

OTIMIZAÇÃO DO TRANSPORTE DE MATÉRIA-PRIMA EM UMA CALHA DE TRANSFERÊNCIA¹

*Magno A. Calil Resende Silveira²
Gustavo Lucas Rocha de Oliveira³
Bráulio Viegas da Silva⁴
Daniel Nasato⁵*

Resumo

O transporte de matéria-prima utilizando correia transportadora e calhas de transferência pode se tornar crítico devido a detalhes não previstos na concepção de projetos ou à baixa frequência de manutenção no processo. Eventuais problemas como derramamento de material, desalinhamento de correia, ruptura e desgaste prematuro de periféricos associados ao sistema podem gerar prejuízos ao processo. Atualmente, na área de Redução da planta de Ipatinga da Usiminas perde-se parte da matéria-prima no seu transporte. Com o intuito de reduzir esse derramamento, foi feito um estudo em determinado trecho do transporte de pelotas, que abrange duas correias transportadoras e um conjunto de calha de transferência, utilizando-se a ferramenta computacional EDEM[®]. Experimentos foram efetuados para se obter algumas propriedades da pelota, correia e metal, necessárias na simulação. A partir das análises das simulações utilizando-se as condições atuais foi possível identificar problemas que vem ocorrendo no processo. Modificações na geometria do modelo foram efetuadas e novas simulações realizadas, até a obtenção de uma geometria que solucionasse o problema de derramamento de material no sistema.

Palavras-chave: DEM; Simulação de partículas; Pelota; Calha de transferência.

OPTIMIZATION OF RAW MATERIAL TRANSPORT IN A TRANSFER CHUTE

Abstract

Raw material transport using conveyor transfer and chutes may become critical due to details not covered in the design phase or the low maintenance frequency in the process. Problems such as material spillage, belt misalignment, breakage and premature wear of peripherals associated with the system can cause damage to the process. Currently, part of the raw material is lost in transportation in the Ipatinga ironmaking plant (Usiminas). Aiming to reduce this loss, a study was done on particular system of pellets transport, which comprises two conveyor belts and a set of transfer chute, using the EDEM[®]. Experiments were conducted to obtain some pellet, belt and metal properties needed in the simulation. The simulation results for current conditions became possible to identify problems that have occurred in the process. Changes in the model geometry and new simulations were made, to obtain a geometry that would solve the problem of material spillage in the system.

Key words: DEM; Particle simulation; Pellet; Transfer chute.

¹ *Contribuição técnica ao 40º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 11º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 19 a 22 de setembro de 2010, Belo Horizonte, MG.*

² *Membro da ABM, Engenheiro Químico, M.Sc., Centro de Tecnologia da Usiminas – Unidade Ipatinga; MG.*

³ *Engenheiro Mecânico, CQE/ASQ, Centro de Tecnologia da Usiminas – Unidade Ipatinga; MG.*

⁴ *Membro da ABM, Engenheiro Metalurgista, Superintendência de Engenharia de Processos Industriais da Usiminas; Ipatinga, MG.*

⁵ *Engenheiro Químico, M.Sc., ESSS; São Paulo, SP.*

1 INTRODUÇÃO

O transporte de matéria-prima utilizando correia transportadora e calhas de transferência pode se tornar menos eficiente devido a detalhes não considerados na concepção de projetos ou à manutenção inadequada do processo. Eventuais problemas como derramamento de material, desalinhamento de correia, ruptura e desgaste prematuros da estrutura e de periféricos associados ao sistema de transporte podem gerar grandes prejuízos ao processo.

Atualmente, o sistema de abastecimento de matéria-prima para os altos-fornos da planta de Ipatinga da Usiminas está subdimensionado para a produção de gusa vigente, o que requer um transporte ininterrupto de carga metálica e, às vezes, além da capacidade das correias transportadoras. Este fato acarreta na maioria das vezes queda de material de boa qualidade a partir do sistema de transporte. Além disso, existem dispositivos de transferência inadequados que podem elevar o derramamento daquele material, reduzindo o lucro no processo de fabricação de gusa. Em especial, existe um sistema de transferência no trecho compreendido entre duas correias transportadoras, CTA101 e CTA115, (parte do sistema de descarregamento do *car dumper* 2) localizadas na área de matéria-prima, que está originando derramamento de quantidade considerável de pelota. Esta vai se acumulando ao redor da base de sustentação local, sendo necessário deslocar recursos para a sua posterior retirada. Parte dessa pelota pode sofrer degradação no processo de recuperação e/ou ser reaproveitada como material de menor valor agregado. O trabalho para a reutilização e a possível desvalorização dessa pelota aumenta o custo de produção de gusa.

Sendo assim, foi realizado um estudo de caso para se avaliar e analisar o sistema de transporte e de transferência do trecho mencionado, a partir da criação de um modelo utilizando-se a ferramenta computacional EDEM[®], para buscar modificações no processo que reduzissem esse derramamento de pelota.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 A Ferramenta Computacional Utilizada

O EDEM[®] é uma ferramenta computacional utilizada para modelar e simular cenários que contenham material particulado, cuja unidade básica é uma esfera, de tamanho tal que não possam ser considerados fluidos, como é o caso de transporte, cominuição e peneiramento de sólidos. Ele faz parte de uma classe de método numérico conhecido como DEM (*discrete element method*), que calcula o comportamento granular e outros fenômenos descontínuos, a partir do cômputo dos movimentos de translação e rotação de cada partícula individualizada (elemento discreto) de um sistema particulado, a partir de integrações numéricas de um sistema de equações diferenciais ordinárias em cada passo de tempo.⁽¹⁾

Para se efetuar os cálculos dos movimentos de cada partícula no sistema considerado numa simulação é necessário saber algumas condições operacionais do processo, algumas propriedades da estrutura em que as partículas escoam, das próprias partículas a serem utilizadas e das interações existentes entre estas.

O *software* possui uma interface na qual se faz a configuração do modelo a ser construído e simulado. Nesta interface é possível adicionar a geometria do sistema, criar as unidades básicas das partículas e indicar as propriedades do sistema particulado, das partes estruturais e das suas interações necessárias para a realização dos cálculos.

2.2 Propriedades Físicas e de Interação do Sistema

As propriedades das partes envolvidas no sistema a ser modelado devem ser mensuradas para a etapa de configuração do modelo no *software* utilizado. Algumas delas, necessárias e menos conhecidas, merecem uma rápida abordagem.

O coeficiente de restituição é uma medida do retorno de uma partícula após sua colisão com uma superfície e depende das partes envolvidas. A partir da altura inicial (H), da altura de restituição (h) e da equação 1⁽¹⁾ é possível determinar o valor do coeficiente de restituição (ξ) entre uma partícula e uma superfície.

$$\xi = \sqrt{\frac{h}{H}} \quad (1)$$

O coeficiente de atrito de rolamento de uma partícula é uma medida do ângulo de inclinação mínima (α) necessário da superfície em que aquela partícula se encontra para promover o seu rolamento. Esse coeficiente pode ser dado pela equação 2.

$$\mu_r = \text{tg}(\alpha) \quad (2)$$

O coeficiente de atrito estático de uma partícula em uma superfície está relacionado com a força necessária para vencer a força de atrito entre partícula e superfície, iniciando o movimento da primeira. Esse coeficiente pode ser encontrado confeccionando um gráfico da força necessária para se iniciar o deslocamento em função da força normal sobre um conjunto de partículas.

2.3 Ajuste de Parâmetros do Modelo

Em alguns casos, os materiais particulados podem ser deformados, como corpos sólidos e interagir entre si durante sua movimentação. Esta interação não é afetada somente pelas forças e torques originados das partículas da vizinhança imediata, mas também pelas partículas distantes.

Cada partícula possui suas características particulares como tamanho, forma, rugosidade, sendo necessários métodos que considerem a média destas particularidades, a fim de se reproduzir com fidelidade o escoamento granular.

O Método dos Elementos Discretos é uma aproximação de um sistema granular real em que alguns fatores podem ser negligenciados, como deformação permanente ou quebra e rugosidade superficial. Além disso, a implementação de outros fatores é geralmente inviável, como a forma exata de cada partícula e um grande número de partículas pequenas (da ordem de 1 mm), frente ao ganho no resultado final.

A partir de experimentos laboratoriais foram estimados valores para as propriedades das partes envolvidas e entre elas (pelotas, borracha da correia transportadora e chapa de aço) para o sistema estudado. Em seguida foram feitas simulações para a adequada calibração dos parâmetros a serem utilizados no *software* utilizado. Finalmente, foram efetuadas simulações de casos com o sistema completo, modificando-se a geometria para analisar e avaliar seus efeitos no resultado final.

2.4 Experimentos Laboratoriais

Os valores das propriedades utilizados nos parâmetros de configuração do DEM para o sistema modelado foram obtidos direta (diâmetro médio e massa específica das pelotas e coeficientes de restituição) ou indiretamente (coeficientes de atrito

estático e de rolamento) a partir de experimentos laboratoriais. Aqueles obtidos indiretamente sofreram ajustes na etapa de calibração do modelo, discutida a seguir, para melhor adequação à realidade do processo.

Para a determinação das propriedades, as pelotas foram coletadas aleatoriamente, sem seguir uma norma padronizada. Amostraram-se pelotas recém caídas e da própria correia. Seu diâmetro médio foi determinado a partir de medidas de dez pelotas escolhidas aleatoriamente, de tamanhos diferentes. Como as pelotas não são totalmente esféricas mediram-se quatro diâmetros para cada pelota, calculando-se as médias simples para cada uma. A seguir calculou-se uma média para as dez pelotas. Os diâmetros medidos variaram de aproximadamente 11 mm a 15 mm.

A massa específica das partículas foi estimada utilizando-se uma proveta com certo volume de óleo e uma quantidade de pelota, cuja massa foi de 67,13 gramas. Inicialmente foi colocado somente o óleo na proveta ($0,150 \text{ dm}^3$) e a seguir foi adicionada a massa de pelotas, elevando-se o volume do líquido para $0,167 \text{ dm}^3$. Com os valores obtidos calculou-se a massa específica desejada. O esquema do experimento pode ser visto na Figura 1a.

O coeficiente de atrito de rolamento foi medido utilizando-se o seguinte experimento: colocaram-se aproximadamente dez pelotas sobre um pedaço da correia transportadora, que estava sobre a bancada, e em seguida inclinou-se esta última até que as pelotas começassem a rolar. A partir do ângulo de inclinação em que as pelotas estavam na eminência do movimento se determinou o coeficiente de atrito de rolamento. Na Figura 1b pode ser visto um esquema desse experimento.

Na realização do experimento para avaliar o atrito estático entre as pelotas e a borracha da correia transportadora utilizou-se um recipiente de plástico, aberto em uma das faces, onde foram colocadas algumas pelotas e em seguida ele foi colocado com a face aberta voltada para baixo sobre um pedaço da correia.⁽¹⁾ Foi colocado um peso sobre o recipiente e todo o conjunto foi puxado com uma balança de Newton, anotando-se o valor da força exercida pela balança e do peso colocado sobre o recipiente. O experimento foi repetido sete vezes, aumentando-se o peso sobre o recipiente e registrando-se os valores da força indicada na balança e do referido peso. Na Figura 1c pode ser visto um esquema desse experimento.



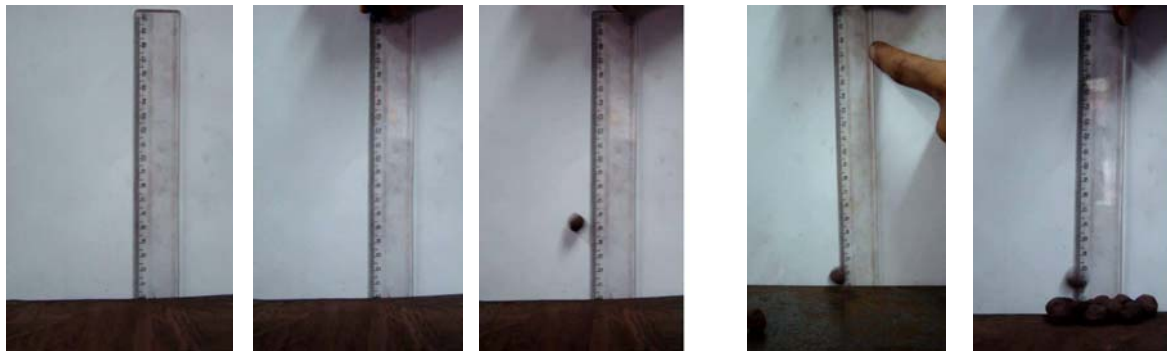
Figura 1. Esquema experimental para estimativa da massa específica, do atrito de rolamento e estático das pelotas.

Experimento semelhante foi realizado para se estimar o coeficiente de atrito estático entre as pelotas e o aço, trocando-se o pedaço da borracha por uma chapa de aço.

Para se estimar o coeficiente de restituição entre a pelota e a borracha, colocou-se um pedaço da correia transportadora sobre uma bancada, liberou-se uma pelota, suspensa de 20 cm a partir da correia e mediu-se a altura alcançada após a colisão. Na Figura 2a podem ser vistas as fotografias da sequência desse experimento, que foi repetido quinze vezes, utilizando-se pelotas de tamanhos diferentes para estimar uma altura média de restituição. Esses experimentos foram filmados e assistidos em velocidade lenta para se verificar os valores exatos da altura de restituição.

Experimentos semelhantes foram realizados para se determinar o coeficiente de restituição entre pelotas e a chapa de aço, trocando-se o pedaço de borracha por

um de aço, conforme pode ser observado na Figura 2b. A sequência do experimento e os cálculos foram semelhantes daqueles efetuados para o par pelota/borracha. Já para o coeficiente de restituição entre pelotas, colocaram-se algumas pelotas sobre o pedaço de borracha para que cada partícula liberada colidisse com aquelas e sofresse restituição, conforme pode ser observado na figura 2c. Novamente a sequência do experimento e os cálculos foram semelhantes àqueles efetuados e mencionados anteriormente.



(a) com correia transportadora

(b) com aço

(c) com pelotas

Figura 2. Fotografias do experimento para se determinar o coeficiente de restituição.

O experimento para se determinar o ângulo de repouso das pelotas foi executado da seguinte maneira: pegou-se um tubo de PVC de 100 mm de diâmetro e 150 mm de altura, colocou-o sobre um pedaço da correia transportadora e encheu-o com aproximadamente 2.100 gramas de pelotas, ficando conforme visto na figura 3a. Em seguida suspendeu-se o tubo para que as pelotas rolassem até atingirem um estado de repouso para que fosse feita a medição do ângulo de repouso. O estado final atingido e a medição do ângulo de repouso podem ser vistos nas Figuras 3b e 3c, respectivamente.

Posteriormente foi feito um experimento semelhante, considerando a situação em que a correia já estivesse com pelotas, pois tal fato influencia no ângulo de repouso do material. Nesse caso foi colocada uma camada de pelotas sobre o pedaço da correia transportadora e sobre aquela camada foi montada a sequência descrita anteriormente. Após suspender o tubo de PVC, mediu-se o ângulo de repouso para esta nova situação.



(a) condição inicial

(b) acomodação das pelotas

(c) medida do ângulo

Figura 3. Fotografias do experimento do ângulo de repouso das pelotas.

2.5 Calibração dos Parâmetros

A fim de se contabilizar os efeitos dos fatores não considerados no modelo, citados na seção 2.3, o método dos elementos discretos necessita de parâmetros para os contatos individuais, cujos valores iniciais foram estimados a partir dos experimentos citados na seção anterior. Contudo, esses parâmetros foram calibrados, realizando-se simulações de experimentos no próprio EDEM®, para que pudessem ser

utilizados no *software*, a fim de se obter um comportamento simulado do material particulado semelhante ao do caso real.

O primeiro experimento simulado para a calibração dos parâmetros foi aquele que determinou o coeficiente de atrito de rolamento entre as pelotas e a correia transportadora. Para tal, foi criada uma superfície plana, com as propriedades da correia transportadora e sobre ela, algumas esferas, com as propriedades das pelotas. Em seguida ajustaram-se os parâmetros coeficiente de atrito estático e de rolamento entre as pelotas e entre estas e a correia transportadora para aqueles estimados a partir dos respectivos experimentos. A simulação consistiu na inclinação da superfície plana até um ângulo tal que as esferas começassem a rolar.

O outro experimento simulado para a calibração dos parâmetros foi aquele que determinou o ângulo de repouso das pelotas. Para tal, criaram-se uma superfície plana, com as propriedades da correia transportadora e sobre ela, algumas esferas (com as propriedades das pelotas) dentro de um cilindro com as mesmas dimensões daquele usado no experimento laboratorial. Em seguida ajustaram-se os coeficientes de atrito estático e de rolamento entre as pelotas e entre estas e a correia transportadora para aqueles estimados a partir dos experimentos e das simulações mencionadas anteriormente. A simulação consistiu na elevação do cilindro de modo que as esferas fossem liberadas e rolassem até atingir o estado de repouso sobre a superfície plana. Na Figura 4 podem ser vistas figuras da sequência da simulação.

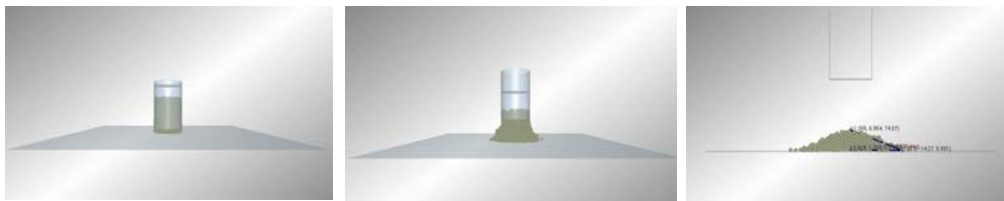


Figura 4. Figuras da simulação do ângulo de repouso das pelotas na correia.

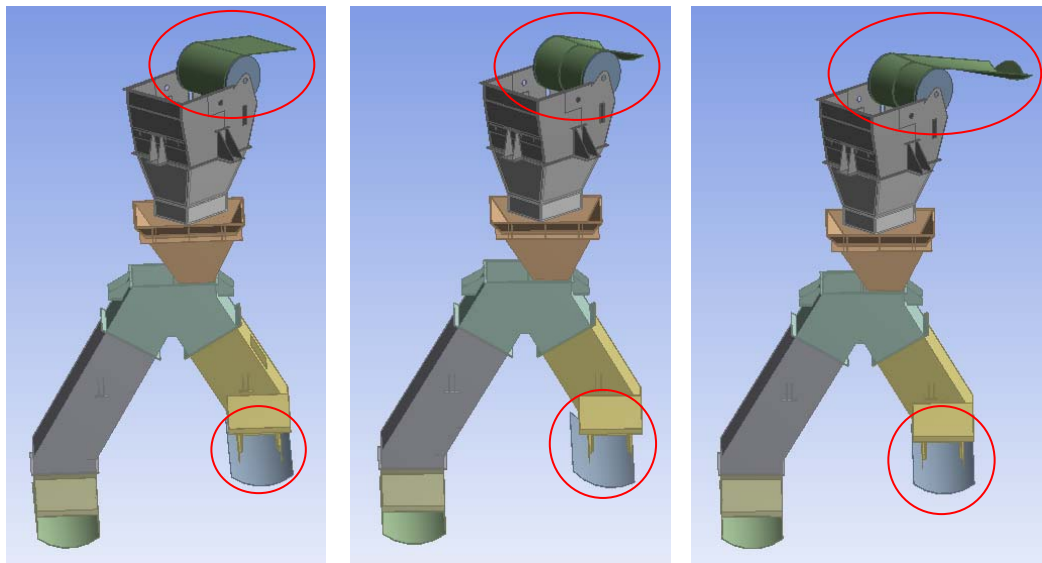
Essas simulações foram repetidas várias vezes, reajustando-se os parâmetros requeridos até que os ângulos de rolamento e de repouso simulados coincidissem com os experimentais.

2.6 Simulação do Sistema

O sistema particulado deste estudo é composto por pelotas metálicas e as partes estruturais envolvidas na modelagem são as correias transportadoras (borracha) e a chaparia do sistema de transferência (aço).

Após encontrar os melhores valores dos parâmetros na etapa de calibração, partiu-se para a simulação de todo o sistema em estudo. A geometria considerada inicialmente pode ser vista na figura 5a. Observa-se que a correia transportadora que chega até a calha de transferência era curta e reta e a que recebe as partículas após passagem pela calha de transferência era simétrica. Posteriormente, esta última foi deslocada para considerar o desalinhamento da correia observado no processo real, e na primeira foi colocado um abaulamento, pois quando o material particulado está na correia o seu centro fica mais afundado e as bordas em um nível mais elevado, propiciando uma melhor acomodação das partículas. Essa nova geometria pode ser vista na Figura 5b. Finalmente, promoveu-se uma última modificação na geometria, observada na Figura 5c: aumento do comprimento da correia de alimentação para que a acomodação simulada das partículas tornasse mais próxima daquela do sistema real. Enquanto se promoviam tais modificações na geometria, os valores dos parâmetros de interação entre pelotas e estas e a correia

transportadora também sofreram pequenos ajustes para que os resultados do sistema simulado se aproximassem daqueles observados no processo real.



(a) geometria inicial (b) geometria intermediária (c) geometria final

Figura 5. Geometrias consideradas nas simulações do sistema completo.

Após a obtenção dos melhores valores para os parâmetros de interação entre as partes envolvidas no sistema completo e de resultados simulados coerentes com aqueles do processo real e atual, foram realizadas modificações na geometria da calha e novas simulações foram feitas buscando reduzir a perda do material.

3 RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO

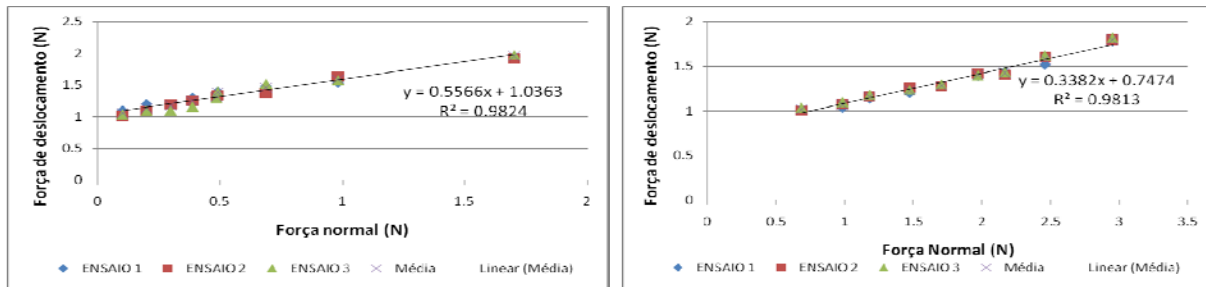
3.1 Experimentos Laboratoriais e Calibração dos Parâmetros

O diâmetro médio encontrado para as pelotas foi de 12,2 mm e a sua massa específica foi de 3948 kg/m³. Os valores dos coeficientes de restituição calculados a partir da equação 1, utilizando-se os valores experimentais foram: 0,53 para pelota-borracha da correia transportadora; 0,09 para pelota-aço e 0,20 para pelota-pelota.

O valor do coeficiente de atrito de rolamento está relacionado ao ângulo de inclinação da superfície em que as pelotas começam a rolar. No referido experimento foram encontrados os seguintes ângulos daquela superfície da correia transportadora: 8° a 9° para pelotas de formato praticamente esférico, 12° a 15° para pelotas com alguma irregularidade e 19° a 22° para pelotas irregulares. O coeficiente de rolamento utilizado inicialmente na etapa de calibração foi de 0,15 (tangente de 9°).

Os resultados laboratoriais para se estimar os valores dos coeficientes de atrito estático, que são obtidos a partir da inclinação da reta de cada caso, estão apresentados nos gráficos da Figura 6.

Os valores daqueles coeficientes para o par pelota/correia transportadora e pelota/aço são, respectivamente, 0,5566 e 0,3382. O valor do coeficiente de atrito estático entre pelotas e estas e a correia transportadora na etapa de calibração foi considerado inicialmente igual a 0,5.



(a) pelota com correia transportadora

(b) pelota com aço

Figura 6. Gráficos obtidos a partir dos experimentos de atrito estático.

O ângulo de repouso obtido para as pelotas na superfície de borracha foi de aproximadamente 20° e ao se considerar uma camada de pelotas sobre aquela superfície, obteve-se um ângulo de repouso de aproximadamente 25° . Verifica-se que nesta última situação as pelotas se acomodam melhor devido a primeira camada reduzir os efeitos de rolamento das demais pelotas.

Na etapa de calibração dos parâmetros associados ao contato das pelotas com as outras partes do sistema em estudo, consideraram-se os valores apresentados na Tabela 1 para as simulações do experimento do ângulo de rolamento das pelotas. Primeiro, foi realizada a simulação considerando-se as pelotas como esferas regulares, de 12 mm de diâmetro, obtendo-se um ângulo de rolamento de cerca de 9° , e em seguida, as pelotas foram consideradas irregulares, modificando-se para isso o valor de um dos parâmetros da Tabela 1, sendo obtido um ângulo de rolamento de cerca de 12° . Estes valores se aproximam daqueles medidos experimentalmente.

Tabela 1. Valores dos parâmetros para a simulação do ângulo de rolamento

	Pelotas regulares		Pelotas irregulares	
	Pel./Pel.	Pel./Cor.	Pel./Pel.	Pel./Cor.
Coefficiente de restituição	0,2	0,5	0,2	0,5
Coefficiente de atrito estático	0,5	0,5	0,5	0,5
Coefficiente de atrito de rolamento	0,15	0,15	0,15	0,20

Na outra simulação, para o experimento do ângulo de repouso das pelotas, utilizaram-se inicialmente os valores para pelotas regulares da Tabela 1 para os parâmetros de configuração, obtendo-se um ângulo de repouso da ordem de 18° . Contudo, o valor do coeficiente de atrito de rolamento para pelota/pelota foi aumentado para se obter um ângulo de repouso da ordem de 25° , que foi o valor obtido no respectivo experimento laboratorial utilizando-se uma camada de pelotas sobre o pedaço de correia transportadora. Após algumas repetições, obtiveram-se os valores de 0,23 para o coeficiente e 27° para o ângulo de repouso. Novamente, os valores obtidos a partir das simulações concordaram bem com aqueles obtidos experimentalmente.

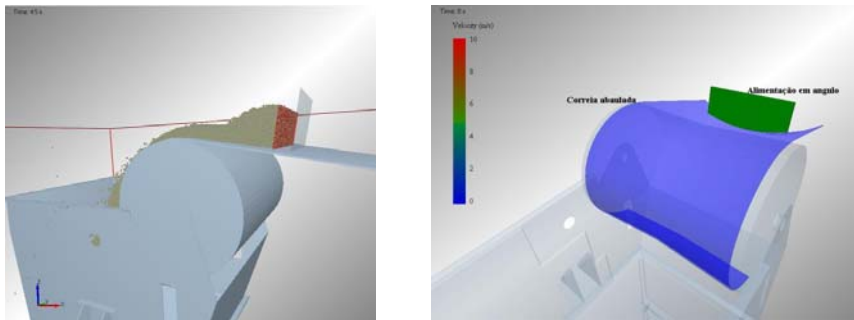
Não foram consideradas as interações entre pelotas e aço nos experimentos de calibração devido à inexistência de rolamento dessas partículas nesta superfície, para o caso em estudo.

3.2 Simulação dos Casos do Sistema Completo

Após a obtenção dos valores dos parâmetros necessários, partiu-se para as simulações dos casos para o sistema completo. Consideraram-se as velocidades das correias transportadoras de 2 m/s, a vazão de material na entrada de 220 kg/s e

dois contadores de partículas na correia inferior para se verificar a quantidade de material concentrado em cada metade.

Utilizando-se a geometria vista na Figura 5a e uma alimentação de pelotas na extremidade da correia superior, observou-se que as pelotas se espalhavam muito, antes de serem jogadas dentro da calha, o que não ocorre na realidade. Esse espalhamento foi devido principalmente ao formato da correia superior (reto), conforme visto na Figura 7a, que não acomodava perfeitamente as pelotas. Logo, esta foi posteriormente modificada considerando seu abaulamento, conforme visto na 7b.

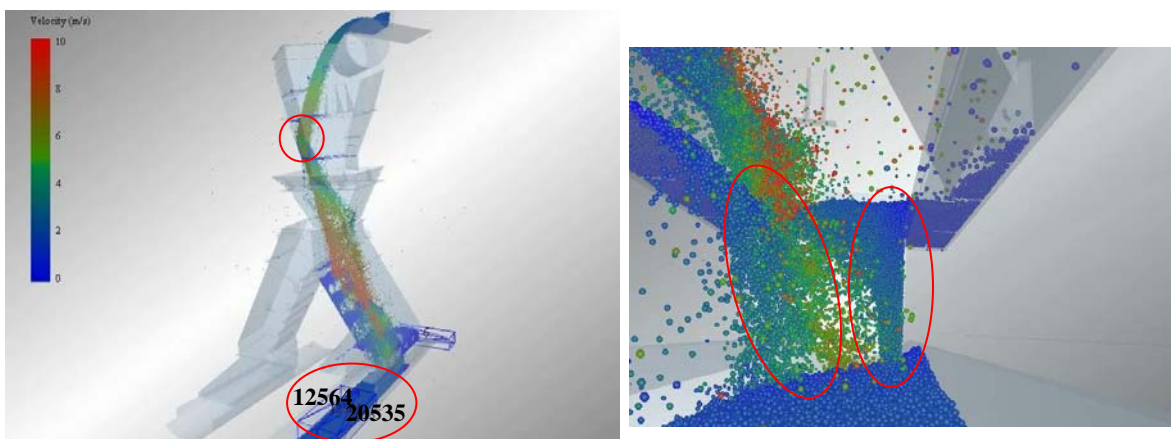


(a) correia superior reta

(b) correia superior abaulada

Figura 7. Detalhes da alimentação das pelotas na correia transportadora superior.

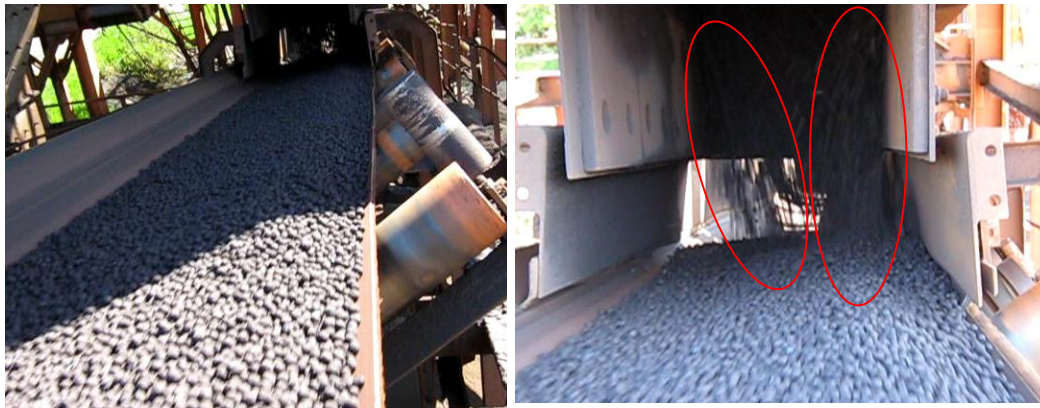
A partir dos resultados do primeiro caso simulado foi possível observar detalhes que ocorrem no sistema real: o primeiro impacto das pelotas com a estrutura da calha, evidenciado na Figura 8a, bem próximo daquele visto no processo; uma maior concentração das pelotas em um dos lados da correia transportadora que se encontra após a calha, verificado na Figura 8a, o que causa o desalinhamento daquela correia, conforme pode ser observado na figura 9a; e a formação de dois fluxos principais de partículas, evidenciado na Figura 8b, na parte inferior da calha de transferência, que pode ser observado também na Figura 9b.



(a) primeiro impacto e descentralização do fluxo

(b) formação de dois fluxos

Figura 8. Resultados obtidos a partir da primeira simulação do sistema.



(a) desalinhamento

(b) formação de dois fluxos

Figura 9. Fotografias do processo real do sistema em estudo.

Os valores dos parâmetros de configuração utilizados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Valores dos parâmetros para a simulação com a geometria da figura 5a

	Pelota/Pelota	Pelota/Correia	Pelota/Aço
Coefficiente de restituição	0,20	0,50	0,09
Coefficiente de atrito estático	0,60	0,60	0,30
Coefficiente de atrito de rolamento	0,40	0,40	0,15

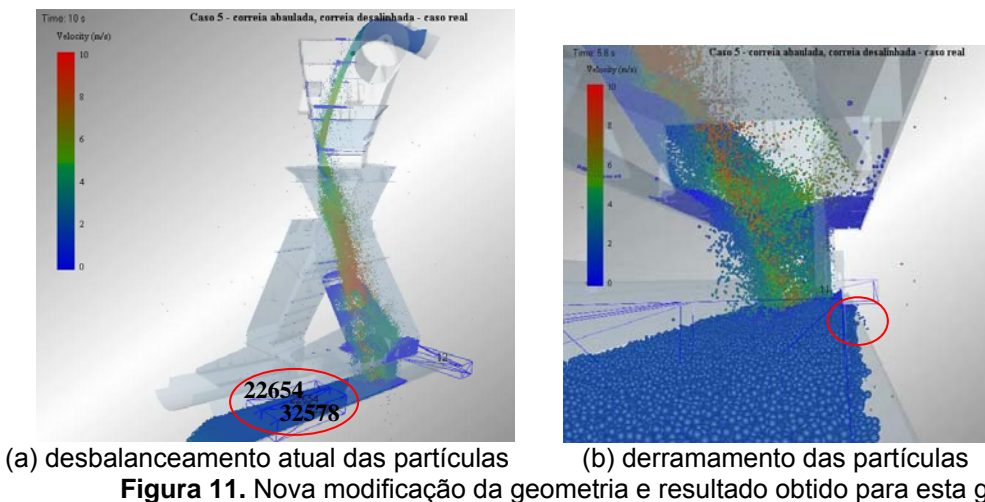
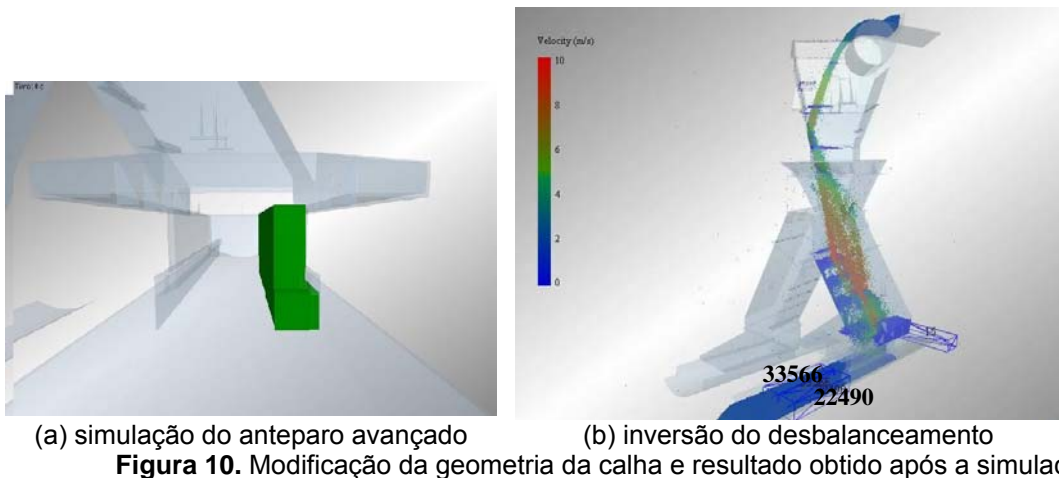
O problema a ser resolvido neste estudo é a redução do derramamento de material que é transportado pela correia, principalmente por aquela que se encontra logo após a calha. Como observado logo na primeira simulação e confirmado no processo real, a causa principal dessa queda de material é o desalinhamento da correia, devido ao material se concentrar mais em uma das bordas, favorecido pela maneira como as partículas escoam pela calha. Logo, verificou-se que é necessário centralizar o fluxo de material na correia transportadora. Para tal foram sugeridas duas modificações na geometria da calha:

- avanço de um anteparo da calha, de modo que ele se posicione mais próximo do centro da correia. Esta é a solução mais eficaz e fácil para ser implementada no processo; e
- inclusão de uma calha interna para dirigir o fluxo para o centro da correia. Esta é uma solução mais complexa para se implementar, mas seria a mais eficiente, uma vez que o fluxo adquiriria um sentido de velocidade igual ao da correia.

Então, num segundo caso, modificaram-se a geometria da calha, promovendo um avanço de 150 mm em um anteparo inferior, conforme pode ser visto na figura 10a e o coeficiente de atrito de rolamento entre as pelotas para 0,3, deixando os demais parâmetros inalterados. No entanto, após simulação desse caso, verificou-se que o avanço promovido foi exagerado, deslocando a maior parte das pelotas para o lado oposto ao do anteparo, conforme pode ser observado na Figura 10b.

A seguir foram realizadas simulações utilizando-se a geometria mostrada na Figura 5b, que considera o abaulamento da correia transportadora de alimentação, fazendo com que as pelotas se acomodassem melhor antes de cair na calha, e o desalinhamento da inferior que recebe as partículas após passagem pela calha de transferência. Alguns valores dos coeficientes apresentados na Tabela 2 também foram modificados para ficarem mais próximos dos calibrados, buscando uma melhor adequação ao caso real. Para essa nova geometria foi simulado novamente o caso real e atual para verificar principalmente o desalinhamento da correia inferior

e a perda de material nela. Na Figura 11a verifica-se a maior concentração de partículas em um lado da correia e na 11b, o resultado da simulação mostrando a queda de pelotas no ponto semelhante ao que ocorre no processo real.

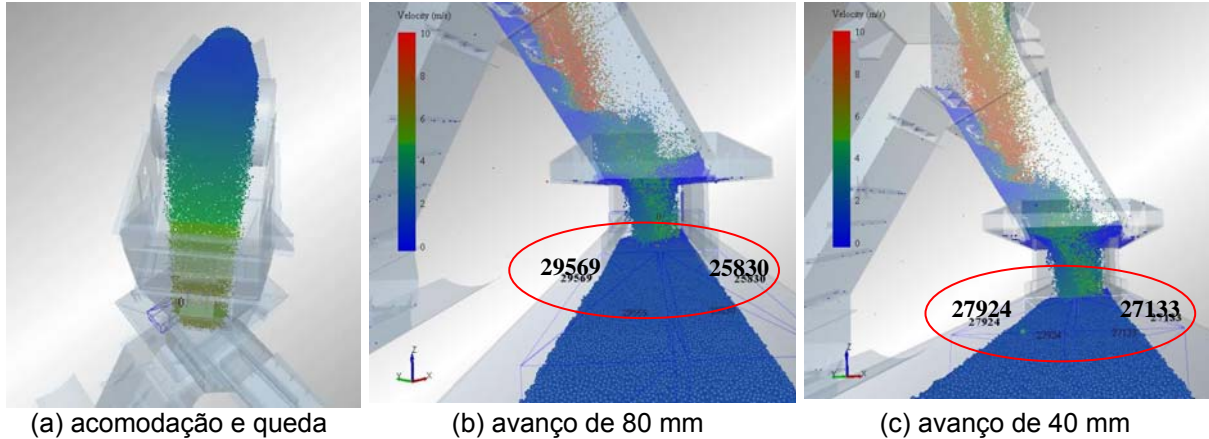


Em seguida, modificou-se a geometria, promovendo um avanço de 100 mm no anteparo inferior (semelhante àquele visto na Figura 10a) e alinhando a correia transportadora inferior, com a finalidade de se verificar uma possível centralização do fluxo de material nessa correia, o que não ocorreu.

Como o material ainda não estava se acomodando perfeitamente na correia superior, decidiu-se efetuar uma modificação na geometria do sistema, aumentando-se o comprimento da referida correia e criando uma alimentação de pelotas com o formato elíptico (que é mais realista), conforme apresentado na figura 5c. Assim, as pelotas passaram a se acomodar melhor naquela correia, como pode ser visto na Figura 12a, sendo possível o ajuste dos parâmetros da Tabela 2 para valores mais próximos aos encontrados na etapa de calibração. Na Tabela 3 estão apresentados os novos valores dos coeficientes de ajuste para o modelo. Nas simulações seguintes foram considerados esses valores e essa nova geometria.

Efetuararam-se avanços de 90 mm, 80 mm, 70 mm, 60 mm, 50 mm e 40 mm no anteparo inferior e cada caso foi simulado, verificando-se o comportamento do fluxo na correia transportadora inferior quanto à centralização das partículas. Em todas as simulações observou-se que o material ficava centralizado em poucos segundos, mas, após o regime permanente se estabelecer, formava-se uma maior concentração de partículas do lado oposto do anteparo. Com a redução gradativa do

avanço do anteparo verificou-se que o material foi centralizando-se na correia, obtendo-se a melhor situação quando o anteparo estava avançado somente 40 mm a partir do ponto original do processo atual. Nas figuras 12b e 12c são vistos alguns resultados dessas simulações, evidenciando o balanceamento das pelotas ao longo da correia.

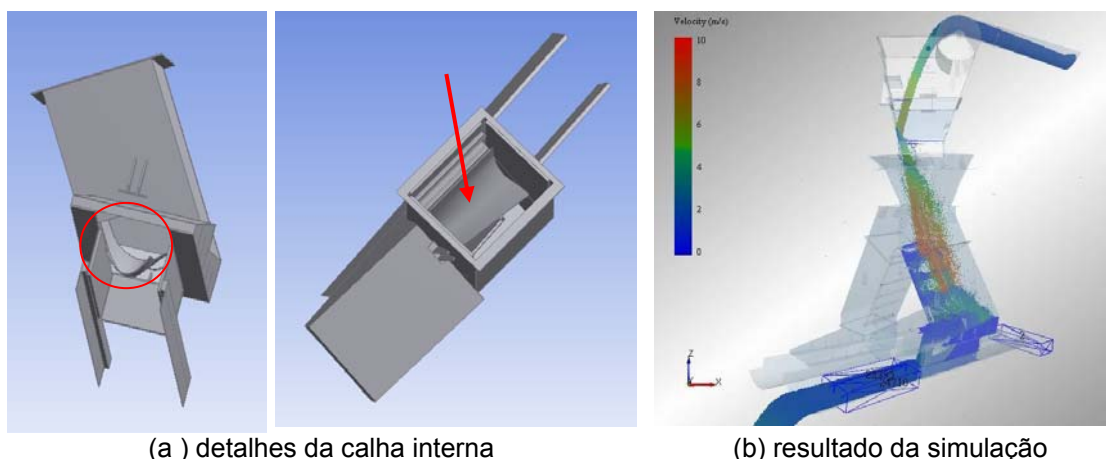


(a) acomodação e queda (b) avanço de 80 mm (c) avanço de 40 mm
Figura 12. Detalhe da acomodação e queda do material da correia superior e resultados das simulações para a geometria da Figura 5c.

Tabela 3. Valores dos parâmetros para a simulação com a geometria da Figura 5c

	Pelota/Pelota	Pelota/Correia	Pelota/Aço
Coeficiente de restituição	0,20	0,50	0,09
Coeficiente de atrito estático	0,55	0,50	0,30
Coeficiente de atrito de rolamento	0,28	0,20	0,15

Finalmente considerou-se uma geometria com uma calha interna, incluída na “perna direita” da calha de transferência, por onde o material passa antes de atingir o anteparo inferior. Na Figura 13 podem ser vistos detalhes dessa calha interna e resultados da simulação para este novo caso. Após simulações verificou-se que se a calha interna estiver centralizada em relação à correia transportadora inferior, o material cai e é transportado de forma centralizada na correia.



(a) detalhes da calha interna (b) resultado da simulação
Figura 13. Geometria com calha interna e resultado da simulação.

Como foi mencionado anteriormente, esta última modificação não é de fácil implementação prática, optando-se, portanto, pela solução de se avançar o anteparo em 40 mm no processo real.

4 CONCLUSÃO

A partir das simulações considerando-se a geometria e as condições operacionais atuais foi possível verificar a boa concordância do modelo concebido com o processo real. Observou-se que o principal motivo do derramamento de material estava associado ao desalinhamento da correia transportadora localizada após a calha de transferência, devido ao direcionamento do fluxo de partículas se concentrar mais para um lado da correia. Esse fato deixou evidente a necessidade de se centralizar o fluxo de partículas, o que evitaria, conseqüentemente, o desalinhamento da correia.

Após a realização das modificações da geometria do modelo e simulações dos casos verificou-se que é preciso ter cautela ao promover qualquer alteração no sistema real para não causar a inversão do desalinhamento. Para a centralização do fluxo de material na correia transportadora inferior foram propostas duas modificações no sistema: avanço de um anteparo inferior, imediatamente antes da correia, ou adição de uma calha interna. Esta última é mais complexa de ser implementada na prática em relação à primeira, optando-se pela escolha de se efetuar o avanço do anteparo no sistema real. Os resultados das simulações mostraram que um avanço de 40 mm daquele anteparo praticamente promove a centralização do fluxo de pelotas na correia.

A ferramenta computacional utilizada se mostrou bastante eficiente no estudo do caso em questão e pode ser utilizada em vários outros estudos que envolvem a participação de sistemas particulados, como é o caso de outras operações realizadas na sinterização, coqueria, mineração e alto-forno.

REFERÊNCIAS

- 1 MORRISON, D. J., WU, W. Experimental Validation of the Discrete Element Method (DEM). Iron Ore Conference, Perth/WA, Austrália, 2007.