

## Estudo dos Efeitos das Propriedades Morfológicas Sobre o Escoamento de Grãos de Aveia

Eliezer José Balbinot<sup>1</sup>  
Manuel Osório Binelo<sup>2</sup>  
Oleg Khatchatourian<sup>3</sup>  
Rodolfo França de Lima<sup>4</sup>

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

**Resumo** O presente trabalho tem por objetivo a modelagem matemática e computacional do escoamento de grãos de aveia aplicando o Método dos Elementos Discretos, a fim de investigar o impacto da morfologia do grão no seu escoamento. Para tanto, foram realizados experimentos em laboratório a fim de coletar dados sobre o ângulo de repouso dos grãos de aveia e o tempo de escoamento dos grãos pelo corpo de uma calha experimental. Posteriormente, foi criado um modelo computacional da calha, idêntico ao modelo utilizado nos experimentos, no software *Yade*, que implementa o Método dos Elementos Discretos. Para validar o modelo escolhido, os resultados simulados foram comparados com os dados experimentais. Os resultados alcançados neste estudo mostram que o Método dos Elementos Discretos é capaz de prever o fluxo de descarga dos grãos de aveia com boa precisão. Além disso, verificou-se que a utilização de clumps de esferas para aproximar a geometria do grão de aveia torna o método muito mais consistente com os dados reais.

**Palavras-chave.** Método dos Elementos Discretos, Modelagem Matemática, Modelagem Computacional.

### 1 Introdução

Atualmente existem no mercado diferentes tipos de secadores que visam atender desde pequenos até grandes produtores. Entre os secadores existentes destaca-se o secador de fluxo misto que é amplamente utilizado na agricultura, porém ainda existe a necessidade de otimizar o processo envolvido em tal secador, visto que o fluxo de grãos pelo corpo do secador não foi suficientemente analisado e estudado [7]. A criação de modelos matemáticos capazes de prever o fluxo de grãos é de extrema importância para o projetos de secadores de grãos mais eficientes. A modelagem matemática do escoamento de grãos mais próximos de esferas, como a soja, foi realizada em trabalhos como [4], mas grãos com pouco esfericidade, como a aveia, são um desafio mais complexo.

---

<sup>1</sup>eliezer.balbinot@hotmail.com

<sup>2</sup>manuel.binelo@gmail.com

<sup>3</sup>olegkha@unijui.edu.br

<sup>4</sup>rodolfofrancadelima@gmail.com

Este trabalho visa modelar matematicamente e computacionalmente o fluxo de grãos de aveia em uma calha experimental e o ângulo de repouso dos grãos de aveia por meio de simulações numéricas implementadas através do Método de Elementos Discretos (MED), que consiste em um método de simulação numérica de interação entre um número finito de partículas, devido a forças de contato e não-contato, dentro de um sistema móvel ou fixo [8].

## 2 Materiais e Métodos

Foram realizados ensaios em laboratório em uma calha experimental composta por uma placa de plástico transparente e por chapas de madeira de medidas 2 x 30 cm, com saída para os grãos com abertura de 2 x 2 cm, de modo a analisar o tempo de descarga dos grãos de aveia ao longo da calha. Além disso, foram realizados experimentos a fim de determinar o ângulo de repouso para a aveia. Após a coleta dos dados, os mesmos foram analisados com auxílio do software Tracker, que consiste em um software de código aberto para análise de imagem e vídeo. Posteriormente, descreveu-se o fluxo dos grãos pelo corpo da calha e determinou-se o ângulo de repouso dos grãos por meio de simulações realizadas no software *Yade*, que consiste em um programa de computação de código aberto desenvolvido por [5], que implementa o Método dos Elementos Discretos.

### 2.1 Método dos Elementos Discretos

O MED consiste em um método de interação entre um número finito de partículas discretas, devido a forças de contato e não-contato, dentro de um sistema móvel ou fixo variante com o tempo. Inicialmente, [3] introduziram o estudo do método na modelagem de sistemas bem simples, restritos a escala de 100 a 1000 partículas e em geometrias 2D. Com o avanço da tecnologia computacional, a partir da década de 90, os tamanhos dos modelos aumentaram consideravelmente. Atualmente, o método possui grande aplicação em escala industrial, em 3D e em sistemas com geometrias complexas [8].

No método as partículas podem ser representadas por esferas, poliedros, elipsoides, capsulas ou, para representar o formato mais realista possível dos grãos ou superfícies de contato, existe a possibilidade de adicionar discos ou esferas nos chamados clumps ou clusters. Outro benefício do método é a visualização virtual dos movimentos das partículas no sistema em estudo [9].

Algumas hipóteses apresentadas em [2] e [4] referentes ao MED foram adotadas na realização desta pesquisa, de modo a simplificar o problema em estudo. Destaca-se:

- as partículas são tratadas como corpos rígidos;
- o contato entre as partículas ocorre ao longo de uma área muito pequena (como um ponto);
- no contato entre as partículas existe uma tolerância de penetração entre elas. A grandeza desta penetração esta relacionada com a Lei Força - Deslocamento, sendo muito pequena em relação ao tamanho das partículas;

- a parede é assumida ser tão rígida que não ocorre deslocamentos ou movimentos resultantes entre as interações, partícula parede;
- supõe-se que não existe fluxo de ar ao longo do aparato;
- a geometria das partículas é representada através de esferas e *clumps*, constituídos por 7, 11 e 15 subesferas.

## 2.2 Geometria

O tamanho de uma semente é definido pelas dimensões de seu comprimento, largura e espessura, não apresentando formas geométricas bem definidas. Para resolver problemas relacionados à sua geometria, utiliza-se uma forma conhecida próxima a sua real geometria.

Para a determinação da geometria dos grãos, foram escolhidos aleatoriamente 30 grãos de aveia e determinou-se os valores das dimensões características desses grãos. Após determinadas as dimensões e a partir do modelo proposto por [6], foram utilizados clumps de modo a obter uma geometria aproximada do real formato do grão de aveia. A Figura 1 apresenta os clumps constituídos respectivamente por 7, 11 e 15 esferas.

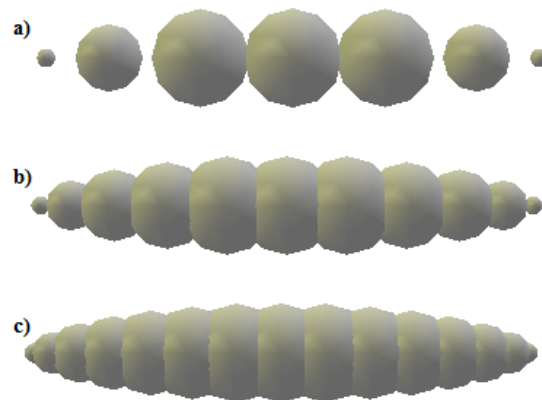


Figura 1: Geometria do modelo multi-esfera para elipsoides com  $N$  subesferas: a,  $N = 7$ ; b,  $N = 11$ ; c,  $N = 15$ .

## 2.3 Valores para os parâmetros de entrada

Os valores dos parâmetros dos materiais utilizados na realização deste artigo foram obtidos na literatura com base no trabalho desenvolvido por [1]. Para cada parâmetro, os autores apresentam um intervalo de valores. De modo a ajustar os parâmetros do modelo para que o mesmo simulasse com maior precisão possível o escoamento de grãos, comparou-se os dados experimentais com os dados gerados pelas simulações, em diferentes intervalos de tempo. A Tabela 1 apresenta os valores da densidade, do coeficiente de Poisson, do módulo de Young, do ângulo de atrito, do coeficiente de amortecimento, do módulo de cisalhamento e do passo de tempo das simulações.

Tabela 1: Valores dos parâmetros de entrada dos materiais.

Parâmetro	Aveia	Unidade de Medida
Densidade	1397	$Kg/m^3$
Coefficiente de Poisson	0,2	-
Módulo de Young	15,6e6	Pa
Ângulo de Atrito	31,8	Radianos
Módulo de Cisalhamento	0,05	Pa
Coefficiente de Amortecimento	0,2	-

### 3 Resultados e Discussões

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos com a realização dos experimentos utilizando aveia e a calha experimental. Além disso, são apresentados os resultados obtidos com as simulações realizadas com o software Yade, bem como a comparação entre os dados experimentais e os dados simulados.

#### 3.1 Simulação Calha

Os experimentos de escoamento foram realizados com ângulo da calha em 40 graus. Posteriormente foram realizadas inúmeras simulações de modo a calibrar os parâmetros do modelo, através da comparação entre os dados simulados com os dados experimentais. As simulações foram realizadas com esferas e *clumps* constituídos por 7, 11 e 15 subesferas. Os tempos de escoamento dos dados experimentais, dos dados simulados bem como o desvio padrão experimental e o erro relativo obtido a partir das simulações realizadas estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Comparativo entre os dados experimentais e os dados simulados.

Variável	Tempo de escoamento	Erro (%)
Média Experimental	1,58434	-
Desvio Padrão Experimental	0,437618501	-
Simulação com uma esfera	2,315	46
Simulação com <i>Clump</i> contendo 7 subesferas	Sem escoamento	-
Simulação com <i>Clump</i> contendo 11 subesferas	1,324	16,43
Coefficiente de Amortecimento	0,2	-
Simulação com <i>Clump</i> contendo 15 subesferas	1,616	1,9

Considerando os tempos gerados pelas simulações fica evidente que o *clump* contendo 15 subesferas foi o que mais se aproximou da média do tempo de escoamento dos experimentos que é de 1,58 s, apresentando o menor erro de simulação. Com o *clump* contendo

7 subesferas não ocorreu o escoamento de grãos pela calha. Com a esfera, o tempo de escoamento foi superior aos dados experimentais, apresentando erro de 46% e com o *clump* contendo 11 subesferas, o tempo foi inferior a média obtida nos dados experimentais, com erro de 16,43%. O *clump* com 7 subesferas não é viável para a simulação do escoamento de grãos, já que para manter as proporções do grão, ficam espaços vazios entre as esferas, ou seja, as esferas não ficam conectadas; e ainda que o sistema de *clumps* mantenha a posição relativa das subesferas, as colisões ficam muito diferentes do processo real, gerando o travamento do escoamento. Como esperado, quanto maior o número de subesferas, mais próxima a simulação fica dos dados experimentais, pois a geometria do grão é melhor aproximada.

### 3.2 Ângulo de Repouso

Com a realização dos ensaios para a determinação do ângulo de repouso o valor encontrado foi igual a  $32^\circ$ . Posteriormente, foram realizadas as simulações para determinação dos ângulos de repouso para as diferentes geometrias definidas para representar o formato do grão de aveia, através do software Yade. Foram encontrados os seguintes valores:  $N = 1$ , ângulo de repouso =  $28^\circ$ ;  $N = 7$ , ângulo de repouso =  $38^\circ$ ;  $N = 11$ , ângulo de repouso =  $35^\circ$ ;  $N = 15$ , ângulo de repouso =  $32^\circ$ , conforme observados na Figura 2.

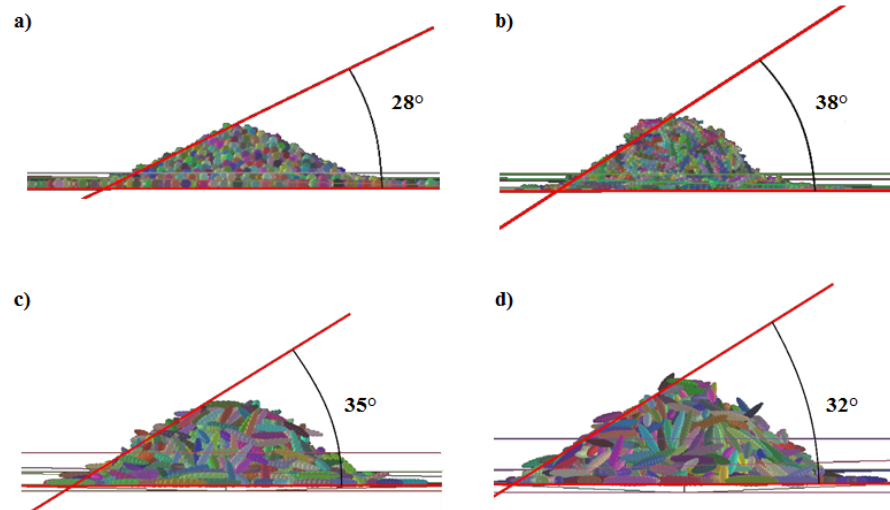


Figura 2: Ângulo de repouso: a-  $N = 1$ ; b-  $N = 7$ ; c-  $N = 11$ ; d-  $N = 15$ .

Analisando-se esses valores, percebe-se que quanto mais a geometria adotada se aproxima do real formato do grão, mais próximo estará o valor do ângulo dos dados simulados com o valor do ângulo de repouso dos dados experimentais que foi de  $32^\circ$ .

## 4 Conclusões

A morfologia do grão possui um importante impacto no seu fluxo, como pode ser demonstrado nos experimentos e simulações de escoamento em calha e ângulo de repouso. A utilização de *clumps* de esferas para aproximar a geometria do grão torna o método muito mais consistente com os dados reais. Embora a análise do custo computacional do método não seja parte do escopo deste trabalho, foi possível perceber que a solução com clumps acaba demandando muitos recursos computacionais, fato que limita a escolha da quantidade de esferas do clump. Em trabalhos futuros pode ser investigado o limite em que a quantidade de esferas utilizadas no *clump* aproxima os resultados experimentais.

## Referências

- [1] J. M. Boac, M. E. Casada, R. G. Maghirang, J. P. Harner III, Material and interaction properties of selected grains and oilseeds for modeling discrete particles, *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 53(4):1201 - 1216, 2010.
- [2] A. L. Bordignon, GBPM: um novo método de elementos discretos, Tese de doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.
- [3] P. A. Cundall, O. D. L. Strack, A discrete numerical model for granular assemblies, *Géotechnique*, 29(1):47 - 65, 1979.
- [4] O. A. Khatchaturian, M. O. Binoelo, and R. F. de Lima, Simulation of soya bean flow in mixed-flow dryers using DEM, *Biosystems Engineering*, 123:68-76, 2014
- [5] J. Kozicki and Donzé, A new open-source software developed for numerical simulations using discrete modeling, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 49:4429-4443, 2008.
- [6] D. Markauskas, R. Kacianauskas, A. Dziugys, R. Navakas. Investigation of adequacy of multi-sphere approximation of elliptical particles for DEM simulations, *Granular Matter*, 12(1):107 - 123, 2009.
- [7] J. Mellmann, k. Iroba, T. Metzger, E. Tsotsas, C. Mszros, I. Farkas, Moisture content and residence time distributions in mixedflow grain dryers. *Biosystems Engineering*, 109(4):297 - 307, 2011.
- [8] A. Mesquita, M. O. Silva, E. Santos, L. C. Carvalho, E. Gomes, E. Neto, M. Mafra, Uso do método dos elementos discretos em manuseio de minérios e sua contribuição para a pós-graduação e graduação no curso de engenharia mecânica da UFPA. In: *Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia*, Belém, 2012.
- [9] V. Šmilauer, Woo documentation, 2016. Disponível em: <https://woodem.org/Woo.pdf>. Acesso em: 30 jun. 2016.