Universidade Federal do Espírito Santo
Centro Tecnológico
Colegiado de Engenharia Ambiental

JOSE CLAUDIO TARDIN TAVARES NEGRIS

SIMULAÇÃO DO FLUXO DE MATERIAL EM CHUTE DE TRANSFERÊNCIA ATRAVÉS DO MÉTODO DOS ELEMENTOS DISCRETOS

VITÓRIA
2018

JOSE CLAUDIO TARDIN TAVARES NEGRIS

SIMULAÇÃO DO FLUXO DE MATERIAL EM CHUTE DE TRANSFERÊNCIA ATRAVÉS DO MÉTODO DOS ELEMENTOS DISCRETOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Ambiental do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientadora: Prof.a Dr.a Jane Méri Santos

Co-orientador: Prof. Dr. Rafael Sartim

VITÓRIA

2018

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por poder sentir sua presença comigo e pela força para seguir em frente;

Aos meus pais, Eulália Maria Tardin Tavares Negris e Edno Negris, por dedicarem sua vida a mim, seu filho e por acreditarem sempre em mim;

A Neilessandra da Silva, pelo amor, companheirismo incondicional e pela paciência,

Aos meus professores orientadores, Rafael Sartim e Jane Méri Santos, pelo desafio lançado, confiança e por todos os valiosos ensinamentos;

Ao meu gestor de estágio, Mario Delmaestro, por todos ensinamentos e pela forma paciente como me ajudou a conduzir meu período de estágio;

Ao meu professor, Bruno Furieri, por aceitar o convite para participar desta banca examinadora;

Ao meu supervisor de estágio, Marcelo Gottardi, pelo apoio e incentivo na execução deste trabalho;

A minha avó e madrinha, Maria Thereza Tardin, *In Memorian*, por sempre ter me apoiado e acreditado em mim;

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

O correto projeto e dimensionamento de chutes de transferência são fundamentais para o transporte de materiais a granel, bem como para a vida útil do equipamento e a redução em suas emissões atmosféricas. Grande parte do material particulado emitido em transferências entre correias transportadoras, pode ser contido caso haja a adoção de práticas recomendáveis no projeto dos chutes. Tendo em vista esta perspectiva, quando um chute já implementado apresenta problemas de emissão e desgaste, ferramentas de simulação computacional tornam-se valiosas aliadas na visualização do fenômeno e no apoio a tomada de decisão. Este trabalho, tem como objetivo avaliar o fluxo de material em um chute de transferência industrial, servindo como base para a implementação de modificações, contribuindo assim para a redução nas emissões fugitivas, em processos com estas características. Para este procedimento, foram realizadas simulações com o intuito de investigar os efeitos da adição de componentes mecânicos (garfos) e possíveis modificações (defletora). Estas modificações foram elaboradas observando-se os efeitos vistos em área e utilizando-se de conhecimentos técnicos e exemplos já abordadas na literatura. Com a realização das simulações observou-se a modificação no sistema, e na última simulação, melhorias em desgaste e redução de emissão de particulado. Além de modificações mecânicas, é importante a adoção de cortinas de pó, para a contenção de material na entrada do chute. A geração de melhorias ambientais para a área é inestimável, tendo em vista a importância da problemática ambiental e os ganhos gerados por essas melhorias; ganhos ambientais e de qualidade de vida para os trabalhadores. Ressalta-se que a realização de modificações em equipamentos como chutes é um grande desafio e a adoção de simulações utilizando o método dos elementos discretos caracteriza-se por ser parte de um presente mais tecnológico e informatizado, possível graças a evolução em software e hardware, ocorrida nas últimas décadas.

Palavras-chave: Correias transportadoras, chutes de transferência, emissões atmosféricas, simulação computacional.

ABSTRACT

The design and dimensioning of transfer chutes are fundamental for the transportation of granulated materials, as well as for the useful life of the equipment and the reduction of its atmospheric conditions. Much of the particulate matter emitted in transfers between conveyor belts can be restrained if there is good practice in the design of chutes. Considering this perspective, when a chute already implemented presents emission and wear problems, computer simulation tools become valuable allies in visualizing the phenomenon and supporting decision making. This work aims to evaluate the flow of material in an industrial transfer chute, serving as a basis for the implementation of modifications, thus contributing to the reduction in fugitive emissions, in processes with these characteristics. For this procedure, simulations were performed in order to investigate the effects of adding mechanical components (forks) and possible modifications (deflector). These modifications were elaborated observing the effects seen in the area and using the technical knowledge and examples already discussed in the literature. With the simulations, it was observed the modification in the system, and in the last simulation, improvements in wear and reduction of particulate emission. In addition to mechanical modifications, it is important to adopt powder curtains to contain material at the entrance of the chute. The generation of environmental improvements for the area is invaluable, considering the importance of environmental issues and the gains generated by these improvements; environmental gains and quality of life for workers. It is noteworthy that making modifications in equipment such as chutes is a great challenge, the adoption of simulations using the discrete elements method is characterized by being part of a more technological, and computerized present, thanks to the evolution in software and hardware, occurred in the last decades.

Key Words: Transport belt, transfer chute, atmospheric emissions, computacional simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Correia transportadora e seus componentes 13
Figura 2 – Ponto de transferência 14
Figura 3 – Modelo de chute de transferência e suas repartições 16
Figura 4 – Relação mostrando o par de forças que determina o torque de atrito 23
Figura 5 – Modelo CAD gerado no SolidWorks 24
Figura 6 – Identificação dos componentes do chute de transferência 26
Figura 7 – Modelo de partícula adotada no DEM. 28
Figura 8 – Validação do modelo com visita em campo 30
Figura 9 – Resultado da primeira simulação. Vista lateral 31
Figura 10 – Resultado da primeira simulação. Vista superior.....31
Figura 11 – Identificação do efeito de retorno de material pela correia de chegada, nos 10 segundos iniciais de simulação.....33
Figura 12 – Identificação do efeito de retorno de material pela correia de chegada, após os 10 segundos iniciais de simulação.....33
Figura 13 – Resultado da segunda simulação. Vista lateral 35
Figura 14 – Resultado da segunda simulação. Vista superior 35
Figura 15 – Resultado da terceira simulação. Vista lateral 38
Figura 16 – Resultado da terceira simulação. Vista superior.....38
Figura 17 – Identificação do efeito de retorno de material pela correia de chegada, nos 20 segundos iniciais de simulação.....39
Figura 18 – Resultado da quarta simulação. Vista lateral. Após formação da caixa de pedra.....41
Figura 19 – Resultado da quarta simulação. Vista lateral. Durante a formação da caixa de pedra 41
Figura 20 – Resultado da quarta simulação. Vista superior, durante os 10 primeiros segundos de simulação 42
Figura 21 – Resultado da quarta simulação. Vista superior, após 10 primeiros segundos de simulação 43
Figura 22 – Desenvolvimento do fluxo de material em intervalos de tempo iguais 50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Simulações realizadas ..... **Erro! Indicador não definido.**
Tabela 2 – Propriedades das partículas no DEM 27
Tabela 3 – Outras propriedades das partículas no DEM 27
Tabela 4 – Mudança nas propriedades das partículas no DEM 32

LISTA DE SÍMBOLOS

g aceleração da gravidade [m2s-2]

m_p massa da partícula [Kg]

$\boldsymbol{v}_p$ velocidade da partícula [ms-2]

$\boldsymbol{F}_{p,c}$ força de contato resultante da colisão entre as partículas e entre partículas e parede [N]

$\boldsymbol{F}_{p^{\to}c}$ força existente adicional, sendo responsável pela contabilização da interação entre fluido e partícula [N]

$\boldsymbol{J}p$ momento de inércia [Kgm2]

wp velocidade angular da partícula [rad/s]

$\boldsymbol{M}_p$ torque aplicado pelas forças de contato [Nm]

F_N^0 força de contato normal [N]

K_L rigidez de carregamento [N/m]

K_U rigidez de descarregamento [N/m]

δ sobreposição normal na colisão

δ^0 sobreposição normal antes da colisão

$\boldsymbol{F}_T$ força tangencial [N]

d_{st} deslocamento tangencial relativo [m]

μ coeficiente de atrito

N força de reação a normal [N]

R raio de curvatura [m]

P peso do objeto [N]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 10
2 OBJETIVOS 11
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 12
3.1 Poluição do ar por material particulado 12
3.2 Correias transportadoras e chutes de transferência 13
3.3 Trajetória de material no Chute de Transferência 17
3.4 Emissão fugitiva de material particulado no ponto de transferência e suas técnicas de controle 17
4.1 Modelagem Matemática 19
4.1.1 Modelagem da fase discreta 19
4.2 Propriedades mecânicas dos materiais 21
4.2.1 Módulo de elasticidade 22
4.3 Propriedades dinâmicas dos materiais 22
4.3.1 Coeficientes de restituição (Cr) 22
4.3.2 Coeficiente de atrito estático (μe) 22
4.3.3 Coeficiente de atrito dinâmico (μd) 23
4.3.4 Coeficiente de rolamento (μr) 23
4.4 Geometria 24
4.5 Simulações realizadas e Software ROCKY DEM 25
4.6 Condições de input no Software ROCKY DEM 27
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO 30
5.1 Análise do fluxo – Caso base 30
5.2 Análise do fluxo – Inclusão de raspadores 36
5.3 Análise do fluxo – Inclusão de garfo na região de entrega de material 38
5.4 Análise do fluxo – Modificação na defletora 41
6 CONCLUSÕES 46
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 47
REFERÊNCIAS 48
APÊNDICE A – DESENVOLVIMENTO DO FLUXO DE MATERIAL 50

1 INTRODUÇÃO

Segundo Cecala et al (2012), os transportadores de correia estão entre os equipamentos mais utilizados nas operações de processamento mineral. Os transportadores de correia, são de fundamental importância para a indústria, onde é necessário transportar material a granel por longas distâncias. Um transportador de correia é uma grande tira de borracha que fica esticada ao redor de duas ou mais polias, movimentando-se com uma velocidade definida e carregando certa quantidade de material.

Um componente, presente em pontos de transferência entre correias é denominado chute de transferência. Uma de suas funções é a de conter o material, para que o mesmo não se disperse pela atmosfera ambiente, além de direcionar o fluxo de material entre a transferência. O chute de transferência tem por objetivo cumprir algumas condições como, realizar a transferência do material a granel na taxa especificada e sem entupimentos, proteger os funcionários de ferimentos, minimizar a fuga de materiais, devolver as raspas de material para o fluxo principal e facilitar a manutenção (SWINDERMAN ET AL., 2009).

“A função primária de um chute de transferência é transferir de maneira confiável o material a granel a uma taxa de fluxo determinada” (SWINDERMAN ET AL., 2009), devendo haver uma passagem mais homogênea de material através do chute à correia, pois a transferência, momentânea, de quantidades de material a granel, acima do projetado, pode resultar em perdas para o sistema, em desalinhamento e mudança do centro de gravidade da correia. A Modelagem Discreta de Elementos (DEM) computadorizada vem como uma ferramenta de apoio na busca do fluxo confiável de material.

O chute de transferência tem, como alguns de seus principais componentes, garfos, chapas defletoras e raspadores, todos eles com funções primordiais no correto funcionamento do equipamento, permitindo o fluxo de material a uma taxa constante e segura. Garfos e defletoras, tem como principal função o direcionamento correto do material, sendo os raspadores, fundamentais para a contenção da queda de material no retorno de correias transportadoras.

Dentre os muitos poluentes atmosféricos, o material particulado (MP) está associado a efeitos deletérios ao sistema respiratório e cardiovascular na população

exposta (ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE, 2006). Mediante a necessidade de controle deste poluente na atmosfera, destaca-se a necessidade de controle dessa emissão nas transferências entre correias (região onde há grande fuga de material). Portanto, o estudo da emissão de material particulado em chutes de transferência é de fundamental importância para a redução desta emissão, tendo em vista seu funcionamento e a quantidade de material gerado em uma transferência. É sabido que em um chute de transferência grande quantidade de material é ressuspenso devido à sua movimentação e que do ponto de vista ambiental isso resulta em um elevado índice de emissão. Tendo em vista essa perspectiva, o estudo de chutes de transferência, visando a redução de fuga de materiais, tem sido parte do escopo de diversos trabalhos, resultando em modificações nesses sistemas e em reduções significativas nas emissões.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é simular o fluxo de material particulado utilizando a Modelagem Discreta de Elementos, em uma correia transportadora de forma a expor pontos importantes que possam influenciar o comportamento das emissões fugitivas.

2.2 Objetivos Específicos

Baseando-se no objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Validar a modelagem do fluxo de material particulado no chute de transferência por meio da comparação com imagens obtidas no experimento em campo;
- Analisar a influência ocasionada por alterações na geometria do chute de transferência no fluxo de material.
- Investigar possíveis causas de emissão de material particulado na região de instalação do chute.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Poluição do ar por material particulado

Segundo a Política Nacional do Meio Ambiente, poluição é a degradação da qualidade ambiental resultante de atividades que, direta ou indiretamente, prejudiquem a saúde, o bem-estar e a segurança da população; criem condições adversas às atividades sociais e econômicas; afetem desfavoravelmente a biota; afetem as condições estéticas ou sanitárias do meio ambiente.

A resolução CONAMA 003/1990 define poluente atmosférico como: “Qualquer forma de matéria ou energia com intensidade e em quantidade, concentração, tempo ou características em desacordo com os níveis estabelecidos, e que tornem ou possam tornar o ar:

I. Impróprio, nocivo ou ofensivo a saúde;

II. Inconveniente ao bem-estar público;

III. Danoso aos materiais, à fauna e flora;

IV. Prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade e às atividades normais da comunidade” (Resolução CONAMA nº 003/1990).

Além disso, a poluição do ar pode ser entendida, também, como o lançamento de compostos em desacordo com os padrões ambientais estabelecidos (SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS HÍDRICOS, 2006).

Por material particulado (MP) entende-se uma mistura complexa de partículas extremamente pequenas e gotículas líquidas, de composição variável, podendo conter muitos componentes, como ácidos compostos orgânicos, metais, entre outros (EPA, 2015).

Sua classificação baseia-se em seu diâmetro e que está diretamente relacionado ao seu efeito nocivo à saúde. Partículas menores que 10µm são denominadas inaláveis, enquanto menores que 2,5µm são consideradas respiráveis (EPA, 2015). Segundo a EPA (2015), Partículas mais finas, respiráveis, são capazes de afetar o coração e o pulmão causando efeitos

deletérios à saúde. Devido à complexidade e os diferentes tamanhos de partículas associadas a efeitos sobre a saúde humana, vários termos são utilizados para definir as partículas em suspensão, dentre elas as Partículas Totais em Suspensão (PTS), que são, por definição, a massa de partículas coletadas pelo método do amostrador de grandes volumes, entre 0,3 e 100µm.

Comentado [JMS1]: Acho que vc deve expandir este paragrafo falando sobre partículas totais em suspensão e partículas sedimentadas

3.2 Correias transportadoras e chutes de transferência

De acordo com Santos e Malagoni (2014), correias transportadoras detêm uma posição dominante no transporte de materiais devido às suas vantagens, como economia e segurança de operação, confiabilidade, versatilidade e enorme variabilidade de capacidade. No setor minero-metalúrgico, é possível observar que as correias transportadoras se constituem no meio mais difundido para o transporte de grandes quantidades de material a granel.

As correias são utilizadas em numerosos processos, em conexão com seu propósito normal de providenciar um fluxo contínuo de materiais entre setores operacionais (SANTOS E MALAGONI, 2014).

Uma correia transportadora é composta por diferentes partes (figura 1). Conforme Cecala et al (2012), um transportador e seus respectivos pontos de transferência associados, podem gerar uma grande quantidade de material inalável. Sendo uma das principais fontes de emissões fugitivas em uma operação no setor mineral.

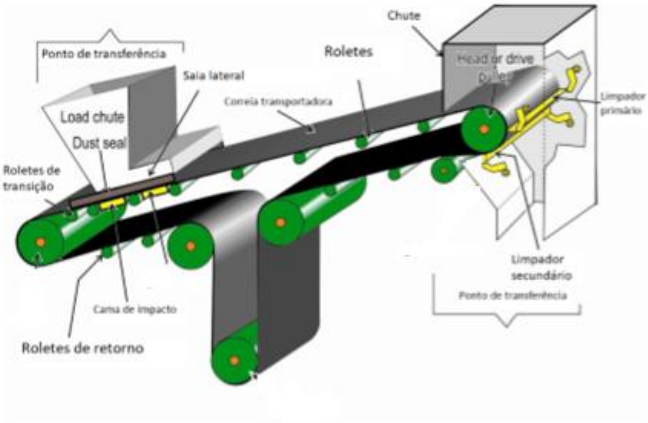

Figura 1 – Correia transportadora e seus componentes

FONTE: Adaptado de CECALA et AL (2012).

Em geral, algumas das razões pelas quais há a instalação de pontos de transferência em transportadores são (figura 2):

- Para mudar a direção horizontal do material em movimento;
- Para cobrir longas distâncias;
- Para permitir que haja energia efetiva de transmissão para cobrir uma distância muito longa que não poderia ser realizada por uma única correia.

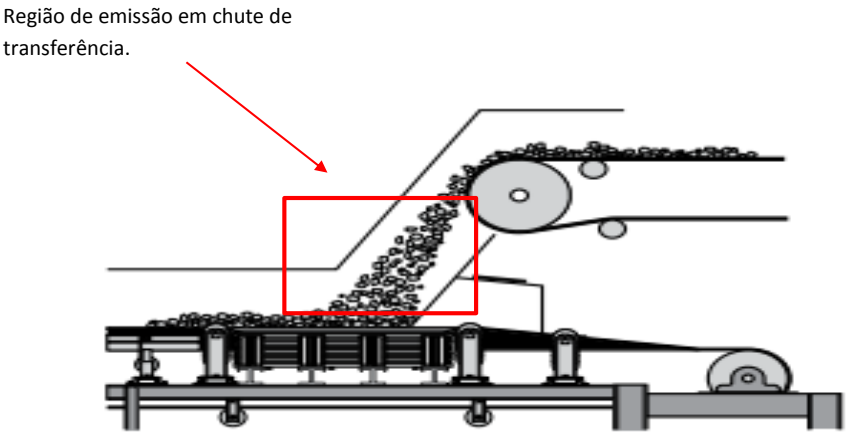

Figura 2 – Ponto de transferência e região de emissão em chute

FONTE: Adaptado de SWINDERMAN ET AL. (2009).

O dimensionamento em projeto de chutes é influenciados por condições como a capacidade de transporte, as características do material manuseado, a velocidade e a inclinação da correia e o número de zonas de carregamento do transportador (SWINDERMAN, ET AL., 2009).

Porém, alcançar todas essas condições em um desenho de chute, torna-se por vezes complexo, devido às condições de espaço e localização do ponto de transferência.

Em condições normais, raspadores de correia são instalados na polia de descarga, de um chute, para remover material que fica aderido à correia além do ponto de descarga (SWINDERMAN ET AL., 2009). Sabe-se que um chute bem projetado, tem por consequência, também, a redução na emissão difusa, atuando na contenção do material gerado no processo. Uma espécie de cortina pode ser colocada na saída do chute, com a finalidade de impedir a passagem de material particulado para o ambiente externo. Em geral, no dimensionamento de um chute são fundamentais duas características:

I. O chute deve direcionar o material transportado na mesma direção de movimento da correia receptora com carga centralizada, para prevenção de desalinhamento e desgaste;

II. A largura do chute na descarga deve ser da ordem de 2/3 da largura da correia receptora (ROBERTS, 2003).

O desenho do chute de transferência de modo que seja contemplada o acesso facilitado dos componentes para a manutenção é fundamental. Em geral, é preciso desenhar a estrutura do chute, de modo que a mesma se localize na melhor posição (para os componentes), oferecendo assim espaço para que a manutenção seja realizada.

Segundo Swinderman Et Al (2009), o desenho de um chute de transferência convencional, normalmente é realizado por um projetista experiente ou por um engenheiro, utilizando princípios básicos aceitos pela indústria. Sendo assim, um chute de transferência convencional normalmente consiste das seguintes partes (conforme figura 3):

A. Chute Dianteiro – Parede dianteira;
B. Chute de Queda;
C. Chute de Carga;
D. Zona de Acomodação.

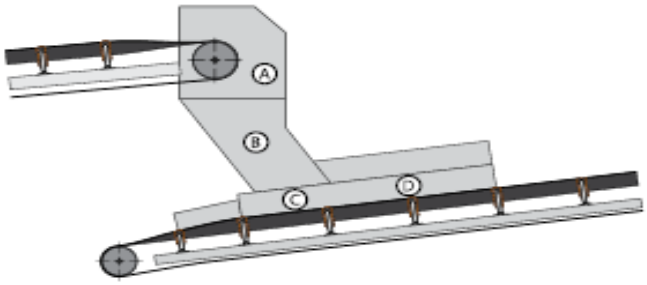

Figura 3 - Modelo de chute de transferência e suas repartições

FONTE: SWINDERMAN, ET AL. (2009).

3.3 Trajetória de material no Chute de Transferência

O conjunto de pontos pelo qual o material a granel passa desde o momento em que entra em um chute até o momento em que é descarregado na correia seguinte, é chamado trajetória.

Ao se projetar um chute de transferência, a geometria deve ser calculada, permitindo-se que uma menor quantidade possível de material se acumule sobre a parede dianteira do mesmo (Figura 3).

3.4 Emissão fugitiva de material particulado no ponto de transferência e suas técnicas de controle

A EPA (2015), traz emissões fugitivas como aquelas que não passam por dispositivos projetados para direcionar as emissões tais como, chaminés, dutos e outros dispositivos equivalentes. Siqueira (2007), traz como exemplos de fontes de emissões fugitivas as pilhas de estocagem, as torres de resfriamento e os componentes de tubulações em processos industriais.

Conforme há a passagem de material através do chute, há a geração de um fluxo de ar, e com ele material particulado é carregado ou desprendido para fora da região do transportador. A velocidade do ar passando pelo chute e a coesão entre as partículas do material carregado são as condições fundamentais e determinantes que ocorra transporte de material particulado pelo fluxo (emissões fugitivas).

Swinderman, Et Al. (2009), define uma relação de proporcionalidade entre as grandezas pó gerado, velocidade do ar na entrada do chute, tamanho das partículas e coesão, ilustrada na equação 3.1.

$$Pó\ Gerado\ \alpha\ \frac{Velocidade\ do\ ar}{Tamanho\ das\ partículas\ x\ coesão} \qquad (3.1)$$

O volume de ar que é transportado através de um chute está diretamente relacionado às dimensões das aberturas do mesmo, bem como às aberturas existentes e a outros componentes de processamento (SWINDERMAN ET AL., 2009). Portanto, o desenho do ponto de transferência, torna-se fundamental para o controle do pó gerado e emitido.

O minério de ferro granulado, assim como a pelota de minério de ferro, tem sua origem no minério de ferro e é uma matéria-prima rica e ferro, vindo diretamente das minas, sendo o principal constituinte do material em estudo.

O acumulo de material nas paredes do chute, bem como seu desgaste, pode ser reduzido ao se utilizar de componentes de projeto para este fim. Dentre alguns dos principais componentes tem-se os defletores, barras metálicas e as chapas de desgaste.

Defletores podem ser utilizados dentro de um chute de transferência a absorção de impactos, minimizando assim o desgaste. É importante que entre o defletor e a polia dianteira do transportador alimentador, haja espaço suficiente para impedir o bloqueio da passagem, por pedaços maiores de material. Defletores de chapa localizados no fundo do chute de carregamento, próximos a correia, podem auxiliar na redução de problemas associados ao carregamento descentralizado.

A instalação de barras metálicas, permitem a formação de uma camada de proteção na correia, devido à passagem preferencial de partículas menores. As partículas maiores, deslizam pela inclinação e depositam-se sobre a correia de forma amortecida, devido à presença das partículas menores que se depositaram anteriormente.

“O impacto e o deslizamento constantes de material contra as laterais do chute de transferência são sua principal fonte de desgaste. Uma forma de reduzir o desgaste do chute em si é o uso de chapas sacrificiais dentro dele” (SWINDERMAN ET AL., 2009). Essas chapas também podem ser instaladas com a finalidade de reduzir a fricção com a parede e/ou a adesão do material.

Com os avanços tecnológicos obtidos nas últimas décadas, novos sistemas de contenção de emissão de material particulado foram desenvolvidos. Para chutes de transferência, sistemas de despoeiramento (sistema de ventilação local exaustora) e supressão de pó são fundamentais para o controle de emissões fugitivas, sendo os meios mais utilizados e impedindo que o material particulado polua o ambiente vizinho (ACGIH, 2010).

Estudos demonstraram que o aumento da estrutura do chute na região de descarga com a finalidade de formar um enclausuramento, reduz a velocidade do ar e faz com que a poeira em suspensão retorne para o fluxo de material granular, o que diminui o potencial para geração de emissão (CHEN et al., 2012; CECALA et al., 2012).

A captura passiva de material com a instalação de cortinas de borracha no fim do enclausuramento do chute de transferência é outra técnica comumente utilizada em área. Esses componentes auxiliam na diminuição da velocidade do ar no interior do chute e possibilitam que o material em suspensão retorne para a corrente de material granular. Também é aconselhável instalar as cortinas no ponto de entrada da correia de alimentação no chute de transferência para que haja diminuição do fluxo de ar, reduzindo assim a quantidade de material saindo pela região de entrada (CECALA et al., 2012).

4 METODOLOGIA

4.1 Modelagem Matemática

Este trabalho utilizará do método dos elementos discretos (DEM), que será responsável por simular a trajetória das partículas sujeitas às forças de contato.

De acordo com Assumpção (2015), um modelo DEM bem calibrado pode ser utilizado para entender mais sobre processos industriais. Isto é, pode-se compreender melhor sobre o fluxo de material em chute de transferência, por exemplo, utilizando-se a visualização de resultados de simulações no DEM.

4.1.1 Modelagem da fase discreta

O método dos elementos discretos é uma boa alternativa para tratar fluxos de partículas numericamente, pois o fluxo de material particulado pode agir de forma similar aos fluidos ou aos sólidos. “É um método capaz de descrever o comportamento mecânico de partículas baseando-se no uso de um algoritmo numérico explícito que acompanha a interação de cada partícula, contato por contato, com outras partículas e geometrias (formas físicas) que as circundam, modelando-se, assim, seu movimento (MERENDINO, 2011).

As forças agindo em cada partícula, podem ser divididas em duas categorias: Forças de contato (para as interações partícula-partícula e partícula-parede) e forças de corpo, como a gravidade (GAMBARINI, 2017). A força resultante atuando sobre uma partícula p é a soma vetorial das forças gravitacional m_pg, a força de contato partícula-partícula ou partícula-parede $F_{p,c}$e a força adicional $F_{p\vec{-}c}$ que considera a interação entre o fluido e a partícula. Os movimentos translacional e rotacional da partícula p, podem ser descritos pelas equações 4.1 e 4.2, respectivamente.

$$m_p \frac{d\boldsymbol{v}_p}{dt} = \boldsymbol{F}_{p,c} + \boldsymbol{F}_{p\vec{-}c} + m_p\mathbf{g} \qquad (4.1)$$

$$\boldsymbol{J}p \frac{dwp}{dt} = \boldsymbol{M}_p \qquad (4.2)$$

Comentado [JMS2]: O que significa cada variável desta equação?

Onde: m_p : Massa da partícula p (Kg), $\boldsymbol{v}_p$: Velocidade da partícula p (m/s), g aceleração da gravidade (ms-2), wp é a velocidade angular da partícula (rad/s), $\boldsymbol{J}p$ seu momento de inércia (Kgm2), $\boldsymbol{F}_{p,c}$ é a força de contato resultante da colisão entre as partículas e entre partículas e parede (N) e $\boldsymbol{M}_p$ é o torque aplicado pelas forças de contato (Nm) e $\boldsymbol{F}_{p\vec{-}c}$ é a força existente adicional, sendo responsável pela contabilização da interação entre fluido e partícula (N).

Durante sua movimentação, a partícula pode interagir com suas partículas vizinhas ou paredes e interagir com o fluido ao seu redor, com o qual quantidade de movimento e energia são trocados (ASSUMPÇÃO et al, 2015). O movimento da partícula não é afetado somente pelas forças e torques originários das partículas e fluido vizinhos, mas também pela propagação de ondas de perturbação ocasionadas por partículas e fluidos distantes.

Na abordagem DEM, é escolhido um passo de tempo menor do que um valor crítico tal que durante um único passo de tempo (time-step) a perturbação da partícula e do fluído não pode se propagar além das partículas e fluido vizinhos (CUNDALL e STRACK, 1979).

As forças de contato podem ser decompostas em dois componentes perpendiculares, a força normal e a tangencial ao plano de contato. Sendo as direções normal e tangencial, definidas em função da sobreposição normal e do

deslocamento tangencial relativo durante o contato, respectivamente (GAMBARINI, 2017).

4.1.2 Força de Contato Normal

O cálculo da força de contato normal se dá através do modelo de histerese linear (WALTON, 1993). A força normal é aproximada por meio de duas linhas retas com inclinações diferentes, uma representando o carregamento e outra o descarregamento. O Sistema de equações 4.3 e a equação 4.4 descrevem o modo de cálculo da força normal.

$$F_N = \begin{cases} \min(\boldsymbol{F}_N^0 + K_U \Delta\delta,\ \ K_L \delta) & para\ \Delta\delta \geq 0 \\ \max(\boldsymbol{F}_N^0 + K_U \Delta\delta,\ \ 0.001 K_L \delta) & para\ \Delta\delta < 0 \end{cases} \tag{4.3}$$

$$\Delta\delta = \delta\ \ -\delta^0 \tag{4.4}$$

Onde: F_N^0 é a força de contato normal no instante de tempo anterior (N), K_L e K_U são as rigidezes de carregamento e descarregamento (N/m), δ é a sobreposição normal na colisão e δ^0 a sobreposição no tempo anterior (GAMBARINI, 2017).

As rigidezes de carregamento e descarregamento são medidas de resistência de um corpo à deformação, ocasionado por uma força aplicada. Sendo uma quantidade inerente ao material em análise.

4.1.3 Força de Contato Tangencial

Segundo Gambarini (2017), um modelo elástico-ficcional é adotado para o cálculo da força tangencial F_T. Ela deve ser menor ou igual ao produto entre a força normal e o coeficiente de atrito estático η_{st} caso não haja deslizamento ou $\eta_d$quando houver deslizamento. F_T é calculado segunda a equação 4.5.

$$F_T = \begin{cases} \min\left(\boldsymbol{F}_T^0 + K_L d_{st}, \eta_{st} \boldsymbol{F}_N\ \right) & Se\ em\ deslizamento \\ \max\left(\boldsymbol{F}_T^0 + K_L d_{st}, \eta_d \boldsymbol{F}_N\right) & Caso\ contrário \end{cases} \tag{4.5}$$

Onde: F_T^0 é a força tangencial do passo de tempo anterior e d_{st} é o deslocamento tangencial relativo durante o contato.

4.2 Propriedades mecânicas dos materiais

4.2.1 Módulo de elasticidade

Segundo Merendino (2011), módulos de elasticidade são medidas de resistência de um material específico a uma deformação elástica, quando submetido a uma força.

$$\Delta = \frac{tensão}{deformação} \qquad (4.6)$$

De acordo com a forma com que a tensão e a deformação são aplicadas, incluindo suas direções, é possível definir vários tipos de módulos de elasticidade. Alguns dos mais comumente utilizados são:

- Módulo de Young: É definido como a tensão de tração aplicada pela deformação ocasionada por esta tração.
- Módulo de Cisalhamento ou de Rigidez: descreve a tendência de um objeto ao cisalhamento, que é a deformação da forma deste a volume constante.
- Coeficiente de Poisson: é a relação entre a deformação lateral e a deformação axial de um corpo quando submetido a uma tração ou compressão axial.

4.3 Propriedades dinâmicas dos materiais

4.3.1 Coeficientes de restituição (C_r)

É a razão entre as velocidades de aproximação e de separação de dois corpos em uma colisão (MERENDINO, 2011).

$$C_r = \frac{(v_2' - v_1')}{(v_1 - v_2)} \qquad (4.7)$$

Onde: v_1 e v_2 são as velocidades antes da colisão e v_1' e v_2' são as velocidades após a colisão.

4.3.2 Coeficiente de atrito estático (μ_e)

É o valor escalar que indica a quantidade de força necessária para que um corpo, em repouso, seja posto em movimento (MERENDINO, 2011).

A força pode ser expressa como:

$$F = \mu_e N \qquad (4.8)$$

Onde N é a reação da força normal ao peso do objeto, em Newtons.

4.3.3 Coeficiente de atrito dinâmico (μ_d)

É um valor escalar que determina a força de atrito existente, contrária ao movimento de um objeto. De forma similar à fórmula de força de atrito estático, a força de atrito dinâmico pode ser calculada como:

$$F = \mu_d N \qquad (4.9)$$

Sendo N a reação da normal ao peso do objeto em Newtons (MERENDINO, 2011).

4.3.4 Coeficiente de rolamento (μ_r)

Ao realizar um movimento de rolamento, o corpo e a superfície podem se deformar, fazendo assim oposição ao movimento de rolamento. Em geral esse efeito é representado por um torque aplicado a cada um dos corpos, conforme a figura 4 (MERENDINO, 2011).

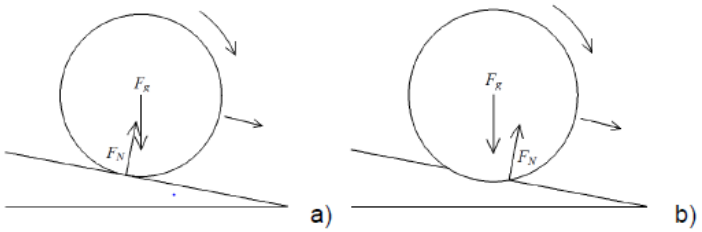

Figura 4 – Relação mostrando o par de forças que determina o torque de atrito, sendo F_N a força de reação agindo sobre o objeto do plano e F_g a componente normal do peso do objeto. O coeficiente de atrito de rolamento é o braço do par de forças. a) baixo

atrito de rolamento; b) alto atrito de rolamento.

Fonte: MERENDINO, 2011.

Definido como coeficiente de atrito de rolamento, μ_r é um escalar utilizado para determinar quão grande é o torque necessário para colocar um objeto em movimento, a partir do repouso.

O coeficiente de atrito de rolamento é definido como:

$$\mu_r = \frac{t}{PR} \qquad (4.10)$$

Onde t é o torque necessário para que haja o rolamento, P o peso do cilindro e R o raio de curvatura local no ponto de contato.

4.4 Geometria

O modelo simplificado de um chute de transferência foi dimensionado, utilizando-se um software de CAD. O dimensionamento foi feito para um caso real da Indústria de mineração, para um chute de transferência existente em um sistema de passagem de correias de minério. O chute transfere minério bruto, sendo de fundamental importância no sistema a que pertence.

O SolidWorks foi utilizado, conforme mencionado anteriormente, para o desenho da geometria, utilizando os desenhos obtidos através de busca em acervo técnico (Figura 5). A geometria, exemplificada na figura 5, caracteriza-se por possuir as correias de entrada e de recebimento de material (em preto) e a estrutura do chute de transferência (em azul).

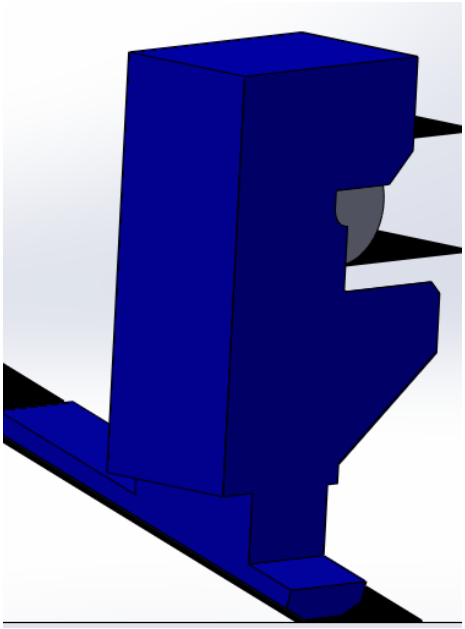

Figura 5 – Modelo CAD gerado no SolidWorks

FONTE: Elaborado pelo autor.

4.5 Simulações realizadas e Software ROCKY DEM

A fim de atender as necessidades em campo, foram realizadas 4 simulações, conforme descrito na tabela 1, onde foram avaliados a situação atual, observada em área (01), a inclusão do efeito dos raspadores (02), a presença de garfo (03) e a modificação na defletora (04):

Tabela 1 – Simulações realizadas

Simulação	Raspadores	Garfo	Modificação defletora
01	-	-	-
02	Sim	-	-
03	Sim	Sim	-
04	Sim	Sim	Sim

Os Raspadores têm como principal função impedir que material retorne ao longo do retorno da correia de entrada, impedindo o desprendimento do mesmo. Um garfo, tem como principal função impedir o contato direto do material com a correia receptora, formando uma região de acúmulo de material e contribuindo para um fluxo mais uniforme e centralizado. Já uma chapa defletora tem como principal função direcionar o fluxo de material para a correia de chegada, proporcionando assim uma entrega com uma velocidade mais próxima da correia. A figura 6 identifica os componentes adicionados em cada simulação.

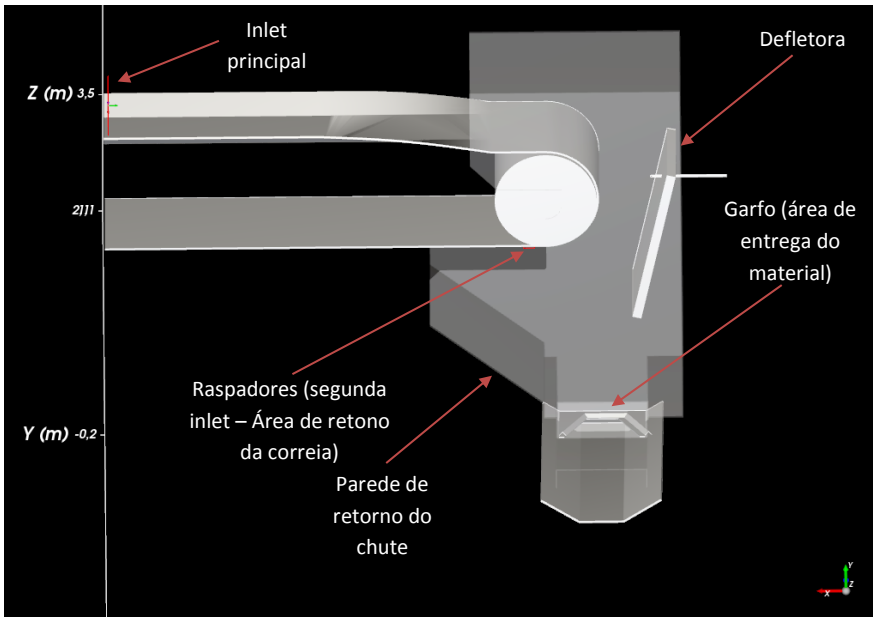

Figura 6 – Identificação dos componentes do chute de transferência.

FONTE: Elaborado pelo autor.

O ROCKY DEM é um software comercial da ESSS, onde ocorrem as simulações. A partir do input de propriedades do material analisado e das superfícies estudadas é possível obter a trajetória das partículas (fluxo de material).

4.6 Condições de input no Software ROCKY DEM

Comentado [JMS3]: Somente são necessárias condições inciaiis? Qual a equação que vc está resolvendo de fato? Não são necessárias condições de contorno? O problema é #D?

Após o desenvolvimento da geometria, o ROCKY DEM é utilizado para realizar a simulação de fluxo de material através do chute. As equações (4.1) e (4.2) são utilizadas nos cálculos realizados pelo software, com a finalidade de se obter as trajetórias das partículas e suas interações (partícula/partícula, partícula/borracha e partícula/parede).

Assumpção, et al (2015), define as propriedades das partículas para o caso da indústria mineradora, de modo a garantir que o fluxo de material seja o mais representativo possível (Tabela 2).

Comentado [JMS4]: A primeira citação de qualquer tabela ou figura deve aparecer no texto antes da ftabela ou figura

Tabela 2 - Propriedades das partículas no DEM.

Variáveis	Minério/Minério	Minério/Borracha	Minério/Aço
Coef. Restituição	0,4	0,3	0,3
Atrito estático	0,65	0,6	0,5
Atrito dinâmico	0,65	0,6	0,5

A Tabela 3, define outras propriedades adotadas para o material em estudo.

Tabela 3 - Outras propriedades das partículas no DEM.

Variáveis	Valor	Unidade
Diâmetro	10	mm
Módulo de Young	1e+07	N/m2
Vazão (entrada)	1083	T/h
Vazão raspador	0,1	T/h
Densidade	3900	Kg/m3
Resistência ao rolamento	0,28	-

O Software em estudo utiliza alguns parâmetros para realizar a simulação do escoamento (fluxo) de material, dentre eles estão os coeficientes de atrito estático e dinâmico que, conforme tabela 1, são caracterizados para as diversas regiões (superfícies) de contato. Para o dado caso, foram definidas três regiões de contato: Minério/Minério, ou seja, contato entre as partículas; Minério/Borracha, ou seja, contato entre as correias e o material e por último

Minério/Aço, caracterizando o contato entre o material e as regiões/paredes do chute de transferência e sua defletora.

O Software permite, ainda, a edição das partículas estudadas, a fim de se obter uma geometria que melhor represente essas partículas. Uma esfera apresenta uma única dimensão definida, o seu raio, sendo, portanto, um modelo mais simplório para ser utilizado, o que implica diretamente na complexidade do problema a ser resolvido e o tempo computacional estimado para a sua solução. Na análise do Método dos Elementos Discretos as partículas normalmente são aproximadas por discos ou esferas, em análises em duas ou três dimensões. Essas formas são preferíveis pois são computacionalmente eficientes (MESQUITA, ET AL, 2012).

Adotou-se para o estudo, uma partícula do tipo esférica, conforme mostra a figura 4, possuindo as partículas, diâmetro médio de 10mm. Os valores mínimos de partícula pertinentes ao processo giram em torno de 325 Mesh ou 0,044mm. Para as simulações foram consideradas partículas iguais e com o mesmo diâmetro. Este valor de diâmetro de partícula foi adotado, devido ao limite do recurso computacional disponível.

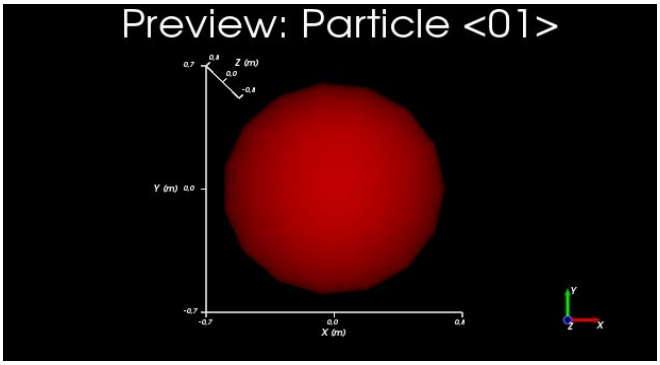

Figura 7: Modelo de partícula adotada no DEM.

FONTE: Elaborado pelo autor.

Para a correta realização da simulação pelo software, são necessárias as definições de velocidades das correias de entrada e recebimento, além de suas

vazões de projeto. Para a geração das partículas, foi necessária a adoção de regiões de geração (inlet), onde foram definidas as vazões de projeto das correias transportadoras. O valor para o módulo de Young foi utilizado como 1e+7. A vazão adotada para a correia de entrada foi de 1083 toneladas por hora e sua velocidade em área é equivalente à 3,5m/s. Já para a correia de recebimento, ficou definida uma velocidade equivalente a 2,0m/s.

Com o intuito de investigar as trajetórias das partículas, ficou definido um tempo de simulação de 10 segundos, tempo necessário para que possam ser avaliados todos os efeitos do fluxo, como o efeito de raspadores.

A avaliação de efeito dos raspadores foi dada por meio da inclusão de uma segunda região de geração de partículas (segunda inlet, conforme figura 6). Nessa região foi definida uma vazão de 0,1 tonelada por hora e este valor é baseado em estudos, em área, com a finalidade de se estudar a redução na emissão de material no retorno da correia transportadora de entrada.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas seções seguintes são apresentados os resultados relacionados aos objetivos específicos deste trabalho, avaliando o padrão dos fluxos de material, sua distribuição e aspectos relacionados a emissão e desgaste na estrutura do chute de transferência. Ao todo foram realizadas 4 simulações, com o intuito de encontrar a melhor caracterização para o material em estudo e analisar possíveis problemas relacionados com o fluxo.

Essas simulações são fundamentais para o entendimento e análise do fenômeno, a fim de otimizar, caso necessário, a estrutura do chute de transferência e seus componentes.

O tempo computacional estimado para conclusão das simulações aumentou, conforme aumentou a complexidade do modelo em estudo, variando de aproximadamente 3,5 horas para 20 horas no último caso.

5.1 Análise do fluxo – Caso base

Os primeiros resultados, foram obtidos a partir da utilização dos dados descritos na metodologia. No primeiro caso foi realizada a simulação do caso

base, sem modificações ou alterações em sua geometria. O valor de densidade foi o valor indicado em área, caracterizando-se assim o material para o início da primeira simulação.

Um levantamento de campo foi realizado para visualização do comportamento, in loco, do material. O levantamento foi realizado durante período de funcionamento dos equipamentos. Foi possível constatar e comparar os resultados obtidos com a simulação com os resultados em área para fins de validação do modelo (forma usualmente utilizada, devido à restrição computacional). Nessa visita a campo, foi possível confirmar a posição da defletora, e o fluxo do material no interior do chute, conforme figura 8.

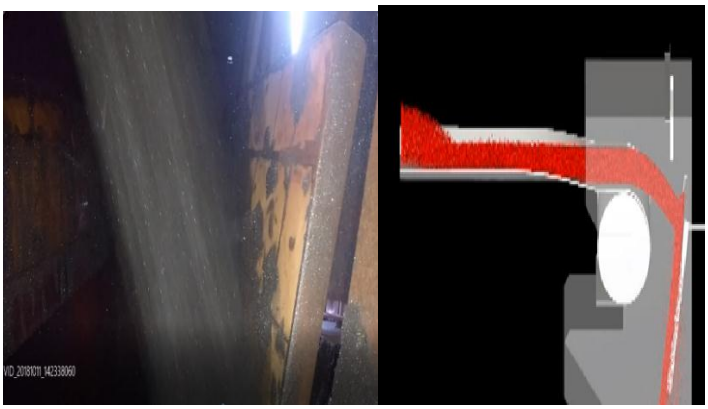

Figura 8 - Validação do modelo com visita em campo – Posição da defletora.

FONTE: Elaborado pelo autor.

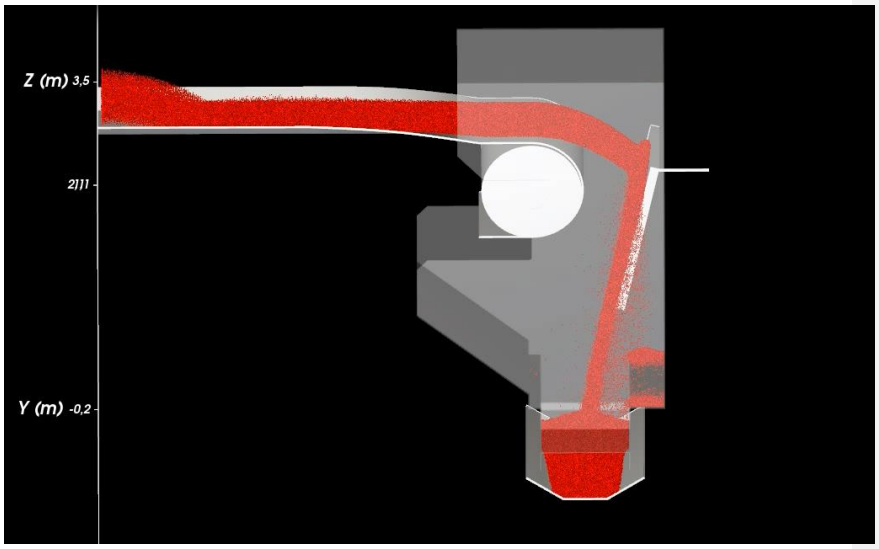

Figura 9 – Resultado da primeira simulação. Vista lateral.

FONTE: Elaborado pelo autor.

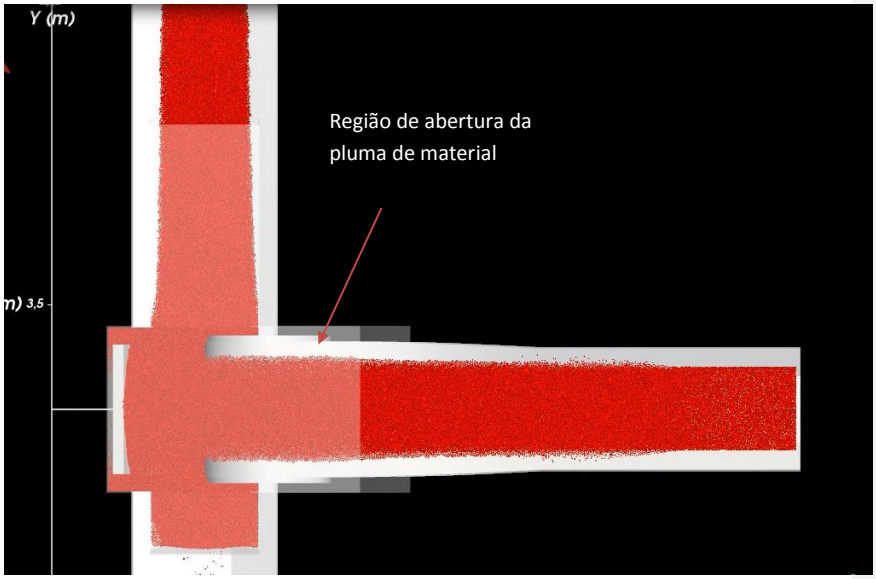

Figura 10 – Resultado da primeira simulação. Vista superior.

FONTE: Elaborado pelo autor.

Com a primeira simulação, pôde-se observar um considerável extravasamento de material pelas laterais da placa defletora, bem como uma entrega de material na correia de chegada descentralizada, o que pode ocasionar problemas de desgaste na correia, reduzindo sua vida útil.

Durante a execução da simulação, foi observado que o material tende a expandir (formando uma pluma) na região de planificação da correia de entrada, o que indica uma expansão do fluxo. O ajuste nos valores de coeficiente de atrito estático e dinâmico foi necessário, a fim de otimizar o modelo, tornando-o o mais representativo possível e com a menor abertura de pluma (novos valores indicados na tabela 4; valores antigos na tabela 2).

Tabela 4 – Mudança nas propriedades das partículas no DEM.

Variáveis	Minério/Minério	Minério/Borracha	Minério/Aço
Coef. Restituição	0,4	0,3	0,3
Atrito estático	0,35	0,3	0,6
Atrito dinâmico	0,35	0,3	0,6

Com a utilização das novas propriedades, ainda assim foi possível observar o retorno de material na entrega para a correia receptora (figura 11). Tal efeito é reduzido a partir do momento em que o material se acumula na região de recebimento. Esse fenômeno pode ser observado nas figuras 9, 10, 11 e 12 e tende a durar durante os primeiros dez segundos de simulação.

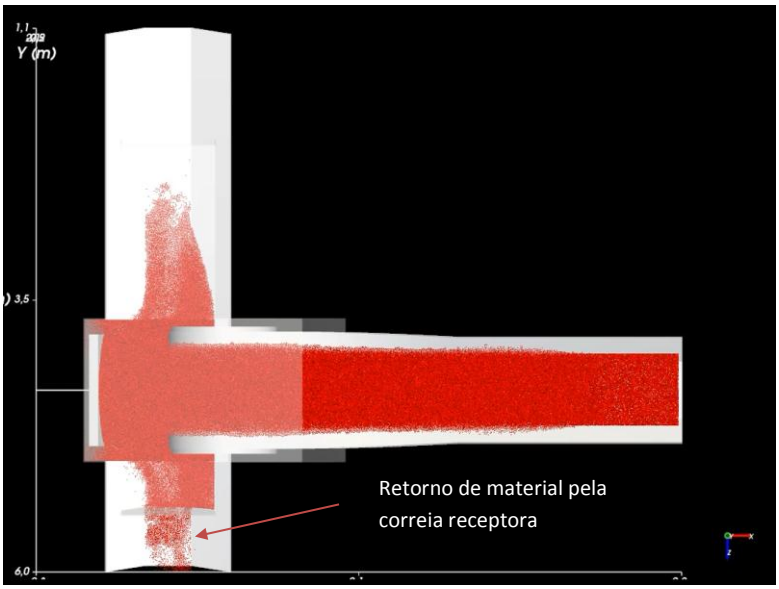

Figura 11 – Identificação do efeito de retorno de material pela correia de chegada, nos 10 segundos iniciais de simulação.

FONTE: Elaborado pelo autor.

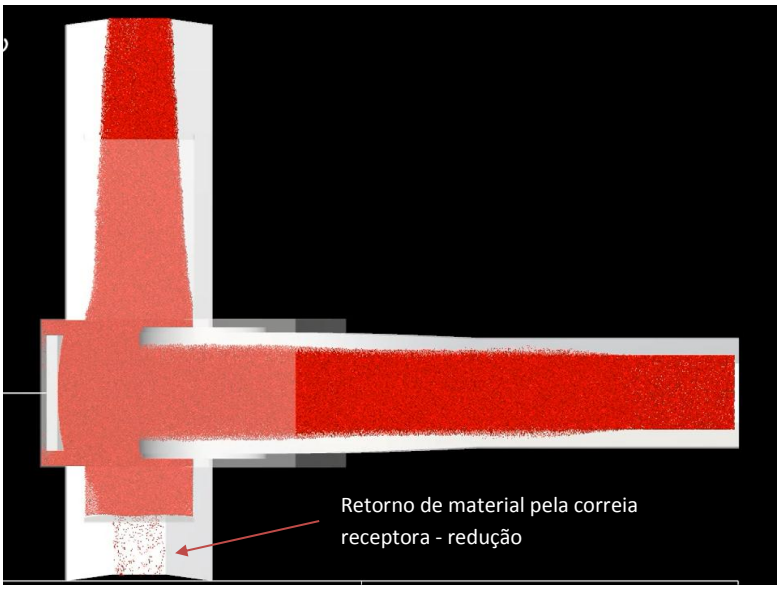

Figura 12 - Identificação do efeito de retorno de material pela correia de chegada, após os 10 segundos iniciais de simulação.

FONTE: Elaborado pelo autor.

Grande volume de material desprende-se na região de transferência, ocasionando uma elevação na emissão de material particulado, emissões fugitivas. Este fenômeno deve-se a distância percorrida pelo material entre a correia de entrega e a receptora (altura de queda, conforme observa-se em área). A defletora exerce influência direta sobre a geração de emissões, a partir do ponto onde há redução na altura de queda de material, em relação ao cenário sem defletora, reduzindo assim a dispersão das partículas na corrente. O alto índice de material particulado emitido na região de instalação do chute de transferência pode ser resultado, ainda, do dimensionamento do conjunto chute-defletora. Este índice está associado a duas origens: O material emitido diretamente pela região de entrada do chute e o material desprendido do chute e que se acumula ao seu redor, sendo posteriormente carregado por fluxos de ar, na região.

5.2 Análise do fluxo – Inclusão de raspadores

Um segundo caso foi simulado, considerando-se agora a existência do efeito de raspadores no retorno da correia de entrada. Esse efeito foi considerado para se analisar a necessidade de instalação de sistema motovibrador na parede do chute. A implementação desse sistema seria necessária caso houvesse acúmulo de material na região, devido seu ângulo de inclinação dificultar o escoamento de material.

Para tal, foi criada uma segunda região de geração de partículas, conforme mencionado anteriormente, representando o efeito dos raspadores e posicionada onde seriam os mesmos (região inferior do tambor, no retorno da correia de entrada). A vazão colocada nessa segunda região foi de 0,1 tonelada por hora. Com essa modificação, foi necessário a inclusão de uma segunda vazão, caracterizada pelo mesmo tipo de material utilizada no primeiro caso.

Nesse caso há uma permanência de material extravasando pelas laterais da defletora, problema que persiste devido à largura da defletora, conforme indicam as figuras 13 e 14. Esse fenômeno pode ocasionar um acúmulo de material na região abaixo da defletora.

A distribuição do material na entrega (região de chegada de material na correia inferior), caracteriza-se, da mesma forma que no caso anterior, por ser descentralizada e direta na correia, contribuindo assim para um maior desgaste da mesma. Sabe-se que a velocidade de entrega de material deve ser a mais próxima possível da velocidade da correia de chegada, reduzindo-se assim problemas de desgaste e possíveis desalinhamentos.

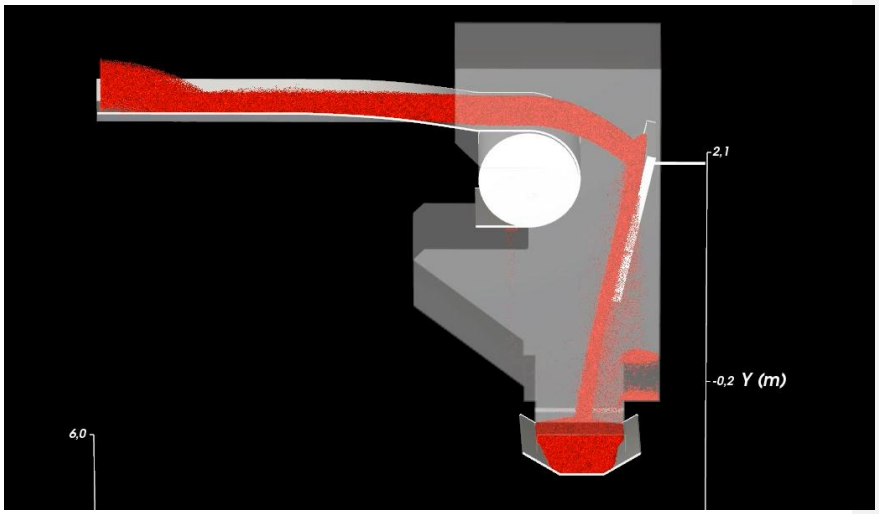

Figura 13 – Resultado da segunda simulação. Vista lateral.

FONTE: Elaborado pelo autor.

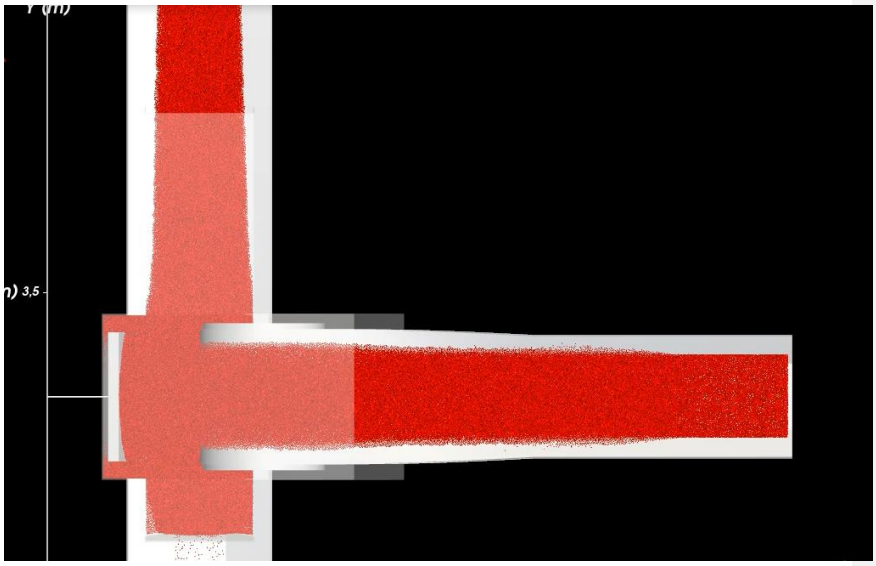

Figura 14 – Resultado da segunda simulação. Vista superior.

FONTE: Elaborado pelo autor.

Após a execução do segundo caso, observa-se que não houveram alterações significativas para o primeiro caso, sendo a análise do efeito dos raspadores a principal justificativa para a realização deste. O sistema motovibrador, não se mostrou necessário, pois como observado na figura 13, não há acúmulo de material na parede de retorno do chute.

5.3 Análise do fluxo – Inclusão de garfo na região de entrega de material

Seguindo as condições expostas nos dois primeiros casos, foi realizada uma nova simulação com o intuito de investigar os efeitos da implementação de um garfo na região de entrega do material. Tal investigação baseou-se na necessidade de impedir ou reduzir ao máximo o retorno de material pela correia de chegada. Tal retorno de material, conforme já exemplificado, pode ocorrer neste caso, também devido a inclinação da correia transportadora, bem como a entrega não centralizada de material.

Neste caso, foram mantidas as mesmas propriedades do material e as mesmas inlets (1083T/h e 0,1T/h), para estudar o comportamento do material na região do garfo.

Segundo os resultados obtidos na simulação, pôde-se observar que a adição do garfo não foi suficiente para a redução no retorno do material pela correia de recebimento. Tal efeito indica que a inclinação da correia de chegada é muito grande e que com o garfo, formando uma caixa de pedra na região da entrega, há um aumento no tempo em que o material fica retornando pela correia (20 segundos de simulação).

Segundo Swinderman, Et Al. (2009), algumas propostas de melhoria podem ser adotadas para uma melhora na situação observada no fluxo do material.

I. Implementação de cortina de pó na entrada do chute;

II. Remodelagem da geometria do chute, de forma que não haja retorno de material pela correia receptora.

Tais medidas são importantes para que o fluxo de material seja o mais ideal possível, isto é, seja centralizado na correia receptora e para que assim não haja retorno de material pela correia. É importante observar, ainda, que a instalação de uma borracha mais resistente na saia de fundo da guia metálica é um contribuinte para impedir o retorno do material.

Como pode ser observado nas figuras 15, 16 e 17, a seguir, é possível observar que não ouve mudança significativa quanto ao fluxo do material no chute, com a inclusão de raspadores e garfo, ressaltando apenas o tempo maior de material retornando pela correia de recebimento.

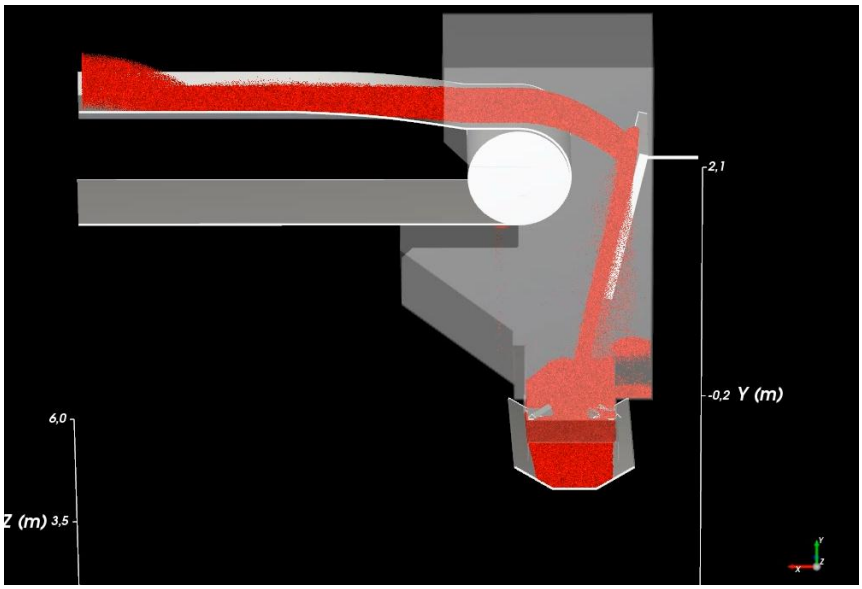

Figura 15 – Resultado da terceira simulação. Vista lateral.

FONTE: Elaborado pelo autor.

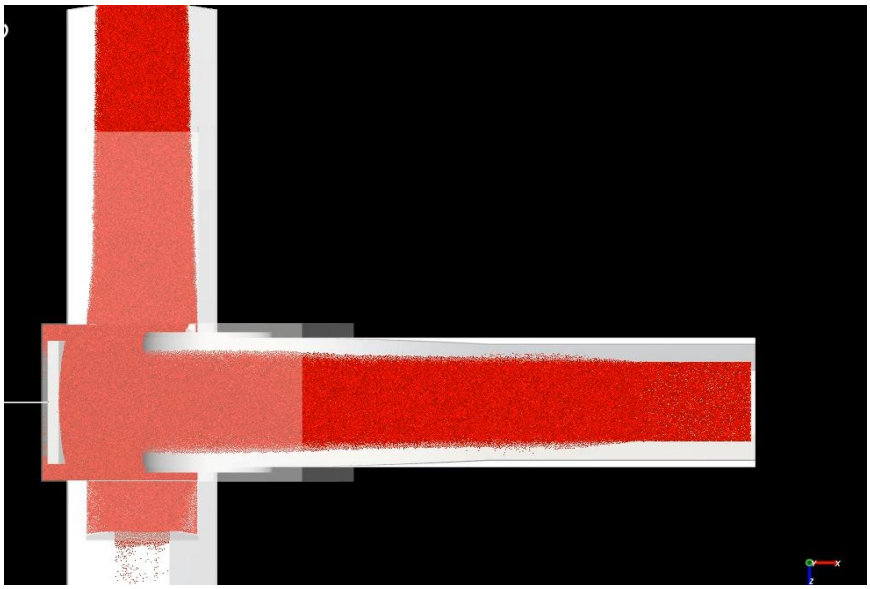

Figura 16 – Resultado da segunda simulação. Vista superior.

FONTE: Elaborado pelo autor.

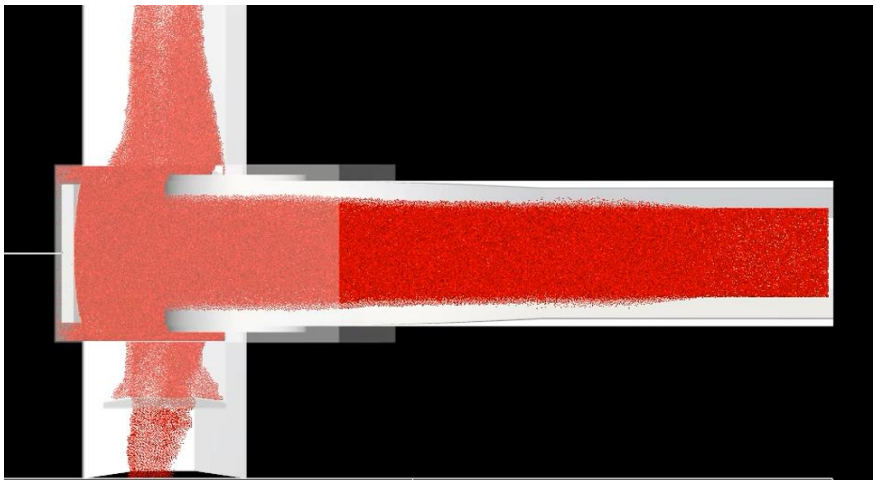

Figura 17 - Identificação do efeito de retorno de material pela correia de chegada, nos 20 segundos iniciais de simulação.

FONTE: Elaborado pelo autor.

Vale ressaltar que o impacto direto na correia de chegada, é um fator importante e contribuidor para o desgaste dos cavaletes, gerando assim um atrito desnecessário e prejudicial as condições mecânicas do equipamento.

O retorno de material é um fator contribuinte para o aumento de emissão fugitiva. Em conjunto com esse problema identifica-se, também, elevação na emissão por causa do extravasamento de material nas laterais da defletora, fatores que contribuem para a poluição do ar nas regiões vizinhas ao equipamento.

O material que se acumula, desprendendo-se da correia em conjunto com o material emitido, principalmente pela entrada do chute, caracterizam potencial fontes de material emitido para a atmosfera vizinha, conforme já mencionado anteriormente, seja pelo carregamento pelo vento, seja pela sua emissão direta.

5.4 Análise do fluxo – Modificação na defletora

Mediante os resultados obtidos nos casos anteriores, foram realizadas modificações no ângulo da defletora, de forma a possibilitar a formação da *stone box*.

A partir deste caso, pode-se observar uma ligeira modificação no padrão do fluxo, sendo seu ponto de entrega modificado. Esse efeito é lógico, tendo em vista a modificação no ângulo da defletora e consequente modificação da posição da região de contato minério/defletora (minério/aço). O fluxo de material tende a criar uma região de acúmulo, onde há um primeiro impacto e a criação de uma camada de forramento na superfície interna do chute (caixa de pedra/*stone box*). As figuras 18 e 19, ilustram a formação da caixa de pedra.

Há redução na altura de queda de material, quando comparado este último caso aos 3 casos anteriores. Essa redução pode ter por característica, uma redução na emissão de material particulado e redução na energia cinética de impacto entre partículas e correia receptora (redução na energia potencial gravitacional).

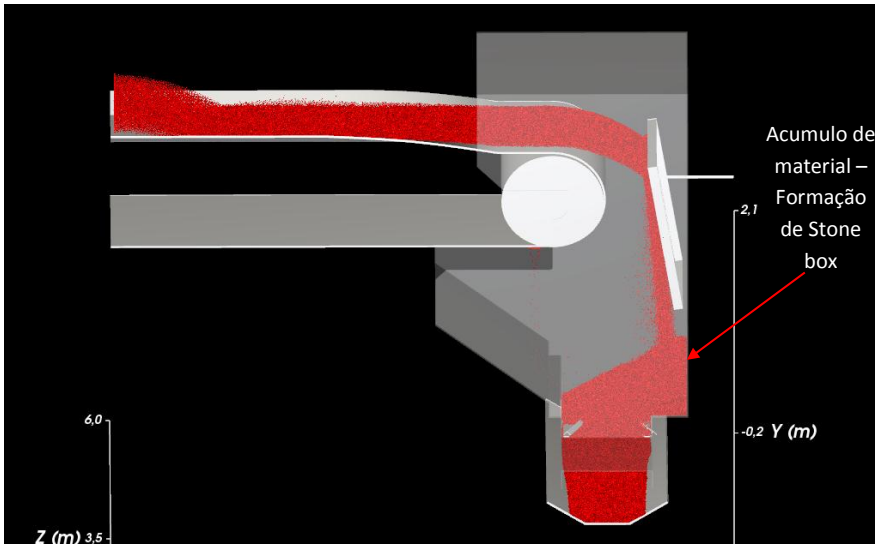

Figura 18 – Resultado da quarta simulação. Vista lateral. Após formação da caixa de pedra

FONTE: Elaborado pelo autor.

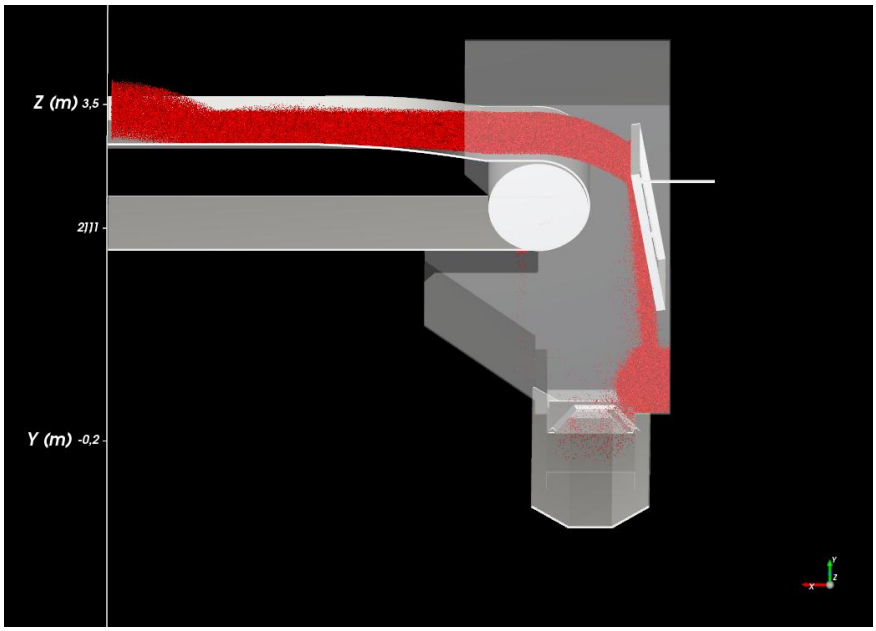

Figura 19 – Resultado da quarta simulação. Vista lateral. Durante a formação da caixa de pedra

FONTE: Elaborado pelo autor.

Na análise de retorno de material pela correia de chegada, observa-se o retorno de uma quantidade inferior de material quando comparado aos três primeiros casos.

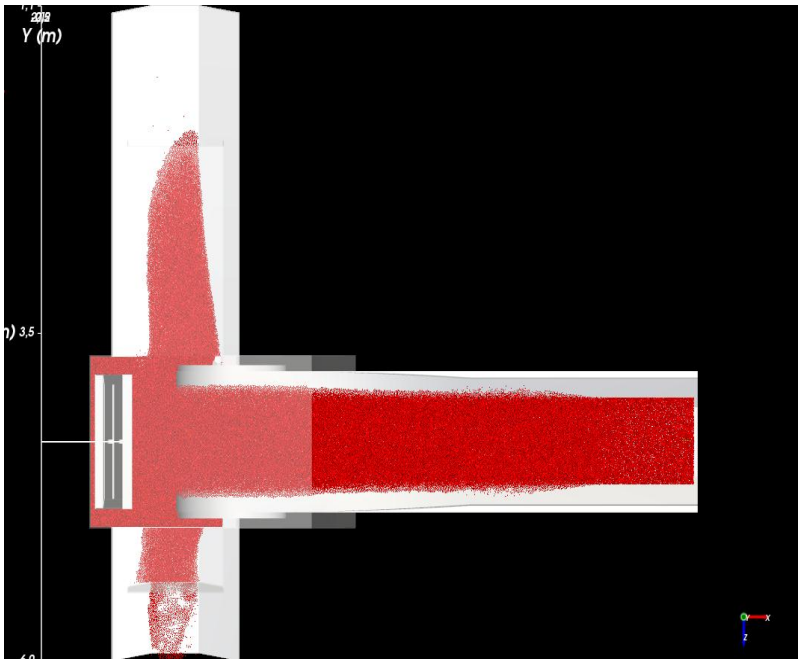

Figura 20 – Resultado da quarta simulação. Vista superior, durante os 10 primeiros segundos de simulação.

FONTE: Elaborado pelo autor.

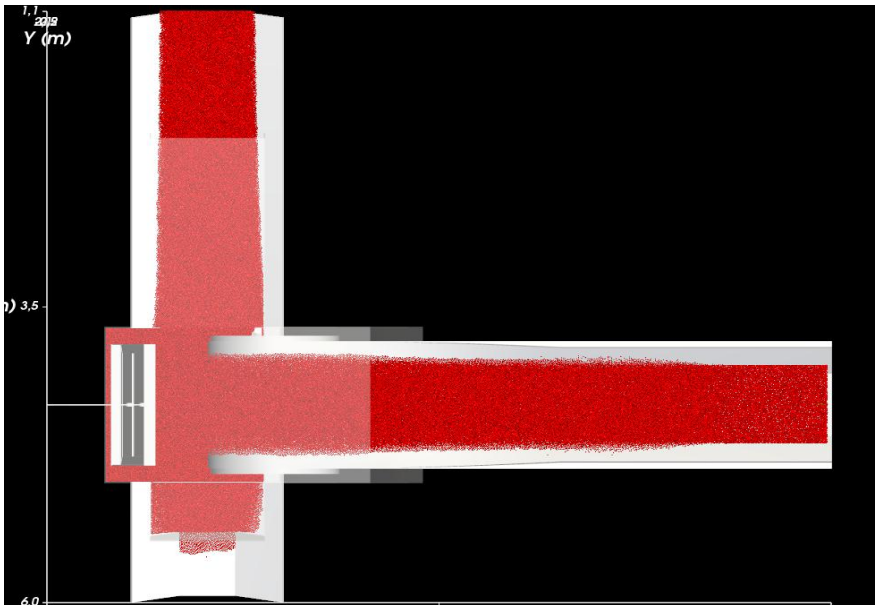

Figura 21 – Resultado da quarta simulação. Vista superior, após 10 primeiros segundos de simulação.

FONTE: Elaborado pelo autor.

A última consideração, fundamental para o ponto de vista ambiental, se dá pela ausência de cortina de pó na região de entrada do chute, o que ocasiona uma emissão acentuada, conforme explicitado anteriormente.

Ainda pode ser inferido que o retorno de material, figuras 20 e 21, ultrapassando a borracha de vedação na região das guias metálicas é outro problema que pode acentuar o aspecto da emissão de material particulado, contribuindo assim para um índice de emissão além do desejado na área.

Todos os pontos de emissão em chute de transferência (área de recebimento da correia receptora, retorno de material e área ausente de cortina de pó na entrada do chute) são os principais responsáveis pelo aumento de material particulado na região e um consequente acúmulo próximo do equipamento. Este acúmulo, em geral, é tratado a partir de limpeza manual, onde são recolhidos os materiais depositados e destinados de forma correta.

A modificação no posicionamento e dimensionamento da defletora, resultou em um fluxo de material mais suave (menos crítico), o que pode indicar uma redução na emissão de particulado. Todas essas evidências indicam que as alterações na defletora, resultam em uma medida mais efetiva no controle de emissões fugitivas geradas ao longo do sistema.

6 CONCLUSÕES

O controle de emissões a partir de ajustes em chutes de transferência é de fundamental importância para a perspectiva ambiental. Tal efeito ocorre a partir de modificações em componentes do chute para esta finalidade, como por exemplo, alterações no ângulo da defletora, com a finalidade de formação de caixa de pedra e a remodelagem completa do mesmo.

Com a facilidade em acesso de microcomputadores mais robustos (maior memória e processadores com frequências mais elevadas), foi possível aliar o método dos elementos discretos com a problemática de equipamentos mecânico-ambientais. É possível a realização de simulações computacionais com a finalidade de se ter uma melhor visualização do fenômeno corrente, bem como o embasamento teórico para a tomada de decisão.

A partir do problema descrito neste trabalho, foi possível observar alguns aspectos físicos do fenômeno corrente, bem como analisar se as alterações realizadas foram suficientes e necessárias para a exclusão de problemas observados em área: O desgaste do chute e a elevada emissão difusa.

Com os resultados da primeira simulação, conclui-se que a situação atual do chute de transferência não é a ideal, sendo a chegada de material na correia de recebimento direta, o que ocasiona desgaste e elevada emissão.

Na segunda simulação houve a inclusão de raspadores, com a inclusão de uma segunda região de geração de partículas (inlet), com essa inclusão, pode-se concluir que não houve alteração significativa no fenômeno de transferência, sendo desnecessária a implementação de sistema motovibrador.

Um terceiro caso foi simulado, buscando avaliar-se o efeito do garfo, colocado na região de chegada de material da transferência. Com este

equipamento houve alteração significativa no retorno de material pela correia de recebimento. Este efeito é prejudicial ao sistema, pois uma maior quantidade de material tende a retornar e cair da correia, gerando assim maior emissão de particulado e acúmulo de material na região.

Visando avaliar os efeitos da modificação da chapa defletora, foram feitos ajustes em sua dimensão e posicionamento. Esses ajustes resultaram em formação de caixa de pedra em região próxima a correia de recebimento. Com este efeito conclui-se que a quarta configuração é a mais benéfica ao sistema, gerando um menor impacto e não alterando a quantidade de material retornado. A modificação na placa defletora representou melhorias em relação à altura de queda de material, quando comparado aos três primeiros cenários, e no efeito de dispersão das partículas.

A utilização do software baseado em DEM mostrou-se versátil, de fácil utilização e útil para a realização de simulações e uso no meio industrial. Tendo o método dos elementos discretos já implementado, resta ao usuário definir as propriedades necessárias ao sistema, para que este seja o mais representativo possível, o que pode ser feito via literatura, via experimentos ou via validação do modelo, observando o fenômeno em campo. Sua ferramenta de visualização do fenômeno é bastante completa, permitindo ao usuário realizar análises profundas do processo.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros ficam sugeridas as realizações de simulações:

- Com remodelagem da geometria do chute de transferência, sendo esta escolhida de modo a evitar o retorno de material pela borracha de vedação das guias metálicas.
- Acoplamento ROCKY DEM – FLUENT, com o objetivo de se analisar quantitativos em emissão de material particulado.

REFERÊNCIAS

Comentado [JMS5]: Liste as referencias de acordo com a ABNT

ACGIH - American Conference of Governmental Industrial Hygienists. **Industrial Ventilation: A Manual of Recommended Practice for Design**. 27th edition, 2010.

ASSUMPÇÃO, Marcos & Mazzinghy, Douglas & D. Souza, Leonardo & Russo, José & Bailona, Baltazar & Spogis, Nicolas. (2015). **Aplicação do método dos elementos discretos na avaliação de chutes de escoamento de minério de ferro itabiríticos**. Holos. 7. 34. 10.15628/holos.2015.3666

CECALA, A. B. *et al*.. **Dust control handbook for industrial minerals mining and processing.** [S.l.]: Department of Health and Human Services, Public Health Service, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, Office of Mine Safety and Health Research, 2012.

CUNDALL, P. A., STRACK, O. D. L., 1979. **A discrete numerical model for granular assemblies.** Geotechnique, v. 29, p. 47–65.

GAMBARINI, Gabriela. **Simulação Numérica de emissões fugitivas em correias transportadoras**. 2017. 47 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - UFES, Vitória, 2017. 1.

LEVY, A.; KALMAN, C. J**. Handbook of conveying and handling of particulate solids**. [S.l.]: Elsevier, 2001. v. 10.

MERENDINO, E. M. **Estudo de processo de reciclagem do composto de polietileno e alumínio proveniente de embalagens cartonadas assépticas através de simulação computacional usando o método dos elementos discretos (DEM)**. 2011. 106 f. Dissertação de Mestrado -Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

MESQUITA, A., SILVA, M. O., SANTOS, E.,CARVALHO, L.C., GOMES, E., NETO, E., MAFRA, M. (2012). **Uso do método dos elementos discretos em manuseio de minérios e sua contribuição para a pós graduação e graduação no curso de engenharia mecânica da UFPA**. Anais: XL Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia - COBENGE, Belém, PA, Brasil.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. MMA. **CONAMA 003/1990**. Disponível em: http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res90/res0390.html. Acesso em: 10/11/2018.

ORGANIZATION, W. H.; UNAIDS et al. **Air quality guidelines: global update 2005**. [S.l.]: World Health Organization, 2006.

ROBERTS, A. W., **Chute Performance and Design for Rapid Flow Condition**. Chem. Eng. Technology. V,26, n. 2, p. 163-170. 2013.

SWINDERMAN, R. Todd *et al*.. (Org.). **Foundations: guia Prático para um Controle Mais Limpo**. 4. ed. [S.l.]: Martin Engineering, 2009. 562 p. v. 1.

EPA. **Particulate Matter (PM). 2015**. Disponível em: <http://www.epa.gov/airquality/particlepollution/index.html>. Acesso em: 08 Ago. 2018.

SANTOS, D. A., MALAGONI, R. A. **Projeto de correias transportadoras: Um estudo computacional de comparação dos métodos cema e prático.** Holos. 2014.

WALTON, O.R., 1993**. Numerical simulation of inclined chute flows of monodisperse inelastic, frictional spheres**. Mechanics of Materials 16, 239–247.

APÊNDICE A – DESENVOLVIMENTO DO FLUXO DE MATERIAL

As simulações duraram, em média, 10 segundos. Com esse tempo, foram gerados vídeos com a finalidade de se facilitar a visualização dos resultados. O time-step selecionado foi de 0,04 segundo e o desenvolvimento do fluxo de material, pode ser observado na figura 22 para o primeiro caso. O processo de desenvolvimento do fluxo é o principal resultado obtido das simulações, sendo de fundamental importância para a identificação de falhas e apoio na tomada de decisões.

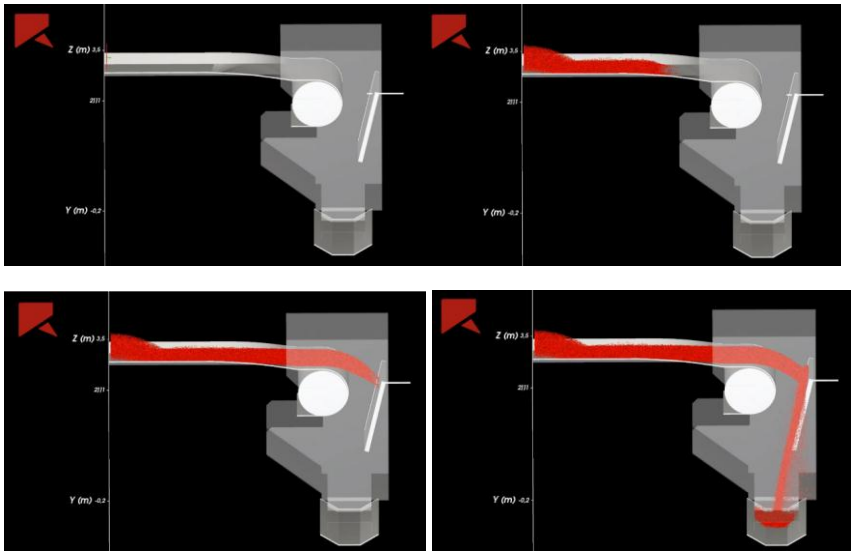

Figura 22 - Desenvolvimento do fluxo de material em intervalos de tempo iguais.

FONTE: Elaborado pelo autor.

O time-step selecionado na simulação influencia diretamente no tempo total de duração da mesma. Valores muito grandes, significam menor tempo computacional e menor visualização dos detalhes, enquanto valores mais próximos de time-step, resultam em maior tempo computacional para a realização da simulação e a visualização de uma maior quantidade de detalhes.