



**Eduardo Goelzer Kamphorst**

**AVALIAÇÃO DA SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA COM ROSCA  
TRANSPORTADORA DE GRÃOS DE SOJA UTILIZANDO O MÉTODO  
NUMÉRICO DE ELEMENTO DISCRETO: UM ESTUDO DE CASO**

Horizontina-RS

2021

**Eduardo Goelzer Kamphorst**

**AVALIAÇÃO DA SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA COM ROSCA  
TRANSPORTADORA DE GRÃOS DE SOJA UTILIZANDO O MÉTODO  
NUMÉRICO DE ELEMENTO DISCRETO: UM ESTUDO DE CASO**

Trabalho Final de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em engenharia mecânica na Faculdade Horizontina, sob orientação do professor Me. Paulo Augusto Soliman.

Horizontina-RS

2021

**FAHOR - FACULDADE HORIZONTINA  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova o trabalho final de curso**

**AVALIAÇÃO DA SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA COM ROSCA  
TRANSPORTADORA DE GRÃOS DE SOJA UTILIZANDO O MÉTODO  
NUMÉRICO DE ELEMENTO DISCRETO: UM ESTUDO DE CASO**

**Elaborada por:  
Eduardo Goelzer Kamphorst**

Como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em  
Engenharia Mecânica

Aprovado em: 05/07/2021  
Pela Comissão Examinadora

---

Me. Paulo Augusto Soliman  
Presidente da Comissão Examinadora - Orientador

---

Me. Adalberto Lovato  
FAHOR – Faculdade Horizontina

---

Me. Luis Carlos Wachholz  
FAHOR – Faculdade Horizontina

**Horizontina - RS  
2021**

## RESUMO

Este trabalho iniciou-se com o questionamento sobre a exatidão dos dados de vazão mássica provenientes de uma simulação utilizando-se o método de elemento discreto quando aplicado à um sistema de rosca transportadora para descarga de grãos de soja. Para respondê-lo optou-se por realizar um estudo de caso com uma metodologia quantitativa experimental, onde primeiramente realizaram-se testes experimentais de descarga de grãos de soja em um sistema de rosca transportadora de uma carreta graneleira, mensurando a vazão mássica.

Posteriormente realizaram-se simulações computacionais em condições semelhantes às dos testes experimentais, com as devidas simplificações para reduzir o custo computacional da simulação. Utilizando-se dos dados gerados pelo processamento da simulação, realizou-se o tratamento estatístico.

Os resultados tratados da simulação computacional foram comparados aos dados obtidos nos testes experimentais. Considerando-se que as simplificações das simulações não afetaram a comparação dos dados concluiu-se que a informação gerada pela simulação foi suficientemente exata para mensurar a capacidade de vazão mássica de um sistema de rosca transportadora de grãos de soja.

**Palavras-chave:** Elemento Discreto. Simulação. Rosca Transportadora. Equipamento Agrícola.

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 – Fluxogramas de exemplos de casos sem e com o uso de simulação em desenvolvimento de produtos.....  | 6  |
| Figura 2 – Partes de um sistema de rosca transportadora.....  | 9  |
| Figura 3 – Tipos de Helicoides em sistemas de roscas transportadoras: a) padrão, b) para transporte inclinado ou vertical, c) recortado e d) fita.....  | 10 |
| Figura 4 – Comparação do fluxo em simulação de DEM e no modelo reduzido nos estágios de descarga .....  | 11 |
| Figura 5 – Instantâneos da seção transversal dos preenchimentos antes do início da rotação da rosca em a). Instantâneos depois de aplicada rotação de 48rpm á rosca transportadoras em b) .....   | 12 |
| Figura 6 – Dimensões de comprimento(L), Largura (W) e espessura(T) .....  | 13 |
| Figura 7 – Comparação entre, a) Teste de empilhamento realizado e b) Simulação utilizando DEM com partículas multi esferas com 5 esferas representando sementes de soja realizados por XU et al. (2018) .....   | 14 |
| Figura 8 – Instantâneos da execução dos testes de triagem de sementes e das respectivas simulações em DEM. Em (a) instantâneo da triagem real, (b) instantâneo da simulação utilizando o software EDEM e (c) instantâneo da simulação utilizando o software DEMSLab ..... | 16 |
| Figura 9 – Comparação entre a quantidade de sementes que se depositou, em cada uma das 5 áreas no teste de triagem, e as simulações com DEM utilizando os modelos de sementes com multi esferas de 5, 9 e 13 esferas.....   | 16 |
| Figura 10 – Representação gráfica da diferença entre a interpretação do modelamento das substâncias de sistemas particulados (a) contínuos e (b) discretos .....  | 18 |
| Figura 11 – Representação dos posicionamentos e interações entre duas partículas esféricas em três momentos diferentes que representam passos de tempo distintos e seguintes (a), (b) e (c) .....   | 19 |
| Figura 12 – Exemplo de adaptação de um grão de soja para o modelo de multi esferas, com círculos representando esferas sobrepostas .....  | 22 |
| Figura 13 – Dimensões consideradas para o modelamento dos grãos com o método multi esferas com 5 esferas.....   | 23 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 14 – Partícula gerada com as coordenadas e posições baseadas nas medidas dos grãos de soja.....   | 24 |
| Figura 15 – Gráfico que demonstra a influência do teor de água no módulo de deformação do grão de soja.....  | 24 |
| Figura 16 – Desenho em CAD, fornecido pela empresa Kampag Industrial Ltda .....  | 25 |
| Figura 17 – Imagem de um momento da pesagem da carreta graneleira acoplada ao trator com o tratorista, no dia 12 de setembro de 2020.....  | 27 |
| Figura 18 – Imagens de um momento de carga da carreta graneleira na moega da cooperativa Agren, à esquerda a vista superior e à direita a vista traseira. ....   | 28 |
| Figura 19 – Instantâneos retirados do vídeo de uma das descargas realizadas.....   | 28 |
| Figura 20 – Fluxograma que representa a sequência de acontecimentos para a parametrização da simulação.....  | 30 |
| Figura 21 – Modelamento com 5 esferas realizado com os posicionamentos de O1, O2, O3, O4 e O5 .....  | 31 |
| Figura 22 – Imagem do medidor Motomco 99FBI realizando a medição da amostra de grãos de soja no dia 23 de setembro de 2020, resultando em 11,4 % de teor de umidade .....  | 32 |
| Figura 23 – Geometrias simplificadas para a simulação, em vermelho a rosca transportadora e em cinza o conjunto da caixa coletora e o tubo de descarga, todos fornecidos pela empresa Kampag Industrial Ltda ..... | 34 |
| Figura 24 – Representação geométrica do trem de engrenagens pertencente à caixa de transmissão que transmite a rotação da TDP do trator ao eixo da rosca transportadora.....                                       | 35 |
| Figura 25 – Representação do vetor da rotação da rosca transportadora .....  | 36 |
| Figura 26 – Momento em que a fábrica estática terminou de criar 1078669 partículas que representam grãos de soja.....  | 37 |
| Figura 27 – Modelo de contato previamente carregado no software EDEM Academic Simulator 2020 .....   | 38 |
| Figura 28 – Momento em que as partículas sobrepuseram a geometria do sistema de rosca transportadora, causando um vazamento de partículas .....  | 39 |
| Figura 29 – Figuras de 9 instantes de tempo, representando o resultado visual da simulação .....   | 41 |
| Figura 30 – Sensor de vazão mássica, com uma sessão de 250mm de raio, posicionado próximo à base do tubo de descarga .....   | 42 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 31 – Imagem representando o segundo sensor de vazão mássica, com sessão de 250mm de raio, posicionado próximo ao topo do tubo de descarga .....   | 42 |
| Figura 32 – Gráfico de linha gerado pelos dados fornecidos pelo Sensor 1. Eixo ordenado representando a vazão mássica e eixo das abcissas representando o tempo equivalente .....  | 43 |
| Figura 33 – Gráfico de linha gerado pelos dados fornecidos pelo Sensor 2. Eixo ordenado representando a vazão mássica e eixo das abcissas representando o tempo equivalente .....  | 44 |
| Figura 34 – Gráfico de linhas gerado pelos dados dos Sensores 1 e 2, as médias aritméticas simples dos sensores e a média aritmética simples dos resultados experimentais. Eixo ordenado representando a vazão mássica e eixo das abcissas representando o tempo equivalente ..... | 45 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 – Dados mensurados nas descargas dos grãos, usados para calcular a vazão mássica.....   | 29 |
| Tabela 2 – Medições das dimensões dos 6 grãos de soja.....   | 30 |
| Tabela 3 – Parâmetros que representam todas características mecânicas das partículas de soja necessárias na simulação .....            | 32 |
| Tabela 4 – Parâmetros que representam todas características mecânicas da geometria que representa o sistema mecânico na simulação..... | 35 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E/OU SIGLAS

CAD – *Computer Assisted Design*

DEM – *Discrete Element Method*

$F_n$  – Força normal

$\delta_n$  – Deformação normal

$E^*$  – Módulo de Young equivalente

$R^*$  – Raio Equivalente

$E$  – Módulo de Young

$\nu$  – Coeficiente de Poisson

$R$  – Raio

$F_n^d$  – Força normal de amortecimento

$m^*$  – Massa equivalente

$v_n^{rel}$  – Componente normal da velocidade relativa

$S_n$  – Rigidez normal

$F_t$  – Força tangencial

$S_t$  – Rigidez tangencial

$\delta_t$  – Deformação tangencial

$G^*$  – Módulo de cisalhamento equivalente

$F_t^d$  – Força tangencial de amortecimento

$v_t^{rel}$  – Componente tangencial da velocidade relativa

$\mu_s$  – Coeficiente de atrito estático

$\tau$  – Torque

$R_i$  – Distância do ponto de contato ao centro de massa

$\mu_r$  – Coeficiente de atrito de rolagem

$w_i$  – Unidade do vetor de velocidade angular do objeto no ponto de contato

## SUMÁRIO

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO</b> .....  | <b>3</b>  |
| 1.1      | TEMA .....   | 4         |
| 1.2      | DELIMITAÇÃO DO TEMA.....   | 4         |
| 1.3      | PROBLEMA DE PESQUISA .....   | 4         |
| 1.4      | HIPÓTESES.....   | 5         |
| 1.5      | JUSTIFICATIVA .....  | 5         |
| 1.6      | OBJETIVOS .....  | 7         |
| 1.6.1    | <b>Objetivo geral</b> .....  | <b>7</b>  |
| 1.6.2    | <b>Objetivos específicos</b> .....   | <b>7</b>  |
| <b>2</b> | <b>REVISÃO DA LITERATURA</b> .....   | <b>8</b>  |
| 2.1      | SISTEMA DE ROSCA PARA TRANSPORTE DE GRÃOS.....   | 8         |
| 2.2      | DEM APLICADO À MATERIAIS GRANULARES.....   | 10        |
| <b>3</b> | <b>METODOLOGIA</b> .....   | <b>17</b> |
| 3.1      | O MÉTODO NUMÉRICO DE ELEMENTO DISCRETO .....   | 17        |
| 3.1.1    | <b>Modelo de contato</b> .....   | <b>19</b> |
| 3.1.2    | <b>Passo de Tempo</b> .....  | <b>21</b> |
| 3.1.3    | <b>Modelamento e distribuição das partículas</b> .....   | <b>21</b> |
| 3.1.4    | <b>Propriedades dos grãos</b> .....  | <b>24</b> |
| 3.2      | GEOMETRIA DO SISTEMA MECÂNICO.....   | 25        |
| 3.3      | TESTES EXPERIMENTAIS .....   | 26        |
| <b>4</b> | <b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS</b> .....  | <b>27</b> |
| 4.1      | REALIZAÇÃO DOS TESTES EXPERIMENTAIS .....  | 27        |
| 4.2      | PARAMETRIZAÇÃO DA SIMULAÇÃO .....  | 30        |
| 4.2.1    | <b>Modelamento da partícula do grão de soja</b> .....  | <b>30</b> |
| 4.2.2    | <b>Definição do material e da distribuição das partículas</b> .....                                | <b>31</b> |
| 4.2.3    | <b>Importação da geometria do sistema de rosca transportadora</b> .....                            | <b>33</b> |
| 4.2.4    | <b>Definição do material do sistema de rosca transportadora</b> .....                              | <b>34</b> |
| 4.2.5    | <b>Atribuição do movimento à rosca transportadora</b> .....  | <b>35</b> |
| 4.2.6    | <b>Disposição dos grãos no sistema</b> .....   | <b>36</b> |
| 4.2.7    | <b>Atribuição do modelo de contato</b> .....   | <b>37</b> |
| 4.2.8    | <b>Definições das condições do ambiente</b> .....  | <b>38</b> |
| 4.2.9    | <b>Escolha do passo de tempo</b> .....   | <b>38</b> |
| 4.2.10   | <b>Escolha do tamanho de célula de rede construtiva da geometria da rosca transportadora</b> ..... | <b>39</b> |
| 4.3      | RESULTADOS DO PROCESSAMENTO DA SIMULAÇÃO .....   | 40        |
| 4.4      | ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS .....   | 44        |
|          | <b>CONSIDERAÇÃO FINAL</b> .....  | <b>46</b> |
|          | <b>REFERÊNCIAS</b> .....   | <b>47</b> |
|          | <b>APÊNDICE</b> .....  | <b>49</b> |
|          | <b>ANEXO</b> .....   | <b>56</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

No desenvolvimento de novos produtos e tecnologias mecanizadas para aplicação em plantio, colheita ou transporte de grãos, surge um importante fator limitante, o conhecimento do comportamento do material dentro destes equipamentos. Para entender este comportamento realiza-se a construção de modelos reais para testes, o que torna o desenvolvimento da tecnologia mais oneroso e lento.

Para evitar custos com montagem e possível sucateamento de modelos reais, a aplicação de um método de simulação confiável se faz necessário. Métodos de elemento discreto já são usados em simulações de materiais particulados e a caracterização destas partículas são de importância para o sucesso de uma simulação exata.

Pesquisas já vem sendo realizadas para buscar o emprego de modelos satisfatórios em métodos de elemento discreto para grãos. Xu et al. (2018) fizeram a modelagem de um grão de soja para aplicação em simulações com elemento discreto, utilizando experimentos de empilhamento para medição do ângulo de repouso e triagem de fluxo automático para sua análise, foi validada a utilização de um modelo que é feito com um método de preenchimento de esferas.

A aplicação desta simulação para mecanismos que utilizam sistemas de rosca transportadora, popularmente conhecidos como roscas varredoras ou sem fins já é feita, mas a avaliação deste método para aplicação em sistemas mecânicos é válida pois colabora com a quantificação da diferença físico/numérico em simulações de relativo baixo custo computacional.

Este trabalho é motivado por situações de desenvolvimento e engenharia de produtos aplicados a grãos. Pensando na redução de tempo e custo para verificar a vazão mássica em novos modelos mecanizados para transbordo do produto colhido, tem-se a avaliação do método numérico elemento discreto que poderá simular, através de *software*, a aplicação de modelos projetados em *computer assisted design* (CAD). Fazendo com que seja reduzida ou eliminada a necessidade de construção de modelos físicos para análise dos projetos.

A avaliação é realizada com a verificação e comparação de resultados mensurados em experimentos reais, utilizando-se um sistema de rosca transportadora, com os resultados obtidos no pós processamento de simulações com

o método de elemento discreto, realizando-se análises estatísticas. Os resultados deste trabalho têm importância na verificação da acuracidade de tal simulação que, se aprovada, possibilita a redução de custo e tempo no desenvolvimento de projetos de produtos voltados, principalmente, para o mercado de grãos, sementes e objetos particulados semelhantes.

### 1.1 TEMA

O presente trabalho trata da avaliação de uma simulação que utiliza o método de elemento discreto aplicado à um sistema mecânico utilizado para transporte de grãos. Verifica-se a acuracidade dos seus resultados quanto a vazão mássica, comparando dados experimentais com os obtidos numericamente.

### 1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Este trabalho delimita-se à avaliação da simulação de acordo com as condições existentes nos testes experimentais, realizados com um sistema de rosca transportadora de grãos de soja, onde se mede a vazão mássica e as condições necessárias para que posteriormente se consiga aplicar condições semelhantes na simulação. De forma que se consiga utilizá-la para gerar dados de vazão mássica, e então compará-los aos dados obtidos nos testes experimentais.

### 1.3 PROBLEMA DE PESQUISA

Este trabalho tem como problema a ser resolvido, a solução da dúvida sobre a acuracidade do resultado de uma simulação de transporte de grãos, interpretados como partículas, utilizando-se do método numérico de elemento discreto, quando comparado à uma situação real de transbordo de grãos, realizando-se medições de vazão em um mecanismo de transporte de grãos que utiliza rosca transportadora.

Após a coleta de dados se farão simulações, caracterizando-as com dados de acordo com as condições reais. Para que, posterior ao tratamento de dados, seja feita a comparação dos resultados experimentais aos da simulação.

Com base no que foi dito acima, caracterizamos o problema de pesquisa com a seguinte pergunta: Uma simulação de transporte de partículas em um sistema mecânico de rosca transportadora, utilizando o método de elemento discreto, gera

resultados de vazão de grãos que sejam suficientemente precisos para determinada aplicação, quando comparados aos resultados de um experimento real?

#### 1.4 HIPÓTESES

Pressupondo os resultados para uma possível resposta para a solução do problema, por intuição do pesquisador, tem-se três hipóteses:

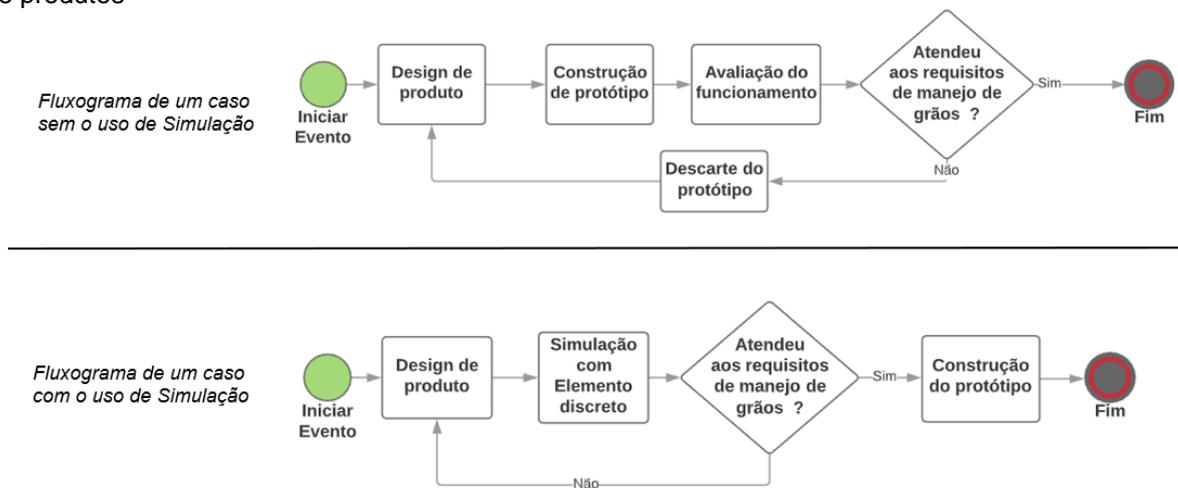
- Uma simulação de partículas que utiliza o método de elementos discretos, resulta em informação de vazão mássica com mais de 90% de exatidão, em comparação à vazão mássica medida em um modelo real. Portanto, a simulação com método numérico de elemento discreto, que interpreta grãos de soja como partículas é viável, para a compreensão de seu comportamento a nível de projeto de engenharia, em um sistema mecânico de rosca transportadora, em termos de vazão mássica.
- Uma simulação de partículas de grãos de soja que utiliza o método de elementos discretos, simulando um número elevado de partículas em um sistema de rosca transportadora necessita um tempo de processamento superior à 20 dias, tornando inviável a comparação dos resultados de vazão mássica da simulação ao de um modelo real.
- Uma simulação de partículas de grãos de soja que utiliza o método de elementos discretos, aplicados em um sistema de rosca transportadora, mesmo em situações de número elevado de partículas, quando simplificada, torna viável, com uma exatidão de 90%, a comparação dos seus resultados de vazão mássica com os resultados de vazão mássica de um modelo real.

#### 1.5 JUSTIFICATIVA

No dia a dia de empresas que estão sempre buscando a melhoria de desempenho de seus produtos, existe um enorme custo na execução de protótipos para a avaliação dos seus desempenhos, quando estes não provam ser suficientemente bons na sua aplicação, neste caso em manejo de grãos, tem-se o sucateamento de muitas de suas partes e até do seu todo.

A execução deste trabalho se faz importante para entendermos a acuracidade do método utilizado para a simulação do transporte de grãos. Pode-se utilizar o método sem a avaliação, mas não saberemos se os resultados estão sendo fiéis à realidade, podendo gerar até mesmo um atraso e maior custo em situações de desenvolvimento de produtos e tecnologias para transporte de grãos. Com a comprovação da acuracidade dos dados, gerados pelo método, tem-se o efeito contrário, gerando a redução de tempo e de custo de projeto, conforme Figura 1.

Figura 1 – Fluxogramas de exemplos de casos sem e com o uso de simulação em desenvolvimento de produtos



**Fonte:** O autor

Além disso, durante o curso de engenharia mecânica não se tem o aprendizado sobre como equacionar materiais como grãos para que se entenda seu comportamento, pois dentro do meio estamos acostumados a procurar soluções deste tipo. A questão vem à tona à medida que se aprendem os mais variados métodos para equacionamento do comportamento dos mais variados tipos de materiais, mas a dúvida sobre como se comportará um material particulado ainda se mantém. Portanto este trabalho também tem como objetivo a avaliação deste método numérico para entender o comportamento de grãos, por ser um conhecimento necessário para um Engenheiro Mecânico que atuará nesta área de conhecimento.

## 1.6 OBJETIVOS

### 1.6.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar uma simulação de partículas representando grãos de soja, para saber se esta é suficientemente exata para ser utilizada na avaliação da vazão mássica em mecanismos para transportes de grãos que estejam em fase de projeto de produto, ou até para melhorias em produtos correntes. Com isso, podendo gerar redução de custos e de tempo em setores de engenharia de produto na indústria.

### 1.6.2 Objetivos específicos

Alinhados aos objetivos gerais, os objetivos específicos neste trabalho são os seguintes:

- a) Coletar dados de vazão mássica em um sistema de rosca transportadora de grãos de soja.
- b) Aplicar a metodologia de simulação utilizando elementos discretos para replicar o sistema de rosca transportadora descarregando grãos de soja para medir a vazão mássica.
- c) Otimizar a simulação para realizá-la dentro da limitação de capacidade de processamento que existe.
- d) Comparar os dados de vazão mássica, coletados em um sistema de rosca transportadora de grãos de soja, aos dados obtidos em uma simulação utilizando elemento discreto.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Para que este trabalho seja possível, é necessário recorrer a algumas literaturas de trabalhos existentes sobre o assunto. Para Köche (1999), a investigação científica se dá quando se percebe que o conhecimento existente é insuficiente para explicar algum problema ou a solução deste.

Se pensa que sem o conhecimento já existente, a dúvida não existiria. Este mesmo conhecimento vem de algumas fontes de experimentos e pesquisas já realizadas, que serão apresentadas neste capítulo.

### 2.1 SISTEMA DE ROSCA PARA TRANSPORTE DE GRÃOS

O sistema mecânico que é utilizado neste trabalho é um sistema de transporte de grãos que utiliza rosca transportadora, também conhecido como *auger*, rosca varredora, transportador helicoidal, rosca alimentadora, alimentador de rosca ou sem fim. O seu uso é motivado pela sua presença abrangente no mercado de máquinas e implementos agrícolas para o manejo de grãos, por ser um sistema que mantém uma vazão mássica constante e de fácil mensuração.

Segundo Metcalf (1965), um alimentador de rosca compreende um eixo cilíndrico com uma ou mais asas helicoidais fixas perpendicularmente, ou levemente inclinadas a este, que giram dentro um enclausuramento, onde o material que será transportado é alimentado por um lado e sai pelo outro. Um sistema de simples funcionamento, onde o material que deverá ser transportado preenche o espaço disponível entre o eixo cilíndrico, as asas helicoidais e o enclausuramento, formando um ou mais feixes helicoidais de material, dependendo do número de asas helicoidais.

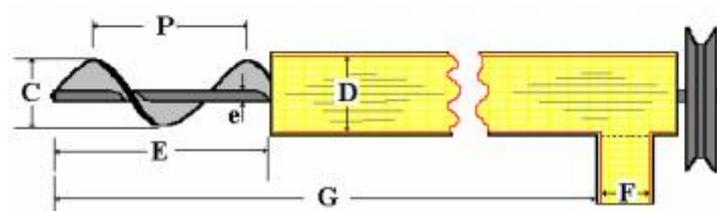
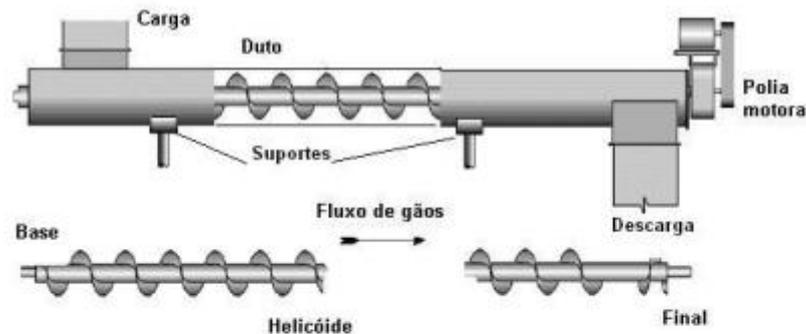
Também no trabalho de Metcalf (1965) explicou-se que a rotação da rosca tende a mover o feixe de material no sentido radial do sistema, movimento que sofre interferência pelo atrito do material transportado com o material do enclausuramento. Para evitar esse esforço de atrito, o feixe acaba movendo-se no sentido axial do sistema, movimento que sofre interferência pelo atrito com o material das asas helicoidais. Para que os esforços causados pelos atritos, do material transportado tanto com o enclausuramento como com a asa helicoidal sejam mínimos, o feixe de material acaba movendo-se tanto no sentido axial quanto no radial.

Sendo este um mecanismo utilizado para o transporte de grãos, se dá a importância da eficiência da vazão mássica que possa realizar no material transportado, portanto, o tempo que este entra por um lado e sai pelo outro é o que se deseja entender, bem como sua massa na entrada e na saída. Para uma melhor vazão mássica do sistema, favorecendo o movimento no sentido axial, um tubo com maior rugosidade e asas helicoidais com menor rugosidade deve ser utilizados.

No capítulo 12 do livro de Silva et al. (2008) descreveu-se um pouco mais as partes essenciais da rosca helicoidal, sendo elas, o helicóide ou asas helicoidais juntamente do eixo, o duto condutor ou enclausuramento, a polia motora, o suporte e as extremidades.

A Figura 2 mostra as partes essenciais, e a partir dela podemos perceber algumas dimensões importantes para se saber a capacidade de transporte de uma rosca transportadora. São elas, o diâmetro do helicóide ( $C$ ), o diâmetro do eixo do helicóide ( $e$ ) e o passo da rosca transportadora ( $P$ ). Precisa-se entender estas dimensões pra que posteriormente possa ser realizado o processo analítico para o cálculo de vazão mássica.

Figura 2 – Partes de um sistema de rosca transportadora



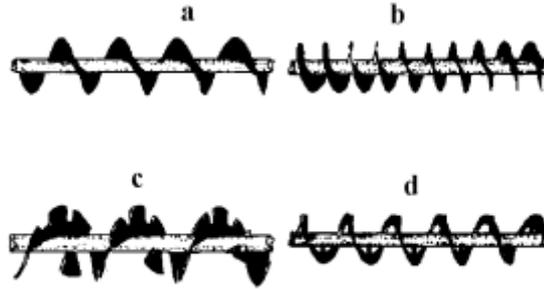
**Dimensões importantes para o cálculo do transportador helicoidal**

$P$  = Passo,  $D$  = Diâmetro do duto,  $C$  = Diâmetro do helicóide,  $E$  = Exposição,  $e$  = Diâmetro do Eixo,  $F$  = Diâmetro da descarga,  $G$  = Comprimento do helicóide

Fonte: Adaptado de Silva et al. (2008)

Na mesma literatura de Silva et al. (2008), citou-se alguns tipos de helicoides, conforme Figura 3, e distinguiu-se suas geometrias de acordo com as suas aplicações.

Figura 3 – Tipos de Helicoides em sistemas de roscas transportadoras: a) padrão, b) para transporte inclinado ou vertical, c) recortado e d) fita



**Fonte:** Adaptado de Silva et al. (2008)

Neste trabalho, o tipo de rosca que é usado é o helicóide para transporte inclinado (b), pois o transbordo dos grãos se dará de baixo para cima.

## 2.2 DEM APLICADO À MATERIAIS GRANULARES.

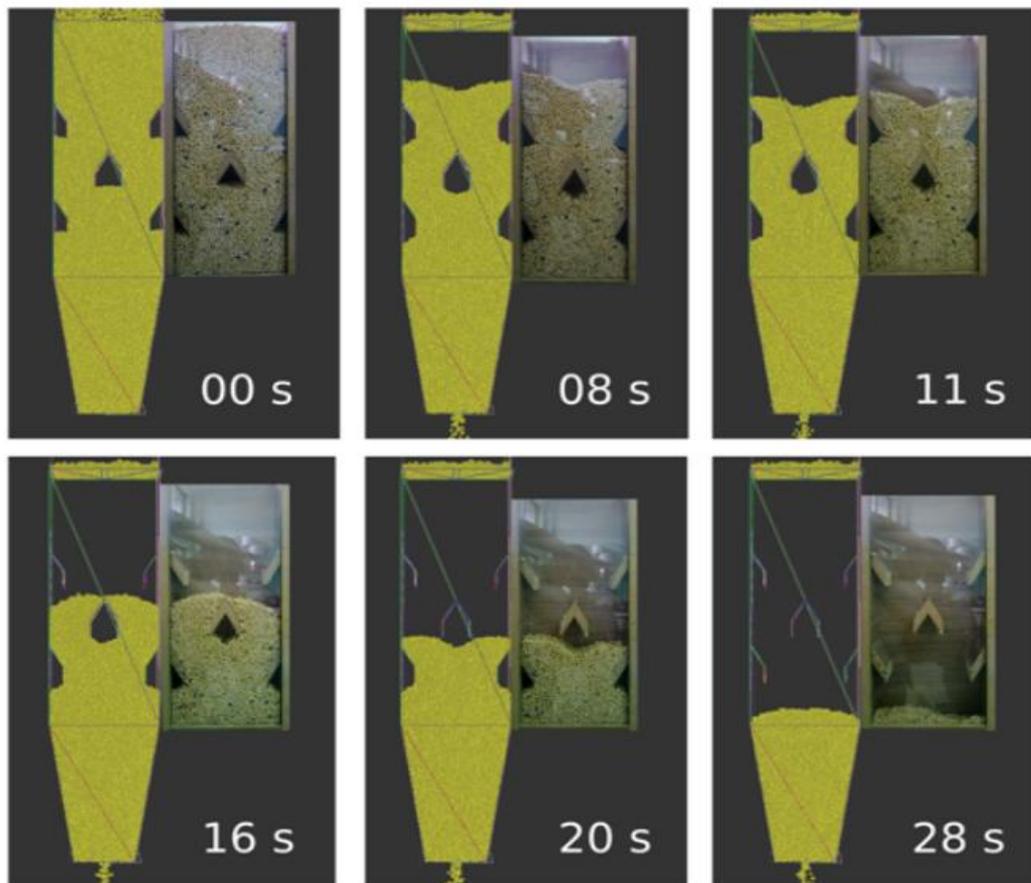
Para poder considerar algumas complexidades no entendimento do comportamento do material transportado pelo mecanismo, buscando resultados mais completos de eficiência de vazão mássica, sem a construção de protótipos, opta-se pela utilização do método de elemento discreto (DEM). Introduzido por Cundall et al. (1979), onde justifica-se a maior eficácia do método para este tipo de análise por ser mais flexível que os métodos analíticos e pela facilidade de obter informações em qualquer etapa do método quando comparado à modelos reais.

O método considera o equilíbrio de forças entre as partículas e os seus respectivos deslocamentos, bem como suas interações entre forças e deslocamentos com cada parte dos contornos do sistema. Para tal, faz-se iterações de equações dentro de um passo de tempo fixado e muito reduzido. Estas equações consideram, dentro deste passo de tempo, as variáveis de velocidade e de aceleração como constantes, possibilitando o cálculo das forças e deslocamentos entre partículas e contornos sem necessitar altos recursos de memória computacional.

No trabalho de De Lima et al. (2016) tratou-se de conhecer o comportamento de grãos de soja em um secador típico de fluxo misto com calhas, utilizou-se o DEM e construiu-se um modelo reduzido de um secador, com uma placa de acrílico

fazendo o fechamento de um dos lados do modelo, podendo assim, ser visualizado o comportamento dos grãos para compará-los aos resultados adquiridos na simulação com DEM, conforme Figura 4.

Figura 4 – Comparação do fluxo em simulação de DEM e no modelo reduzido nos estágios de descarga



**Fonte:** Adaptado de De Lima et al. (2016)

Com a análise visual do fluxo de grãos de soja realizada por De Lima et al. (2016), percebeu-se a capacidade do método para esta aplicação, tanto no tempo de escoamento quanto para a comparação com o padrão de escoamento dos grãos dentro do aparato.

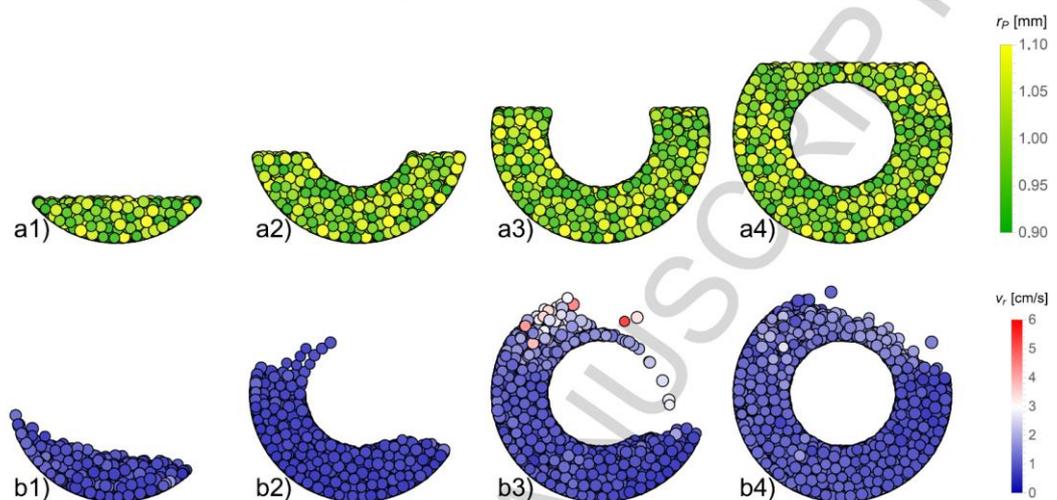
Com o trabalho de Orefice et al. (2017) realizou-se a investigação da relação entre o diâmetro do eixo do sistema de rosca transportadora e a taxa de vazão volumétrica, e também a influência do coeficiente de atrito entre partículas e material do sistema de rosca transportadora. Para tanto utilizou-se o Método de elemento discreto (DEM), generalizando-se o material transportado para aplicação em materiais granulares, portanto utilizaram-se esferas com raio de  $0,1\text{cm} \pm 10\%$  e um modelo de interação Hertziana com Módulo de Young de 5 MPa e Coeficiente de

Poisson de 0,45, com um coeficiente de atrito entre partículas de 0,5 e entre partículas e material do sistema de 0,25. Os testes foram realizados com uma rotação de rosca transportadora, disposta horizontalmente, variando de 27 a 48 rpm, suficientemente baixas para que não acontecesse o movimento radial das partículas no sistema.

Em seu trabalho esperava-se que a vazão volumétrica fosse proporcional à velocidade de rotação e nível de preenchimento, e também que o aumento da vazão volumétrica fosse linearmente proporcional ao aumento de rotação da rosca. Mas ocorreram dois efeitos que alteraram esta perspectiva, e que foram apenas percebidos pela utilização do DEM, o confinamento lateral dos grãos e o efeito de fluxo contrário, que basicamente dependem tanto do nível de preenchimento do sistema como da velocidade da rosca.

Na Figura 5 se pode perceber o confinamento lateral em b1), b2) e b3), quando o nível de preenchimento do material atinge dimensão superior ao da altura da parte superior do eixo da rosca transportadora, em b3), tem-se o efeito de fluxo contrário. Em b4) quando o nível de preenchimento supera a altura da parte superior do eixo da rosca transportadora, os dois efeitos acabam cessando.

Figura 5 – Instantâneos da seção transversal dos preenchimentos antes do início da rotação da rosca em a). Instantâneos depois de aplicada rotação de 48rpm à rosca transportadoras em b)

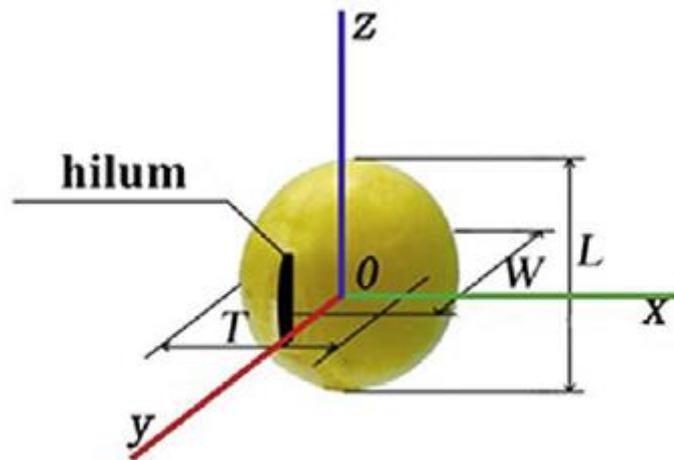


**Fonte:** Orefice et al. (2017)

Portanto a utilização do DEM neste caso, provou que a vazão volumétrica e o aumento desta, não são linearmente proporcionais à velocidade de rosca e ao nível de preenchimento de material granular no sistema.

Para entender as características dimensionais e de distribuição dos grãos de soja para aplicá-las neste trabalho, utilizaram-se os resultados do trabalho de Xu et al. (2018), onde executou-se a verificação para o modelamento aproximado de uma partícula de semente de soja usando o DEM, fazendo medições dos formatos em 4 variedades diferentes de grãos de soja, utilizando-se uma tecnologia de laser em três dimensões para escanear o formato das sementes para posteriormente utilizá-las na sua modelagem. Com um paquímetro mediu-se as dimensões de comprimento, largura e espessura, conforme Figura 6.

Figura 6 – Dimensões de comprimento(L), Largura (W) e espessura(T)

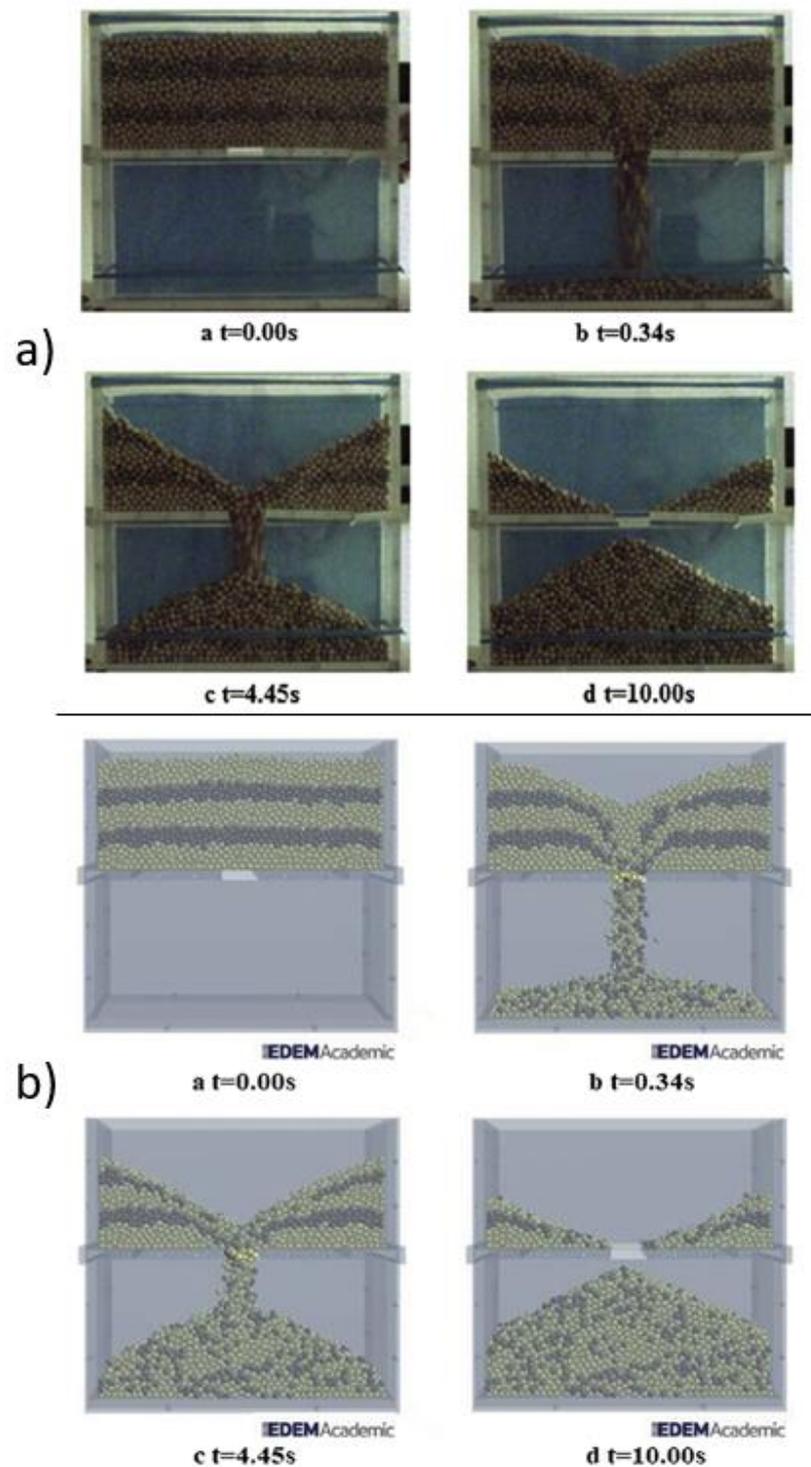


**Fonte:** Adaptado de Xu et al. (2018)

Com as dimensões principais e formatos mensuradas utilizou-se o método de multi esferas, aproximando-se as dimensões para um modelamento onde esferas sobrepostas compõem um sólido que representa a semente de soja. Os modelamentos foram feitos com 5, 9 e 13 esferas. Posteriormente realizou-se análise experimental de empilhamento e de triagem de grãos e comparou-se aos resultados de simulações em DEM, utilizando-se em 3 simulações distintas os modelos de 5, 9 e 13 esferas na modelagem das sementes de soja.

Na Figura 7 podemos ver os resultados do teste de empilhamento realizado por Xu et al. (2018), com imagens de instantes do teste em a), comparados à b), onde demonstram a simulação em DEM, com as imagens dos mesmos instantes das imagens de a).

Figura 7 – Comparação entre, a) Teste de empilhamento realizado e b) Simulação utilizando DEM com partículas multi esferas com 5 esferas representando sementes de soja realizados por XU et al. (2018)



**Fonte:** Adaptado de Xu et al. (2018)

Ao comparar os fatores de escoamento de grãos de vazão e de padrão da disposição dos grãos, conclui-se que o método de modelagem de multi esferas com 5 esferas, por ser o modelo que utilizou a menor quantidade de memória de

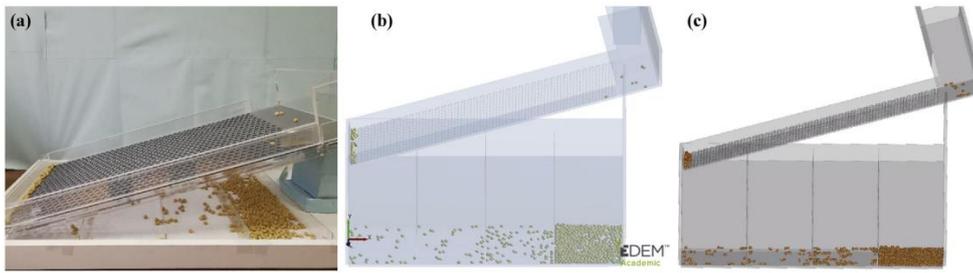
processamento e por resultar em dados com acuracidade suficiente em relação ao teste de empilhamento, é um modelo confiável para representar sementes de soja em uma simulação com DEM.

Considerando que os equacionamentos das interações entre as partículas de soja e entre partículas de soja e o mecanismo necessitam de condições de contorno, como as características mecânicas de ambos, temos como referência o trabalho de Yan et al. (2020), onde realizou-se um método de modelamento generalizado de sementes de soja baseado no DEM. Assim como Xu et al. (2018), também se utilizou o método multi esferas com 5 esferas em parte de seus testes, mas o mais interessante foi a avaliação de características mecânicas utilizadas para os parâmetros em simulação com DEM. Para definir-se a densidade das sementes de soja utilizou-se o método de picnômetro, já o módulo de elasticidade foi mensurado com teste de compressão. Para conhecer o coeficiente de atrito estático entre as partículas de soja, e entre as partículas de soja e o filtro de aço galvanizado, utilizou – se um método de declive juntamente de uma câmera de alta velocidade. O coeficiente de restituição foi encontrado realizando um teste de pêndulo simples, bem como filmagem da queda de semente utilizando uma câmera de alta velocidade.

Para avaliar tanto as características mecânicas utilizadas na simulação quanto as dimensões e modelagem de grãos, executou-se a comparação das simulações em DEM com os experimentos de triagem de grãos e de ângulo de repouso. Obtendo resultados suficientemente precisos para que se validasse a utilização das características mecânicas dos grãos.

A Figura 8 mostra os resultados visuais para comparação entre o teste de triagem de sementes e os resultados de simulações em DEM, Onde no teste de triagem dividiu-se a bandeja abaixo do filtro em 5 áreas onde os grãos se dispunham após a triagem.

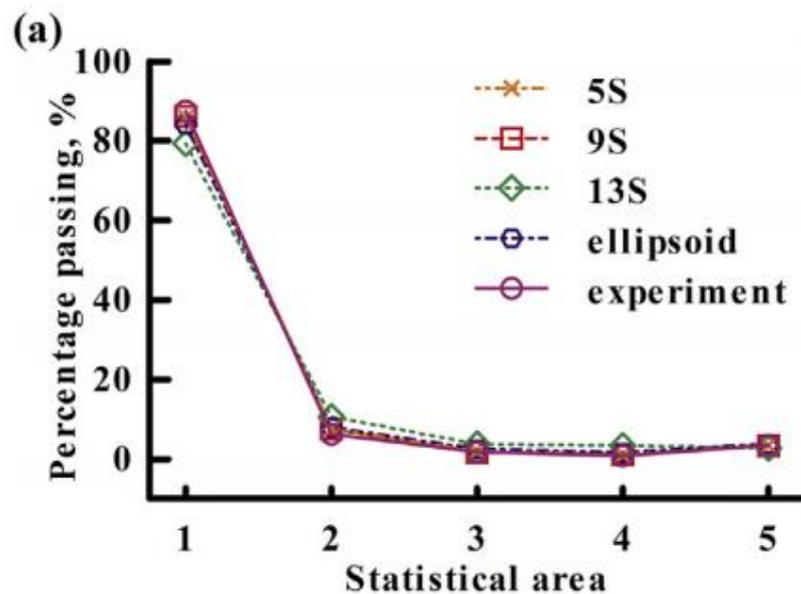
Figura 8 – Instantâneos da execução dos testes de triagem de sementes e das respectivas simulações em DEM. Em (a) instantâneo da triagem real, (b) instantâneo da simulação utilizando o software EDEM e (c) instantâneo da simulação utilizando o software DEMSLab



**Fonte:** Adaptado de Yan et al. (2020)

Para entendimento da acuracidade da simulação temos os dados no gráfico da Figura 9, apresentado nos resultados do trabalho.

Figura 9 – Comparação entre a quantidade de sementes que se depositou, em cada uma das 5 áreas no teste de triagem, e as simulações com DEM utilizando os modelos de sementes com multi esferas de 5, 9 e 13 esferas



**Fonte:** Adaptado de Yan et al. (2020)

Se pode notar que além do método multi esferas com 5 esferas atender aos requisitos de acuracidade, as características mecânicas utilizadas podem ser aplicadas às sementes e aos grãos de soja.

### 3 METODOLOGIA

Para este estudo de caso utilizaremos um formato quantitativo-experimental de teste, que tem sua origem mostrada no trecho:

O responsável pela chamada revolução científica moderna foi Galileu, ao introduzir a matemática e a geometria como linguagens da ciência e o teste quantitativo-experimental das suposições teóricas como o mecanismo necessário para avaliar a veracidade das hipóteses e estipular a chamada verdade científica, mudando radicalmente a forma de produzir e justificar o conhecimento científico. (KÖCHE, 1999, p.52)

O que nos mostra a necessidade de mensurar grandezas físicas neste tipo de trabalho para que se tenha sucesso em sua análise. Portanto utilizar-se-ão instrumentos de metrologia e ferramentas como softwares de simulação e *computer assisted design* (CAD), realizando amostragens e análise estatística, reforçando a verdade científica deste trabalho.

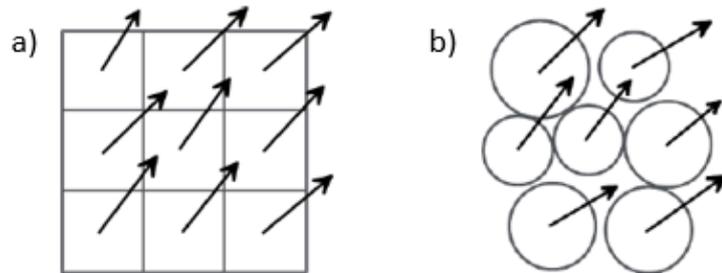
A disponibilidade de *softwares* que executam a simulação com o método numérico de elemento discreto é escassa e os ditos *Open Source*, de fornecimento gratuito, são ainda mais difíceis de utilizar por não estarem bem otimizados para grandes simulações, portanto, para a execução deste trabalho selecionou-se o *EDEM Academic Simulator*. Este foi disponibilizado por meio de pedido formal ao fornecedor, anexado a este trabalho como Anexo 1, e detentor dos direitos do mesmo, a *Altair Engineering, inc.*, que no dia 14 de setembro de 2020 forneceu uma licença de 3 meses de uso do *software*, com a disponibilidade de uso de 20 núcleos de processamento possibilitando a execução da simulação. O processador utilizado para o processamento da simulação foi um da marca AMD e modelo Ryzen 3950X de propriedade do autor deste trabalho.

#### 3.1 O MÉTODO NUMÉRICO DE ELEMENTO DISCRETO

Segundo a *Altair Engineering, inc.* (2020) quando se fala em simulação de sistemas particulados existem duas formas principais de aproximação, o contínuo, regido por equações diferenciais onde se assume, no modelamento da substância, que ela preenche todos os espaços existentes dentro do aglomerado de partículas, ignorando o comportamento da interação entre partículas; e o discreto, que interpreta cada partícula como uma entidade distinta e idealiza o material granular

como uma montagem de partículas, onde o comportamento macroscópico destas partículas é resultado de interações individuais entre elas, vide Figura 10.

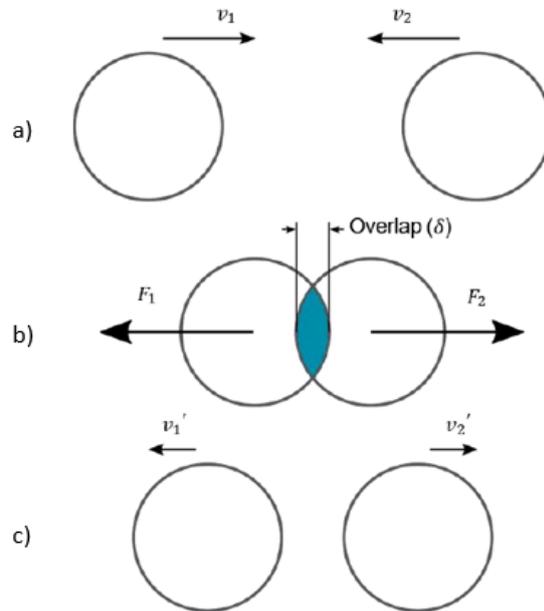
Figura 10 – Representação gráfica da diferença entre a interpretação do modelamento das substâncias de sistemas particulados (a) contínuos e (b) discretos



**Fonte:** Adaptado de *Altair Engineering, inc.* (2020)

Neste trabalho opta-se pelo método discreto de aproximação do sistema particulado, o Método de Elemento Discreto ou *Discrete Element Method* (DEM), que foi apresentado por Cundall et al. (1979), com o nome de Método de Elemento Distinto, em um trabalho onde interpreta a interação entre partículas como um problema de transiente no desenvolvimento do estado de equilíbrio no balanceamento das forças internas. Como já explicado no item 2.2, no DEM tem-se as interações de forças e de deslocamentos, conforme Figura 11, tanto entre partículas como entre partículas e o contorno no sistema, sendo calculadas dentro de um passo de tempo fixado.

Figura 11 – Representação dos posicionamentos e interações entre duas partículas esféricas em três momentos diferentes que representam passos de tempo distintos e seguintes (a), (b) e (c)



**Fonte:** Adaptado de *Altair Engineering, inc.* (2020)

Onde o resultado é levado em consideração na próxima iteração da equação governante no momento do passo de tempo seguinte, resultando no novo posicionamento da partícula e novamente o cálculo é realizado, até que se atinja um tempo decorrido que é formado pelo somatório dos passos de tempo.

### 3.1.1 Modelo de contato

Entendendo que este método utiliza a interação das forças entre as partículas e o contorno do sistema, precisa-se compreender as equações governantes que geram as interações em cada iteração realizada. Chama-se o Modelo de contato, a forma que utilizamos para interpretar estas interações entre as partículas e neste trabalho utilizou -se o modelo de contato de Hertz-Mindlin, pois dentro dos modelos disponíveis no *software* utilizado é o mais adequado na questão de uso de memória de processamento, que deve ser priorizada levando em consideração a dimensão dos testes.

Segundo *DEM Solutions* (2014) o modelo de contato de Hertz-Mindlin é caracterizado pela sua alta acuracidade e eficiência no cálculo de forças, onde seu componente de força normal,  $F_n$ , é baseado na teoria de contato Hertziana (Hertz 1882), que é uma função da deformação normal  $\delta_n$ , e é dada por

$$F_n = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R^*} \delta_n^{\frac{3}{2}}$$

Onde o Módulo de Young equivalente  $E^*$ , e o raio equivalente  $R^*$  são definidos da seguinte forma

$$\frac{1}{E^*} = \frac{(1 - \nu_i^2)}{E_i} + \frac{(1 - \nu_j^2)}{E_j}$$

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_j}$$

Sendo o  $E_i$ ,  $\nu_i$ ,  $R_i$ , e  $E_j$ ,  $\nu_j$ ,  $R_j$  respectivamente o Módulo de Young, o Coeficiente de Poisson e o raio de cada esfera em contato.

A força normal de amortecimento  $F_n^d$  é dada por

$$F_n^d = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{S_n(m^*)} v_t^{rel}$$

Onde  $m^* = \left(\frac{1}{m_i} + \frac{1}{m_j}\right)$  é a massa equivalente,  $v_n^{rel}$  é a componente normal da velocidade relativa,  $S_n$ , a rigidez normal e  $\beta$  são dados por

$$\beta = \ln e / \sqrt{(\ln^2 e + \pi^2)}$$

$$S_n = 2E^* \sqrt{R^*} \delta_n$$

Com  $e$  sendo o coeficiente de restituição.

A força tangencial,  $F_t$ , que é baseada no trabalho de Mindlin-Deresiewicz (Mindlin 1949) (Mindlin and Deresiewicz 1953), depende da deformação tangencial  $\delta_t$  e da rigidez tangencial  $S_t$ .

$$F_t = -S_t \delta_t$$

Com

$$S_t = 8G^* \sqrt{R^*} \delta_n$$

Onde  $G^*$  é o Módulo de cisalhamento equivalente.

A Força tangencial de amortecimento,  $F_t^d$ , é dada por

$$F_t^d = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{S_t m^*} v_t^{rel}$$

Onde  $v_t^{rel}$  é a componente tangencial da velocidade relativa.

A força tangencial é limitada pelo atrito de Coulomb  $\mu_s F_n$  onde  $\mu_s$  é o coeficiente de atrito estático.

Temos a importância do torque entre partículas pelo atrito de rolamento, que é dado por

$$\tau_i = \mu_r F_n R_i \omega_i$$

Onde  $\mu_r$  é o coeficiente de atrito de rolagem,  $R_i$  é a distância do ponto de contato ao centro de massa e  $\omega_i$  é a unidade do vetor de velocidade angular do objeto no ponto de contato.

### 3.1.2 Passo de Tempo

Como Cundall et al. (1979) dizem em seu trabalho que o método utiliza um passo de tempo fixado para realizar as iterações, é necessário que se estabeleça este passo de tempo. A publicação de O'Sullivan et al. (2004) fala sobre a importância da escolha do passo de tempo correto e que muitas vezes pode ser superestimado, gerando resultados errôneos, pois este depende da dimensão da partículas e da velocidade da interação entre elas, em um passo de tempo muito grande, cada iteração gera um deslocamento exagerado de uma partícula, e em um passo de tempo muito pequeno, o número de iterações pode ser exagerada, utilizando muita memória de processamento, aumentando demasiadamente o custo computacional.

O software *EDEM Academic Simulator*, que é utilizado neste trabalho utiliza o passo de tempo de Rayleigh, que de acordo com *EDEM eLearning* (2020), é dado como,  $\Delta t_{min}$ , pela seguinte equação.

$$\Delta t_{crit} = \frac{\pi r_{min} \sqrt{\frac{\rho}{G}}}{0,163v + 0,8766}$$

Onde  $r_{min}$  é o raio da menor partícula no sistema,  $\rho$  é a densidade da partícula.

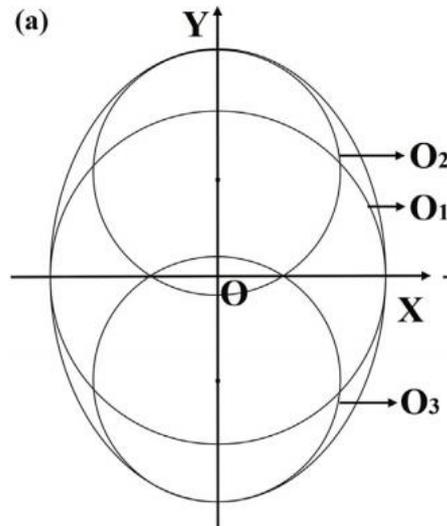
### 3.1.3 Modelamento e distribuição das partículas

A importância da geometria dos grãos de soja se dá pois define os pontos de contato entre as partículas da simulação e também por se tratar de uma simulação que demanda uma quantidade grande de memória de processamento, sendo desejável reproduzir apenas os aspectos relevantes para o resultado.

Como já relatado no item 2.2, no trabalho de Xu et al. (2018), tem-se a verificação de um método de multi esferas, que foi selecionado por ser o método de

modelamento de partículas utilizado pelo software EDEM Academic Simulator. Neste método a partícula é composta por múltiplas esferas com diferentes raios que podem se sobrepor, aproximando-se das dimensões da partícula que se se pretende simular, conforme Figura 12.

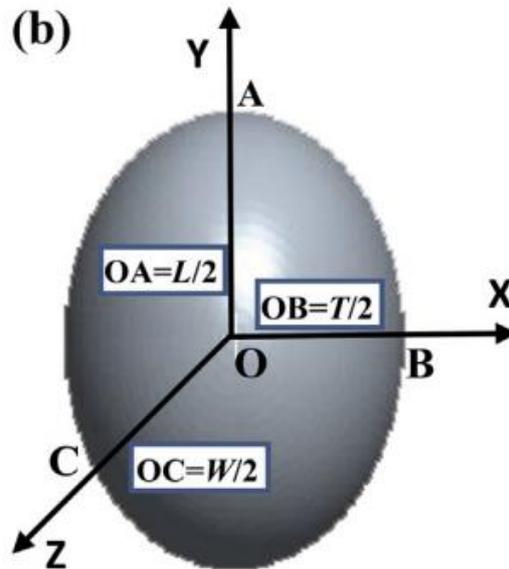
Figura 12 – Exemplo de adaptação de um grão de soja para o modelo de multi esferas, com círculos representando esferas sobrepostas



**Fonte:** Adaptado de Yan et al. (2020)

Neste trabalho utiliza-se o método com 5 esferas avaliado por Xu et al. (2018) para modelar os grãos de soja. E o dimensionamento dos grãos obedeceu ao dimensionamento e posicionamentos do trabalho de Yan et al. (2020), onde temos as dimensões medidas nos grãos de soja, conforme Figura 13.

Figura 13 – Dimensões consideradas para o modelamento dos grãos com o método multi esferas com 5 esferas

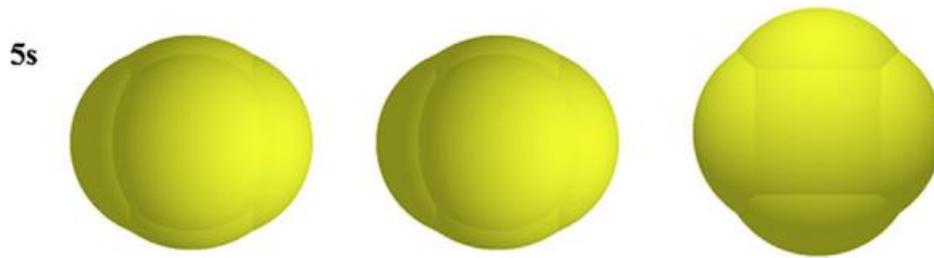


**Fonte:** Adaptado de Yan et al. (2020)

Onde o  $L$  é o comprimento,  $T$  é a espessura e  $W$  é a largura, e para entendermos os posicionamentos das esferas na composição da partícula de soja composta por 5 esferas, vamos chamá-las de esferas  $O_1$ ,  $O_2$ ,  $O_3$ ,  $O_4$  e  $O_5$ .

Toma-se como o sistema de coordenadas um sistema espacial de coordenadas cartesianas de eixos  $X$ ,  $Y$  e  $Z$ , onde de  $O_1$  tem um raio igual à  $\frac{T}{2}$ , e está posicionado no centro do sistema de coordenadas.  $O_2$  com um raio igual à  $\left(\frac{T^2}{2L}\right)$ , posicionado sobre o semieixo positivo de  $Y$  no plano dos eixos  $(X,Y)$  nas coordenadas  $\left(0, \frac{L}{2} - \frac{T^2}{2L}\right)$ , com  $O_3$  sendo gerada pelo espelhamento da esfera  $O_2$  em relação ao eixo  $X$ . A esfera  $O_4$  com um raio igual à  $\left(\frac{T^2}{2W}\right)$  posicionado sobre o semieixo positivo de  $Z$  no plano dos eixos  $(X,Z)$  nas coordenadas  $\left(0, \frac{W}{2} - \frac{T^2}{2W}\right)$ , com  $O_5$  sendo gerada pelo espelhamento de  $O_4$  em relação ao eixo  $X$ , gerando uma partícula conforme Figura 14.

Figura 14 – Partícula gerada com as coordenadas e posições baseadas nas medidas dos grãos de soja



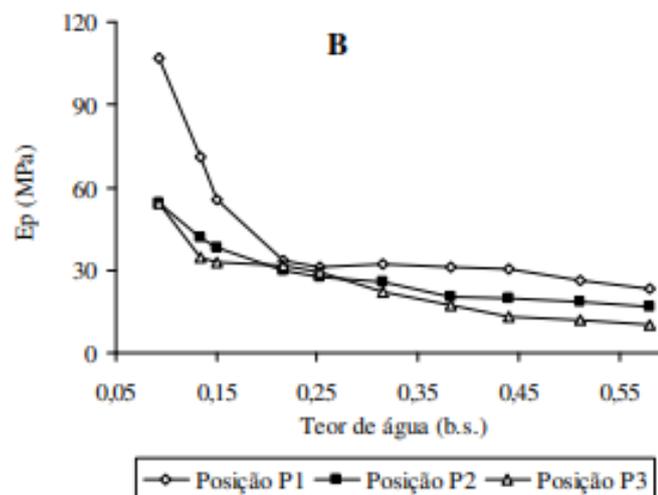
Fonte: Adaptado de Yan et al. (2020)

### 3.1.4 Propriedades dos grãos

Para que ocorram as iterações das equações governantes são necessários dados invariáveis que as restringem, estes dados são propriedades mecânicas intrínsecas das partículas de grãos de soja.

Na publicação de Ribeiro et al. (2007), tem-se a verificação da influência do teor de água em valores de força máxima de compressão em grãos de soja, também verificando o módulo proporcional de deformidade. Os testes de compressão foram feitos com uma deformação fixada de 2mm em amostras de grãos com variados teores de água, e a partir da curva força deformação obteve-se o módulo proporcional de deformação, gerando o gráfico da Figura 15.

Figura 15 – Gráfico que demonstra a influência do teor de água no módulo de deformação do grão de soja



Fonte: Adaptado de Ribeiro et al. (2007)

Portanto, entende-se que a condição de teor de água afeta as características mecânicas dos grãos de soja, sendo necessário então a utilização de um medidor de teor de umidade para que se conheça esta característica nos grãos utilizados no presente trabalho.

### 3.2 GEOMETRIA DO SISTEMA MECÂNICO

Considerando que os testes experimentais realizados neste trabalho utilizam um sistema de rosca transportadora de uma carreta graneleira, a geometria que é utilizada na simulação deve ser a mesma. Para obter-se o arquivo de desenho em CAD, recorreu-se à empresa Kampag Industrial Ltda, que fabricou o produto utilizado nos testes e que providenciou os desenhos em formato CAD de montagem do produto Carreta Graneleira 15000 Grain Supreme, conforme Figura 16.

Figura 16 – Desenho em CAD, fornecido pela empresa Kampag Industrial Ltda



Fonte: Kampag industrial Ltda (2020)

Para se conseguir utilizar o modelo cedido pela empresa no *software EDEM Academic Simulator*, faz-se a importação deste, e definem-se suas características mecânicas para que a interação entre as partículas e o material do sistema ocorra.

### 3.3 TESTES EXPERIMENTAIS

A necessidade de aquisição de dados experimentais neste trabalho se faz por utilizar um método quantitativo experimental para a comparação entre uma simulação e testes físicos. Tratando-se da medição de vazão mássica de grãos no sistema com rosca transportadora de uma carreta graneleira, é necessário definir as formas de mensurar a variação de massa no sistema e o tempo de descarga deste. Para isto, por decisão do autor, necessita-se de um trator com capacidade de tracionar e acionar a carreta graneleira e o sistema de rosca transportadora desta. Opta-se por mensurar a massa da carreta graneleira, mais o trator e o tratorista, com uma balança rodoviária que contemple o sistema inteiro.

Primeiramente, se realiza a tara da carreta graneleira acoplada ao trator com o tratorista embarcado, então o carregamento de grãos na carreta graneleira deve ser realizada, e após, mensurada novamente a massa total da carreta graneleira mais trator, tratorista, e agora, a carga de grãos. A descarga de grãos deve acontecer, e durante este processo é feita a filmagem a fim de adquirir o tempo de descarga, portanto, faz-se necessário o uso de uma câmera de vídeo. Como o sistema mecânico não descarrega completamente a massa de grãos carregadas nele, mede-se novamente a massa total após a descarga.

Por fim, temos os seguintes dados adquiridos:

- Massa do sistema carregado de grãos;
- Tempo da descarga dos grãos;
- Massa do sistema após a descarga.

Subtraindo-se a massa do sistema após a descarga da massa do sistema carregado de grãos temos a quantidade mássica de grãos descarregados. Ao dividirmos este resultado pelo tempo de descarga de grãos, temos a vazão mássica do sistema.

## 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Nesta seção se apresentarão os resultados obtidos ao aplicarmos os métodos, considerando-se simplificações no processamento da simulação, bem como a realização dos testes experimentais, o tratamento de dados coletados e a realização da análise dos resultados.

### 4.1 REALIZAÇÃO DOS TESTES EXPERIMENTAIS

No dia 23 de setembro de 2020, realizaram-se os testes experimentais de descargas de uma Carreta Graneleira 15000 Grain Supreme, fornecida pela empresa Kampag Industrial Ltda, tracionada e acionada por um trator da marca John Deere, modelo 6145J, operados por um tratorista.

O local selecionado para realizar o trabalho foi a Cooperativa de grãos Agren, no município de Três de Maio no Rio Grande do Sul, pois se pôde contar com a infraestrutura para manejo de grãos, uma moega carregada de grãos de soja para carregar e descarregar a carreta graneleira e uma balança rodoviária com precisão de  $\pm 10$  kg para a pesagem do sistema acoplado ao trator, conforme Figura 17.

Figura 17 – Imagem de um momento da pesagem da carreta graneleira acoplada ao trator com o tratorista, no dia 12 de setembro de 2020



Fonte: O autor (2020)

Na moega da cooperativa, os grãos eram elevados por um sistema de elevador de canecas e então carregados na carreta graneleira, conforme Figura 18.

Figura 18 – Imagens de um momento de carga da carreta graneleira na moega da cooperativa Agren, à esquerda a vista superior e à direita a vista traseira.



Fonte: O autor (2020)

As descargas foram realizadas na mesma moega, com uma velocidade de rotação da tomada de potência (TDP) do trator de 540 rpm, conforme Figura 19, e o tempo foi mensurado utilizando-se a câmera de um telefone celular da marca Samsung de modelo S9.

Figura 19 – Instantâneos retirados do vídeo de uma das descargas realizadas



Fonte: O autor (2020)

A sequência de eventos, apresentada no item 3.3 deste trabalho, foi realizada 8 vezes, gerando 8 amostras de vazão mássica do sistema de rosca transportadora, as pesagens do sistema carregado e descarregado, geraram um relatório que está anexado a este trabalho como Anexo 2. Utilizando este relatório e o tempo de descarga mensurado com a câmera, gerou-se a Tabela 1 de informações, onde se tem, na última coluna, os números de vazão mássica de cada descarga.

Tabela 1 – Dados mensurados nas descargas dos grãos, usados para calcular a vazão mássica

| Massa de grãos antes da descarga (kg) | Massa de grãos após descarga (kg) | Massa de grãos descarregada (kg) | Tempo de descarga (s) | Vazão mássica (kg/s) |
|---------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|-----------------------|----------------------|
| 1450                                  | 40                                | 1410                             | 70                    | 20,1                 |
| 1390                                  | 40                                | 1350                             | 56                    | 24,1                 |
| 1170                                  | 50                                | 1120                             | 54                    | 20,7                 |
| 1030                                  | 20                                | 1010                             | 70                    | 14,4                 |
| 1030                                  | 30                                | 1000                             | 58                    | 17,2                 |
| 970                                   | 40                                | 930                              | 50                    | 18,6                 |
| 940                                   | 40                                | 900                              | 60                    | 15,0                 |
| 910                                   | 60                                | 850                              | 53                    | 16,0                 |

Fonte: O autor (2020)

Os dados de Massa de grãos descarregada geraram uma média aritmética simples de 1071,25 kg, os dados de tempo de descarga geraram uma média aritmética simples de 58,88 s e os dados de vazão mássica geram uma média aritmética simples no valor de 18,26 kg/s e este será utilizado para a posterior comparação aos resultados obtidos na simulação de descarga do sistema de rosca transportadora.

## 4.2 PARAMETRIZAÇÃO DA SIMULAÇÃO

Para podermos aplicar os métodos utilizados na realização da simulação, tem-se uma sequência de eventos demonstrados na Figura 20, que representam os passos para a parametrização da simulação no *software EDEM Academic Simulator*.

Figura 20 – Fluxograma que representa a sequência de acontecimentos para a parametrização da simulação



Fonte: O autor (2020)

### 4.2.1 Modelamento da partícula do grão de soja

O modelamento das partículas iniciou-se coletando uma amostra de 6 grãos de soja da carreta graneleira utilizada no dia 23 de setembro de 2020 durante os testes experimentais. Utilizando-se o método citado no item 3.1.3, mensurou-se as dimensões  $L$ ,  $T$  e  $W$ , utilizando um paquímetro analógico com amplitude de 150mm da marca TMX, gerando a Tabela 2 de informações.

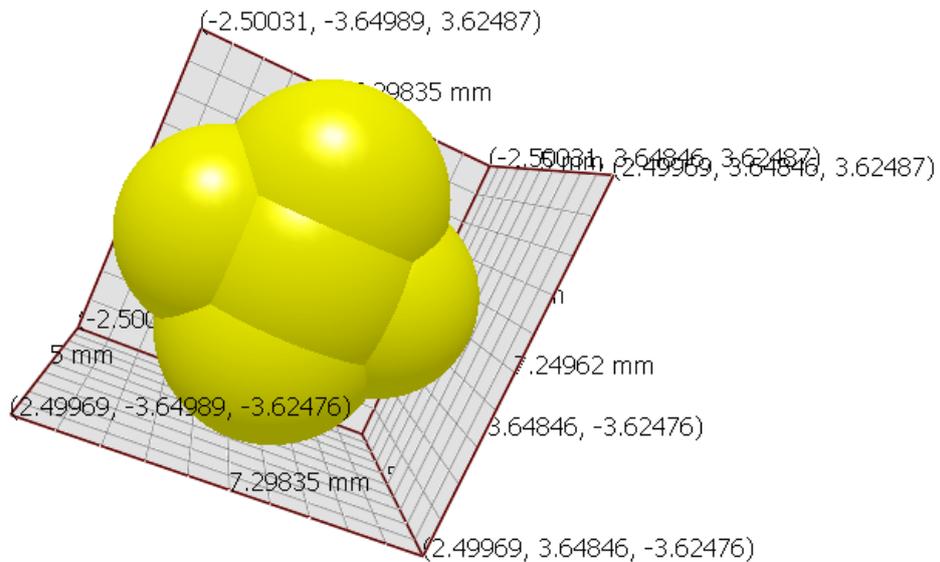
Tabela 2 – Medições das dimensões dos 6 grãos de soja

|         | Grão 1 | Grão 2 | Grão 3 | Grão 4 | Grão 5 | Grão 6 | Média aritmética |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------------------|
| $L(mm)$ | 7,5    | 7,2    | 6,7    | 7,6    | 6,1    | 6,5    | 6,9              |
| $T(mm)$ | 6,5    | 6,1    | 6,1    | 6,2    | 5,4    | 6,4    | 6,1              |
| $W(mm)$ | 5,5    | 4,6    | 5,4    | 5,7    | 5      | 6      | 5,4              |

Fonte: O autor (2020)

Utilizando-se a média aritmética das dimensões das amostragens e aplicando-se os posicionamentos e equacionamentos dos dimensionamentos de esferas dependentes das dimensões  $L$ ,  $T$  e  $W$ , apresentados também no item 3.1.3, gerou-se a partícula da Figura 21.

Figura 21 – Modelamento com 5 esferas realizado com os posicionamentos de O1, O2, O3, O4 e O5



Fonte: O autor (2020)

#### 4.2.2 Definição do material e da distribuição das partículas

No software *EDEM Academic Simulator*, a definição do material das partículas nada mais é do que a definição das características mecânicas da partícula. Portanto, durante os testes experimentais de descarga coletou-se uma amostra de 150g de grãos de soja para que posteriormente se realizasse o teste de teor de umidade no dia 23 de setembro as 14 horas e 53 minutos, na Unidade de Caravágio da cooperativa Agrosol no município de Três de Maio-RS, que possui um medidor de umidade para grãos da marca Motomco e modelo 99FBI, Figura 22.

Figura 22 – Imagem do medidor Motomco 99FBI realizando a medição da amostra de grãos de soja no dia 23 de setembro de 2020, resultando em 11,4 % de teor de umidade



Fonte: O autor (2020)

A medição do teor de umidade da amostragem resultou em 11,4%, portanto para este trabalho utilizam-se as características mecânicas utilizadas por Yan et al. (2020) nos grãos, pois nos seus resultados obteve uma amostragem com um teor de umidade de 11,1%, valor que está muito próximo ao teor de umidade de 11,4% que se obteve neste trabalho. As características mecânicas estão representadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros que representam todas características mecânicas das partículas de soja necessárias na simulação

| Parâmetros                        | Símbolo | Valor   |
|-----------------------------------|---------|---------|
| Densidade (kg/m <sup>3</sup> )    | $\rho$  | 1192    |
| Coefficiente de Poisson           | $\nu$   | 0,4     |
| Módulo de Young (Pa)              | $E$     | 2,6e+08 |
| Coefficiente de atrito estático   | $\mu_s$ | 0,2     |
| Coefficiente de atrito de rolagem | $\mu_r$ | 0,03    |
| Coefficiente de restituição       | $e$     | 0,607   |

Fonte: Adaptado de Yan et al. (2020)

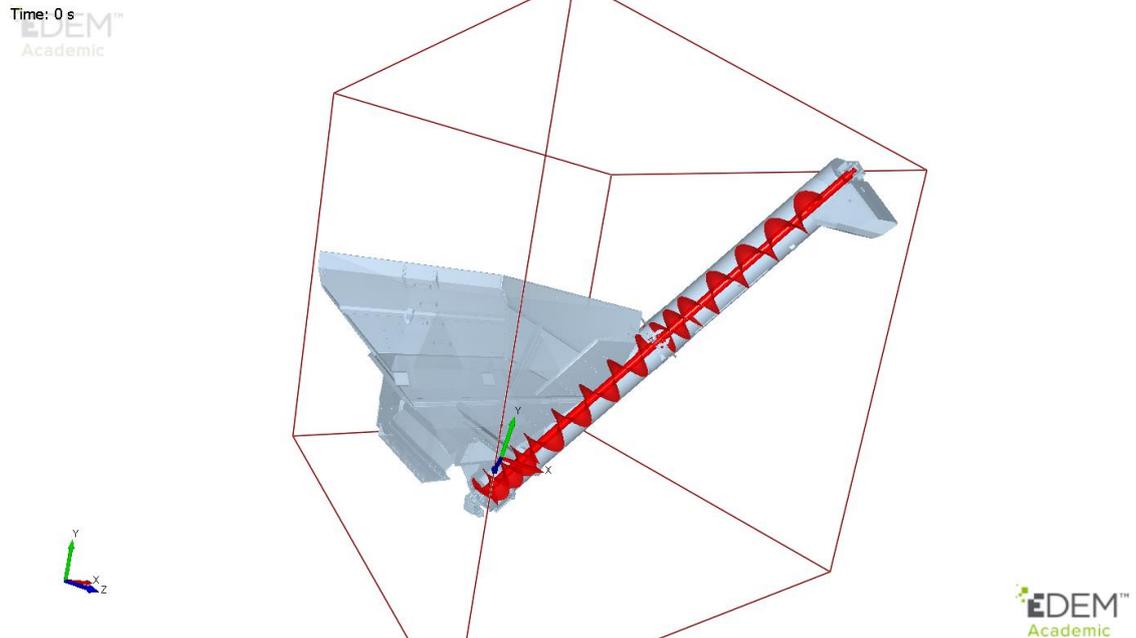
Como a simulação gera milhares de partículas, é necessário que se defina uma distribuição para as variações das dimensões destas, e conforme o trabalho de Xu et al. (2018), utiliza-se uma distribuição normal. O desvio padrão da distribuição pode ser definido pelo desvio padrão das dimensões mensuradas nas amostras da Tabela 1, chegando a valores de 0,59 mm; 0,39mm e 0,50mm para  $L$ ,  $T$  e  $W$  respectivamente.

Como o software *EDEM Academic Simulator* utiliza um desvio padrão para os raios das esferas que compõem a partícula, utilizando-se a média dos desvios das dimensões mensuradas chegar-se-ia a um valor próximo de 0,5mm por esfera que compõem a partícula, mas com este valor de desvio padrão ocorrem deformações muito grandes nas partículas modeladas, portanto, para fins de padronização da proporcionalidade das esferas que compõem a partícula, utilizou-se um desvio padrão de 0,05mm no raio de cada esfera.

#### **4.2.3 Importação da geometria do sistema de rosca transportadora**

Como citado no item 3.2, a empresa Kampag Industrial Ltda disponibilizou o modelo em CAD do produto Carreta Graneleira 15000 Grain Supreme, que foi utilizado neste trabalho para realizar os testes experimentais. Considerando a simplificação do processamento da simulação separaram-se as geometrias importadas em duas partes, uma delas sendo composta pela caixa coletora juntamente do tubo de descarga e a outra pela rosca transportadora, conforme Figura 23.

Figura 23 – Geometrias simplificadas para a simulação, em vermelho a rosca transportadora e em cinza o conjunto da caixa coletora e o tubo de descarga, todos fornecidos pela empresa Kampag Industrial Ltda



Fonte: Kampag Industrial Ltda (2021)

Para separar as duas partes, utilizou-se o *software Solidworks Premium 2020*, transformando-se caixa coletora e o tubo de descarga em um sólido e salvando estes na extensão de arquivo igs e após repetiu-se o mesmo com a rosca transportadora.

Posteriormente se fez a importação destes dois arquivos igs ao *software EDEM Academic Simulator*, e neste software realizou-se o posicionamento da rosca transportadora dentro do tubo de descarga, conforme modelo em CAD, onde o eixo central do conjunto ficou posicionado com um ângulo de  $66,38^\circ$  em relação ao plano composto pelos eixos X e Y, que no ambiente do software, representou o solo dos testes experimentais.

#### 4.2.4 Definição do material do sistema de rosca transportadora

Assim como utilizou-se as características mecânicas como parâmetros da partícula de soja em conformidade com o trabalho de Yan et al. (2020), as características mecânicas do material das geometrias que representam o sistema mecânico também puderam ser utilizadas, pois o aço galvanizado utilizado em seu trabalho não difere muito do aço utilizado na construção das carretas graneleiras. Gerando assim a Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros que representam todas características mecânicas da geometria que representa o sistema mecânico na simulação

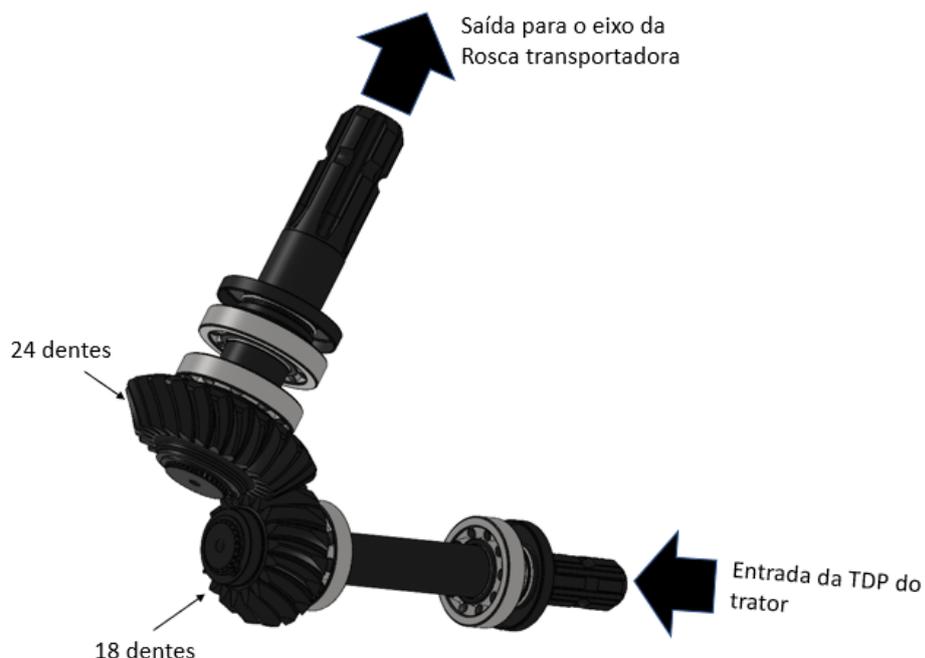
| Parâmetros                       | Símbolo | Valor   |
|----------------------------------|---------|---------|
| Densidade (kg/m <sup>3</sup> )   | $\rho$  | 7850    |
| Coeficiente de Poisson           | $\nu$   | 0,3     |
| Módulo de Young (Pa)             | $E$     | 7,9e+11 |
| Coeficiente de atrito estático   | $\mu_s$ | 0,277   |
| Coeficiente de atrito de rolagem | $\mu_r$ | 0,04    |
| Coeficiente de restituição       | $e$     | 0,726   |

Fonte: Adaptado de Yan et al. (2020)

#### 4.2.5 Atribuição do movimento à rosca transportadora

Para poder atribuir o movimento de rotação da rosca transportadora, é necessário entender qual a velocidade utilizada nos testes experimentais. Sabendo-se que a rotação realizada pela tomada de potência (TDP) do trator durante as descargas foi de 540 rpm, e a transmissão da rotação deste eixo até o eixo da rosca transportadora se dá por meio de uma caixa de transmissão com um trem de engrenagens, tendo-se a caracterização destas conforme a Figura 24.

Figura 24 – Representação geométrica do trem de engrenagens pertencente à caixa de transmissão que transmite a rotação da TDP do trator ao eixo da rosca transportadora



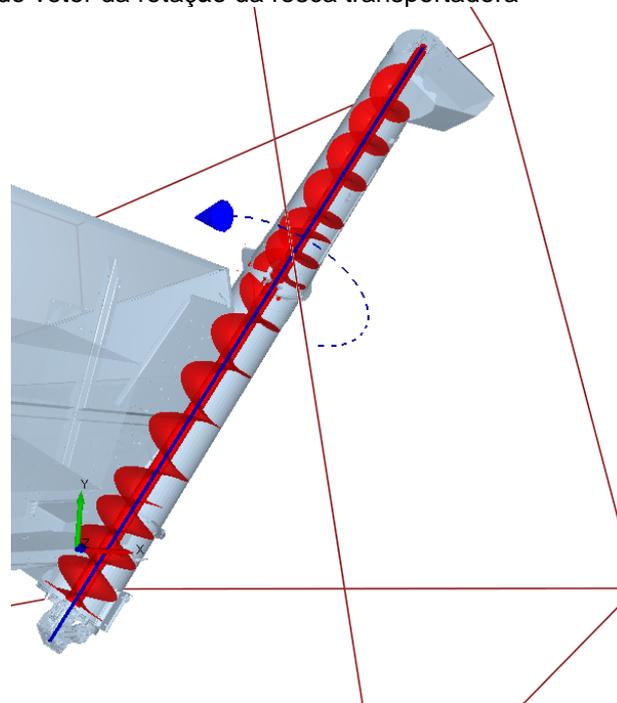
Fonte: O autor (2020)

Calculou-se a rotação do eixo da rosca, utilizou-se  $T_1$  para o número de dentes da engrenagem da entrada,  $T_2$  para o número de dentes da engrenagem de saída,  $n_1$  para a velocidade de rotação de entrada e  $n_2$  para a velocidade de rotação de saída. Portanto, segundo Melconian (2009) na relação de transmissão de engrenagens temos:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{T_2}{T_1}$$

Resultando em uma rotação  $n_2$  de 405 rpm, e então atribuiu-se esta rotação no sentido anti-horário à rosca transportadora, conforme Figura 25.

Figura 25 – Representação do vetor da rotação da rosca transportadora



**Fonte:** O autor (2021)

A rotação da rosca transportadora foi configurada para acontecer desde o princípio do processamento da simulação e sem um transiente de velocidade, ou seja, sem aceleração inicial.

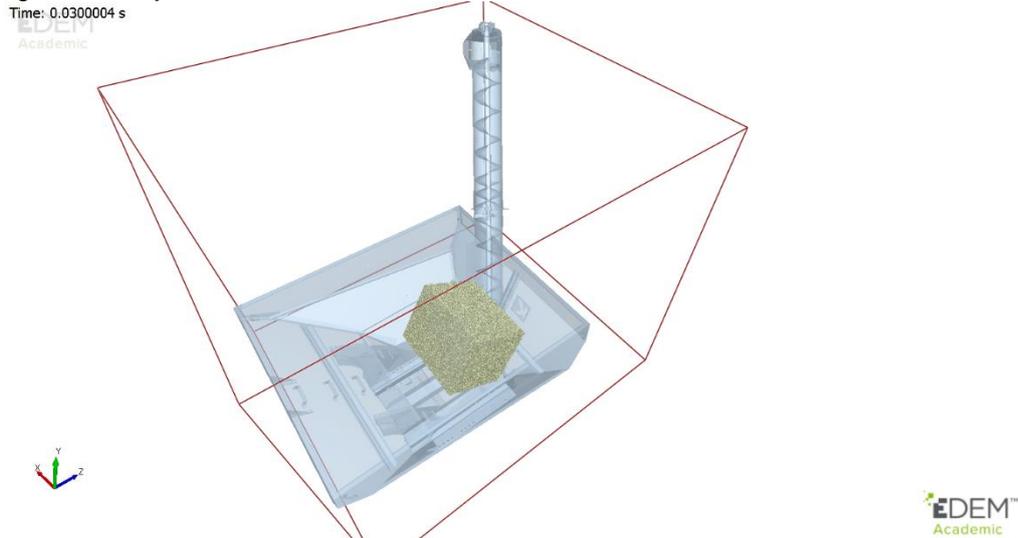
#### 4.2.6 Disposição dos grãos no sistema

No *software EDEM Academic Simulator 2020*, a geração de partículas durante a simulação se dá através da criação de uma dita “fábrica” de grãos. Esta podendo ser uma fábrica dinâmica ou estática, diferenciadas apenas pelo fato de a primeira gerar uma quantidade de partículas por tempo durante simulação e a

segunda pelo fato de criar a uma quantidade fixada de partículas em algum momento da simulação.

Para esta simulação utilizou-se uma fábrica de grãos estática, onde gerou se 1078669 partículas, representando 150 kg de grãos de soja, posicionadas dentro da caixa coletora, conforme Figura 26.

Figura 26 – Momento em que a fábrica estática terminou de criar 1078669 partículas que representam grãos de soja



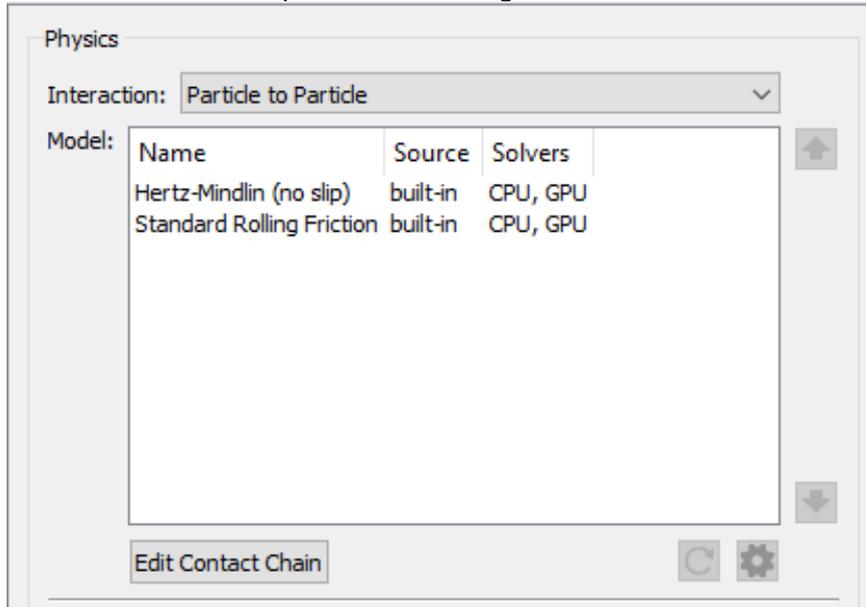
**Fonte:** O autor (2021)

A criação das partículas aconteceu em 7,0654 horas de tempo total de computação, que foi considerado pelo autor um tempo excessivo, visto que a simulação do transporte dos grãos ainda não havia começado.

#### 4.2.7 Atribuição do modelo de contato

Para atribuir-se o modelo de contato de Hertz-Mindlin no *software EDEM Academic Simulator 2020*, bastou selecioná-lo, pois está previamente carregado, e elencar quais os materiais que interagem utilizando o modelo, conforme Figura 27.

Figura 27 – Modelo de contato previamente carregado no software EDEM Academic Simulator 2020



Fonte: EDEM Academic Simulator 2020

Tanto na interação de partículas com partículas quanto na interação entre partículas e o material da geometria do sistema da rosca transportadora foram selecionados os mesmos modelos de contato.

#### 4.2.8 Definições das condições do ambiente

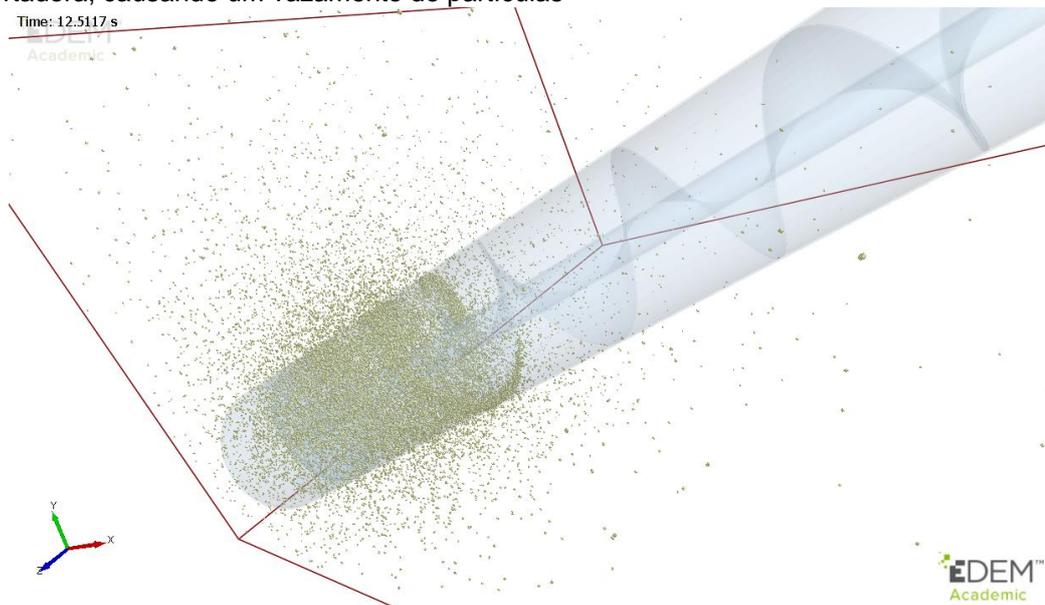
Dentro da área de condições do ambiente do *software* escolheu-se a intensidade da aceleração gravitacional e a sua direção. Como o ambiente de simulação está representando em um sistema cartesiano XYZ, onde XZ representam o plano do solo, comparando ao teste experimental, a direção da aceleração gravitacional selecionada foi a do eixo normal a este, o eixo Y, mas no sentido negativo e com uma intensidade de  $9,81 \frac{m}{s^2}$ .

#### 4.2.9 Escolha do passo de tempo

O passo de tempo é essencial para o sucesso da simulação, como dito no item 3.1.2, um passo de tempo muito grande pode resultar em um deslocamento exagerado das partículas, quanto maior as velocidades das partículas maiores os seus deslocamentos, podendo acarretar sobreposição entre partículas e também entre partículas e a geometria do sistema mecânico. Já um passo de tempo muito pequeno, pode resultar em uma simulação muito longa, necessitando grande capacidade de processamento. Por recomendação de *EDEM eLearning (2020)*, um

passo de tempo que seja entre 20% e 40% do passo de tempo de Rayleigh deve ser suficiente para que a simulação tenha sucesso. Para escolhermos o passo de tempo, realizaram-se testes, começando com um passo de tempo de 40% do passo de tempo de Rayleigh, onde ocorreram problemas de sobreposição entre as partículas e o material do sistema de rosca transportadora, gerando um problema de vazamento de grãos do sistema, conforme Figura 28.

Figura 28 – Momento em que as partículas sobrepueram a geometria do sistema de rosca transportadora, causando um vazamento de partículas



Fonte: O autor (2020)

A próxima tentativa foi um passo de tempo de 25% do passo de tempo de Rayleigh, onde não ocorreu nenhum problema de sobreposição de partículas, nem mesmo entre partículas e a geometria do sistema, gerando um leve aumento de tempo do processamento da simulação, pois quanto mais reduzido o passo de tempo, maior será o tempo de simulação e maior será a quantidade de memória de processamento necessária para realizá-la.

#### 4.2.10 Escolha do tamanho de célula de rede construtiva da geometria da rosca transportadora

No item 4.2.3 já se citou uma simplificação realizada em relação à geometria do sistema de rosca transportadora, onde se fez uma redução de detalhes na geometria importada ao software, para que não houvesse maior necessidade de capacidade de processamento além do necessário para a interpretação da vazão

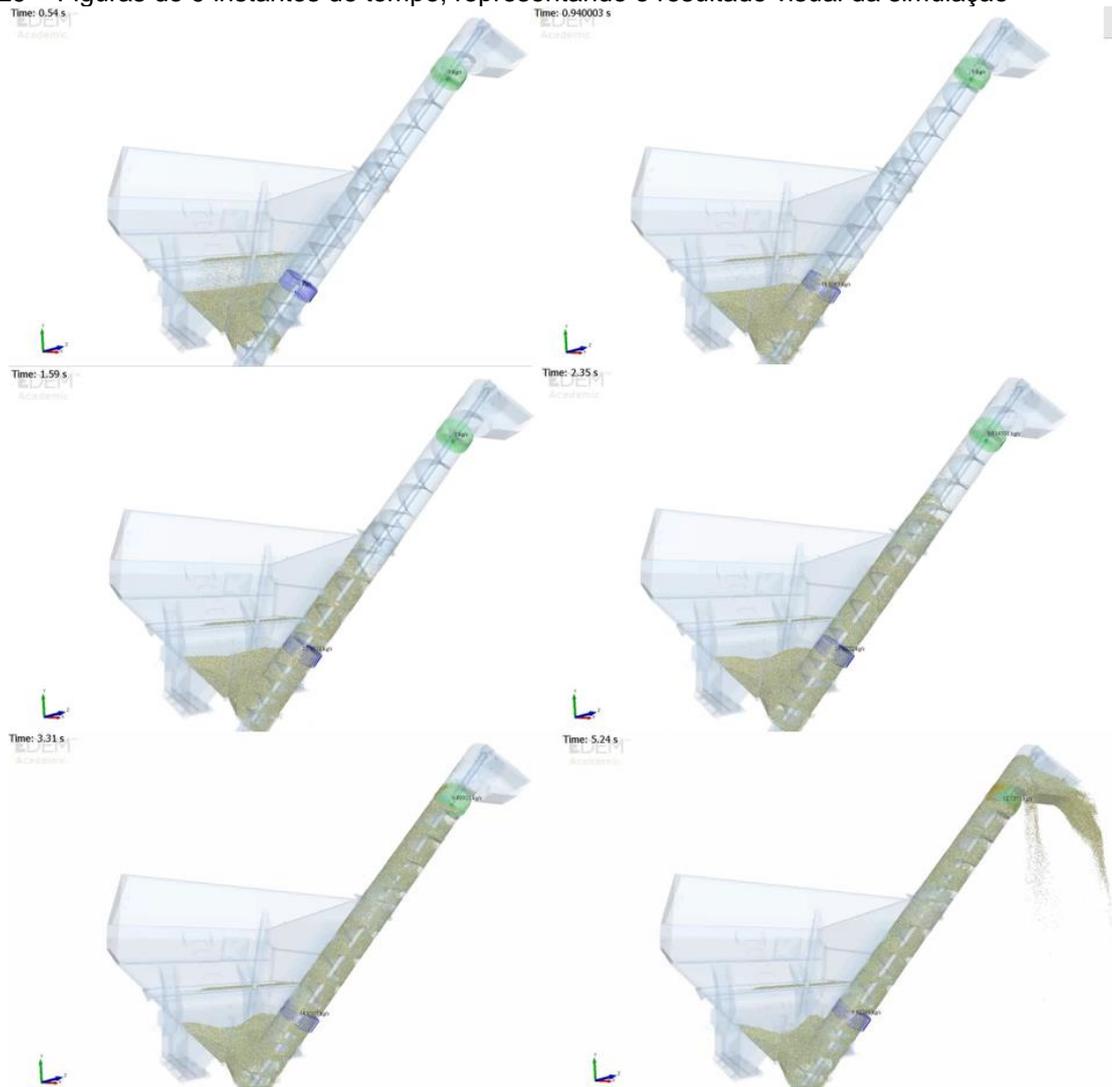
mássica de grãos no sistema. Esta otimização se faz necessária, pois o *software EDEM Academic Simulator* interpreta as geometrias que não são partículas como um material contínuo formado por uma malha, composta por células com um tamanho dependente do menor raio de esfera que compõem as partículas existentes, e assim, quanto maior o número de células que formam a geometria do material do sistema maior será o tempo de processamento e maior será a necessidade de capacidade de processamento.

No caso desta simulação, a menor esfera existente em uma partícula de grão de soja possui um raio de 1,7418 mm; e o tamanho de célula da malha foi escolhido de forma que a menor partícula de grão de soja não entrasse dentro desta célula. Esta escolha foi realizada da mesma forma que se realizou a escolha do passo de tempo, realizando-se um teste. A *EDEM eLearning* (2020) sugere que as células variem dentro de um valor de 1 a 3 vezes o valor do menor raio de esfera, quando se utilizou uma célula 3 vezes o tamanho de raio da menor esfera não houveram problemas de vazamento de grãos do sistema. Portanto, seguindo a sugestão da fornecedora do *software* e buscando a redução do custo computacional, optou-se por utilizar o tamanho de célula 3 vezes maior que o menor raio de esfera presente entre as partículas de grãos de soja.

#### 4.3 RESULTADOS DO PROCESSAMENTO DA SIMULAÇÃO

Após a realização de toda a parametrização, iniciou-se o processamento da simulação, a qual tomou um tempo total de computação de 258.75 horas, gerando 5,88 segundos equivalentes ao tempo real de descarga parcial da carreta graneleira. Sendo interrompida neste instante de tempo, pois até então houve um preenchimento integral de partículas na extensão total do tubo e considerando que uma simulação que descarregasse totalmente as partículas que estão dispostas na caixa coletora teria um tempo de computação exageradamente alto, o que poderia inviabilizar a finalização deste trabalho. Tem-se alguns instantes da simulação representados na Figura 29.

Figura 29 – Figuras de 9 instantes de tempo, representando o resultado visual da simulação

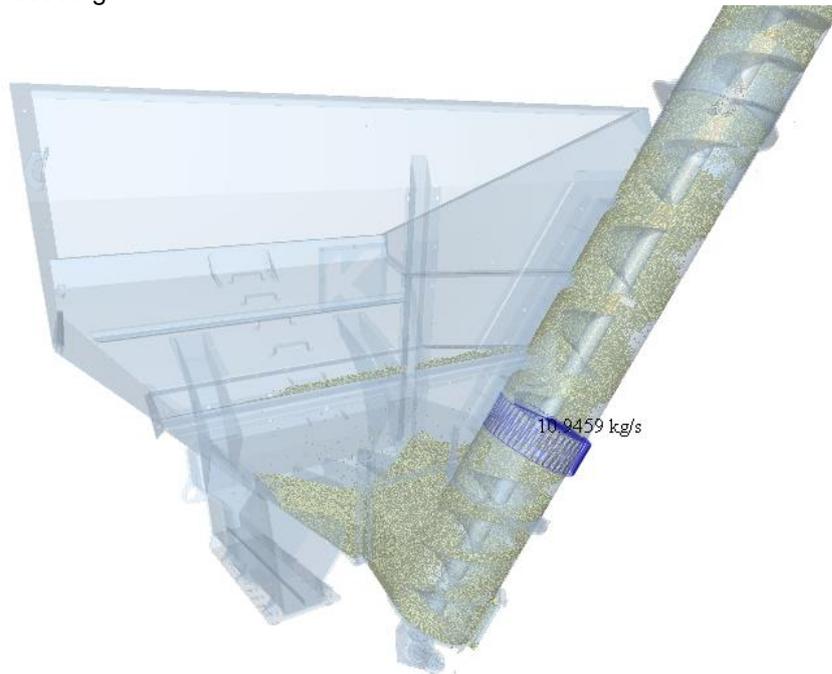


Fonte: O autor (2021)

Apesar do curto tempo equivalente ao tempo de descarga realizados, já se pôde contar com dados de capacidade de descarga instantâneas, sendo que a melhor forma de entendermos a vazão mássica no sistema foi posicionando sensores de vazão mássica na extensão do tubo, que estão disponíveis na seção analítica do *software EDEM Academic Simulator*.

Considerando o curto tempo equivalente gerado, utilizaram-se dois sensores de vazão mássica, cada um com uma seção circular com 250mm de raio e posicionados ortogonalmente ao eixo central do sistema de descarga. Um dos sensores posicionado próximo à base do tubo de descarga, denominado Sensor 1, conforme Figura 30.

Figura 30 – Sensor de vazão mássica, com uma sessão de 250mm de raio, posicionado próximo à base do tubo de descarga



**Fonte:** O autor (2021)

E o outro sensor de vazão mássica, denominado Sensor 2, posicionado próximo ao topo do tubo de descarga, conforme Figura 31.

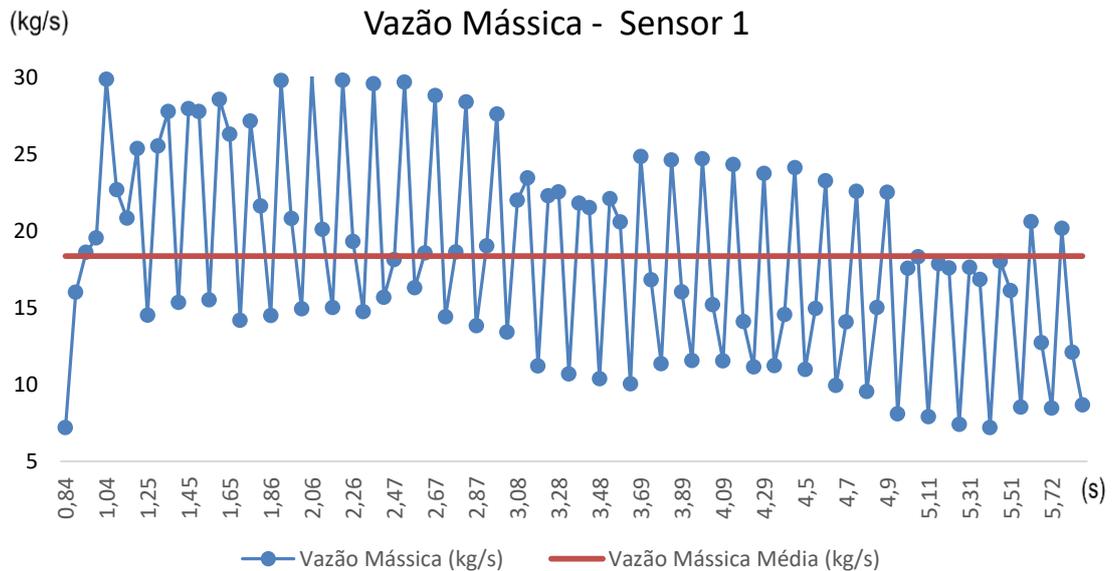
Figura 31 – Imagem representando o segundo sensor de vazão mássica, com sessão de 250mm de raio, posicionado próximo ao topo do tubo de descarga



**Fonte:** O autor (2021)

Cada um destes sensores mediu a vazão mássica em sua seção a cada período determinado em segundos. O Sensor 1 gerou dados de vazão coletados a cada 0,05 segundos conforme a Figura 32.

Figura 32 – Gráfico de linha gerado pelos dados fornecidos pelo Sensor 1. Eixo ordenado representando a vazão mássica e eixo das abcissas representando o tempo equivalente

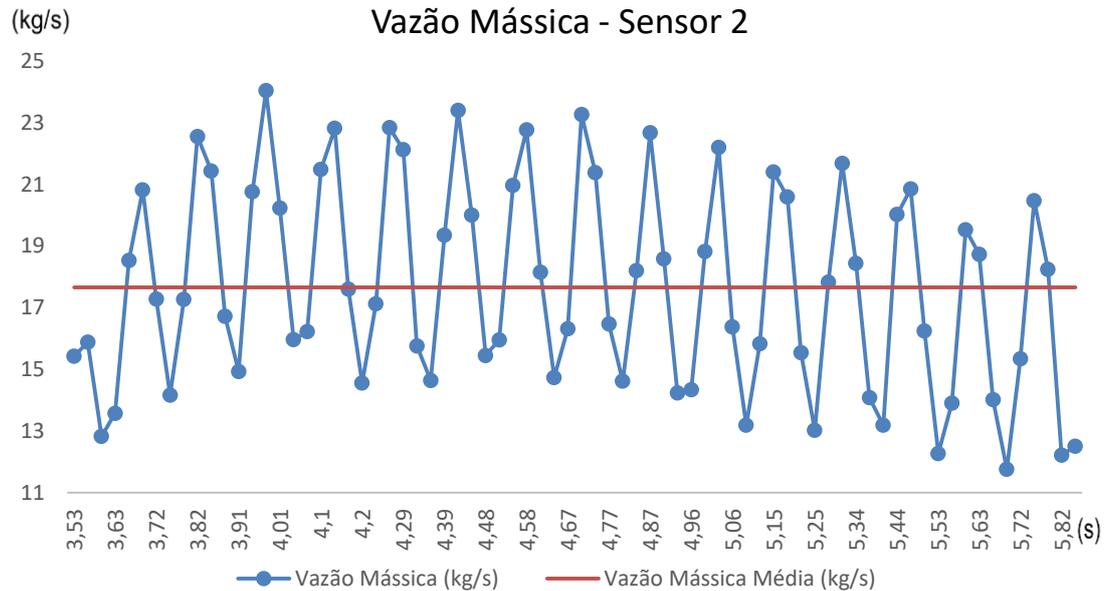


**Fonte:** O autor (2021)

Para fins de comparação aos dados coletados nos testes experimentais considerou-se os dados de vazão mássica quando as partículas, representando grãos de soja, iniciaram a passagem pela seção dos sensores, portanto, no Sensor 1 as coletas iniciaram-se aos 0,84 segundos de tempo equivalente.

Já o Sensor 2 começou as suas coletas em 3,53 segundos de tempo equivalente, com um intervalo de 0,03 segundos entre cada uma, pois o tempo de coleta foi menor, conforme Figura 33.

Figura 33 – Gráfico de linha gerado pelos dados fornecidos pelo Sensor 2. Eixo ordenado representando a vazão mássica e eixo das abcissas representando o tempo equivalente



**Fonte:** O autor (2021)

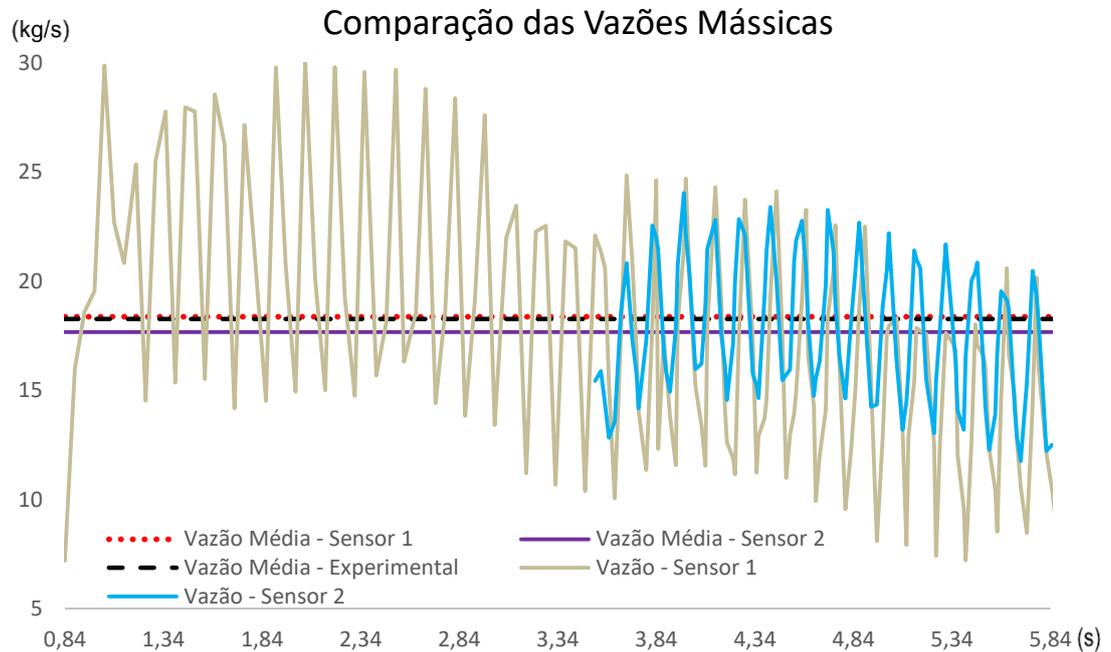
Ambas as tabelas que contêm os dados geradores destes gráficos, obtidos através dos Sensores 1 e 2 estão distintos no Apêndice 1 e Apêndice 2 deste trabalho.

A média aritmética simples de vazão mássica em um período de 5,03 segundos obtida a partir dos dados do Sensor 1 foi de 18,36 kg/s, já a média aritmética simples da vazão mássica medida em um período de 2,29 segundos no Sensor 2 foi de 17,66 kg/s.

#### 4.4 ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS

Compilou-se os dados das médias aritméticas simples de ambos os sensores e a média aritmética simples obtida nos testes experimentais, mais os dados mensurados nos Sensores 1 e 2 e gerou-se o gráfico conforme a Figura 34, para que se possa visualizar de forma mais clara a comparação dos resultados.

Figura 34 – Gráfico de linhas gerado pelos dados dos Sensores 1 e 2, as médias aritméticas simples dos sensores e a média aritmética simples dos resultados experimentais. Eixo ordenado representando a vazão mássica e eixo das abcissas representando o tempo equivalente



**Fonte:** O autor (2021)

Para poder utilizar os dados da simulação calcula-se a média aritmética simples das médias de vazão de ambos os sensores, resultando em um valor de 18,01 kg/s, que se compara com o valor de 18,26 kg/s obtidos com a média dos valores de vazão dos testes experimentais.

Levando em consideração as variações das condições na realização de cada descarga de grãos nos testes experimentais, sendo elas as diferentes quantidades mássicas de grãos que foram descarregadas pelo sistema de rosca transportadora, a variedade de cultivares de soja na moega da cooperativa, a precisão de  $\pm 10$  kg na balança rodoviária utilizada para medir as massas do sistema carregado e a variação de óleo diesel no tanque do trator utilizado.

Lembrando das simplificações feitas na simulação em relação às condições do experimento físico, sendo elas, a redução na massa de grãos descarregada de em torno de 1071,25 kg feitos nos experimentos para 150 kg na simulação e a redução no tempo equivalente de simulação de 5,88 segundos comparados a tempos de em torno de 60 segundos resultantes nos experimentos, todas feitas para viabilizar a realização da simulação em tempo hábil inferior aos 20 dias propostos. Se tem a diferença entre os dados médios de vazão mássica obtida numericamente com a experimental de apenas 0,25 kg/s, ou seja 1,36%.

## CONSIDERAÇÃO FINAL

Após realizar as coletas dos dados experimentais, utilizando-se uma metodologia quantitativa experimental, simular o sistema de rosca transportadora descarregando grãos de soja utilizando os métodos descritos neste trabalho e simplificando a simulação em busca de uma redução de tempo do seu processamento, tratar estatisticamente os dados do pós processamento chegando a uma diferença de 1,36%, equivalente à 98,63% de exatidão, entre os resultados considerados, conclui-se que:

O método de elemento discreto aplicado à simulações de partículas de grãos de soja descarregadas por um sistema de rosca transportadora, em condições semelhantes às experimentadas neste trabalho, se torna uma ferramenta de potencial aplicação em setores de engenharia de produto, em fases de design computacional do produto ou até mesmo em produtos correntes, a fim de medir a performance de vazão mássica do sistema, gerando por consequência mais agilidade no reconhecimento da capacidade do que se está projetando e desenvolvendo, evitando, em alguns casos, a necessidade de construção de protótipos para esta avaliação. Ressaltando que, com uma capacidade de processamento superior aos utilizados neste trabalho possivelmente se teria um tempo inferior de processamento de simulação, potencializando ainda mais o método.

## REFERÊNCIAS

ALTAIR ENGINEERING, INC. **What is DEM. Theoretical background behind the Discrete Element Method (DEM)**. E-book. 2020. Disponível em: <https://www.altair.com/resource/what-is-the-discrete-element-method-dem>. Acesso em: 24 out. 2020.

CUNDALL, P.A.; STRACK, O. D. L. A discrete numerical model for granular assemblies. **Geotech**, Advanced Technology Group, Dames & Moore, London, Department of Civil and Mineral Engineering, University of Minnesota, USA, v.29, n. 1, p.47-65, Mar. 1979. Disponível em: <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/pdf/10.1680/geot.1979.29.1.47>. Acesso em: 21 mai. 2020.

De LIMA, Rodolfo F. et al. Validação do Método dos Elementos Discretos para o escoamento de grãos de soja. **Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics**, SBMAC - Sociedade de Matemática Aplicada e Computacional, São Carlos, v. 7, n. 1, Set. 2016. Disponível em : <https://proceedings.sbmac.org.br/sbmac/article/view/1673>. Acesso em: 04 out 2020

DEM SOLUTIONS. **EDEM 2.6 Theory Reference Guide**. E-book. 2014. Disponível em: [https://www.edemsimulation.com/content/uploads/2016/08/EDEM2.6\\_theory\\_reference\\_guide.pdf](https://www.edemsimulation.com/content/uploads/2016/08/EDEM2.6_theory_reference_guide.pdf). Acesso em: 24 out. 2020.

EDEM eLearning, Time Step, 2020. Disponível em: <https://www.edemsimulation.com/topic/time-step/>. Acesso em: 20 set 2020.

KÖCHE, J. C. **Fundamentos de Metodologia Científica**. E-book. Petrópolis, RJ: Vozes, 2011. Disponível em: [http://www.brunovivas.com/wp-content/uploads/sites/10/2018/07/K%C3%B6che-Jos%C3%A9-Carlos0D0AFundamentos-de-metodologia-cient%C3%ADfica-\\_-teoria-da0D0Aci%C3%AAncia-e-inicia%C3%A7%C3%A3o-%C3%A0-pesquisa.pdf](http://www.brunovivas.com/wp-content/uploads/sites/10/2018/07/K%C3%B6che-Jos%C3%A9-Carlos0D0AFundamentos-de-metodologia-cient%C3%ADfica-_-teoria-da0D0Aci%C3%AAncia-e-inicia%C3%A7%C3%A3o-%C3%A0-pesquisa.pdf). Acesso em: 21 mai. 2020

MELCONIAN, S. **Elementos de máquinas**. 9ª edição. Editora Érica, 2009.

METCALF, J. R. The Mechanics of the Screw Feeder. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers**, Mining Department, University of Sheffield, v.180, n.1, p. 131-146, Jun. 1965. Disponível em: [https://doi.org/10.1243%2FPIME\\_PROC\\_1965\\_180\\_015\\_02](https://doi.org/10.1243%2FPIME_PROC_1965_180_015_02). Acesso em: 21 mai. 2020.

OREFICE, Luca et al. DEM study of granular transport filled horizontal screw conveyors. **Powder Technology**, Graz University of Technology, Institute of Process and Particle Engineering, Graz 8010, Austria, v. 305, p. 347-356, Jan. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0032591016306519>. Acesso em: 30 set. 2020.

O'SULLIVAN, C.; BRAY, D. J. Selecting a suitable time step for discrete element simulations that use central time integration scheme. **Engineering Computations**, Imperial College London, v. 21, n. 2/3/4, p. 278-303, Mar 2004. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/241224401\\_Selecting\\_a\\_suitable\\_time\\_step\\_for\\_discrete\\_element\\_simulations\\_that\\_use\\_the\\_central\\_difference\\_time\\_integration\\_scheme](https://www.researchgate.net/publication/241224401_Selecting_a_suitable_time_step_for_discrete_element_simulations_that_use_the_central_difference_time_integration_scheme). Acesso em: 08 nov. 2020.

RIBEIRO, Deise M. et al. Propriedades mecânicas dos grãos de soja em função do teor de água. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. 2, Maio/Ago. 2007. Disponível em: [https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-69162007000300019&lng=pt&tlng=pt](https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-69162007000300019&lng=pt&tlng=pt). Acesso em: 31 de out. 2020

SILVA, J. S.; et al. **Secagem e Armazenagem de produtos Agrícolas**. 2ª edição. Viçosa, Minas Gerais: Aprenda fácil, 2008.

XU, T. et al. A modelling and verification approach for soybean seed particles using the discrete element method. **Advanced Powder Technology**, School of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China, v. 29, n. 12, p. 3274-3290, Dez. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921883118304709?via%3Dihub>. Acesso em: 21 mai. 2020.

Yan, D. et al. A general modelling method for soybean seeds based on the discrete element method. **Powder Technology**, School of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China, v. 372, p. 212-226, Jul. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S003259102030423X>. Acesso em: 21 mai. 2020.

## APÊNDICE

### APÊNDICE 1 – DADOS GERADOS PELO SENSOR 1

| Tempo (s) | Taxa de vazão mássica (kg/s) |
|-----------|------------------------------|
| 0,840004  | 7,19807                      |
| 0,89      | 16,0045                      |
| 0,940003  | 18,6043                      |
| 0,990006  | 19,5373                      |
| 1,04393   | 29,873                       |
| 1,09      | 22,6758                      |
| 1,14      | 20,8223                      |
| 1,2       | 25,3576                      |
| 1,25      | 14,518                       |
| 1,3       | 25,5203                      |
| 1,35      | 27,7739                      |
| 1,4       | 15,3493                      |
| 1,45      | 27,9549                      |
| 1,5       | 27,7656                      |
| 1,55      | 15,5088                      |
| 1,6       | 28,5591                      |
| 1,65      | 26,2876                      |
| 1,7       | 14,1769                      |
| 1,75      | 27,1502                      |
| 1,8       | 21,6147                      |
| 1,86      | 14,5002                      |
| 1,91      | 29,7906                      |
| 1,96      | 20,8051                      |
| 2,01      | 14,9379                      |
| 2,06      | 30,0895                      |
| 2,11      | 20,1039                      |
| 2,16      | 15,0039                      |
| 2,21      | 29,7993                      |
| 2,26      | 19,3022                      |

|         |         |
|---------|---------|
| 2,31    | 14,7413 |
| 2,36    | 29,5843 |
| 2,42    | 15,6724 |
| 2,47    | 18,1245 |
| 2,52    | 29,6832 |
| 2,56666 | 16,3063 |
| 2,62    | 18,5554 |
| 2,67    | 28,8074 |
| 2,72    | 14,4042 |
| 2,77    | 18,6193 |
| 2,82    | 28,3824 |
| 2,87    | 13,8188 |
| 2,92    | 19,03   |
| 2,97    | 27,6041 |
| 3,02    | 13,4106 |
| 3,08    | 21,9941 |
| 3,13    | 23,4493 |
| 3,18    | 11,2064 |
| 3,23    | 22,2746 |
| 3,28    | 22,5349 |
| 3,33    | 10,6832 |
| 3,38    | 21,8126 |
| 3,43    | 21,5173 |
| 3,48    | 10,3789 |
| 3,53    | 22,1001 |
| 3,58    | 20,5874 |
| 3,63    | 10,0436 |
| 3,69    | 24,8384 |
| 3,74    | 16,8091 |
| 3,79    | 11,3512 |
| 3,84    | 24,6199 |
| 3,89    | 16,0211 |
| 3,94    | 11,564  |

|         |         |
|---------|---------|
| 3,99    | 24,7016 |
| 4,04    | 15,1906 |
| 4,09001 | 11,5414 |
| 4,14    | 24,31   |
| 4,19    | 14,1032 |
| 4,24    | 11,1507 |
| 4,29    | 23,7347 |
| 4,35    | 11,2312 |
| 4,4     | 14,5608 |
| 4,45    | 24,1102 |
| 4,5     | 10,9821 |
| 4,55    | 14,9406 |
| 4,6     | 23,262  |
| 4,65    | 9,9365  |
| 4,7     | 14,0871 |
| 4,75    | 22,5663 |
| 4,8     | 9,5522  |
| 4,85    | 15,0187 |
| 4,9     | 22,5084 |
| 4,96    | 8,09036 |
| 5,01    | 17,564  |
| 5,06    | 18,3092 |
| 5,11    | 7,90781 |
| 5,16    | 17,8559 |
| 5,21    | 17,5853 |
| 5,26    | 7,41338 |
| 5,31    | 17,6216 |
| 5,36    | 16,8414 |
| 5,41    | 7,21006 |
| 5,46    | 18,0179 |
| 5,51    | 16,1099 |
| 5,57    | 8,529   |
| 5,62    | 20,5955 |

|      |         |
|------|---------|
| 5,67 | 12,7168 |
| 5,72 | 8,46978 |
| 5,77 | 20,1601 |
| 5,82 | 12,104  |
| 5,87 | 8,68055 |

## APÊNDICE 2 – DADOS GERADOS PELO SENSOR 2

| Tempo (s) | Taxa de vazão mássica (kg/s) |
|-----------|------------------------------|
| 3,53      | 15,4312                      |
| 3,56      | 15,8829                      |
| 3,6       | 12,8282                      |
| 3,63      | 13,5779                      |
| 3,66      | 18,5336                      |
| 3,69      | 20,8173                      |
| 3,72      | 17,2844                      |
| 3,75      | 14,1708                      |
| 3,79      | 17,2666                      |
| 3,82      | 22,5531                      |
| 3,85      | 21,4338                      |
| 3,88      | 16,7218                      |
| 3,91      | 14,9308                      |
| 3,95      | 20,7577                      |
| 3,98      | 24,0381                      |
| 4,01      | 20,2346                      |
| 4,04      | 15,9722                      |
| 4,07      | 16,2235                      |
| 4,1       | 21,4822                      |
| 4,14      | 22,8147                      |
| 4,17      | 17,6047                      |
| 4,2       | 14,5558                      |
| 4,23      | 17,1288                      |
| 4,26      | 22,8368                      |

|         |         |
|---------|---------|
| 4,29001 | 22,1248 |
| 4,33    | 15,7618 |
| 4,36    | 14,6445 |
| 4,39    | 19,3544 |
| 4,42    | 23,3968 |
| 4,45    | 20,0036 |
| 4,48    | 15,4544 |
| 4,52    | 15,9575 |
| 4,54627 | 20,9632 |
| 4,58    | 22,772  |
| 4,61    | 18,1556 |
| 4,64    | 14,736  |
| 4,67    | 16,3157 |
| 4,71    | 23,2634 |
| 4,74    | 21,3776 |
| 4,77    | 16,472  |
| 4,8     | 14,6199 |
| 4,83    | 18,2025 |
| 4,87    | 22,6763 |
| 4,9     | 18,5828 |
| 4,93    | 14,2411 |
| 4,96    | 14,3464 |
| 4,99    | 18,8278 |
| 5,02    | 22,1932 |
| 5,06    | 16,382  |
| 5,09    | 13,193  |

|         |         |
|---------|---------|
| 5,12001 | 15,8294 |
| 5,15    | 21,4012 |
| 5,18    | 20,5897 |
| 5,21    | 15,5438 |
| 5,25    | 13,0261 |
| 5,28    | 17,8258 |
| 5,31    | 21,6848 |
| 5,34    | 18,4412 |
| 5,37    | 14,0794 |
| 5,4     | 13,1925 |
| 5,44    | 20,0199 |
| 5,47    | 20,8491 |
| 5,5     | 16,2446 |
| 5,53    | 12,2741 |
| 5,56    | 13,9039 |
| 5,59    | 19,5324 |
| 5,63    | 18,7339 |
| 5,66    | 14,0215 |
| 5,69    | 11,7615 |
| 5,72    | 15,3459 |
| 5,75    | 20,4708 |
| 5,78    | 18,2429 |
| 5,82    | 12,224  |
| 5,85    | 12,5074 |

## ANEXO

ANEXO 1 – Solicitação formal à *Altair Engineering, inc.* para uso do software *EDEM Academic Simulator*

---



### EDEM FOR POSTDOC PROGRAM APPLICATION PACK

This document includes

- Application Information and Guidelines (Page 2)
- Application Form (Page 3)

### Overview

The aim of the 'EDEM for Postdoc' program is to support academics undertaking research using the Discrete Element Method (DEM). This initiative has been designed specifically for postdoctoral researchers who are applying for funding and wish to use EDEM software as part of their research.

Successful applicants will get a free EDEM license for a duration of 3 months, enabling them to gather initial results to support their funding application.

### How to Apply?

Simply fill in the application form and letter below and return it to [academic@edemsimulation.com](mailto:academic@edemsimulation.com)

### When can applications be made?

Applications can be made at anytime throughout the year. Once submitted, applications will be reviewed and a response will be sent out within 2 weeks.

### What is included?

Successful applicants will receive the following:

- EDEM software license for a duration of 3 months
- Access to any software updates during the license period and technical support
- Access to the EDEM customer area including resources such as tutorials, EDEM User Forum etc

### Eligibility & conditions:

- Applicants must hold a doctoral degree (PhD) or be in the final stage of obtaining one
- Applicants must have reviewed and approved the Terms and Conditions mentioned in the application form

## Application Form

Please complete the application form below and return to: [academic@edamsimulation.com](mailto:academic@edamsimulation.com)

### Your details

|               |                       |
|---------------|-----------------------|
| First name    | Eduardo               |
| Last name     | Kamphorst             |
| Email address | ek002988@fahor.com.br |
| Phone         | +55 51 992581795      |

### Your current organization & role

|                                 |                                  |
|---------------------------------|----------------------------------|
| Institute                       | Faculdade de Horizontina - FAHOR |
| Department                      | MEchanical engineering           |
| Current position                | Graduate Student                 |
| Qualifications & Completed date |                                  |

### Principal Investigator details

|                      |                                  |
|----------------------|----------------------------------|
| First Name           | Eduardo                          |
| Last Name            | Kamphorst                        |
| Position / Job Title | Student                          |
| Institute            | Faculdade de Horizontina - FAHOR |
| Department           | Mechanical Engineering           |
| Email address        | ek002988@fahor.com.br            |

### Other institutions involved

*If you are planning to collaborate with other institutions, please describe which ones here.*

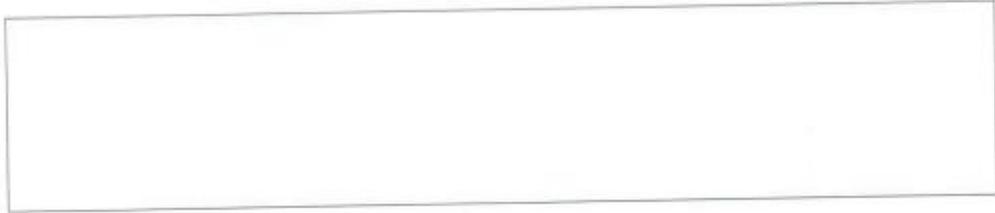
### About your research

|                   |   |
|-------------------|---|
| Proposed title    | Evaluation of the discrete element method applied to screw conveyor |
| Expected duration | 3 months  |

### Research project description

*Describe the proposed research project, providing context & background if applicable (max 500 words, not including program titles/references).*

The project consists on a bachelors thesis, in which the numerical method of discrete element will be evaluated, providing more reliability on its use on product development environment, mainly when focused on grain transport. On this thesis we will be acquiring data from a machine that uses screw conveyor to unload soybean grains in certain conditions, and we will evaluate if the discrete element method gets the approximate results simulating the same conditions.



#### Key research questions

List the questions this research project will attempt to address.

How close do the results of empirical measurements of soybean grains transport on a screw conveyor mechanical system with known boundary conditions will the simulation using the Discrete Element method get to?

#### Methodology

Outline the strategies & methodologies of this research project, including how EDEM software will be used.

Firstly, on known conditions of grain moisture, unloadings of a grain cart will be made, measuring the mass of grain loaded in it, and measuring the amount of grain mass unloaded by it, as well as the discharge time.

After several unloads, varying only the mass and consequently the time of discharge the data will be tabulated.

Then the pre simulation steps will start, and after being properly parameterized, it will be followed by the simulation processing.

The acquired simulation results will be compared to the empiric results, and the we will be able to say, if in this conditions the simulations gave us results as real as possible.

#### Opportunity to generate impact

*Provide details of how the proposed research has the potential to generate impact (from 300 words).*

Living in a country with a well developed agricultural economy, and working on the development of agricultural machinery I realized that brazilian industries do not use the Discrete Element Method to improve their own products. Learning this method and applying it to confirm its reliability will open up a new way to evaluate grain handling.

#### Funding bodies

*Specify all sources of funding of the proposed research including any agencies, academic institutions, commercial organizations, etc.*

| Funding body | Application deadline | Expected results date | Additional comments |
|--------------|----------------------|-----------------------|---------------------|
|              |                      |                       |                     |
|              |                      |                       |                     |
|              |                      |                       |                     |
|              |                      |                       |                     |

What budget is allocated for EDEM software in your funding proposal?

When would you like your free 3-month EDEM license to start?

•

5

I agree to:

- Share research updates and outcome with EDEM Team [by end of free license period]
- Acknowledge the use of EDEM software in publications (please refer to EDEM Referencing Guidelines document)
- the following Terms and Conditions:

1. the "Licensee" for the purposes of the License Agreement for EDEM Academic shall be the University stated in this application form;
  2. you and your Authorized Users are licensed to Use the Software for academic research and teaching purposes only and are specifically excluded from the use of the Software for commercial purposes;
  3. you will reference EDEM in, and will provide copies of, all presentations, published conference papers and published journal papers, and of reports submitted to your sponsors where such material is as a result of use of the Software;
  4. where you wish to publish work employing the EDEM API, you agree to release your API extension source code under the terms of the GNU General Public License Version 3;
  5. Approval from the EDEM team is required for publication of the results of studies comparing EDEM software with any other software.
- All other terms of the License to use EDEM Academic will be as set out in the License Agreement, which is provided with the software.

Date:

Signature

•

6

## ANEXO 2 – Relatório de pesagens gerado pela balança rodoviária

**Rogério Engel Agronegócio Ltda**

CNPJ: 02.425.071/0001-61  
 Telefone: 55-3535-3998

Inscrição Estadual: 1470044819  
 Fax: 55-3535-2847

Página: 1

Cidade: Três de Maio-RS

**Listagem de pesagens**

| Ticket               | Data/Hora          | Veiculo | Motorista   | Produto | Tara   | Bruto          | Liquid | Agente                       |
|----------------------|--------------------|---------|-------------|---------|--------|----------------|--------|------------------------------|
| 1.764                | 23/09/2020 08:46:( | TRA0000 | ADEMIR PEIT | SOJA    | 12.190 | 13.810         | 1.620  | 5.834 KAMPAG INDUSTRIAL LTDA |
| 1.765                | 23/09/2020 10:43:( | TRA0000 | ADEMIR PEIT | SOJA    | 12.190 | 13.770         | 1.580  | 5.834 KAMPAG INDUSTRIAL LTDA |
| 1.767                | 23/09/2020 10:58:( | TRA0000 | ADEMIR PEIT | SOJA    | 12.190 | 13.580         | 1.390  | 5.834 KAMPAG INDUSTRIAL LTDA |
| 1.768                | 23/09/2020 11:08:( | TRA0000 | ADEMIR PEIT | SOJA    | 12.190 | 12.230         | 40     | 5.834 KAMPAG INDUSTRIAL LTDA |
| 1.769                | 23/09/2020 11:14:( | TRA0000 | ADEMIR PEIT | SOJA    | 12.190 | 13.220         | 1.030  | 5.834 KAMPAG INDUSTRIAL LTDA |
| 1.770                | 23/09/2020 11:21:( | TRA0000 | ADEMIR PEIT | SOJA    | 12.190 | 12.210         | 20     | 5.834 KAMPAG INDUSTRIAL LTDA |
| 1.771                | 23/09/2020 11:28:( | TRA0000 | ADEMIR PEIT | SOJA    | 12.190 | 13.220         | 1.030  | 5.834 KAMPAG INDUSTRIAL LTDA |
| 1.772                | 23/09/2020 11:36:( | TRA0000 | ADEMIR PEIT | SOJA    | 12.190 | 12.220         | 30     | 5.834 KAMPAG INDUSTRIAL LTDA |
| 1.773                | 23/09/2020 11:41:( | TRA0000 | ADEMIR PEIT | SOJA    | 12.190 | 13.130         | 940    | 5.834 KAMPAG INDUSTRIAL LTDA |
| 1.774                | 23/09/2020 11:49:( | TRA0000 | ADEMIR PEIT | SOJA    | 12.190 | 12.230         | 40     | 5.834 KAMPAG INDUSTRIAL LTDA |
| 1.775                | 23/09/2020 13:38:( | TRA0000 | ADEMIR PEIT | SOJA    | 12.190 | 13.160         | 970    | 5.834 KAMPAG INDUSTRIAL LTDA |
| 1.776                | 23/09/2020 13:43:( | TRA0000 | ADEMIR PEIT | SOJA    | 12.190 | 12.230         | 40     | 5.834 KAMPAG INDUSTRIAL LTDA |
| 1.777                | 23/09/2020 13:50:( | TRA0000 | ADEMIR PEIT | SOJA    | 12.190 | 13.360         | 1.170  | 5.834 KAMPAG INDUSTRIAL LTDA |
| 1.778                | 23/09/2020 13:57:( | TRA0000 | ADEMIR PEIT | SOJA    | 12.190 | 12.240         | 50     | 5.834 KAMPAG INDUSTRIAL LTDA |
| 1.779                | 23/09/2020 14:04:( | TRA0000 | EDEMIR PEIT | SOJA    | 12.190 | 13.100         | 910    | 5.834 KAMPAG INDUSTRIAL LTDA |
| 1.780                | 23/09/2020 14:10:( | TRA0000 | EDEMIR PEIT | SOJA    | 12.190 | 12.250         | 60     | 5.834 KAMPAG INDUSTRIAL LTDA |
| 1.781                | 23/09/2020 14:17:( | TRA0000 | ADEMIR PEIT | SOJA    | 12.190 | 13.640         | 1.450  | 5.834 KAMPAG INDUSTRIAL LTDA |
| 1.782                | 23/09/2020 14:24:( | TRA0000 | ADEMIR PEIT | SOJA    | 12.190 | 12.230         | 40     | 5.834 KAMPAG INDUSTRIAL LTDA |
| <b>Total Tara:</b>   |                    |         |             |         |        | <b>219.420</b> |        |                              |
| <b>Total Bruto:</b>  |                    |         |             |         |        | <b>231.830</b> |        |                              |
| <b>Total Liquid:</b> |                    |         |             |         |        | <b>12.410</b>  |        |                              |