número de partículas dentro de um sistema fixo ou móvel variante com o tempo (normalmente modeladas por geometrias simples), foi desenvolvido por [3], sendo baseado em um esquema numérico explícito no qual a interação das partículas é monitorada individualmente (um requisito quando se trata de materiais granulares). Em cada contato o sistema é modelado usando as leis do movimento.

O MED compreende dois estágios: o cálculo das forças de contato e posteriormente o cálculo do movimento das partículas através da segunda Lei de Newton. O método considera um número finito de partículas discretas interagindo por meio de forças de contato e não-contato. Em um primeiro momento as forças de interação entre partículas são calculadas permitindo-se uma interpenetração entre os seus elementos, utilizando estas informações para o cálculo da relação força – movimento. ([4]).

As partículas atuam como se fossem unidas por molas nos seus contatos. Baseada nesta hipótese, a força gerada no contato será o produto da deformação da mola pela sua rigidez. Assim, o deslocamento no sentido normal que seria a deformação da mola nessa

orientação é a superposição de duas entidades. Desta maneira a força normal é determinada pela equação 1:

$$F_i^n = K^n U^n n_i. \quad (1)$$

Sendo F_i^n o vetor da força normal, K^n a rigidez normal do contato, U^n a superposição entre partículas e n_i o vetor normal.

No segundo estágio a segunda lei de Newton é usada para determinar as velocidades e acelerações de cada partícula, e a partir disso, a nova posição dos elementos. A modelagem do movimento das partículas consiste na resolução da equação do movimento da segunda lei de Newton através de integração numérica. As forças e momentos externos agindo em cada partícula são devidos a choques com outras partículas, choques com as superfícies de contorno do escoamento, força gravitacional e também devido à influência de ondas provocadas por outras partículas que não estão em contato, ou ainda devido ao fluido no qual as partículas estão contidas [5].

Após o cálculo da força do contato e a sua contribuição para cada partícula, o movimento das partículas pode ser determinado, pois o movimento de uma única partícula é determinado por meio dos vetores de força e momento resultantes atuantes sobre a mesma.

Esse cálculo pode ser deduzido em função do movimento translacional de um ponto na partícula e do movimento rotacional da própria. O movimento translacional pode ser escrito em termos de posição x , velocidade \dot{x} e aceleração \ddot{x} . O movimento translacional é calculado como:

$$F_i = m(\ddot{x}_i - g_i). \quad (2)$$

Sendo F_i a força resultante de todas as forças externas atuantes na partícula, igual à massa m da partícula e g_i a aceleração da gravidade.

A principal limitação para uso do MED é a exigência computacional, uma vez que o método inerentemente usa um esquema de integração de tempo explícito e repete cálculos seqüenciais ao longo de um período de tempo limitado, com passos muito pequenos de tempo.

Algumas hipóteses referentes ao MED foram adotadas nesta pesquisa. São as seguintes:

- Os elementos discretos são tratados como corpos rígidos;
- Todas as partículas são esféricas, com exceção de elementos aplicados às condições de contorno;
- A parede é assumida ser tão rígida que não acontece deslocamento ou movimento resultante das interações entre parede e partícula;
- Supõe-se que não há fluxo de ar;

2.2 Equipamento

Uma das principais motivações deste trabalho é examinar o fluxo de grãos de forma mais semelhante possível ao de um secador típico de fluxo misto com calhas. As dimensões de secadores de soja são enormes e a demanda computacional para realizar simulações com o MED é muito elevada, levando isso em conta, a solução adotada foi a de construir um aparato menor que poderia ser totalmente modelado com MED, mas que iria manter algumas características de um secador de fluxo misto. O aparato experimental é composto por uma placa plana de acrílico transparente e chapas de MDF (Medium Density Fiberboard), além de obstáculos internos semelhantes aos que o grão iria encontrar em um secador de real. O esquema do aparato é ilustrado conforme figura 1.

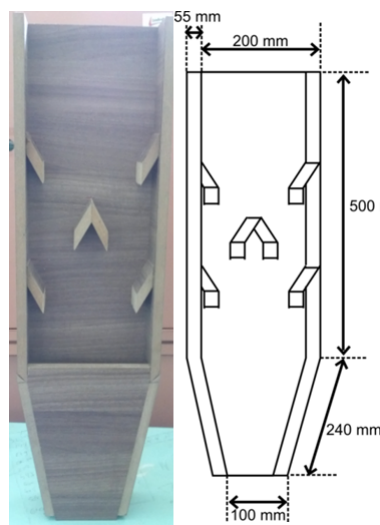


Figura 1: Vista frontal do aparato e suas medidas. Fonte: Autoria própria.

2.3 Definição de parâmetros

As simulações foram criadas no *software* Yade utilizando um modelo 3D idêntico ao aparato utilizado nos experimentos. O primeiro ponto a decidir sobre o modelo foi a modelagem da partícula. A soja não é esférica, mas elipsoidal, considerou-se a utilização como forma elipsoidal a partir de que outros trabalhos utilizaram a esfera para modelar a soja com sucesso, como em [6]. Para encontrar a distribuição do tamanho dos grãos, 30 sementes foram escolhidas aleatoriamente e devidamente medidas com o auxílio de um paquímetro, a fim de se encontrar o raio médio dos grãos de soja. Então, considerando todas as 30 sementes amostradas, o raio médio e seu desvio padrão obtidos foram $3,08mm$ e $0,2730mm$ respectivamente. As propriedades dos materiais utilizados nas simulações foram obtidas por meio de dados presentes na literatura considerando as propriedades dos materiais visto que foram utilizados por outras obras que usaram grãos de soja em outros códigos de MED que conseguiram validar seus modelos. A Tabela 1 resume os valores usados para as propriedades das partículas.

Tabela 1: Parâmetros de entrada para simulação DEM.

Variável	Soja	Unidade
Densidade	1243 ^[a]	kg/m^3
Coefficiente de Poisson	0,25 ^[b]	-
Módulo de Young	$2.6E + 06$ ^[a]	Pa
Ângulo de Atrito	0,4712 ^[b]	Radianos
Coefficiente de Amortecimento	0,05	-
Raio Médio das Partículas	3,08 ^[c]	mm
Desvio Padrão	0,273 ^[c]	mm
Passo de Tempo da Simulação	$3.8E + 06$	-

[a] [6]
[b] [7]
[c] Dados obtidos pelo autor

3 Resultados e discussões

Foram realizados experimentos em laboratório e simulações com o Yade, nos quais foram analisados o fluxo de descarga e o padrão de escoamento dos grãos de soja, variando a abertura por onde os grãos saíam. Foram executados ensaios em laboratório com o aparato experimental, nos quais o orifício de descarga foi aberto em diferentes posições (2 e 2.5 cm), sendo que para 0 cm o orifício se encontra totalmente fechado e com 10 cm completamente aberto. As simulações foram realizadas para as mesmas condições descritas para o experimento, sendo que os resultados obtidos serão mostrados e discutidos. No primeiro experimento realizado, a abertura da tampa para a saída dos grãos escolhida foi de 2 cm. A Figura 2 traz um quadro comparativo entre as simulações realizadas no Yade (esquerda) e o experimento (direita) em seis diferentes momentos distintos durante a descarga, além de um gráfico comparativo entre o experimento real e o simulado contendo o tempo de descarga x altura da massa de grãos. De acordo com a Figura 2 é possível verificar que a simulação MED previu o fluxo de descarga com boa precisão. É de suma importância ressaltar que além dos tempos serem coincidentes, as trajetórias da massa dos grãos durante a descarga é reproduzidas pela simulação com boa exatidão. No segundo experimento realizado a tampa de saída dos grãos foi posicionada com 2,5cm de abertura. A Figura 3 apresenta um quadro com seis imagens da descarga para diferentes tempos durante a descarga e seu respectivo gráfico comparativo entre o experimento real e o simulado. Como previsto, com o aumento da abertura para saída dos grãos o tempo de escoamento dos grãos foi mais rápido em comparação a figura 2. Observando a Figura 3 é possível constatar que novamente simulação MED previu o fluxo de descarga com concordância em relação ao experimento realizado.

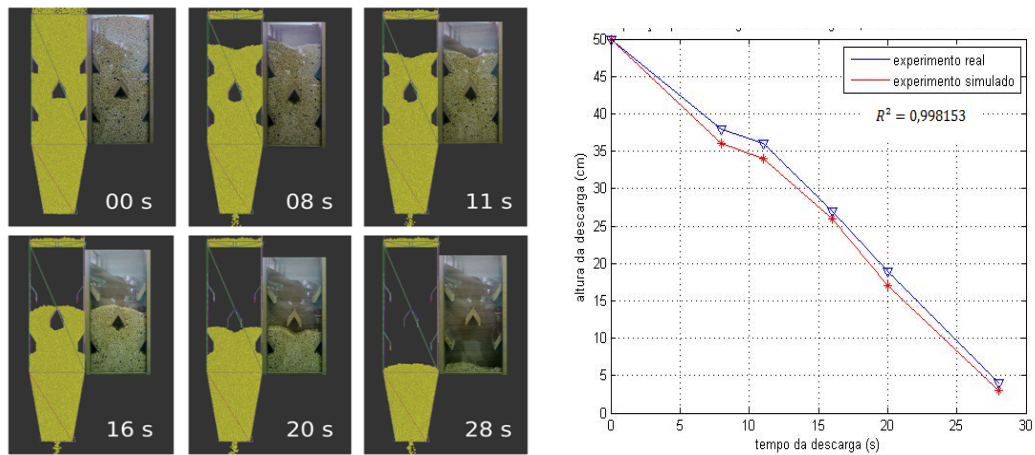


Figura 2: Comparação do fluxo em vários estágios da descarga com abertura da tampa de 2 cm.

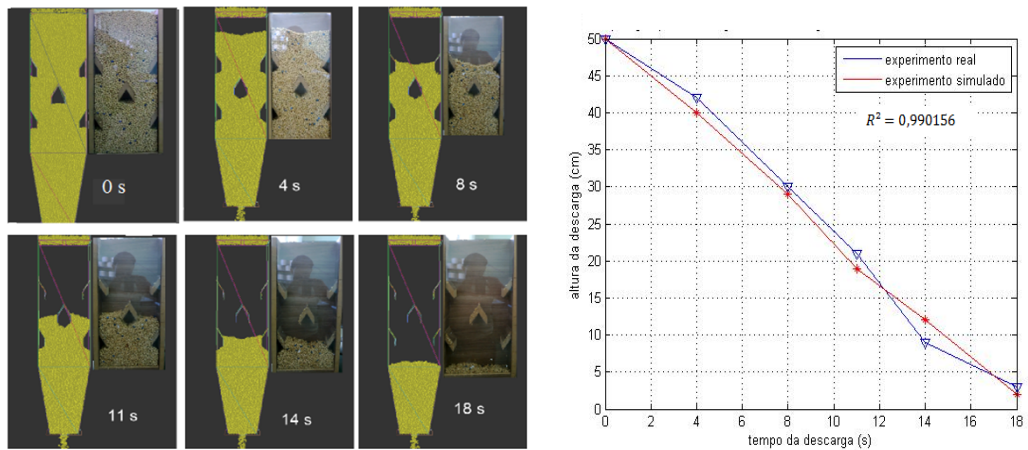


Figura 3: Comparação do fluxo em vários estágios da descarga com abertura da tampa de 2,5 cm.

4 Conclusões

A capacidade do modelo para prever o fluxo de descarga foi testada por meio de um procedimento de validação, confrontando os resultados obtidos com os observados em um aparato experimental. Conclui-se que o MED pode ser utilizado para modelar a resposta complexa do fluxo de grãos.

A partir dos resultados apresentados as seguintes conclusões podem ser mencionadas:

- O pacote de *software* Yade modelou corretamente o fluxo de soja dentro de uma geometria não-trivial, análogo ao usado no secador de fluxo misto;
- Os resultados das simulações concordam com os experimentos não apenas sobre o tempo de descarga, mas também sobre os padrões de escoamento da massa de grãos ao longo do processo de descarga;

- O grão de soja pode ser modelado como esferas individuais alcançando bons resultados;

Como sugestões para trabalhos futuros tem-se:

- Realizar simulações usando elipsóides a fim de aplicar um modelo mais realista quanto a forma geométrica das partículas;
- Considerar o fluxo de ar e transferência de calor e massa, que foram negligenciados no presente trabalho.

Referências

- [1] K. Metzger T. Tsotsas E. Mszros C. Farkas I. Mellmann, J. Iroba. Moisture content and residence time distributions in mixed-flow grain dryers. *Biosystems Engineering*, 109:297–307, 2011. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.04.010>.
- [2] A. T. Silva, A. C. Bernardes. Simulação computacional do escoamento de grãos em silos. *Exacta*, 8:45–53, 2010.
- [3] O. D. L. Cundall, P. A. Strack. Discrete numerical model for granular assemblies. *Abstracts Geotechnique*, 16, 1979. [http://dx.doi.org/10.1016/0148-9062\(79\)91211-7](http://dx.doi.org/10.1016/0148-9062(79)91211-7).
- [4] Z.Y. Yang R.Y. Zhu, H.P. Zhou. Discrete particle simulation of particulate systems: A review of major applications and findings. *Engineering Science*, 63:5728–5770, 2008.
- [5] C.E.V Neves. Comportamento de materiais granulares usando o método dos elementos discretos. Dissertação de mestrado, Universidade de Brasília, 2009.
- [6] M. E. Maghirang R. G. Boac, J. M. Casada. 3d and quasi-2d discrete element modeling of grain commingling in a bucket elevator boot system. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 55:659–672, 2012. doi:10.13031/2013.39812.
- [7] T. Kibar, H. Ozturk. Physical and mechanical properties of soybean. *International Agrophysics*, pages 239 – 244, 2008.