

Evento: XXII Jornada de Pesquisa

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE MATERIAIS GRANULARES COM O MÉTODO DOS ELEMENTOS DISCRETOS UTILIZANDO SIMULAÇÕES 2D E 3D¹

ANALYSIS OF THE BEHAVIOR OF GRANULAR MATERIALS WITH THE METHOD OF THE DISCRETE ELEMENTS USING 2D AND 3D SIMULATIONS

Ricardo Klein Lorenzoni², Saul Vione Winik³, Maiara Mentges⁴, Maurício Dos Santos Dessuy⁵, Manuel Osório Binelo⁶, Oleg Khatchatourian⁷

¹ Pesquisa Institucional desenvolvida no Departamento de Ciências Exatas e Engenharias, pertencente ao Grupo de Pesquisa em Matemática Aplicada e Computacional

² Aluno do Curso de Mestrado em Modelagem Matemática da UNIJUI, bolsista UNIJUI, ricolorenzoni@gmail.com;

³ Aluno do Curso de Mestrado em Modelagem Matemática da UNIJUI, bolsista CNPq, saul.winik@gmail.com;

⁴ Aluna do Curso de Mestrado em Modelagem Matemática da UNIJUI, bolsista Capes, maiara.mentges@hotmail.com;

⁵ Aluno do curso de Graduação em Ciência da Computação da UNIJUI, bolsista PIBIC/UNIJUI, mauriciodessuy@hotmail.com;

⁶ Professor Doutor do Departamento de Ciências Exatas e Engenharias, Orientador, manuel.binelo@gmail.com;

⁷ Professor Doutor do Departamento de Ciências Exatas e Engenharias, Co-orientador, olegkha@unijui.edu.br.

Resumo: Compreender o comportamento de materiais granulares tem sido foco de estudo de diversas pesquisas nos últimos anos. Estas pesquisas compreendem áreas que vão desde o escoamento de grãos em secadores até o comportamento do solo em estudos de geologia. Uma das técnicas utilizadas para compreender o comportamento destes materiais é o Método dos Elementos Discretos, que é baseado em um esquema numérico explícito no qual a interação entre as partículas é monitorada contato a contato e o sistema é modelado utilizando as leis do movimento. O correto funcionamento deste modelo depende diretamente dos parâmetros utilizados na configuração das propriedades dos materiais envolvidos na simulação. Neste contexto o objetivo deste trabalho é determinar os parâmetros para a simulação do fluxo de grãos de soja em um aparato que replica uma pequena seção de um secador real, em simulações bidimensionais e tridimensionais. Os resultados demonstram que o software YADE é capaz de realizar simulações do fluxo de materiais granulares com boa acurácia, e que as propriedades dos grãos estão corretas, apresentando resultados condizentes com os dados experimentais para simulações 3D. Para a realização de simulações 2D são necessários mais estudos, para determinar melhor os parâmetros de entrada, bem como determinar o tamanho exato da abertura do aparato necessária para permitir uma vazão de partículas proporcional à obtida nas simulações 3D.

Evento: XXII Jornada de Pesquisa

Abstract: *Understanding the behavior of granular materials has been the focus of several studies in recent years. This research encompasses areas ranging from grain flow in dryers to soil behavior in geology studies. One of the techniques used to understand the behavior of these materials is the Discrete Element Method, which is based on an explicit numerical scheme in which the interaction between particles is monitored contact to contact and the system is modeled using the laws of motion. The correct functioning of this model depends directly on the parameters used in the configuration of the properties of the materials involved in the simulation. In this context the objective of this work is to determine the parameters for the simulation of soybean grain flow in an apparatus that replicates a small section of a real dryer in two-dimensional and three-dimensional simulations. The results demonstrate that the YADE software is capable of simulating the flow of granular materials with good accuracy, and that the properties of the grains are correct, presenting results consistent with the experimental data for 3D simulations. For further 2D simulations, more studies are needed to better determine the input parameters, as well as to determine the exact aperture size of the apparatus required to allow a particle flow rate proportional to that obtained in 3D simulations.*

Palavras-Chave: Método dos Elementos Discretos; Simulações Computacionais 3D; Simulações Computacionais 2D; Fluxo de Materiais Granulares.

Keywords: *Discrete Element Method; 3D Computational Simulations; 2D Computational Simulations; Flow of Granular Materials.*

INTRODUÇÃO

Conhecer e compreender o comportamento de materiais granulares tem sido o foco de estudo de diversos pesquisadores nos últimos anos. As pesquisas realizadas utilizam diversas técnicas numéricas para compreender o comportamento dos materiais granulares. Dentre estas técnicas, pode-se destacar o Método dos Elementos Discretos (MED), um método numérico computacional capaz de simular a movimentação e a interação de um grande número de partículas.

Inicialmente desenvolvido por Cundall e Strack, o MED é baseado em um esquema numérico explícito no qual a interação entre as partículas é monitorada contato a contato e o sistema é modelado utilizando as leis do movimento (MONTELLANO et al. 2011).

O MED vem sendo aplicado em um grande número de problemas reais, tais como, a movimentação de grãos em equipamentos agrícolas, processamento de materiais granulares na indústria, mecânica de solos, entre outros (BINELO et al. 2017). Atualmente é amplamente aceito como um método eficaz para avaliar problemas de engenharia que envolvem matérias granulares, especialmente em problemas de escoamento de partículas, tendo aplicações em áreas como a geofísica/sismologia, fratura de rochas, mecânica de solos e mineração (MESQUITA, 2012).

No MED as partículas podem ser rígidas ou deformáveis, interagindo entre si por meio de forças de contato normal ou cisalhantes (BINELO et al. 2017). Além disso, consolidou-se como uma poderosa ferramenta em indústrias que trabalham com materiais granulares, por sua dinâmica envolver propriedades físicas e mecânicas dos materiais, tais como o atrito de rolamento e deslizamento (SANTOS et al. 2012).

Montellano et al. (2011) afirmam que o MED é comumente utilizado na determinação do

Evento: XXII Jornada de Pesquisa

comportamento do material granular em silos e tremonhas, incluindo as pressões exercidas pelo material armazenado a modificação do fluxo através da inclusão e da descarga de grãos. É também frequentemente usado na indústria farmacêutica, mineração e indústrias de alimentos, bem como no desenho de construções, terraplanagem e máquinas agrícolas.

O MED é composto por dois estágios: o primeiro é o cálculo das forças de contato, obtidas pela interpenetração entre as partículas, que resulta no cálculo da relação força-movimento (ZHU et al., 2008. NEVES, 2009. BINELO et al. 2017); o segundo é o cálculo do movimento das partículas, obtido por meio da resolução da equação do movimento da segunda lei de Newton por meio de integração numérica.

Um dos principais benefícios da utilização do MED, é a possibilidade de visualização virtual do movimento das partículas dentro do sistema em estudo. Além disso, o método possibilita que as propriedades dos materiais sejam facilmente alteradas, possibilitando o estudo do comportamento de diversos tipos de materiais em um mesmo ambiente de simulação.

No presente artigo, serão realizados experimentos visando a validação dos parâmetros de entrada e das propriedades dos grãos de soja em simulações que utilizam o MED por meio do software YADE. Para atingir este objetivo serão realizados experimentos e simulações computacionais 2D e 3D do fluxo dos grãos de soja em um aparato. Posteriormente, os resultados das simulações computacionais serão confrontados com os resultados experimentais, visando validar os resultados das simulações bem como das propriedades dos materiais utilizadas.

MÉTODO DOS ELEMENTOS DISCRETOS

O Método dos Elementos Discretos adota uma série de hipóteses para simplificar o problema real, descartando aspectos menos importantes. Estas hipóteses simplificadoras, facilitam a proposição de um modelo físico e matemático para o problema. Segundo Šmilauer (2010) nas simulações do MED, a seguinte sequência de passos é executada a cada novo passo temporal:

- Estabelecimento das condições iniciais;
- Detecção das colisões aproximadas;
- Detectar as colisões exatas dos corpos e as interações de atualização, se necessário;
- Resolver interações, aplicando forças sobre as partículas;
- Aplicar outras condições/forças externas (tais como a gravidade);
- Atualizar as posições dos corpos com base nas forças, integrando as equações do movimento.

A cada passo temporal, são realizados cálculos para determinar as forças agindo sobre os corpos, com base na Lei força-deslocamento, e posteriormente as posições das partículas são atualizadas por meio da integração das Lei de movimento. Serão apresentadas agora, breves descrições de cada um destes passos.

LEI FORÇA-DESLOCAMENTO

A lei força-deslocamento estabelece a relação entre as forças de contato entre suas entidades (NEVES, 2009). As forças de contato são o resultado da soma das forças de contato normal e cisalhante (tangente), conforme pode-se ver na Equação (1):

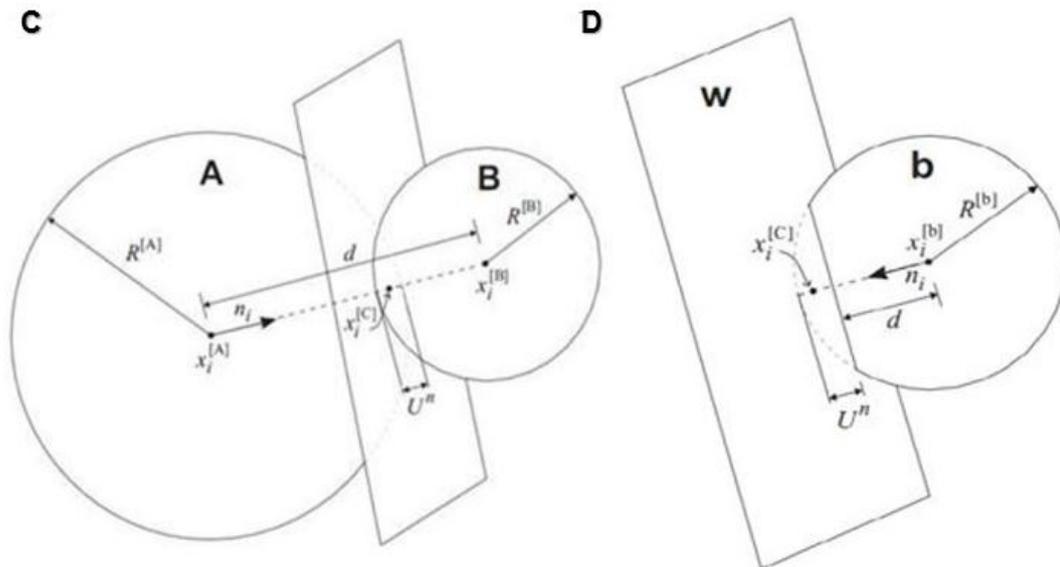
Evento: XXII Jornada de Pesquisa

$$F_i = F_i^n + F_i^s \quad (1)$$

onde F_i^n representa o vetor de força normal e F_i^s representa o vetor de força cisalhante. O contato pode ocorrer entre duas partículas ou então entre uma partícula e uma parede. Se o contato for entre partículas, o vetor de força normal está ao longo da reta que define a menor distância entre os centros das partículas. Já se este contato for entre uma partícula e uma parede, o vetor de força normal esta ao longo da reta de menor distância entre o centro da partícula e a parede.

A Figura 1C um diagrama das forças de contato normal para o contato entre partículas, já a Figura 1D apresenta o diagrama das forças para o contato entre uma partícula e uma parede.

Figura 1 - C - Forças de contato partícula-partícula. D - Forças de contato partícula-parede.



Fonte: ITASCA (2004) apud LIMA (2014).

onde d é a distância entre o centro das partículas, ou entre o centro da partícula e a parede.

$$n_i = \frac{x_i^{[B]} - x_i^{[A]}}{d} \quad (2)$$

O vetor de força normal (n_i) é definido pela Equação (2), onde d é a distância entre o centro das duas partículas, $x_i^{[A]}$ e $x_i^{[B]}$ são os vetores de posição do centro das partículas A e B respectivamente. A distancia (d) entre o centro das partículas pode ser calculada a partir da equação (3):

Evento: XXII Jornada de Pesquisa

$$d = |x_i^{[B]} - x_i^{[A]}| = \sqrt{(x_i^{[B]} - x_i^{[A]})(x_i^{[B]} - x_i^{[A]})} \quad (3)$$

No contato entre uma partícula e uma parede, a direção do vetor de força normal (n_i) é determinada pelo mapeamento do centro da partícula numa porção relevante do espaço definida pela parede. A sobreposição ou penetração (U^n) entre dois corpos é determinada, conhecendo-se os raios das entidades em contato e a distância inicial entre elas.

$$U^n = \begin{cases} R^{[A]} + R^{[B]} - d \\ R^{[b]} - d \end{cases} \quad (4)$$

O contato entre duas partículas ou entre uma partícula e a parede pode ser definido como um ponto x_i^c , e pode ser expressa pela Equação (5).

$$x_i^{[C]} = \begin{cases} x_i^{[A]} + (R^{[A]} - \frac{1}{2}U^n)n_i & (\text{particula - particula}) \\ x_i^{[A]} + (R^{[b]} - \frac{1}{2}U^n)n_i & (\text{particula - parede}) \end{cases} \quad (5)$$

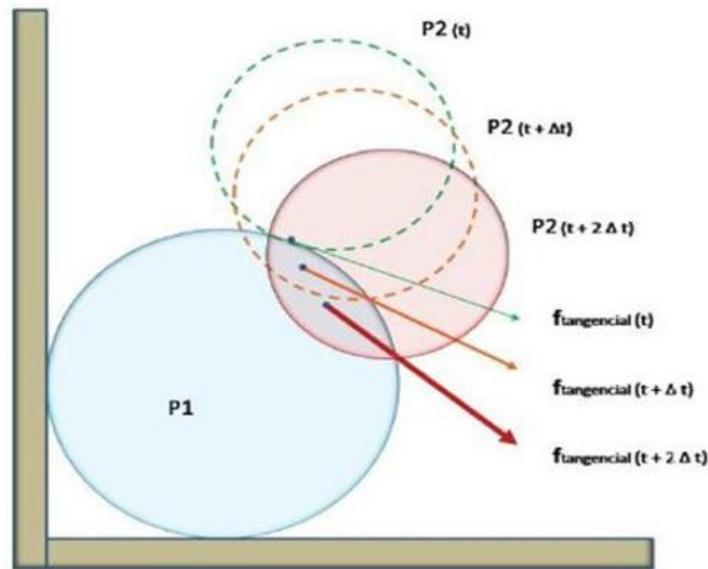
Segundo (PINTO, 2011), a ação das partículas ocorre como se fossem ligadas por molas em seus contatos. O produto da deformação destas molas pela sua rigidez, determina a força.

$$F_i^n = K^n U^n n_i \quad (6)$$

onde K^n é a rigidez normal de contato, determinada pelo modelo de rigidez de contato. No momento em que ocorre o contato entre duas partículas, as forças de contato normal e cisalhante entre estas duas partículas é inicializado com o valor zerado ou seja $F^s=0$. A força de contato de cisalhamento é determinada de forma incremental, de forma que, quando um novo contato é formado, a força cisalhante é nula e subsequentes deslocamentos tangenciais precedem em incrementos desta força. O movimento do ponto de contato deve ser considerado neste procedimento. De modo a ser necessário atualizar o vetor de força normal n_i e o novo ponto de contato x_c a cada passo de integração (DUARTE, 2009). O movimento de duas partículas e a força de deslocamento tangencial a cada novo ponto de contato são demonstrados na Figura 2.

Evento: XXII Jornada de Pesquisa

Figura 2 - Atualização dos pontos de contato e força cisalhante a cada passo temporal.



Fonte: ITASCA (2004) apud LIMA (2014).

A Equação (7) determina o incremento do deslocamento cisalhante no contato, que deve ser realizado a cada nova interação do passo temporal Δt .

$$\Delta U_i^S = V_i^S \Delta t \quad (7)$$

Já o incremento da força elástica cisalhante é determinado pela Equação (8).

$$\Delta F_i^S = -k^S \Delta U_i^S \quad (8)$$

sendo k^S a rigidez de cisalhamento com o contato. A nova força de contato de cisalhamento é calculada somando o valor da força no início da interação com o incremento da força cisalhante elástica (GENG, 2010).

$$F_i^S = F_j^S + \Delta F_i^S \quad (9)$$

Os valores estimados para a força de contato normal e para a força de contato de cisalhamento, determinadas pelas Equações (6) e (7), devem ser ajustados de modo a satisfazer as relações constitutivas de contato. Depois destas correções, a força final de contato é aplicada às partículas (LIMA, 2014), seguindo as equações:

Evento: XXII Jornada de Pesquisa

$$F_i^{[a^1]} \leftarrow F_i^{[a^1]} - F_i \quad (10)$$

$$F_i^{[a^2]} \leftarrow F_i^{[a^2]} - F_i \quad (11)$$

$$M_i^{[a^1]} \leftarrow M_i^{[a^1]} - e_{ijk} \omega_j^{[a^1]} (x_j^{[C]} - x_j^{[a^1]}) F_k \quad (12)$$

$$M_i^{[a^2]} \leftarrow M_i^{[a^2]} - e_{ijk} \omega_j^{[a^2]} (x_j^{[C]} - x_j^{[a^2]}) F_k \quad (13)$$

onde, $F_i^{((a^j))}$ e $M_i^{((a^j))}$ representam o somatório da força e do momento da entidade a^j ; e e_{ijk} representa o símbolo de permutação, definido por:

$$e_{ijk} = \begin{cases} 0, & \text{se 2 índices coincidem} \\ +1, & \text{se } i, j, k \text{ permutam como } 1, 2 \text{ e } 3 \\ -1, & \text{se } i, j, k \text{ permutam como } 3, 2 \text{ e } 1 \end{cases} \quad (14)$$

LEI DO MOVIMENTO

Através de vetores de força e do momento resultante agindo sobre uma única partícula, é possível determinar o movimento da mesma. Sendo possível descrevê-lo pelo movimento translacional de um ponto da partícula, que é descrito em função da posição x , velocidade x' e aceleração x'' ; e do movimento rotacional da partícula, que por sua vez é descrito pela velocidade angular ω_i e aceleração angular $(\dot{\omega}_i)$ (BALBINOT, 2017; GENG, 2010; LIMA, 2014; NEVES, 2009; PINTO, 2011). O movimento translacional é determinado pela Equação (15)

$$F_i = m(\ddot{x}_i - g_i) \quad (15)$$

onde m é a massa total da partícula, e g_i é o vetor de aceleração das forças de corpo. Sendo que o somatório das forças externas que atuam sobre a partícula resulta em F_i . A Equação (16) descreve o movimento rotacional.

$$M_i = \dot{H}_i \quad (16)$$

onde, M_i é o movimento resultante atuando sobre a partícula e H_i representa o momento angular da partícula. Através da equação de Euler, pode-se reduzir a Equação (16) para o movimento:

Evento: XXII Jornada de Pesquisa

$$\begin{aligned} M_1 &= I_1 \dot{\omega}_1 + (I_3 - I_2) \omega_3 \omega_2 \\ M_2 &= I_2 \dot{\omega}_2 + (I_1 - I_3) \omega_1 \omega_3 \\ M_3 &= I_3 \dot{\omega}_3 + (I_2 - I_1) \omega_2 \omega_1 \end{aligned} \quad (17)$$

sendo M_1 , M_2 e M_3 os componentes do momento resultante em relação aos eixos principais, I_1 , I_2 e I_3 os momentos de inércia principais da partícula; $\dot{\omega}_1$, $\dot{\omega}_2$ e $\dot{\omega}_3$ as acelerações angulares referente aos eixos principais. Em uma forma global, a Equação (17) pode ser descrita pela Equação (18).

$$M_i = \frac{2}{5} m R^2 \dot{\omega}_i \quad (18)$$

As equações do movimento descritas nas Equações (15) e (18) são integradas utilizando diferenças finitas centrais que envolvem um valor Δt para o passo de tempo. Os valores de \dot{x}_i e de $\dot{\omega}_i$ são calculados para intervalos de tempo de $t \pm n \Delta t/2$. Já os valores de x_i , x_i'' , ω_i , F_i e M_i são calculados em intervalos primários de $t \pm n \Delta t$. As acelerações são determinadas por:

$$\ddot{x}_i = \frac{1}{\Delta t} \left(\dot{x}_i^{(t + \frac{\Delta t}{2})} - \dot{x}_i^{(t - \frac{\Delta t}{2})} \right) \quad (19)$$

$$\dot{\omega}_i = \frac{1}{\Delta t} \left(\omega_i^{(t + \frac{\Delta t}{2})} - \omega_i^{(t - \frac{\Delta t}{2})} \right) \quad (20)$$

Ao substituir estas equações nas Equações (15) e (18) são obtidas as velocidades para o tempo $t + n \Delta t/2$, tendo como resultado as Equações (21) e (22)

$$\dot{x}_i^{(t + \frac{\Delta t}{2})} = \dot{x}_i^{(t - \frac{\Delta t}{2})} + \left(\frac{F_i^{(t)}}{m} + g_i \right) \Delta t \quad (21)$$

$$\omega_i^{(t + \frac{\Delta t}{2})} = \omega_i^{(t - \frac{\Delta t}{2})} + \left(\frac{M_i^t}{I} \right) \Delta t \quad (22)$$

Determinadas as velocidades, pode-se atualizar a posição do centro da partícula, dada pela Equação (23).

$$x_i^{(t + \Delta t)} = x_i^{(t)} + \dot{x}_i^{(t + \frac{\Delta t}{2})} \Delta t \quad (23)$$

Evento: XXII Jornada de Pesquisa

TRABALHOS RELACIONADOS

Diversos trabalhos buscam analisar o escoamento de materiais granulares em silos e armazéns graneleiros utilizando o MED, como o de Langston; Tüzün e Heyes (1995) onde os autores utilizam um modelo computacional para realizar simulações bidimensionais e tridimensionais do fluxo de carga e de descarga de um material granular de um silo por meio de um funil.

Em Gonzáles-Montellano et al. (2011) os autores desenvolveram um modelo tridimensional para simular o fluxo de grãos de milho (representados por esferas) durante a descarga de um pequeno silo. Analisaram a densidade média ao final do enchimento do silo, a taxa de descarga e o padrão de escoamento. O modelo utilizado pelos autores foi ajustado, alterando as propriedades de atrito do material para obter um modelo que realize previsões aceitáveis.

Já em Coetzee e Els (2009) os autores utilizaram o MED para calibrar os valores do coeficiente de atrito do material e a sua rigidez. Demonstrando que a compressão é dependente da rigidez das partículas. Goda e Ebert (2005) analisaram o preenchimento inicial e a posterior descarga em silos. O material estudado foi gerado com partículas esféricas e os resultados obtidos aproximam-se dos dados reais, demonstrando as vantagens de utilizar o MED para compreender o comportamento do fluxo de materiais granulares.

Em Mellmann et al. (2011) os autores investigaram o fluxo de grãos de trigo em secadores de fluxo misto, utilizando simulações bidimensionais. Para tal, os autores transformaram as coordenadas em variáveis adimensionais. Os resultados permitiram compreender a características importantes do fluxo de grãos, apresentando concordância entre a simulação e os experimentos.

Em Lima (2014) o autor utiliza o MED para investigar o fluxo de grãos de soja em um secador de fluxo misto. Utilizando as propriedades dos materiais com base em dados da literatura, obtendo assim resultados com boa concordância entre os dados experimentais e os dados das simulações.

Diferente destes trabalhos, que buscaram analisar o fluxo de grãos em silos, realizar ajustes nas propriedades dos materiais, ou simular o fluxo de grãos por meio de modelos bidimensionais ou tridimensionais, neste artigo analisa-se o fluxo de grãos de soja em um aparato que replica características de um secador de fluxo misto por meio de simulações bidimensionais e tridimensionais buscando validar os parâmetros de entrada bem como as propriedades dos materiais utilizadas no modelo.

METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Inicialmente foram realizados experimentos práticos em um aparato experimental que replica uma pequena seção de um secador real, os experimentos foram gravados, a fim de obter-se o tempo de escoamento dos grãos de soja, bem como o padrão de fluxo destes grãos. Os resultados dos experimentos apresentados neste trabalho referem-se a média de 30 experimentos práticos.

Posteriormente, por meio do software YADE (Yet Another Dynamic Engine) foram realizadas simulações utilizando o MED em um ambiente computacional idêntico ao modelo do aparato real. Uma réplica computacional do aparato foi desenvolvida utilizando a linguagem de programação Python, este aparato foi utilizado tanto para as simulações tridimensionais quanto para as simulações bidimensionais. A simulação bidimensional foi realizada bloqueando rotações e translações no eixo X, desta forma, as partículas só se deslocam nos eixos Y e Z.

Evento: XXII Jornada de Pesquisa

Para a correta modelagem do fluxo dos grãos utilizando o MED é essencial que os parâmetros equivalentes as propriedades físicas e mecânicas dos corpos consituíntes da simulação estejam corretamente configurados. A Tabela 1 apresenta os parâmetros utilizados nas simulações.

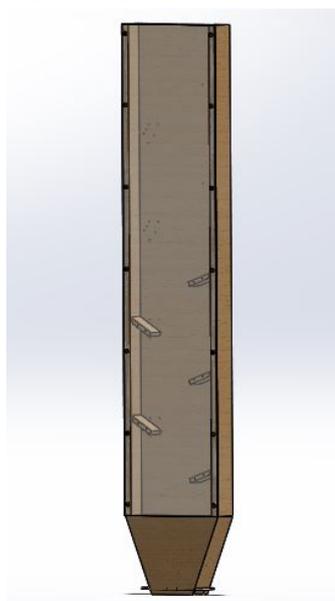
Tabela 1 - Parâmetros de entrada para modelagem MED.

Variável	Soja	Parede	Unidade
Densidade	1243	7800	Kg/m ³
Coefficiente de Poisson	0,25	0,3	-
Módulo de Young	2,6e+6	1,82e+11	Pa
Ângulo de atrito	0,4712	0,22	Radianos
Coefficiente de atrito de rolamento das partículas	0,05	-	-
Coefficiente de amortecimento	0,05	-	-
Raio médio das partículas	3,08	-	mm
Desvio padrão	0,2739	-	mm
Passo de tempo da simulação	3,27e-5	3,27e-5	seg

Fonte: adaptado de LIMA (2015).

O aparato experimental utilizado é apresentado na Figura 3. O aparato foi carregado até um determinado ponto acima da calha mais alta. A abertura inferior do aparato foi configurada em 2,5 cm, desta forma, a abertura possui dimensões de 3,2x2,5.

Figura 3 - Digitalização do aparato experimental.



Fonte: Próprio autor.

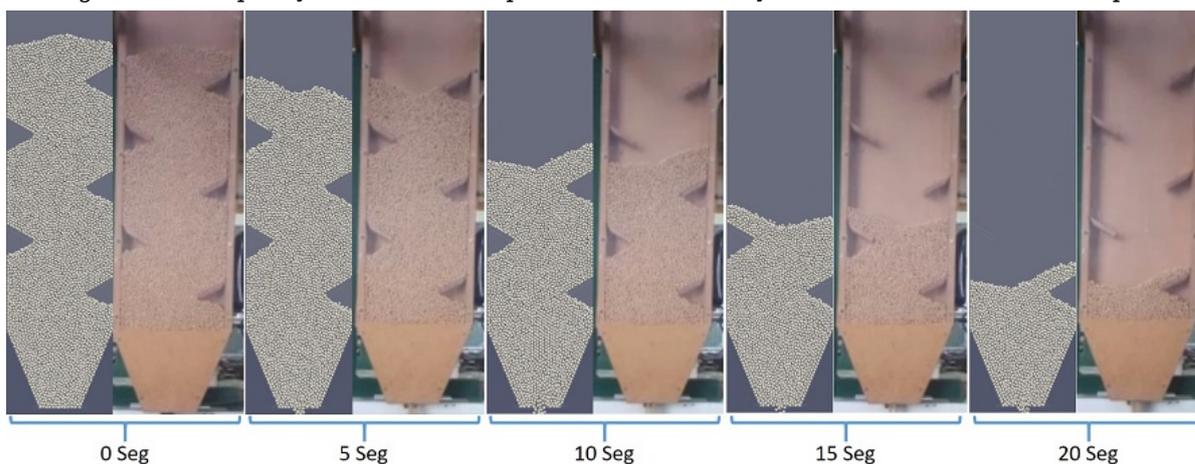
Evento: XXII Jornada de Pesquisa

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao concluir os procedimentos experimentais realizados no aparato físico e nas simulações computacionais desenvolvidas em um modelo idêntico ao aparato físico, tornou-se possível coletar e analisar os resultados obtidos. Neste contexto, foram coletadas informações dos mesmos instantes do transcorrer do experimento em ambos os procedimentos, para realizar a comparação dos resultados reais e computacionais obtidos.

As simulações 3D foram realizadas utilizando diversos parâmetros diferentes de configuração de coeficiente de amortecimento (damping), variando desde 0,01 até 0,1, buscando identificar qual valor apresenta resultados com maior aproximação visual e temporal dos resultados experimentais. A Figura 4 apresenta a comparação dos resultados experimentais práticos e da simulação computacional.

Figura 4 - Comparação resultados experimental X simulação 3D em determinados tempos.



Fonte: Próprio autor.

Analisando a Figura 4, pode-se perceber que durante todo o processo de escoamento dos grãos pelo aparato, o MED obteve um resultado com boa precisão ao prever o comportamento da massa de grãos utilizando o amortecimento de 0,05 corroborando com os resultados apresentados em (KHATCHATOURIAN, 2014). O método realizou corretamente a previsão tanto em relação ao tempo de escoamento quanto em relação ao padrão de fluxo, ficando evidente que durante todo experimento o formato da parte superior da massa simulada foi equivalente ao formato visualizado nos experimentos práticos realizados. Desta forma pode-se dizer que os dados encontrados na literatura para as propriedades físicas e mecânicas dos grãos de soja, bem como das paredes de MDF (Medium-Density Fiberboard) apresentaram resultados confiáveis na utilização do MED.

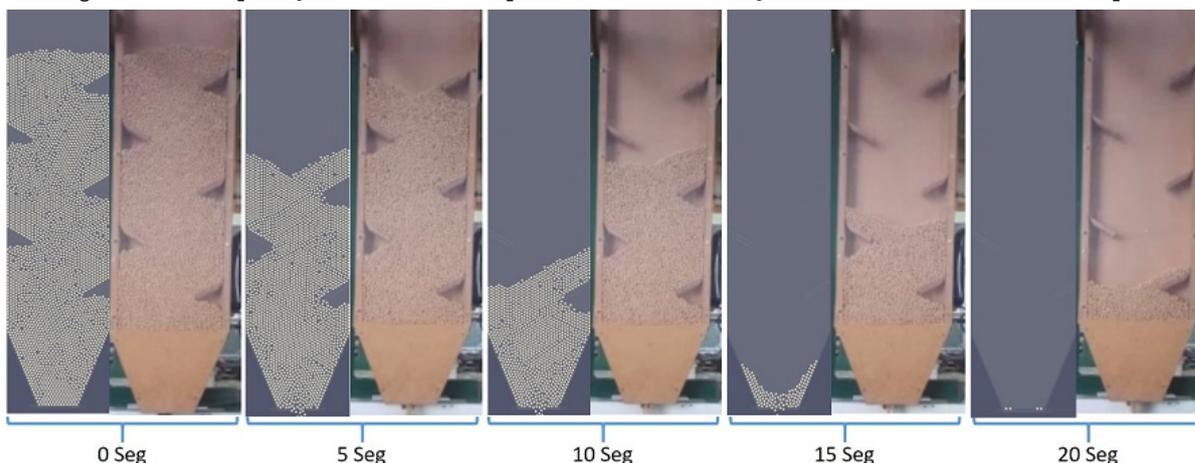
No software YADE as simulações 2D, são realizadas da seguinte maneira, deve-se garantir que as esferas simuladas formem apenas uma camada e que não toquem paredes em um dos eixos, além disso, deve-se bloquear o deslocamento das mesmas neste eixo. Nas simulações 3D realizadas anteriormente, o eixo das abscissas representava a largura do aparato, enquanto os

Evento: XXII Jornada de Pesquisa

eixos das ordenadas e cotas representavam o comprimento e a altura respectivamente. Desta forma, para realizar as simulações 2D foi criado apenas uma camada de partículas e realizou-se o bloqueio do deslocamento dos mesmos no eixo das abscissas.

Inicialmente foi realizada a simulação 2D utilizando a abertura do aparato com 2,5 cm, mantendo as mesmas configurações que foram utilizadas nas simulações 3D. Porém, ao analisar os resultados obtidos por estas simulações, verificou-se que com esta dimensão de abertura, não ocorreu escoamento. Inicialmente, atribuiu-se este erro ao fato de que a maior dimensão na abertura do aparato possui 3,2 cm, sendo esta dimensão a que controla o volume de vazão de escoamento. Na simulação 3D é a dimensão X que possui 3,2 cm de abertura. Desta forma, foi modificado o tamanho da abertura para 3,2 cm a fim de verificar se desta forma, a simulação ocorreria corretamente. A Figura 7 apresenta os resultados da simulação 2D com abertura de 3,2cm.

Figura 5 - Comparação resultados experimental X simulação 2D em determinados tempos.



Fonte: Próprio Autor.

Analisando a Figura 5, pode-se perceber que a utilização de 3,2 cm como abertura do aparato nas simulações 2D possibilitou o escoamento das partículas. Porém, este escoamento ocorreu de forma acelerada em comparação com os dados experimentais. Este resultado corrobora com os dados apresentados em (MELLMANN *et al.* 2011), onde os autores afirmam que o problema de simplificações de problemas 3D para 2D é que não se pode comparar diretamente os tempos de escoamento entre a simulação 2D e experimentais. Uma possível forma de corrigir esta discrepância no tempo de escoamento, é por meio da análise do volume de vazão da simulação 3D e determinar matematicamente o tamanho exato da abertura nas simulações 2D que permitam uma vazão proporcional, fazendo com que os resultados sejam mais aproximados.

CONCLUSÃO

Ao analisar os resultados obtidos pelas simulações computacionais realizadas pode-se constatar que o MED é um método numérico capaz de simular com boa precisão o comportamento de materiais granulares em simulações tridimensionais.

Evento: XXII Jornada de Pesquisa

Mais estudos são necessários para modelar corretamente as simulações 2D. Estudos devem ser realizados, para determinar as dimensões da abertura do aparato em simulações 2D para obter-se a vazão proporcional de partículas por segundo entre os modelos 3D e 2D.

Apesar de os resultados das simulações computacionais 2D do escoamento de grãos de soja não representarem a realidade em relação ao tempo de escoamento, as simulações apresentaram certa acurácia com relação ao padrão de fluxo, indicando a possibilidade de utilização do MED por meio do software YADE também para simulações 2D.

Para trabalhos futuros sugere-se a realização de estudo para determinar o tamanho da abertura do aparato para a correta simulação do escoamento 2D, bem como a implementação de simulações quasi-2D.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, a CAPES e a UNIJUI pelas bolsas de estudo e pesquisa.

BIBLIOGRAFIA

COETZEE, C. J.; ELS, D. N. J. Calibration of discrete element parameters and the modelling of silo discharge and bucket filling. **Computers and Electronics in Agriculture**, 2009a. v. 65, n. 2, p. 198-212.

CUNDALL, P. A.; STRACK, O. D. L. A discrete numerical model for granular assemblies. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics**. 1979. v. 29, n. 1, p. 47-65.

DUARTE, L. S. **Simulação de grãos em GPU**. 2009. 58 f. Dissertação (Mestrado em Informática). Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro.

GENG, Y. **Discrete element modelling of cavity expansion in granular materials**. 2010. 242 f. Tese (Doctor of Philosophy) - University of Nottingham, 2010

GODA, T. J.; EBERT, F. Three-dimensional discrete element simulations in hoppers and silos. **Powder technology**, 2005. v. 158, n. 1, p. 58-68.

GONZÁLEZ-MONTELLANO, C. et al. Validation and experimental calibration of 3D discrete element models for the simulation of the discharge flow in silos. **Chemical Engineering Science**, 2011. v. 66, n. 21, p. 5116-5126.

KHATCHATOURIAN, O. A.; BINELO, M.O.; LIMA, R. F. DE. Simulation of soya bean flow in mixed-flow dryers using DEM, **Biosystems Engineering**, 2014 v. 123, p. 68-76, DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2014.05.003.

LANGSTON, P.; TÜZÜN, U.; HEYES, D. Discrete element simulation of granular flow in 2D and 3D hoppers: dependence of discharge rate and wall stress on particle interactions. **Chemical Engineering Science**, 1995

Evento: XXII Jornada de Pesquisa

LIMA, R. F. DE. **Modelagem matemática do escoamento de grãos de soja em um secador com fluxo misto usando o método dos elementos discretos**. 2014. 87 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática) - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí. 2014.

LIMA, R. F. DE et al. **Simulação do escoamento de grãos de soja em um secador com fluxo contínuo**. In: Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics - CNMAC, **Anais...**, 2015. DOI: 10.5540/03.2015.003.01.0312

MELLMANN, J. et al. Moisture content and residence time distributions in mixed-flow grain dryers. **Biosystems Engineering**, 2011, v. 109, n. 4, p. 297-307.

MESQUITA, A. L. et al. 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, **Anais...** Belém, 2012.

NEVES, C. E. V.. **Comportamento de materiais granulares usando o método dos elementos discretos**. 2009. 166 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

PINTO, C. N. **Uso de Elementos Discretos na Modelagem Numérica da Perfuração de Poços de Petróleo por Brocas PDC**. 2011. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2011.

SANTOS, E.G. MESQUITA, A.L.A. GOMES, L.M. NETO, E.F. MAFRA, M.P. (2012). **Análise da forma geométrica da partícula na aplicação do método dos elementos discretos - DEM**. In: VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM, **Anais...** São Luís, 2012.

ŠMILAUER, V. CHAREYRE, B. **Yade dem formulation**. In Yade Documentation (V. Šmilauer, ed.), The Yade Project , 1st ed. (2010).

ZHU, H. P., ZHOU, Z. Y., YANG, R. Y., YU, A. B. Discrete particle simulation of particulate systems: A review of major applications and findings. **Chemical Engineering Science**. 2008. v. 63, n.23 p. 5728-5770. DOI 10.1016/j.ces.2008.08.006.