



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

PROTOTIPAGEM VIRTUAL DE EQUIPAMENTO DE MANUSEIO DE GRANÉIS EM ESCALA PILOTO USANDO DEM

Vinicius Gonçalves dos Santos

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro Metalúrgico

Orientador: Prof. Rodrigo Magalhães de Carvalho

Rio de Janeiro

Março de 201

PROTOTIPAGEM VIRTUAL DE EQUIPAMENTO DE MANUSEIO DE GRANÉIS EM
ESCALA PILOTO USANDO DEM

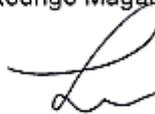
Vinicius Gonçalves dos Santos

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE
ENGENHARIA DE METALÚRGICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO METALÚRGICO

Examinado por:



Prof. Rodrigo Magalhães de Carvalho, D.Sc.



Prof. Luís Marcelo Marques Tavares, Ph.D.



Eng. Emerson Reikdal da Cunha, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
MARÇO de 2018

Santos, Vinicius Gonçalves

Prototipagem virtual de equipamento de manuseio de granéis em escala piloto usando DEM– Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2018

XI, 67, p.: il; 29,7 cm

Orientador: Rodrigo Magalhães de Carvalho

Projeto de Graduação – UFRJ/Escola Politécnica/Curso de Engenharia Metalúrgica, 2018

Referências Bibliográficas: p.64-66

1. Manuseio de materiais granulares 2. Método dos Elementos Discretos 3. Prototipagem virtual I. Magalhães de Carvalho, Rodrigo. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Metalúrgica. III. Título

Agradecimentos

Ao meu orientador e amigo, Professor Rodrigo Magalhães de Carvalho, por todo o ensinamento técnico, disponibilidade e paciência em todo período de desenvolvimento deste trabalho, os quais levarei como grande aprendizado profissional. Um agradecimento especial por confiar no potencial como engenheiro e buscar me direcionar ao foco nos momentos de grande pressão e dificuldades.

À DEM Solutions, por disponibilizar a licença do software de simulação utilizado no trabalho.

À equipe do LTM, por disponibilizar toda a infraestrutura necessária à execução deste trabalho. Aos alunos de pós-graduação e técnicos, que de alguma forma contribuíram para o que este trabalho fosse concluído com êxito. Aos amigos que fiz neste ambiente de trabalho e por tudo o que pude agregar de conhecimento

À minha família, base de toda minha formação pessoal, pelo incentivo e apoio irrestrito.

Aos meus amigos e companheiros de graduação, que estiveram presentes durante toda esta longa e difícil jornada, pela troca mútua de conhecimentos, pelas horas de estudo e também pelas horas de descontração. Um agradecimento por tonarem meus dias na ilha do fundão mais agradáveis.

Aos grandes amigos que estiveram sempre ao meu lado, torcendo para minha realização profissional, responsáveis pelos períodos de diversão, pelos incentivos diários e críticas construtivas ao longo de todo este tempo.

Resumo do projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/UFRJ como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Engenheiro Metalúrgico

PROTOTIPAGEM VIRTUAL DE EQUIPAMENTO DE MANUSEIO DE GRANÉIS EM ESCALA PILOTO USANDO DEM

Vinicius Gonçalves dos Santos

Março de 2018

Orientador: Rodrigo Magalhães de Carvalho

Curso: Engenharia Metalúrgica

A indústria mineral trata constantemente com sistemas de materiais particulados em seus processos. O perfil de escoamento e projeção de um sistema de partículas tem grande importância no estudo, controle e otimização de processos minerais. Com o intuito de realizar ensaios de laboratório que permitam caracterizar o fluxo granular, foi desenvolvido o protótipo virtual de um equipamento em escala piloto, que opera como dispositivo de manuseio em ciclo fechado, e que permite observar e medir o perfil de escoamento de um sistema de partículas sob projetadas em variadas condições de velocidade e inclinação. Este será utilizado na validação de simulações com o Método dos Elementos Discretos (DEM), na forma de ensaio visando a calibração de parâmetros de contato. O presente trabalho consistiu na elaboração da geometria mais adequada para o protótipo virtual, e posterior simulação da sua operação, usando materiais granulares de interesse e com diferentes propriedades. As simulações foram realizadas usando o software de elementos discretos EDEM[®]. Foi proposto um modelo matemático para a alimentação do equipamento, testado e validado com os diferentes materiais. Posteriores simulações avaliaram a capacidade de transporte do equipamento no que diz respeito à manutenção de fluxo de material estável. Os resultados de simulação permitiram a construção do protótipo virtual do equipamento e definição do controle das variáveis necessárias para a sua operação, bem como a viabilização da etapa de construção do equipamento físico.

Palavras chave: Dispositivo de manuseio, método dos elementos discretos, materiais granulares

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for degree of Materials Engineer.

VIRTUAL PROTOTYPING OF PILOT SCALE BULK HANDLING EQUIPMENT USING DEM

Vinicius Gonçalves dos Santos

March 2018

Advisor: Rodrigo Magalhães de Carvalho

Course: Metallurgical Engineering (BEng)

The mineral's industry constantly deals with systems of granular materials in their processes. The flow and projection profile of a particle system is of great importance in the study, control and optimization of mineral processes. In order to carry out laboratory tests to characterize the granular flow, a prototype of a semi-pilot scale device was developed, which operates as a closed-loop handling device, which allows the observation and measurement of the flow profile of a system of particles projected under different operational conditions such as belt speed and angle. The prototype should be used as a tool to validate Discrete Element Method simulations, thus assisting parameter calibration of contact models. The present work consisted in the elaboration of the most suitable geometry for the equipment, and later simulation of its operation, using granular materials of interest and with different properties. The simulations were performed using EDEM[®] discrete element software. A mathematical model to estimate the ideal feed rate of the material to the equipment was found and validated for different granular materials. Further simulations allowed the evaluation of the transport capacity of the equipment with respect to maintaining a steady flow of particles. Result of analysis allowed for definition of the operation variables range thus the beginning of real equipment commission.

Key words: Handling device, Discrete element method, granular materials

Sumário

Agradecimentos	iii
Índice de Figuras	viii
Índice de Tabelas.....	x
I. Introdução	1
II. Objetivo.....	3
III. Revisão Bibliográfica.....	4
III.1 Método dos Elementos Discretos	4
III.2 Forças e Modelos de contato.....	8
III.2.1 Visão geral	8
III.2.2 Modelo de contato de Hertz-Mindlin	8
III.2.3 Hertz-Mindlin com JKR.....	10
III.3 Parâmetros de entrada para as simulações DEM.....	11
III.4 Manuseio de materiais granulares	16
III.4.1 Modelagem de correias chutes de transferência.....	16
III.4.2 Materiais granulares utilizados	20
IV. Metodologia	23
IV.1 Premissas para a operação do equipamento de manuseio	24
IV.2 Levantamento de dados e escolha de materiais.....	29
IV.2.1 Materiais para os componentes do equipamento	29
IV.2.2 Materiais de carga.....	30
IV.3 Simulações DEM.....	32
IV.3.1 Aferição da densidade aparente no DEM	33
IV.3.2 Simulações preliminares	34
IV.3.3 Pós processamento das simulações do equipamento	34
IV.3.4 Estudos de caso.....	37
V. Resultados e Discussão.....	41
V.1 Determinação da densidade aparente	41
V.2 Avaliações preliminares do protótipo	42
V.3 Modelo matemático para obtenção da vazão de alimentação ótima	46
V.4 Estudos de caso: Estabilidade, Distribuição Mássica e Tempo de Residência	51
V.5 Ensaio de capacidade volumétrica do equipamento	59
VI. Conclusões	63

VII. Referências Bibliográficas.....	64
Anexo A: Parâmetros do modelo de contato.....	67

Índice de Figuras

Figura III.1: Quantidade de publicações do DEM em artigos publicados ao longo dos últimos anos (Elsevier, 2018)	5
Figura III.2: Exemplo da divisão de um domínio bidimensional em pequenas células de tamanhos iguais. Cada partícula tem um número que a identifica, mostrados na figura como pontos enumerados, e cada célula comporta os identificadores das partículas que estão associadas a ela (Matuttis e Chen, 2014).....	6
Figura III.3: Ilustração esquemática das forças atuando na partícula i em contato com a partícula j e sobre atuação de uma força de não-contato com a partícula k à uma distância h . ω_i e ω_j são as velocidades angulares das partículas i e j , enquanto que v_i e v_j são as velocidades lineares das respectivas partículas. Há um conjunto de forças atuando no sistema, sendo F_{ijc} a força de contato e M_{ij} o torque agindo na partícula i devido à ação da partícula j ou paredes do sistema. F_{iknc} é a força de não-contato atuante na partícula i pela partícula k (na figura, força de capilaridade) F_{ijn} representa a força da interação entre a partícula i e o fluido no qual ela se encontra (geralmente desprezível o fluido é o ar) e F_{ig} é a força gravitacional atuando na partícula (Zhu, 2007).	7
Figura III.4: Modelo de contato Hertz-Mindlin a) Força Normal b) Força Tangencial (n e Kn coeficiente de mola e do amortecedor, u o movimento relativo) (Renzo, e Di Maio, 2004)	9
Figura III.5: Ensaio de ângulo de repouso, com partículas de síter (Lima, 2016) ...	12
Figura III.6: Aparato para ensaio de ângulo de rolamento (Barrios <i>et al.</i> , 2013)	13
Figura III.7: Tribômetro para testes de coeficiente de atrito e desgaste de partículas. A partícula é pressionada contra um disco rotatório, cuja superfície é constituída ou revestida do material cujo coeficiente entre este a partícula deseja-se calcular. O equipamento permite calcular as forças nas direções tangencial e normal, calculando o coeficiente de atrito pela razão da primeira pela segunda (Barrios <i>et al.</i> , 2013)	14
Figura III.8: Aparato do ensaio de determinação do coeficiente de restituição (Barrios <i>et al.</i> , 2013)	14
Figura III.9: Modelo proposto para calibração e validação de simulações DEM (Quist, 2015).....	15
Figura III.10: Dispositivo de calibração de parâmetros de contato (a) Captura de câmera do material em escoamento dentro do dispositivo (b) Simulação DEM do fluxo equivalente ao da figura (a).....	16
Figura III.11: Sistema de chute de transferência com correia de projeção (<i>International Mining</i> , 2014)	17
Figura III.12: Fluxo de material através de um chute de transferência curvo. Aparato experimental para ensaios de fluxo de material e comparação com as predições do método contínuo. Velocidade de projeção $v_0 = 3 \text{ m/s}$ é mostrada na figura (Roberts, 2003).	19
Figura III.13: Diagrama de forças no chute de transferência curvo da Figura III(a), Para um elemento do fluxo granular de massa Δm . Tem-se a atuação da força peso dada por Δmg , a reação normal N imposta pela superfície do chute, a força centrípeta dada por $\Delta mv^2/R$ e a força de atrito F_D . O raio R é medido tomando um ponto como origem. O ângulo θ é medido como o ângulo entre a direção da força peso e a tangente à curvatura do chute de transferência, no ponto do centro de massa do elemento de massa Δm	19
Figura III.14: Modelagem do escoamento do material granular num chute de transferência. Partículas coloridas conforme sua velocidade. (Jenike & Johanson, 2015).....	20

Figura III.15 Pelotas verdes	21
Figura III.16: pelotas queimadas (Cavalcanti, 2015).....	22
Figura III.17: Partículas de coque siderúrgico	23
Figura IV.1: Esboço 3-D da geometria consolidada do equipamento, evidenciando seus principais componentes. (1) - Correia de projeção (2) - Silo de análise (3) - Correia de retorno (4) Silo de alimentação.....	25
Figura IV.2: (a) Aspecto da correia de retorno em simulação no EDEM®. Visualização (b): Correia industrial equipada com taliscas e guias nas laterais (Servbelt correias industriais, 2017).....	26
Figura IV.3: Mecanismo de recolhimento de partículas da correia de projeção. As partículas projetadas percorrem o silo de análise ($t = 7,2$ s), caem na correia de projeção ($t = 7,6$ s), são recolhidas pelas taliscas ($t = 8,0$ s) e carregadas em direção ao silo de alimentação ($t = 8,4$ s). Visualização do equipamento com transparência, de modo a ver as taliscas da correia de retorno. Partículas são coloridas em vermelho, para melhor visualização	27
Figura IV.4: Vista frontal do esboço 3D. Informação do comprimento e altura do equipamento, e dimensões do silo de análise e correias.	29
Figura IV.5: Representação das partículas no EDEM®: (a): pelotas queimadas (Barrios <i>et al.</i> ,2013) (b) pelotas verdes (Silva, 2017) (c) coque siderúrgico (Lima,2016) (DEM Solutions, 2017).....	31
Figura IV.6: Distribuições mássicas acumuladas das partículas virtuais	32
Figura IV.7: Medição do fluxo mássico na correia de projeção. Visualização das geometrias em transparência, permitindo visualizar o fluxo de partículas no equipamento. Sensor (linhas em verde) colocado na seção transversal da correia de projeção. Partículas contidas na região do sensor destacadas em laranja.	35
Figura IV.8: Vista superior do equipamento. As partículas contidas no sensor, cuja medição da distribuição da é realizada estão coloridas de acordo com sua massa (legenda na Figura), enquanto que demais partículas do sistema estão coloridas de preto.	36
Figura IV.9: Extração de informações para o processamento dos tempos de residência. Equipamento em vista lateral com destaque para a correia de projeção. Sensor em formato de caixa (linhas verdes) que realiza a extração das informações das partículas. Velocidade de correia 2 m/s e largura do sensor 20 cm. Partículas contidas na região do sensor coloridas de laranja e demais partículas coloridas de azul.....	37
Figura V.1: Simulação DEM de densidade aparente para os materiais de teste do protótipo. Partículas coloridas pelo seu tamanho, caixa transparente com vista em perspectiva. (a) Pelota queimada (b) Pelota Verde (c) Coque	41
Figura V.2: Alimentação do equipamento, na região do silo de análise. Partículas coloridas de acordo com sua velocidade.	42
Figura V.3: Sobreposição da alimentação nova do equipamento, partículas coloridas em vermelho, com a carga recirculante carregada pela correia de retorno, partículas coloridas em verde (DEM Solutions, 2018).....	43
Figura V.4: Simulação do caso 3, que mostra (a) Início do processo de acúmulo, com sobrecarga nas taliscas e (b) acúmulo de partículas no silo de análise. Visualização em malha, com vista frontal dos componentes do equipamento voltada para a correia de retorno. Partículas de coque coloridas conforme sua massa, com escala presente na figura.....	44
Figura V.5: Resultados da análise de estabilidade para o plano de simulações preliminar: Fluxos mássicos dos materiais (kg/s) na correia de projeção em função do tempo de simulação	45

Figura V.6: Vista superior das partículas transportadas na correia de projeção: (A) PQ; (B) PV; e (C) Coque	46
Figura V.7: Distribuição mássica média transversal na correia de projeção.	46
Figura V.8: Distribuições de tempo de residência para diferentes velocidades da correia de projeção. Correspondência com o plano de simulações: PQ 1 m/s (caso 7); PQ 2 m/s (caso 4); PQ 3 m/s graus (caso 6)	47
Figura V.9: Distribuições de tempo de residência para diferentes inclinações da correia de projeção. Correspondência com o plano de simulações: PQ 5 graus (caso 9); PQ 10 graus (caso 4); PQ 15 graus (caso 8).....	48
Figura V.10: Comparação das distribuições de tempo de residência para PQ e PV. Correspondência com o plano de simulações: PQ (caso 4); PV 10 graus (caso 5); PQ 15 graus (caso 8)	48
Figura V.11: Influência da velocidade da correia de projeção na vazão de alimentação	50
Figura V.12: Influência da inclinação da correia de projeção na vazão de alimentação	50
Figura V.13: Comparação entre os valores de taxa calculados pelo modelo e pelo τ_1 , medido das simulações (Casos 10 a 15). Quanto os pontos se encontram próximos da bissetriz traçada no gráfico, melhor a acurácia do modelo proposto.....	51
Figura V.14: Simulação da operação do equipamento, com o sistema em estado estacionário. Partículas coloridas conforme sua velocidade, com escala na figura.....	53
Figura V.15: Análise de estabilidade: Fluxos mássicos na correia de projeção, para diferentes velocidades de correia de projeção.	54
Figura V.16: Fluxos mássicos médios na correia de projeção, para diferentes velocidades de correia.....	55
Figura V.17: Medidas de estabilidade: Fluxos mássicos na correia de projeção, para diferentes inclinações de correia	55
Figura V.18: Fluxos mássicos na correia de projeção para pelotas queimadas, pelotas verdes e coque. Mesmo volume de material carregado no equipamento, para cada caso. ..	56
Figura V.19: : Distribuições mássicas na correia de projeção usando pelotas queimadas, sob diferentes inclinações de correia de projeção	57
Figura V.20: Distribuições mássicas na correia de projeção usando pelotas queimadas, sob diferentes inclinações de correia de projeção	57
Figura V.21: Vista superior das partículas transportadas na correia de projeção: (A) PQ; (B) PV	58
Figura V.22: Distribuições mássicas na correia de projeção usando pelotas queimadas e pelotas verdes.....	59
Figura V.23: Fluxos mássicos na correia de projeção ao longo do tempo de simulação, para diferentes porcentagens da carga máxima de pelotas queimadas do equipamento	61
Figura V.24: Representação da queda de partículas das taliscas, ao atingir o volume máximo.....	61

Índice de Tabelas

Tabela III.1: Coeficientes de rigidez e amortecimento (Weerasekara <i>et al.</i> ,2013)	10
Tabela IV.1: Propriedades individuais dos materiais que constituem os componentes do equipamento, aço e borracha. (Barrios <i>et al.</i> , 2013)	30
Tabela IV.2: Dados individuais dos materiais usados como cargas do equipamento	30
Tabela IV.3: Massa e volume do protótipo de partícula modeladas no EDEM®	31
Tabela IV.4: Classes de tamanho para as partículas virtuais de coque	32
Tabela IV.5: Plano de simulações preliminares	34
Tabela IV.6: Plano de simulações visando obter vazões de alimentação ótimas. O caso 4 é o caso base, e os outros foram simulados variando uma de suas variáveis de operação	38
Tabela IV.7: Plano de simulações para o coque, sob diferentes velocidades e inclinações da correia de projeção	39
Tabela IV.8: Plano de simulações para avaliação da capacidade volumétrica do equipamento	40
Tabela IV.9: Plano de simulações para testes de fluxo granular com caixa de pedra	40
Tabela V.1 Resultados das simulações DEM de densidade aparente	41
Tabela V.2: vazões de alimentação ótimas, obtidas a partir das distribuições de tempo de residência dos casos simulados	49
Tabela V.3: Parâmetros do modelo de vazão de alimentação	51
Tabela V.4: Plano de simulações, incluindo as vazões de alimentação ótimas	52
Tabela V.5: Plano de simulações com coque, incluindo as vazões ótimas de alimentação calculadas pelo modelo matemático proposto	52
Tabela V.6: Capacidade máxima do equipamento	60
Tabela V.7: Plano de simulações para avaliação da capacidade do equipamento. Respectivos valores de vazão de alimentação calculados para cada caso, bem como a massa total usada	60
Tabela V.8: Massas médias carregadas pelas taliscas e porcentagem do volume entre taliscas preenchido com material, para os casos usando pelotas queimadas	62

I. Introdução

Materiais granulares, ou particulados, podem ser definidos basicamente como uma coleção de partículas sólidas, macroscópicas e distintas. Estes são de grande importância em aplicações da engenharia, possuindo destaque em numerosos setores industriais. Boa parte dos alimentos consumidos diariamente está disposta na forma de grãos, como arroz, café, feijão e açúcar. Além disso, o manuseio de materiais granulares também detém aplicações na construção civil, agricultura, geotecnia, indústrias farmacêutica, química, mecânica e nuclear, além do setor mineral (Coetzee, 2017).

A indústria mineral é intrinsecamente ligada a materiais granulares. Todas as etapas de beneficiamento mineral, desde a cominuição até os processos de concentração, tratam de grandes populações de partículas, com ampla faixa de tamanhos. Muitas das vezes, há também a presença de fase líquida no processo, geralmente água, o que aumenta a complexidade destes sistemas.

Processos que envolvem manuseio de materiais granulares (granéis), tem grande importância no âmbito industrial, uma vez que se constituem de operações de transporte de material de um ponto a outro, além de carregamentos e descarregamentos de material em outros equipamentos. Dessa forma, o estudo, controle e otimização das operações de manuseio tem grande importância, e as pesquisas dedicadas a entender a dinâmica do fluxo de granéis em processos de manuseio ganham destaque.

Existe grande dificuldade em prever o comportamento de materiais particulados. Seu comportamento pode ser semelhante ao de sólido ou a um líquido, dependendo do tipo e da intensidade das tensões aplicadas, da distribuição de tamanhos do material e da presença ou não de água. (Crosta *et al.*, 2001). Adicionalmente podem exibir características particulares, como dissipação de energia devido à inelasticidade das colisões entre as partículas e das perdas por atrito quando estas deslizam uma sobre as outras, diferente de sólidos e líquidos nos quais as colisões entre moléculas e átomos são admitidas como conservativas. Um resumo acerca da mecânica de escoamento de materiais granulares está presente em Campbell (2006).

No decorrer dos anos, esforços têm sido direcionados ao entendimento da mecânica de materiais granulares, com o surgimento de modelos que tratam o fluxo de material granular como um fenômeno contínuo, em que a velocidade e a densidade do material são tratadas como função do tempo e do espaço. Uma vez que o material granular é idealizado como um contínuo, está sujeito ao equilíbrio e às leis da mecânica dos meios contínuos (Lopes, 2015).

Outra abordagem para a descrição de materiais granulares é a visualização do sistema como meio discreto, ou seja, cada partícula é tratada individualmente, bem como suas interações entre si. Cada partícula pode estar sujeita a um conjunto de forças de naturezas diferentes, como forças de atrito, forças de adesão, forças provenientes do contato entre as partículas e forças de campo (gravitacional, eletroestático, magnético) e as equações de movimento da mecânica são calculadas para cada partícula iterativamente. Logicamente, a abordagem discreta para a modelagem de sistemas de materiais granulares possui um enorme volume de processamento de operações, devido ao grande número de partículas do

qual geralmente se constitui um material granular. Assim, faz-se necessário o uso de métodos computacionais que implementem tal processamento de maneira eficiente.

Nesse contexto, o Método dos Elementos Discretos (DEM) (1979) tem sido o método computacional mais usado por pesquisadores e engenheiros no design, análise e otimização de sistemas que envolvam manuseio de materiais particulados (Coetzee, 2017). O uso do DEM tem permitido realizar previsões acuradas de uma vasta gama de processos na indústria mineral, como na modelagem da cominuição (Carvalho, 2013), projeto e otimização de chutes de transferência (Roberts, 2003) e degradação de materiais (Boechat *et al.*, 2017), caracterizando-se como uma ferramenta poderosa tanto em análises qualitativas como quantitativas de qualquer processo que envolva um sistema de partículas.

Diante da importância do estudo do fluxo de materiais granulares para o controle de processos na indústria mineral e o crescimento das aplicações do DEM como ferramenta de análise, busca-se nesse trabalho, por meio do desenvolvimento de um equipamento virtual de manuseio, reproduzir diversas das operações de manuseio de grãos encontradas na indústria.

II. Objetivo

O objetivo deste trabalho consistiu na prototipagem virtual de um equipamento, que atue como dispositivo de manuseio de materiais granulares em escala piloto, usando de simulações com o método dos elementos discretos como ferramenta de análise. O equipamento permitirá reproduzir em ambiente virtual operações de transporte e transferência de materiais granulares, permitindo observar o comportamento do material em fluxo, e medir algumas de suas propriedades.

O protótipo virtual não só atuará na reprodução de operações de manuseio, como também terá utilidade na calibração de parâmetros de contato e caracterização de materiais granulares, de forma a fornecer parâmetros para as simulações de outros processos utilizando o Método dos Elementos Discretos.

As etapas do desenvolvimento do protótipo de equipamento de manuseio foram realizadas utilizando o software de Elementos Discretos EDEM® 2017 (DEM Solutions, 2016). Este ambiente permitiu realizar simulações com os seguintes objetivos:

- Definir a geometria mais adequada para o equipamento e suas medidas, de acordo com as premissas para sua operação;
- Validar o uso do protótipo virtual como meio de visualização e caracterização do fluxo granular de materiais granulares com diferentes propriedades (distribuição de tamanhos, forma de partícula, forças de interação entre as partículas)
- Investigar os aspectos operacionais do equipamento virtual, visando o desenvolvimento de um futuro projeto mecânico que viabilize sua construção.

III. Revisão Bibliográfica

III.1 Método dos Elementos Discretos

Proposto inicialmente por Cundall e Stack (1979) para ser aplicado em problemas de geomecânica, o Método dos Elementos Discretos (Discrete Element Method ou DEM) é um modelo matemático utilizado para computar o movimento e a colisão de partículas. A primeira aplicação do DEM na indústria mineral se deu com o trabalho de Mishra and Rajamani (1992), na simulação do movimento dos corpos moedores de um moinho de bolas. Na última década, o DEM tem sido amplamente aceito com o método computacional mais atrativo usado por pesquisadores e engenheiros no projeto, análise e otimização de sistemas de materiais particulados (Coetzee, 2017). O ganho de popularidade deste método está diretamente associado ao desenvolvimento do poder de processamento computacional nas últimas décadas, que aumenta a capacidade de simular sistemas em escala industrial, com grande nível de complexidade (Weerasekara e Powell, 2010). A Figura III.1 mostra o número de publicações DEM no decorrer dos últimos anos.

Simulações numéricas usando o DEM se tornaram uma ferramenta valiosa para o estudo de diferentes fenômenos que ocorrem em escala micro em materiais granulares, fornecendo um laboratório virtual que permite ao pesquisador realizar experiências que são difíceis ou impossíveis de realizar em experimentos físicos, como a avaliação das perdas energias de colisão entre partículas durante o fluxo granular fornecendo parâmetros para modelos de quebra de partículas (Carvalho, 2013).

O número de publicações envolvendo este método numérico cresce a cada ano, como mostrado na Figura III.1. Como exemplo de aplicações pode-se citar o estudo do comportamento do solo (Zhang, *et al.*, 2016), leitos fluidizados (Kaneko *et al.*, 1999, Maio *et al.*, 2009), distribuição de camadas do carregamento de alto forno (Mitra *et al.*, 2015), sistemas de descarga de materiais granulares (Balevicium *et al.*, 2010), degradação de matérias-primas durante o manuseio (Tavares e Carvalho, 2010, Cavalcanti, 2016), entre outras aplicações direcionadas à mecânica do contínuo e à mecânica da fratura.

Frequentemente o DEM é aplicado em conjunto com outro método computacional, como o método dos elementos finitos (FEM) em casos envolvendo interações entre uma fase granular e outra sólida (Haddad *et al.*, 2016) e a fluidodinâmica computacional (CFD), em casos que envolvam interações fluido-partícula. Simulações da operação de alto forno (Hou *et al.*, 2016), modelagem de sistema sólido-líquido em processos de fusão como em Baniasadi (2017), leitos fluidizados (Fan *et al.*, 2016) e processos de separação de partículas finas (Chenlongijm *et al.*, 2015) são exemplos de aplicações em que o acoplamento DEM-CFD é a estratégia mais adequada para a modelagem numérica do problema. Atualmente um grande esforço em pesquisas é realizado no entendimento da modelagem numérica de sistemas que envolvam fluidos e partículas, desenvolvendo as bases que consolidem o acoplamento DEM-CFD como ferramenta de análise. Este desenvolvimento é de grande importância na indústria mineral, pois permitirá simular uma infinidade de processos que envolvam interações fluido-partícula desde a separação por tamanhos em classificadores até processos de cominuição a úmido, com obtenção de resultados acurados.

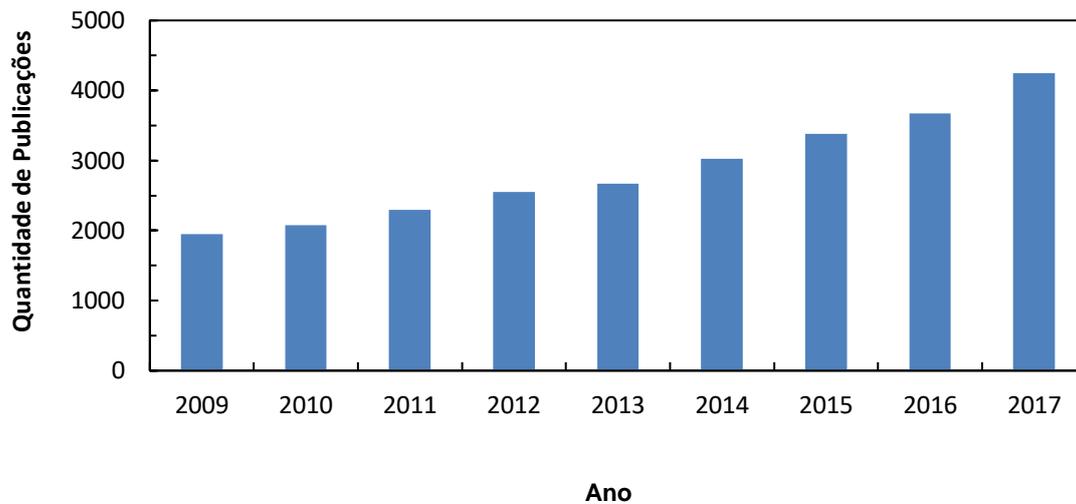


Figura III.1: Quantidade de publicações do DEM em artigos publicados ao longo dos últimos anos (Elsevier, 2018)

Basicamente, o Método dos Elementos Discretos permite acompanhar a evolução da movimentação de um sistema de partículas sujeitas a forças externas (forças de campo, como a gravitacional) e forças decorrentes dos contatos entre as partículas ou entre partículas e as paredes provenientes das delimitações geométricas do problema. O movimento das partículas é calculado a partir das equações de movimento de Newton para os momentos linear (movimento translacional) e angular (movimento rotacional), e o cálculo das forças de contato é realizado a partir de um modelo de contato (Weerasekara, *et al.* 2013). No processamento do DEM o tempo é geralmente discretizado, em intervalos iguais (*timestep*), embora algoritmos com passo de integração variável também sejam utilizados. Para cada intervalo de tempo, as equações de movimento são então integradas para cada partícula presente no domínio, sendo possível assim obter as informações sobre suas posições e velocidades. Esses dados são usados para calcular as posições e velocidades no próximo instante de tempo. Assim, pode-se concluir que o DEM é um algoritmo *time-stepping*, o que significa que seus passos são repetidos em cada passo de tempo (Rodríguez, 2016). Este também demanda esforço computacional considerável, sendo clara a dependência do desenvolvimento da tecnologia de processamento para a ampliação da aplicabilidade do DEM.

Pode-se então descrever em três passos principais o cálculo de um algoritmo DEM (Carvalho, 2013):

1. A primeira etapa consiste no mapeamento de partículas, dividindo o domínio físico do problema em células, formando uma malha. Um exemplo do mapeamento de partículas no domínio 2-D é ilustrado na Figura III.2. Após esta etapa, é possível listar em qual célula cada partícula do sistema está alocada. As regiões de contorno, ou seja, paredes da geometria do problema na qual as partículas estão confinadas são tratadas como partículas virtuais. Os contatos são verificados apenas para as partículas que estão na mesma célula ou nas células vizinhas. Esta

estratégia reduz consideravelmente o tempo computacional gasto na procura dos contatos.

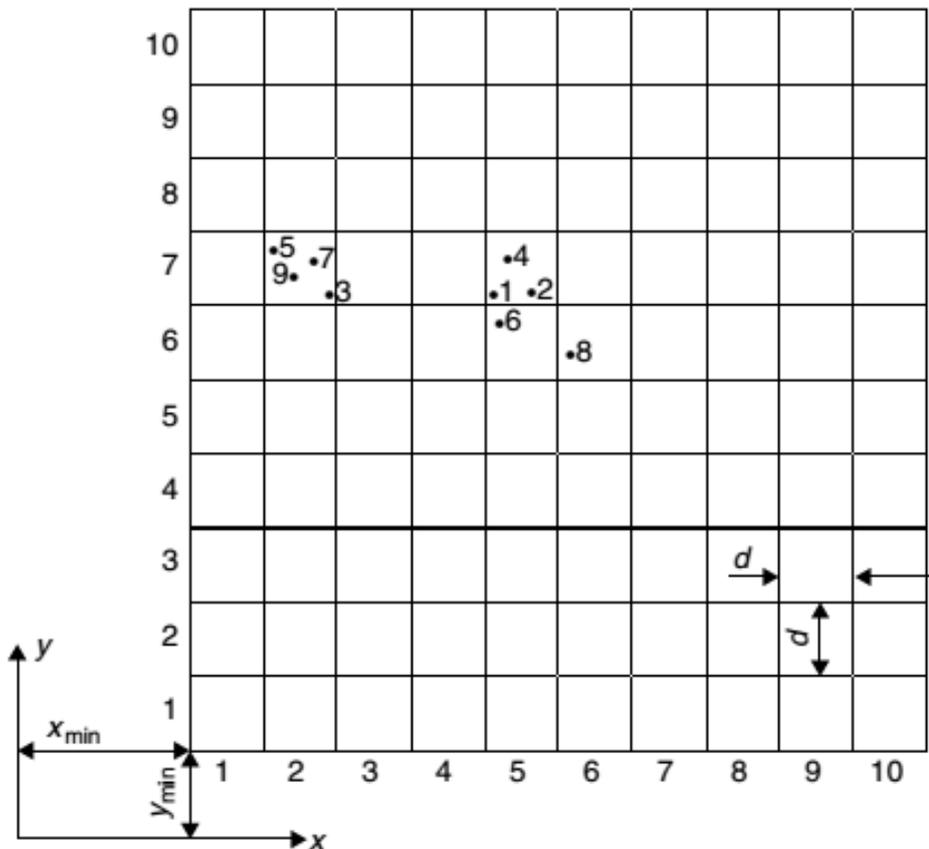


Figura III.2: Exemplo da divisão de um domínio bidimensional em pequenas células de tamanhos iguais. Cada partícula tem um número que a identifica, mostrados na figura como pontos enumerados, e cada célula comporta os identificadores das partículas que estão associadas a ela (Matuttis e Chen, 2014)

2. A partir do mapeamento, é possível verificar os contatos entre as partículas na mesma célula ou entre as células vizinhas, ou entre as partículas e a geometria utilizada para definir o domínio físico. A detecção dos contatos permite que as forças de contato sejam obtidas. Este cálculo é realizado através do modelo de contato escolhido para a aplicação. Este conceito será melhor definido na Seção III.2. A força resultante em cada partícula é calculada como o somatório das forças de contato e por forças de não-contato, como a gravitacional e forças de outras naturezas.
3. As forças resultantes sobre cada partícula são assim obtidas, e as equações de movimento podem ser integradas para cada partícula i :

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = \sum (F_{n_i} + F_{t_i}) + g \quad \text{III.1}$$

$$I \frac{d\omega_i}{dt} = \sum T_i$$

III.2

Sendo m_i a massa do elemento (partícula) i , I e seu momento de inércia. Com a integração das equações III.1 e III.2 determina-se velocidade linear $v_i = (v_{i,x}, v_{i,y}, v_{i,z})$ e a velocidade angular $\omega_i = (\omega_{i,x}, \omega_{i,y}, \omega_{i,z})$ para a partícula no instante de tempo corrente, podendo-se determinar assim seu vetor posição. Estes valores são usados para o próximo instante de tempo, em que um novo mapeamento das posições das partículas é realizado, reiniciando o ciclo de cálculo do DEM.

Nas equações de movimento, os termos F_{n_i} e F_{t_i} referem-se a forças de contato partícula-partícula e partícula-parede nas direções normal e tangencial respectivamente. Estes termos são dependentes do modelo de contato utilizado apresentado na Seção III.2. Em sistemas de partículas finas, outros tipos de forças devem ser levados em consideração nas equações de conservação, como forças de Van der Waals e forças de natureza eletroestática (Zhu, 2007). A Figura III.3 mostra o esquema de forças típico de uma simulação DEM, envolvendo três partículas circulares, no qual duas delas estão em contato enquanto a terceira interage com a segunda por uma força de não-contato.

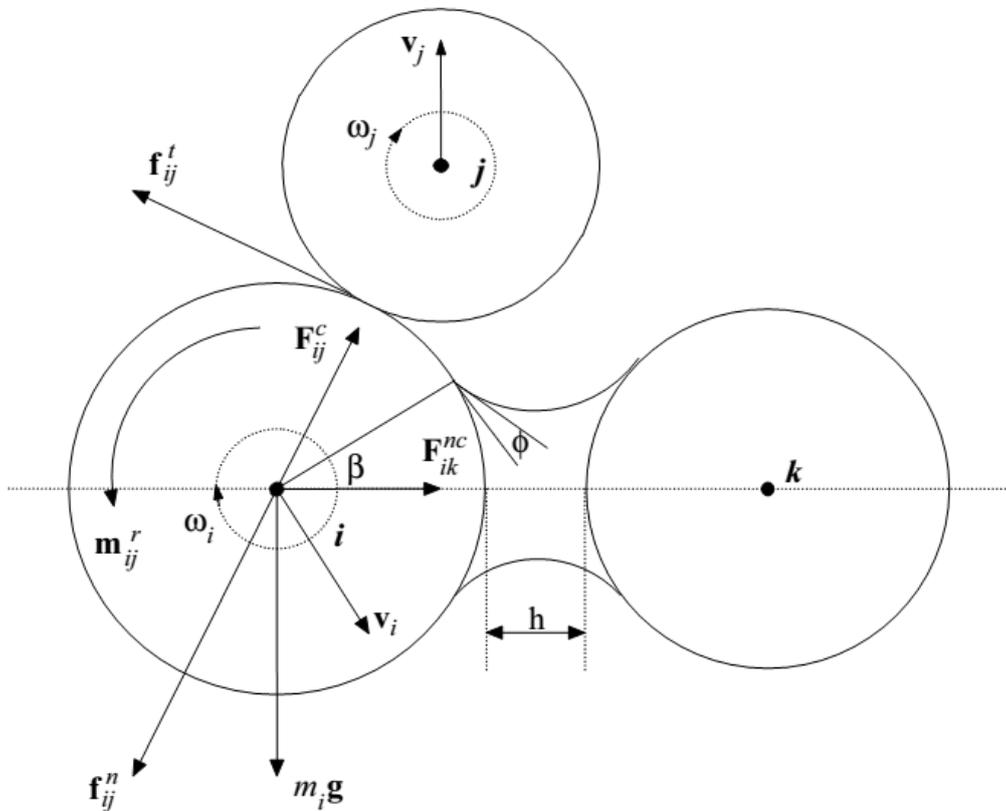


Figura III.3: Ilustração esquemática das forças atuando na partícula i em contato com a partícula j e sobre atuação de uma força de não-contato com a partícula k a uma distância h . ω_i e ω_j são as velocidades angulares das partículas i e j , enquanto que v_i e v_j são as velocidades lineares das

respectivas partículas. Há um conjunto de forças atuando no sistema, sendo F_{ij}^c a força de contato e M_{ij} o torque agindo na partícula i devido à ação da partícula j ou paredes do sistema. F_{ik}^{nc} é a força de não-contato atuante na partícula i pela partícula k (na figura, força de capilaridade) F_{ij}^n representa a força da interação entre partícula e o fluido no qual ela se encontra (geralmente desprezível o fluido é o ar) e F_i^g é a força gravitacional atuando na partícula (Zhu, 2007).

III.2 Forças e Modelos de contato

III.2.1 Visão geral

Para o cálculo das forças provenientes do contato entre partículas é preciso que a natureza do contato seja representada de forma representativa do fenômeno na realidade. O contato não é definido como um ponto, mas sim como uma área finita (área de contato) gerada pela deformação das partículas (Yang, 2007). No DEM, as partículas são consideradas como corpos rígidos, cujo contato gera uma sobreposição entre elas. A força de tração gerada pelo contato pode ser decomposta em uma componente tangencial (plano de contato) e uma componente normal. A determinação de maneira acurada da distribuição da força ao longo da área de contato possui um alto nível de dificuldade. Como o objetivo da implementação do DEM é processar sistemas com grande número de partículas de maneira eficiente, os códigos DEM se utilizam de um conjunto de equações que visam determinar as forças e torques provenientes do contato entre partículas de maneira simplificada. Tal conjunto de equações é denominado modelo de contato. Existem diversas abordagens para modelos de contato, que diferem na forma como descrevem a dissipação de energia e as relações entre força e deformação. A escolha de um modelo é baseada em observações fenomenológicas do movimento das partículas (Silva, 2017) e das condições específicas do sistema o qual deseja-se modelar. Neste trabalho, considerou-se o modelo de contato chamado de Hertz-Mindlin (sem escorregamento) (Mindlin, 1949), descrito na Seção III.2.2. Para simulações de materiais que apresentam comportamento coesivo/adesivo, como pelotas verdes, deve-se considerar estas forças, desta forma, uma abordagem comum é o acoplamento de um modelo para descrição da força coesiva entre materiais. Um modelo bastante utilizado para este objetivo é o modelo de Johnson, Kendall e Roberts (1971) acoplado ao modelo de Hertz-Mindlin. Esse acoplamento está disponível no software EDEM[®] e já foi utilizado com sucesso por outros autores na simulação do comportamento de pelotas verdes como no trabalho de Silva (2017).

III.2.2 Modelo de contato de Hertz-Mindlin

Este modelo está presente no software comercial EDEM[®] (DEM Solutions, 2017) sendo o modelo de contato adotado na maior parte das simulações desenvolvidas na metodologia deste trabalho. É baseado na teoria do contato de Hertz para a direção normal juntamente com as contribuições de Mindlin para a direção tangencial (Mindlin, 1949). As forças resultantes nas direções normal e tangencial são descritas como a soma das contribuições da componente repulsiva (elástica) e da componente dissipativa. Assim, tem-se um modelo mola-amortecedor, para a descrição da força resultante em ambas as direções, além de um fator controlador do deslizamento, como mostrado na Figura III.4:

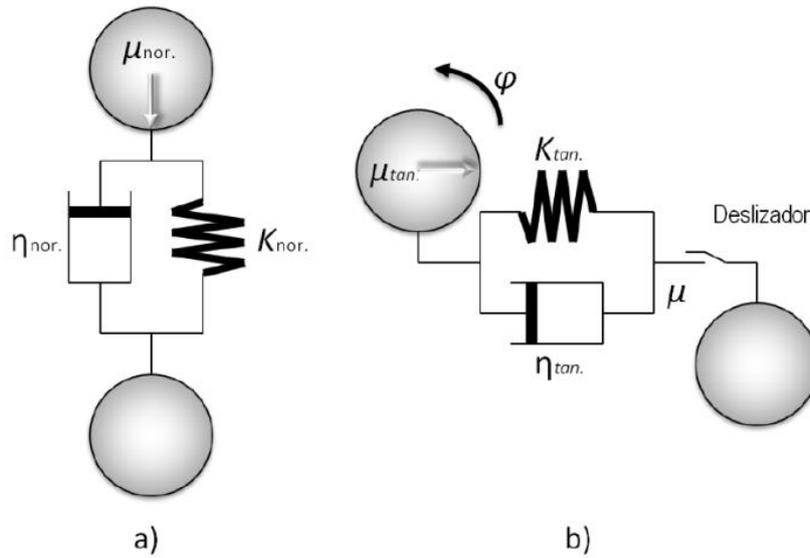


Figura III.4: Modelo de contato Hertz-Mindlin a) Força Normal b) Força Tangencial (η e K_n coeficiente de mola e do amortecedor, u o movimento relativo) (Renzo, e Di Maio, 2004)

Em uma colisão de duas partículas de raios R_1 e R_2 , tem-se a força resultante para a direção normal expressa por:

$$F_n = -K_n \delta_n + \eta_n v_n^{rel} \quad \text{III.3}$$

Em que K_n é a rigidez da mola, δ_n a sobreposição na direção normal, η_n a constante de restituição e v_n^{rel} a velocidade relativa entre as partículas. Na direção tangencial, a possível força de deslocamento depende de ambos os carregamentos, tangenciais e normais. Além disso, a força na direção tangencial é limitada pela lei do atrito de Coulomb. Dessa forma, calcula-se a força na direção tangencial como na equação a seguir:

$$F_t = \min\{\mu_s F_n, K_t \delta_t + \eta_t v_t^{rel}\} \quad \text{III.4}$$

Sendo K_t a rigidez da mola (componente elástica) e η_t o coeficiente de amortecimento para a direção tangencial. μ_s é o coeficiente de atrito estático. Assim, tem-se o sistema mola amortecedor para a direção tangencial da mesma maneira que para a direção normal. A Tabela III.1 mostra como esses valores são calculados, onde Y é o módulo de Young, G o módulo de cisalhamento e ε o coeficiente de restituição. O raio efetivo R^* de colisão entre duas partículas de raios r_1 e r_2 é definido como:

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \quad \text{III.5}$$

A tabela III.1 sintetiza as equações para o cálculo da rigidez e o coeficiente de amortecimento normal e tangencial.

Tabela III.1: Coeficientes de rigidez e amortecimento (Weerasekara *et al.*,2013)

	Direção Normal (n)	Direção Tangencial (t)
Rigidez da mola	$K_n = \frac{4}{3}Y\sqrt{R^*\delta_n}$	$K_t = 8G\sqrt{R^*\delta_n}$
Coefficiente de amortecimento	$\eta_n = 2\sqrt{\frac{5}{6}}\beta\sqrt{S_n}m$	$\eta_t = 2\sqrt{\frac{5}{6}}\beta\sqrt{k_t}m$
$S_n = 2Y\sqrt{R^*\delta_n}$	$\beta = \frac{\ln \varepsilon}{\sqrt{\ln \varepsilon^2 + \pi^2}}$	

Com relação ao movimento de deslizamento, o torque entre as superfícies de contato é dependente do coeficiente de atrito de rolamento μ_r , a distância do ponto de contato e o centro de massa da partícula r_i e a velocidade angular no ponto de contato ω_i pela equação a seguir:

$$\tau_i = -\mu_r F_n r_i \omega_i \quad \text{III.6}$$

Pode-se ver que as equações do modelo são dependentes de alguns parâmetros. A força na direção tangencial é limitada pela lei do atrito, dependente do coeficiente de atrito estático. Da tabela III.1 se observa que a componente de amortecimento das forças normais e tangenciais é dependente do coeficiente de restituição. A expressão para o torque entre duas superfícies depende diretamente do coeficiente de atrito de rolamento utilizado. Dessa forma, fica evidente a importância na definição correta de tais parâmetros de forma que o modelo represente de maneira a realidade do processo em que se queira modelar usando DEM. A simplicidade do modelo Hertz-Mindlin permite com que seja possível rastrear e contabilizar o movimento e cinética de um grande número de partículas.

III.2.3 Hertz-Mindlin com JKR

Em muitos casos, há sistemas em que as forças de adesão exercem significativa influência na determinação do movimento das partículas. Forças de adesão podem ter sua origem de diversas fontes, incluindo forças de Van der Waals, forças eletrostáticas e capilaridade. O modelo JKR, presente no EDEM[®], é um modelo de contato frequentemente aplicado para descrever sistemas de partículas cujo contato exhibe algum tipo de forças de adesão. Tal modelo de contato representa bem o movimento de materiais secos de granulometria muito fina ou materiais úmidos (Silva, 2017).

Johnson, Kendall e Roberts (1971) propuseram um modelo que permite representar a natureza coesiva de materiais finos. Os autores partiram do conceito de que além da energia elástica e de dissipação, presentes na teoria de Hertz-Mindlin, a energia de superfície também contribui de forma significativa para a energia total do sistema. A energia de superfície é dependente da sobreposição das partículas e do parâmetro γ , análogo à tensão superficial. A expressão da força de adesão e da sobreposição para as partículas é dada pelas equações a seguir, sendo a a área de contato entre as partículas.

$$F_{jkr} = -4\sqrt{\pi\gamma_{jkr}Y} * a^{\frac{2}{3}} + \frac{4Y}{3R^*} a^3 \quad \text{III.7}$$

$$\delta = \frac{a^2}{R^*} - \sqrt{\frac{4\pi\gamma_{jkr}a}{Y}} \quad \text{III.8}$$

sendo que o modelo depende do valor de energia de superfície γ . A energia de superfície possui como unidades J/m^2 e necessita ser fornecida ao software EDEM®, quando se realiza simulações usando o modelo JKR.

III.3 Parâmetros de entrada para as simulações DEM

O uso de um método computacional requer a preocupação de que sua aplicação forneça resultados que estejam de acordo com a realidade do processo a ser modelado. No que diz respeito ao Método Dos Elementos Discretos, a obtenção de bons resultados é fortemente dependente de uma escolha cuidadosa de parâmetros iniciais, ou seja, é necessário que haja a calibração destes parâmetros. Não há ainda consenso com relação a um padrão de ensaios destinados à calibração de parâmetros (Coetzee, 2016). Muitas das vezes, a etapa de calibração se revela como a mais custosa das etapas de aplicação do DEM na simulação de operações de manuseio. Nos últimos anos, um número considerável de pesquisadores tem direcionado seus esforços em estabelecer metodologias para ensaios de calibração, como no trabalho de Rackl (2015), propondo inclusive a construção de equipamentos em escala laboratorial que cumpram este objetivo, como no trabalho de Quist (2015).

Atualmente, há duas abordagens distintas para ensaios de calibração, sendo a primeira associada a procedimentos em que os parâmetros são obtidos por ajustes numéricos (retrocálculo) e a segunda associada a ensaios de obtenção medição direta dos parâmetros.

A abordagem numérica (com terminologia em inglês *the bulk calibration approach*) (Coetzee, 2017) consiste em realizar um conjunto de experimentos de bancada para medição de propriedades macroscópicas do fluxo granular, como o ângulo de repouso, ou alguma medida direta de propriedade da partícula, como o ângulo de rolamento. O experimento é então repetido numericamente com o conjunto de parâmetros de contato modificado de maneira iterativa, de forma a obter o melhor conjunto de valores que garanta o mesmo comportamento da propriedade medida no experimento físico. Os parâmetros são então variáveis de ajuste e não há uma forte ligação entre seus valores e o significado físico das propriedades.

Como vantagem principal desse método está o fato de que a calibração de parâmetros por ajuste pode compensar outras propriedades que não estejam representadas com a devida acurácia, como a forma e o tamanho de partícula. A principal desvantagem é o fato de que pode existir mais de um conjunto de valores para os parâmetros de contato que obtenham o mesmo comportamento do conjunto de partículas. Como exemplo de ensaio que utiliza essa abordagem, com medições de uma propriedade do conjunto de partículas, pode-se citar o

ensaio de ângulo de repouso, Figura III.5, que consiste em medir o ângulo formado pela pilha de material, quando esta está concentrada num volume e é despejada sobre a superfície de um material conhecido. A medida de ângulo de repouso é usada para estimar o coeficiente de atrito estático, ajustando estes parâmetros em simulações DEM, até que as partículas virtuais exibam o mesmo ângulo de repouso que as partículas do experimento real. Um exemplo de ensaio a partir do qual se obtém um parâmetro a nível de partícula é o ensaio de ângulo de rolamento, Figura III.6, para determinação do coeficiente de atrito de rolamento. Um conjunto de valores do coeficiente de atrito de rolamento é testado em simulações DEM, de forma que a partícula virtual do material role com o ângulo medido no experimento.



Figura III.5: Ensaio de ângulo de repouso, com partículas de sinter (Lima, 2016)

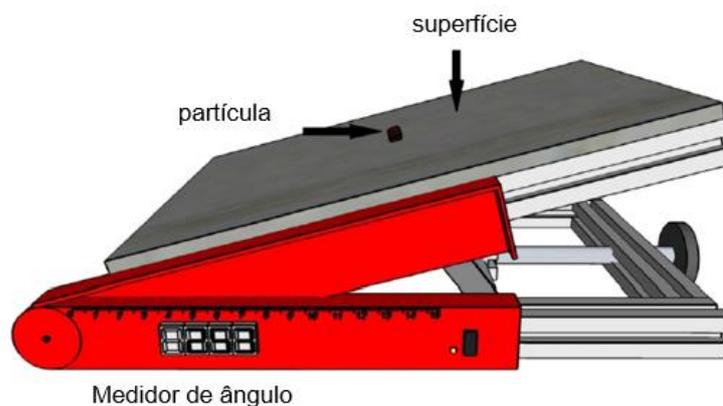


Figura III.6: Aparato para ensaio de ângulo de rolamento (Barrios *et al.*, 2013)

A abordagem que diz respeito aos testes de medição direta, como o próprio nome diz, são ensaios que buscam determinar os parâmetros de contato diretamente de ensaios de bancada, sem o uso de ajustes numéricos. Existem equipamentos usados para a medição do coeficiente de atrito partícula-partícula entre partícula e outros materiais, como o tribômetro usado no trabalho de Barrios *et al.* (2013) para determinação do coeficiente de atrito entre pelotas de minério de ferro e outros materiais (Figura III.7) O coeficiente de atrito é obtido pela razão entre a força na direção tangencial e a força na direção normal. O coeficiente de restituição também pode ser obtido de testes diretos, como o aparato mostrado na Figura III.8. A partícula é lançada de uma altura conhecida, atingindo uma velocidade v_0 imediatamente antes de tocar na base e v' imediatamente após o contato. Uma câmera de alta velocidade é responsável por gravar a trajetória da partícula e possibilitar o cálculo de velocidades. A razão v'/v_0 é o valor do coeficiente de restituição entre o material da partícula e o material da superfície da base em que esta colide.

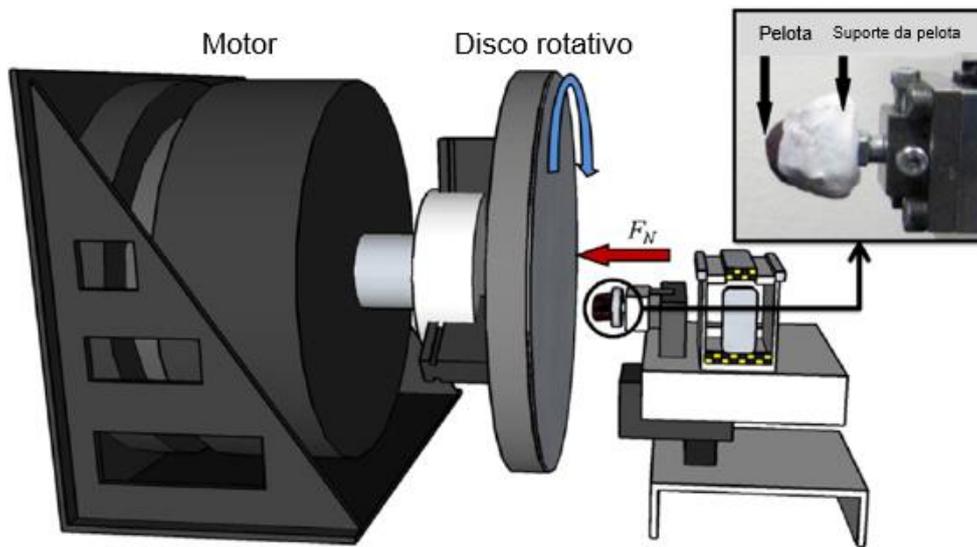


Figura III.7: Tribômetro para testes de coeficiente de atrito e desgaste de partículas. A partícula é pressionada contra um disco rotatório, cuja superfície é constituída ou revestida do material cujo coeficiente entre este a partícula deseja-se calcular. O equipamento permite calcular as forças nas direções tangencial e normal, calculando o coeficiente de atrito pela razão da primeira pela segunda (Barrios *et al.*, 2013)

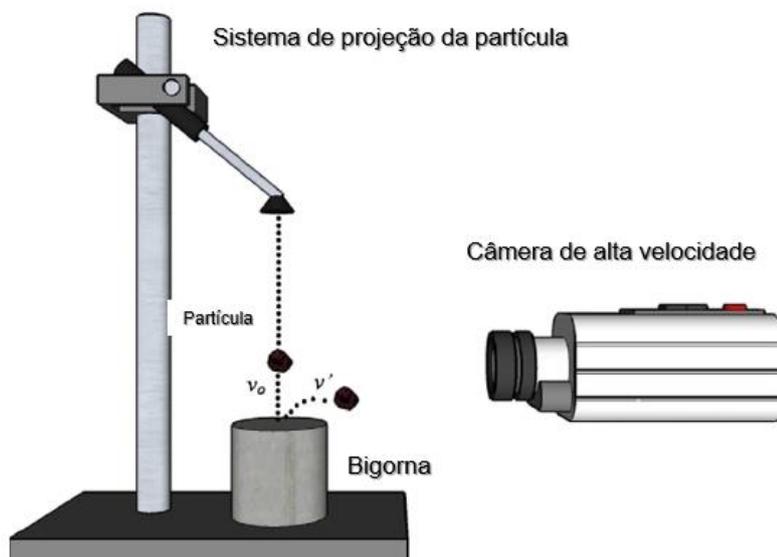


Figura III.8: Aparato do ensaio de terminação do coeficiente de restituição (Barrios *et al.*, 2013)

Propriedades individuais de partícula, como o tamanho e forma, massa específica, sua rigidez (módulo de Young), além de coeficientes de restituição e atrito são geralmente

determinados em laboratório com testes de bancada. Estes parâmetros constituem uma importante etapa do processo de caracterização do material granular a ser estudado. Contudo, a posse das propriedades individuais não é suficiente para a descrição da dinâmica do fluxo granular. Adicionalmente, busca-se obter também informações acerca do regime de fluxo do material, da energia dissipada nas colisões durante o escoamento, entre outros fatores.

Dessa maneira, pode-se pensar a calibração de parâmetros como um conjunto de procedimentos em alguns níveis (Quist, 2015). O processo de calibração de parâmetros para a simulação de um processo apresenta três níveis: O primeiro diz respeito à determinação dos parâmetros individuais de partículas de material granular utilizado, por meio dos ensaios de bancada, como a determinação do coeficiente de restituição. O segundo refere-se aos testes em laboratório envolvendo fluxo do material granular sob diversas condições, de forma a garantir que o comportamento do conjunto de partículas esteja em correspondência com os parâmetros individuais medidos (abordagem numérica). O terceiro e último nível consiste em simular o processo industrial em si, como forma de validação dos parâmetros calibrados anteriormente. Os dados das simulações são colocados em comparação com dados experimentais do processo industrial, de forma a validar a hierarquia dos processos de calibração. A Figura III.9 esquematiza o modelo proposto.

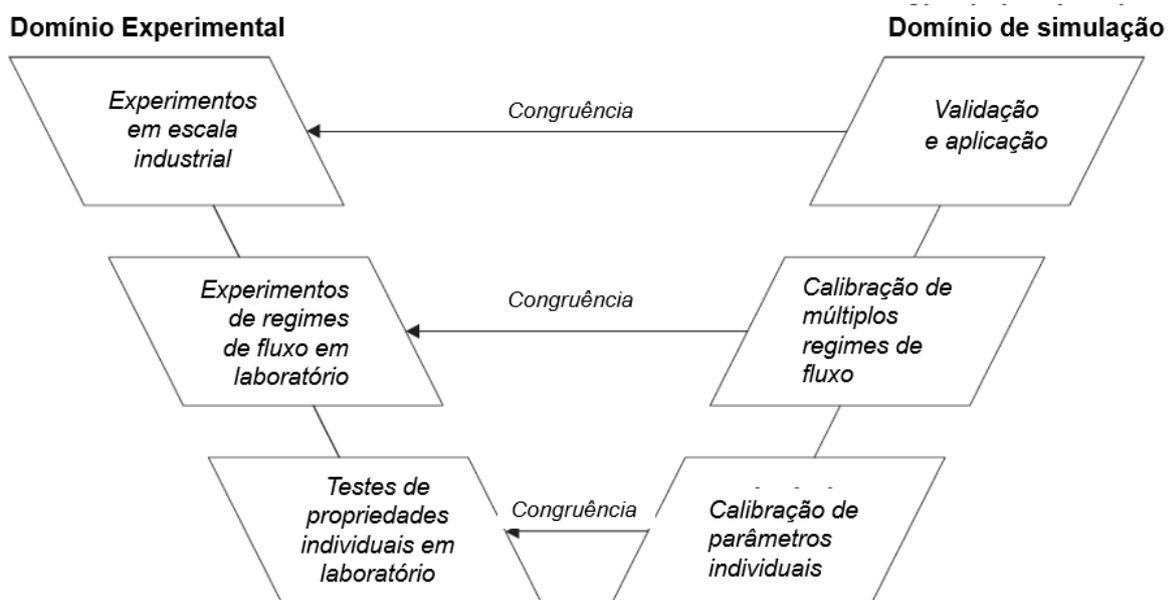


Figura III.9: Modelo proposto para calibração e validação de simulações DEM (Quist, 2015)

Um equipamento que se propõe a servir de ensaio de calibração parâmetros a nível da de regimes de fluxo do material foi construído no Laboratório de Tecnologia Mineral, LTM/UFRJ, validando a proposta original realizada no trabalho de Quist (2015). A Figura III.10 (a) mostra a captura fotográfica, do material em escoamento dentro do dispositivo, enquanto que a Figura III.10(b) mostra a operação correspondente do equipamento simulada no DEM.

O dispositivo permite mudar a configuração do fluxo granular, ajustando o fluxo de material que entra, e a inclinação das superfícies por onde o material escoar, podendo medir o ângulo de repouso do material que se deposita no fundo do equipamento. As simulações DEM permitem que os parâmetros de contato sejam ajustados de modo que o fluxo de partículas virtuais seja igual ao observado no equipamento (mesmo ângulo de repouso).

O protótipo virtual de dispositivo de manuseio deste trabalho, segue a mesma proposta de auxiliar a calibração de parâmetros de contato segundo a abordagem numérica, simulando o fluxo de material granular sob diferentes condições. Todas as características do equipamento e as etapas de desenvolvimento constam no capítulo IV.

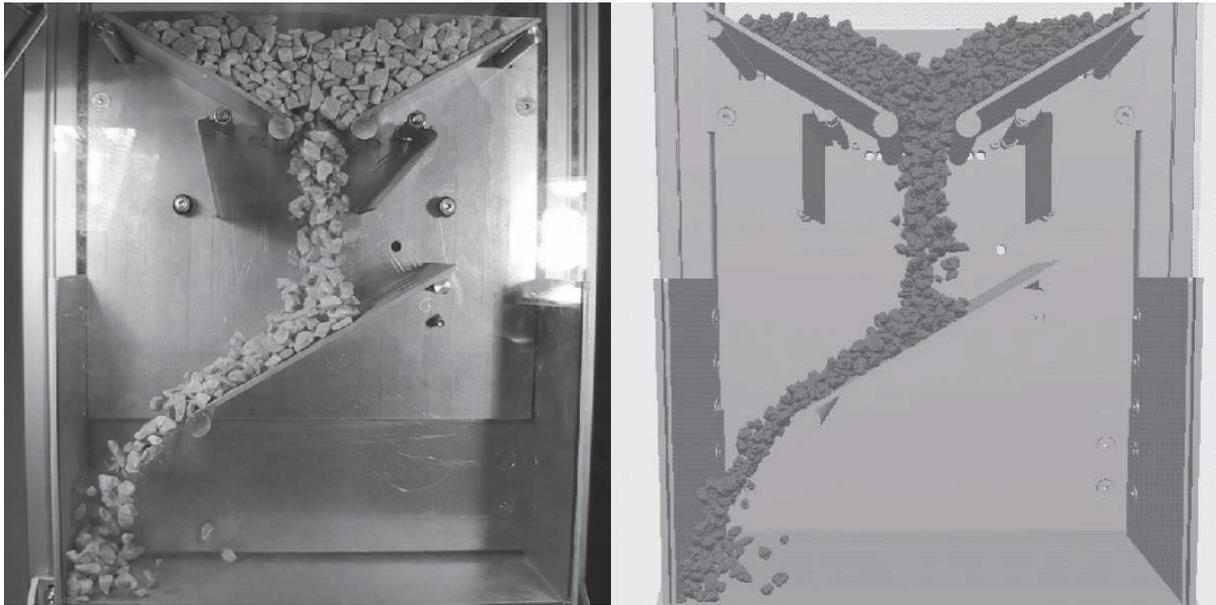


Figura III.10: Dispositivo de calibração de parâmetros de contato (a) Captura de câmera do material em escoamento dentro do dispositivo (b) Simulação DEM do fluxo equivalente ao da figura (a)

III.4 Manuseio de materiais granulares

III.4.1 Modelagem de correias chutes de transferência

O transporte de materiais granulares nos setores industriais é basicamente realizado através de correias transportadoras e chutes de transferência. Tipicamente a função de chute de transferência é transportar o material de um ponto a outro, aumentando ou diminuindo a velocidade do fluxo granular conforme a aplicação. Além de transportar material de uma correia para a outra, podem atuar em carregamentos, direcionando o material para silos, vasos de pressão e reatores. A Figura III.11 mostra o sistema de chute de transferência com descarga na correia de projeção de uma usina de beneficiamento de minério de ferro.



Figura III.11: Sistema de chute de transferência com correia de projeção (*International Mining*, 2014)

A transferência de material, quando não conduzida de forma apropriada, tem um impacto direto no custo da manutenção dos equipamentos envolvidos, bem como no meio ambiente. A vida útil de uma correia pode ser diminuída significativamente em função do impacto do material na mesma, ocasionando quebra de roletes, desalinhamento e desgaste da correia, assim como paradas indesejadas devido a obstruções do chute. Da mesma forma, o meio ambiente é afetado pelo derramamento de material e geração de pó ocorrida no processo de transferência de material (Trejo, 2010). Por conseguinte, a modelagem correta de chutes de transferência exerce importante impacto nas atividades industriais. O objetivo é produzir geometrias que garantam o escoamento do material granular de forma controlada, evitando bloqueios e derramamentos, além de evitar ao máximo a geração e propagação de finos e reduzir o desgaste do material constituinte do chute em contato com o material granular. Trabalhos como o de Scott *et al.* (1993), avaliaram as principais dificuldades com chutes de transferência no ambiente industrial, além de discutir mecanismos para otimização do fluxo de material e redução de desgaste, como a adição de planos de impacto e caixas de pedra.

O projeto de chutes de transferência é alvo de intensas pesquisas, no que tange ao desenvolvimento de métodos que possibilitem prever e analisar a trajetória das partículas do fluxo granular. A análise usando a abordagem contínua (Capítulo I) busca obter os dados de posição e velocidade do fluxo granular através de equações algébricas, provenientes do balanço de forças atuantes no fluxo granular, como mostrado na Figura III.13. Tais equações são dependentes das propriedades do material. Por isso, ensaios de caracterização das propriedades do material, como os apresentados na Seção III.3.1 devem ser realizados para a obtenção dos parâmetros necessários às equações. Estas também dependem da geometria do chute de transferência, o que se configura como a principal desvantagem da aplicação do método contínuo, uma vez que cada geometria requer o desenvolvimento de um conjunto de equações que o represente.

A principal vantagem da abordagem contínua é a fácil e rápida aplicação das equações algébricas, quando o modelo específico para a geometria é bem consolidado. Ensaio relativamente simples, como o aparato experimental mostrado na Figura III.12 permitem que a trajetória do fluxo granular possa ser calculada pelo método contínuo e comparada com os resultados experimentais. No ensaio da Figura III.12, tem-se a aplicação do modelo desenvolvido por Roberts (1999 e 2003) na avaliação da trajetória de chutes de geometria curva.

No modelo proposto por Roberts, é estabelecido o coeficiente de atrito equivalente μ_E que incorpora o atrito com as paredes do chute, e o cisalhamento interno do conjunto de partículas ao valor do coeficiente de atrito. A equação para o atrito equivalente é:

$$\mu_E = \left[1 + \frac{K_v v_o H_o}{vB} \right] \quad \text{III.1}$$

Sendo dependente da razão entre os valores de pressão agindo nas paredes dos lados do chute, K_v (assumida geralmente como sendo 0,4 de acordo com Roberts). v_o é a velocidade inicial do fluxo, ou seja, a velocidade com o qual este foi projetado. H_o é a altura em que ocorre o primeiro impacto entre o fluxo de material granular e o chute de transferência. B é largura média do fluxo de material.

A velocidade de partícula dada uma determinada posição angular no chute de transferência é dada pela equação III.2:

$$v = \sqrt{\frac{2gR}{4\mu_E^2 + 1} [2\mu_E^2 - 1] \sin\theta + 3\mu_E \cos\theta} + Ke^{2\mu_E\theta} \quad \text{III.2}$$

A constante de integração K é determinada pelas condições iniciais em que $v = v_o$ e $\theta = \theta_o$ em que θ_o é o ângulo inicial do fluxo. A forma como o ângulo θ é medido e o raio R do chute determinado é mostrado no balanço de forças da Figura III.13.

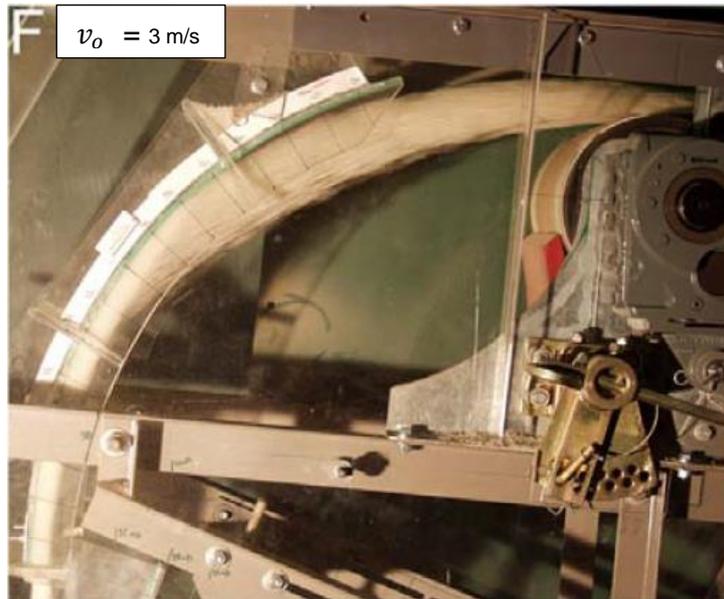


Figura III.12: Fluxo de material através de um chute de transferência curvo. Aparato experimental para ensaios de fluxo de material e comparação com as predições do método contínuo. Velocidade de projeção $v_0 = 3 \text{ m/s}$ é mostrada na figura (Roberts, 2003).

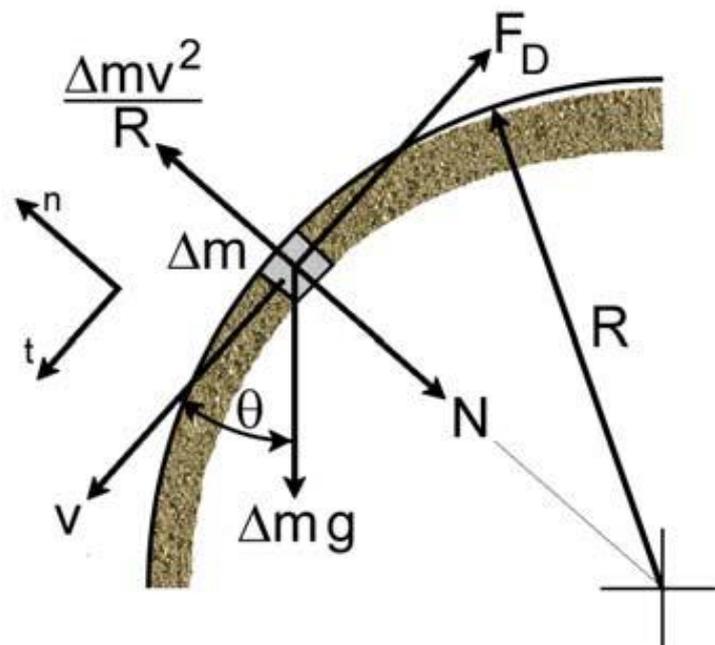


Figura III.13: Diagrama de forças no chute de transferência curvo da Figura III(a), Para um elemento do fluxo granular de massa Δm . Tem-se a atuação da força peso dada por Δmg , a reação normal N imposta pela superfície do chute, a força centrípeta dada por $\frac{\Delta mv^2}{R}$ e a força de atrito F_D . O raio R é medido tomando um ponto como origem. O ângulo θ é medido como o ângulo entre a direção da força peso e a tangente à curvatura do chute de transferência, no ponto do centro de massa do elemento de massa Δm

Com o surgimento do DEM, a análise de chutes de transferência alcançou um novo patamar (Ilic, 2014) uma vez que o uso do DEM como ferramenta de análise traz consideráveis vantagens, superando a limitação da abordagem contínua no que diz respeito à dependência da geometria e permitindo análises qualitativas diretas do fluxo granular, permitindo o projeto de geometrias adequadas para chutes de transferência que evitem o acúmulo de material, reduzam o desgaste devido ao contato com o material, entre outros fatores. A Figura III.14 mostra a modelagem do fluxo em um chute de transferência utilizando DEM, com as partículas coloridas por sua velocidade (escala na Figura).

Diversas publicações nos últimos anos tiveram como alvo a apresentação e comparação das abordagens do método contínuo com DEM, como nos trabalhos de Hastie (2010 e 2007), Ilic (2010) e Cyganiuk (2014).

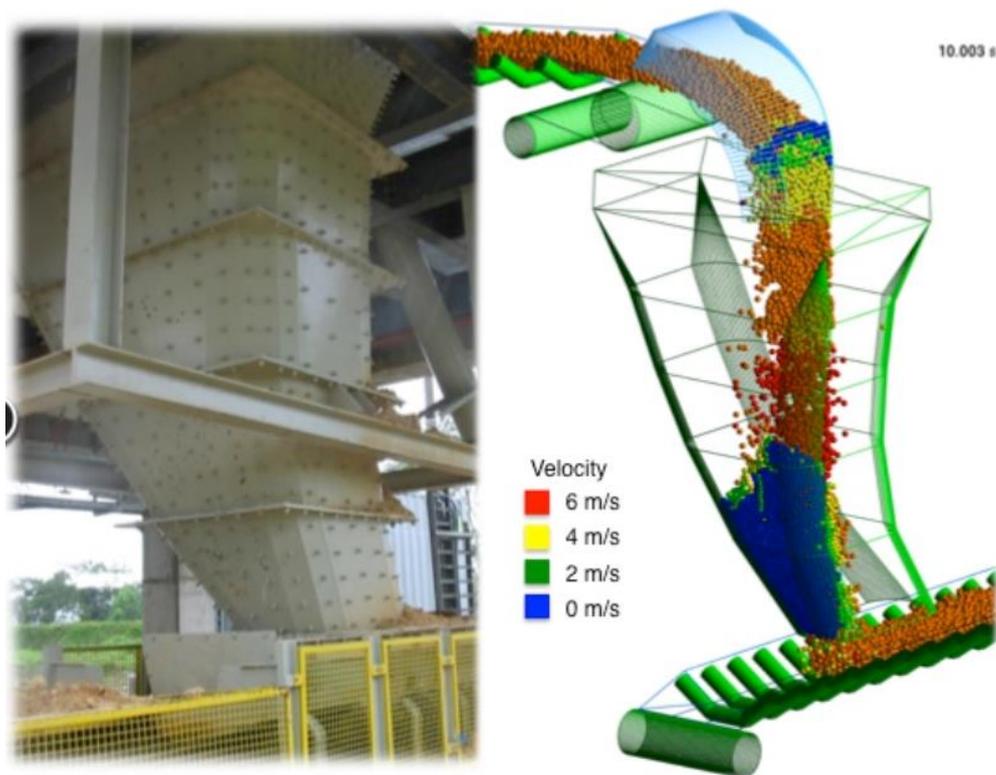


Figura III.14: Modelagem do escoamento do material granular num chute de transferência. Partículas coloridas conforme sua velocidade. (Jenike & Johanson, 2015)

III.4.2 Materiais granulares utilizados

Nesta seção, busca-se descrever de maneira breve as características básicas e processos de produção dos três materiais granulares usados na metodologia deste trabalho: pelotas queimadas, pelotas verdes e coque siderúrgico.

Pelotas são agregados de minério de ferro que ocupam papel importante na indústria siderúrgica uma vez que se configuram atualmente como uma das principais matérias-primas

da qual se constitui a carga ferrífera para a produção de ferro primário. O processo de pelletização consiste resumidamente em três estágios: Preparação de matérias-primas, formação de pelotas verdes pelo processo de aglomeração e por fim o processo de cura (ou queima) para a produção de pelotas endurecidas (ou queimadas).

As pelotas verdes, Figura III.15, são o produto obtido do processo de aglomeração da mistura de finos de minério de ferro, com água, aglutinantes, entre outros aditivos. Este processo é realizado em tambores rotativos ou discos pelletizadores. Pelotas Verdes caracterizam-se por terem faixa de tamanhos entre 8 e 18 mm, concentração de ferro superior a 63% e alta porosidade, entre 25 e 30%. Estas caracterizam-se por terem baixa resistência mecânica e, devido à umidade, presença de forças coesivas. Publicações relacionadas ao manuseio de pelotas verdes podem ser encontradas no trabalho de D.Wang *et al.*, (2015), voltado para a modelagem do processo de formação de pelotas verdes em tambores rotativos, usando o acoplamento dos métodos computacionais DEM e CFD, e no trabalho de Silva (2017) que buscou modelar o processo de classificação de pelotas verdes em peneiras de rolos, usando o DEM como ferramenta.



Figura III.15 Pelotas verdes

A etapa seguinte do processo de pelletização consiste em submeter as pelotas verdes a tratamento térmico em temperaturas elevadas, processo conhecido como queima. Este é formado pelas etapas de secagem, pré-aquecimento, aquecimento e esfriamento das pelotas (Silva, 2017). O objetivo do processo de queimada é conferir resistência mecânica e à abrasão, necessários para o uso das pelotas como matéria-prima para os processos de redução de minério de ferro. As chamadas pelotas queimadas, Figura III.16, são o produto final do processo de pelletização, com boa resistência mecânica

Diversas publicações estão disponíveis na literatura, de estudos referentes às propriedades de pelotas queimadas, usando simulações DEM como ferramenta de análise Boechat *et al.* (2018) realizaram simulações para estudo da degradação de pelotas em um

forno de redução direta. Barrios *et al.* (2013) buscaram calibrar parâmetros de contato para partículas de pelotas queimadas, representando as partículas como um aglomerado de esferas sobrepostas.



Figura III.16: pelotas queimadas (Cavalcanti, 2015)

O coque siderúrgico, Figura III.17, caracteriza-se como a principal matéria-prima fornecedora de carbono para o processo de redução de minério de ferro e obtenção de ferro gusa em altos-fornos. O coque é obtido do processo de coqueificação, que consiste na volatilização das moléculas orgânicas presentes no carvão mineral, realizada em altas temperaturas. Em comparação ao carvão mineral, o coque possui maior resistência mecânica, porosidade e poder calorífico, lhe conferindo funções essenciais no processo de obtenção de ferro gusa, como a garantir a sustentação da carga metálica, permitir a passagens dos gases das reações que ocorrem no processo, além do fornecimento do carbono para a combustão e geração de energia térmica, bem como a realização da reação do minério de ferro. Com relação ao manuseio de materiais, estudos com o coque são voltados para analisar seu comportamento no carregamento de alto fornos (Lima, 2016), e também avaliações da degradação mecânica do material quando submetido a esforços num tambor rotativo, como no trabalho de Silva *et al.* (2016).



Figura III.17: Partículas de coque siderúrgico

IV. Metodologia

Esta seção expõe a metodologia aplicada no desenvolvimento do equipamento virtual, que consiste das seguintes etapas:

1. Elaboração de um esboço inicial para o equipamento. Definição das características básicas de operação, número de correias e os pontos de transferência de material. Determinação dos componentes do dispositivo, sua geometria e dimensões (Seção IV.1).
2. Levantamento das propriedades relevantes dos materiais granulares escolhidos para serem usados como carga do equipamento nas posteriores simulações efetuadas. Para cada material foram determinados a forma de partícula e distribuição de tamanhos, a densidade, módulo de cisalhamento, e também os parâmetros de contato (coeficiente de restituição, e coeficientes de atrito estático e de rolamento). Estes dados foram obtidos da literatura disponível, onde pesquisadores que utilizaram tais materiais em simulações DEM já realizaram a calibração dos parâmetros de contato e aferição das propriedades necessárias.
3. Implementação de simulações da operação do equipamento usando o software de elementos discretos EDEM[®] 2017 (DEM Solutions, 2017), primeiramente em testes para obter a geometria mais adequada do equipamento, e posteriormente em estudos de caso variando o material carregado e as variáveis de operação.

4. Análise do comportamento das simulações da operação do equipamento. Na seção IV.3 é detalhada a etapa de construção do protótipo virtual, as variáveis de processo e diferentes condições de operação e finalmente na seção IV.4 são listados os estudos de caso realizados.

IV.1 Premissas para a operação do equipamento de manuseio

A atividade inicial da elaboração do protótipo virtual consistiu na definição de sua geometria. Para isso, procurou-se obter um esboço inicial que atenda aos objetivos do equipamento e que viabilize futuramente seu projeto mecânico e construção.

As premissas iniciais que conduziram o desenvolvimento do esboço foram a de que o equipamento virtual deve permitir acompanhar o comportamento do fluxo do material granular usado como carga, sob diferentes condições de velocidade e ângulo de projeção além de permitir a amostragem do material circulante no equipamento, para outros ensaios, como análise granulométrica. Partindo dessas características operacionais, os componentes do equipamento de manuseio começaram a ser modelados. Para isso, uma ferramenta de modelagem foi necessária e o software de modelagem 3D Sketchup® (versão gratuita) foi utilizado. Este oferece vantagens por ser de uso intuitivo e fácil aprendizado, além de permitir exportar as geometrias dos componentes para o formato STL (abreviatura de “*stereolithography*”, podendo ser referido também como “*Standard Triangle Language*”). O software de elementos discretos usado, EDEM®, admite importações de geometrias com formato STL e dessa forma é possível modelar e realizar correções em componentes do equipamento de maneira simples e eficiente no Sketchup®, importando-as posteriormente no EDEM® para as simulações.

Um desafio na elaboração do protótipo foi a definição das geometrias mais adequadas para os componentes de modo a evitar retenções de material ou entupimentos além prevenir a ocorrência de material fugitivo em algum dos componentes. Diversas geometrias foram propostas e seu funcionamento avaliado em simulações no EDEM®, até que a configuração mais adequada para os silos e correias fosse obtida. Um esboço 3-D da geometria consolidada do equipamento está ilustrado na Figura IV.1. Nela, tem-se a visualização da geometria do protótipo importada no software EDEM®. Esta foi a geometria base utilizadas em todas as simulações efetuadas neste trabalho, com pequenas variações que serão detalhadas posteriormente neste capítulo, quando os estudos de caso forem discutidos. A legenda da Figura IV.1 nomeia os componentes do equipamento. Essa nomenclatura foi adotada como padrão e utilizada em toda a sequência do desenvolvimento deste trabalho.

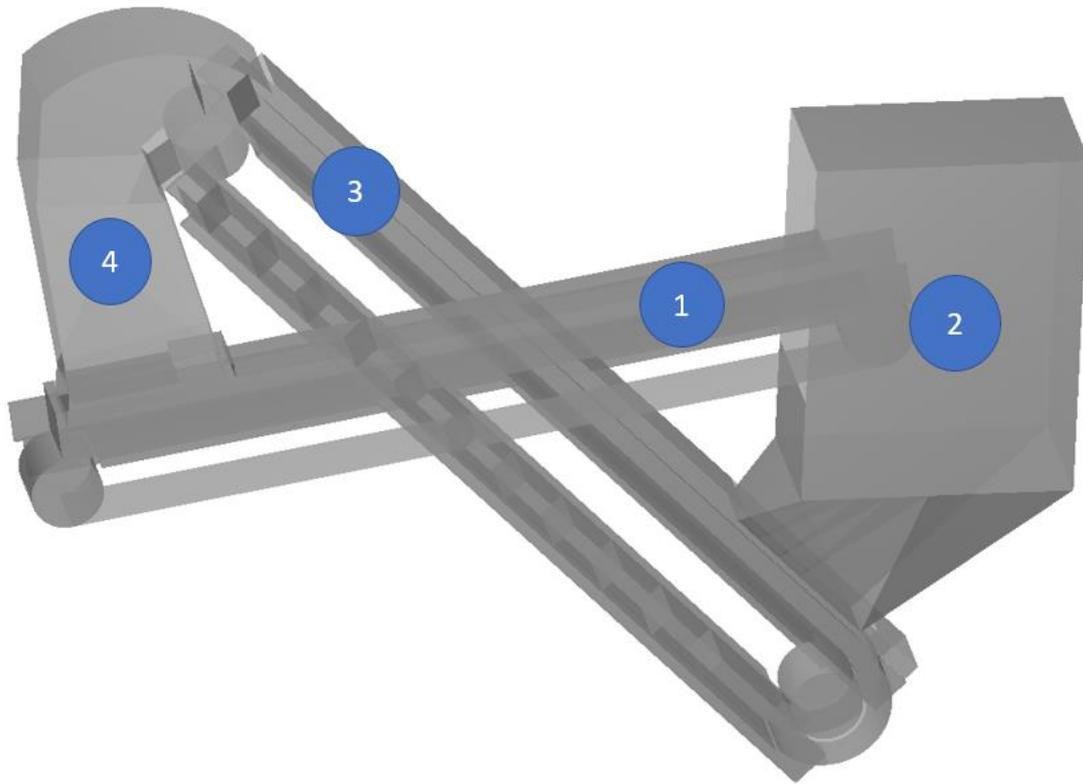


Figura IV.1: Esboço 3-D da geometria consolidada do equipamento, evidenciando seus principais componentes. (1) - Correia de projeção (2) - Silo de análise (3) - Correia de retorno (4) Silo de alimentação

O material granular usado como carga é introduzido no equipamento através do silo de alimentação (4) na Figura IV.1. Por ação da gravidade este chega à correia de projeção, a qual realiza o transporte do material e por fim o projeta sob velocidade e angulação controlados. Devido a isso o aspecto da distribuição de material na correia e o fluxo mássico adquirem importância, de forma a garantir a uniformidade do fluxo de material que é projetado. Estes fatores são alvos de análise nas simulações DEM realizadas neste trabalho, descritas na Seção IV.4.

O material da correia de projeção é projetado no silo de análise, item (2) na Figura IV.1, que se caracteriza como a região cujas análises de fluxo granular serão realizadas. Adicionalmente, o silo tem boa versatilidade no que diz respeito a comportar a operação do equipamento sob diferentes condições da correia de projeção (inclinação e velocidade de projeção) além de ter a capacidade de lidar com ensaios de diferentes volumes de material usado como carga. Com outros requisitos desejáveis, o silo deve permitir que sejam retiradas amostras do material para análise durante a execução do ensaio, além de também permitir que outras peças que modifiquem o padrão do fluxo granular possam ser acrescentadas, como anteparos, defletores e caixas de pedra.

A operação do equipamento ocorre em regime de batelada e em ciclo fechado, ou seja: o equipamento é inicialmente alimentado com material à uma vazão constante, até atingir o volume especificado. Posteriormente o material circula pelo equipamento, até que se encerre as análises e este seja descarregado. A opção por este regime de operação se justifica no fato de poder realizar ensaios com um volume de material controlado garantindo boa economia, além de ser vantajoso em outros aspectos como permitir análise de

degradação do material após sucessivos ciclos no equipamento. Uma vez que este regime de operação foi estabelecido no projeto, houve a necessidade de desenvolver um mecanismo para garantir a recirculação da carga, fazendo com que o material que é descarregado no silo de análise fosse elevado e retorne novamente à correia de projeção. Pesquisas foram realizadas na área de manuseio de materiais com o objetivo de definir qual das soluções usadas na indústria para este tipo de problema seria a mais adequada para o protótipo virtual. Dessa maneira, foi definido que uma correia de inclinação fixa equipada com taliscas seria a opção mais eficiente, denominada correia de retorno na Figura IV.1. Taliscas são palhetas com a mesma largura da correia e de altura fixa, distribuídas uniformemente ao longo do comprimento da correia. A Figura IV.2 (a) mostra a correia de retorno com mais detalhes. A visualização em transparência permite que se observe as taliscas distribuídas ao longo da correia. Como efeito de comparação, a Figura IV.2(b) mostra uma correia de uso industrial.

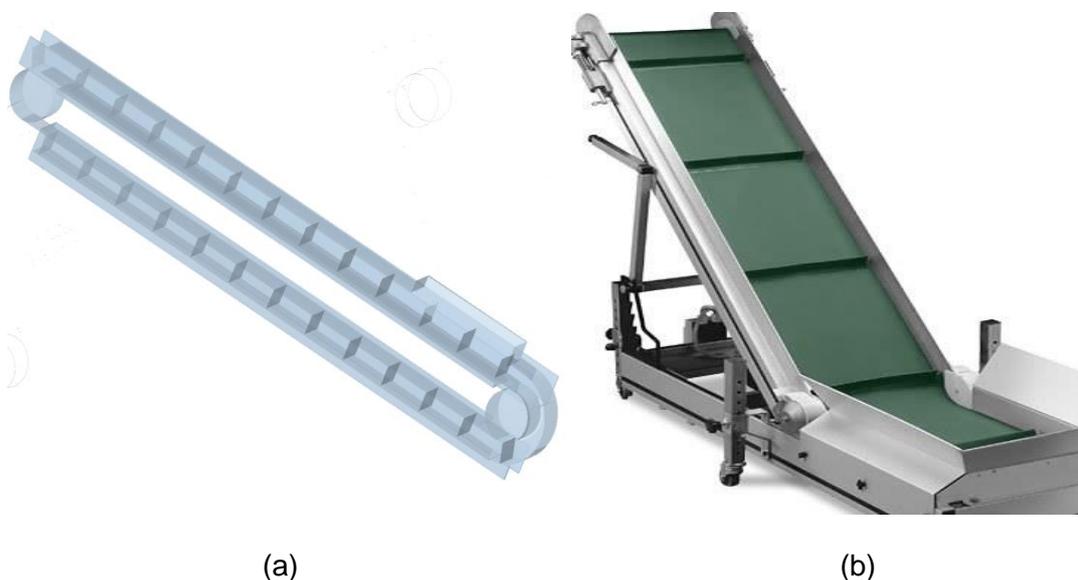


Figura IV.2: (a) Aspecto da correia de retorno em simulação no EDEM®. Visualização (b): Correia industrial equipada com taliscas e guias nas laterais (Servbelt correias industriais, 2017)

A atuação da correia de retorno se dá da seguinte forma: as partículas de material projetadas percorrem o silo de análise e caem diretamente sobre a correia de retorno, sendo carregadas pelas taliscas, como descrito sequencialmente pela Figura IV.3. A correia de retorno possui isolamento acoplado, que não permite que o material escape para fora do material no ponto de transferência do silo para a correia.

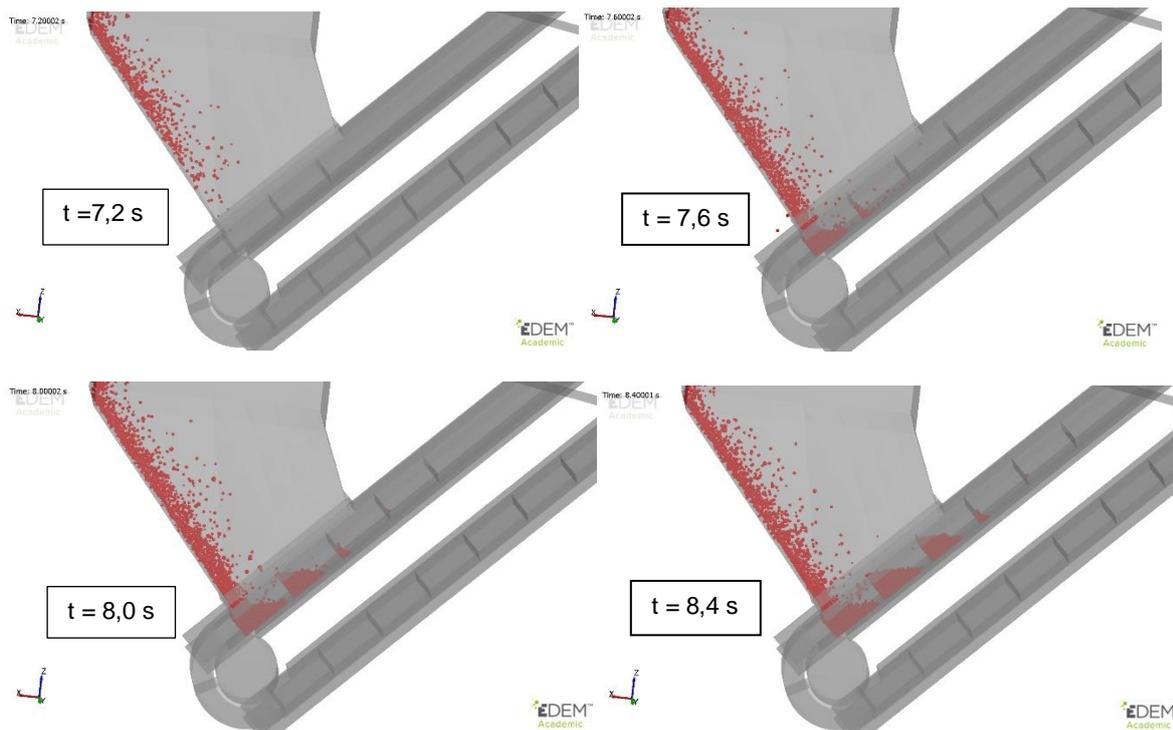


Figura IV.3: Mecanismo de recolhimento de partículas da correia de projeção. As partículas projetadas percorrem o silo de análise ($t = 7,2$ s), caem na correia de projeção ($t = 7,6$ s), são recolhidas pelas taliscas ($t = 8,0$ s) e carregadas em direção ao silo de alimentação ($t = 8,4$ s). Visualização do equipamento com transparência, de modo a ver as taliscas da correia de retorno. Partículas são coloridas em vermelho, para melhor visualização

O material recolhido nas taliscas é descarregado no silo de alimentação, que conduz as partículas novamente até a correia de projeção fechando assim o ciclo. O projeto do silo de alimentação foi pensando de modo que este possua basicamente três funções:

1. Ser o componente pelo qual se dá a introdução do material granular no equipamento. A alimentação de material deve ocorrer de maneira controlada, a taxa constante e estabelecida de modo a evitar que o material que já percorreu o ciclo do equipamento e será projetado no silo de alimentação pela corrente de retorno entre em conflito com o material da alimentação. Também deve-se evitar que se formem vazios na correia de projeção, prejudicando as análises de estabilidade que serão realizadas.
2. Transportar o material carregado pelas taliscas da correia de retorno até a correia de projeção, fechando o ciclo do equipamento, como já mencionado anteriormente.
3. Ser responsável também pela descarga do equipamento, após o fim do ensaio. Foi implementado no protótipo virtual um mecanismo de escotilha na parte superior do silo, de modo a redirecionar o fluxo do material e retirá-lo do equipamento.

A delimitação das dimensões do protótipo virtual tem importância, uma vez que este deve servir como base para a possível construção do equipamento físico, o qual será utilizado em ensaios no LTM/UFRJ e por isso seu tamanho deve ser adequado a esta escala. As duas correias foram projetadas com a mesma largura, ambas medindo 20 cm, dimensão encontrada comercialmente. Como visto na Figura IV.4, as correias estão dispostas paralelamente entre si com um pequeno espaçamento entre estas referente a largura dos suportes que sustentam seus respectivos isolamentos. Assim, a largura do equipamento é a soma da largura das correias mais o espaçamentos, em torno dos 50 cm.

No projeto foi definido que a correia de projeção tivesse inclinação e velocidade reguláveis e que correia de retorno tivesse inclinação fixa de 45 graus e velocidade também regulável, com as taliscas distribuídas ao longo de seu comprimento possuindo espaçamento de 20 cm entre si. A largura das taliscas é a mesma da correia, de forma a garantir que todo o material que caia na correia seja carregado, minimizando o material retido entre a correia e seu suporte. A altura das taliscas foi definida como 8 cm. Todas essas dimensões estão dentro da faixa de tamanhos dos fornecedores de correias disponíveis no mercado, o que garante a viabilidade da construção do protótipo. A Figura IV.6 mostra a vista frontal do equipamento com algumas medidas dos componentes em mm. Os roletes que participam da movimentação das correias são todos de mesma dimensão, tendo diâmetro de 20 cm a largura das correias, com uma pequena folga. Os comprimentos das correias são as medidas determinantes do tamanho do equipamento. Para a correia de projeção tem-os 2,25 m enquanto a de retorno é um pouco maior, com aproximadamente 2,7m. As dimensões do silo de análise permitem que este cumpra suas características de projeto, podendo abrigar anteparos e defletores e comportar as mudanças de inclinação da correia de projeção. Sua largura, não mostrada na Figura é de 40 cm, o dobro da largura da correia.

As dimensões do esboço mostram-se compatíveis para um equipamento de laboratório. O esboço da Figura IV.1 não tem preocupação em estabelecer um projeto mecânico, sendo adequado para implementação e análise das simulações do protótipo virtual no ambiente do EDEM, sendo o objetivo deste trabalho. Por isso, os mecanismos de sustentação das correias e silos, a disposição dos componentes mecânicos que implementem a movimentação das correias, como motor e inversor de frequência não foram levados em consideração, por não serem determinantes na dinâmica do fluxo de material granular que se deseja observar.

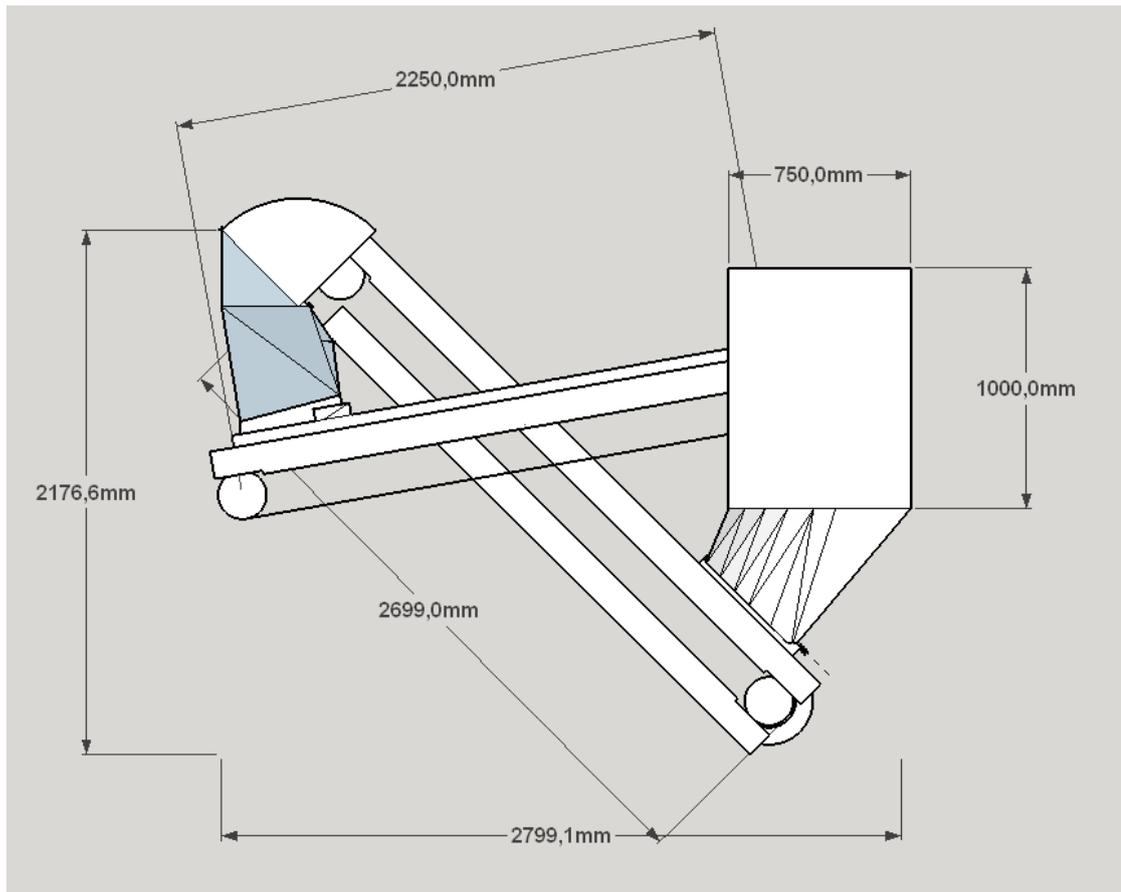


Figura IV.4: Vista frontal do esboço 3D. Informação do comprimento e altura do equipamento, e dimensões do silo de análise e correias.

IV.2 Levantamento de dados e escolha de materiais

IV.2.1 Materiais para os componentes do equipamento

No ambiente do EDEM®, os silos, suportes das correias e seus respectivos isolamentos foram definidos como sendo constituídas unicamente por aço, enquanto que as correias e as taliscas da correia de retorno foram definidas como sendo constituídas de borracha. A Tabela IV.1 lista as propriedades individuais do aço e da borracha (tipo de B, Classe G da norma ASTM 2000) importância para as simulações DEM cujos valores foram obtidos por Barrios *et al.* (2013), que avaliou a estimação de parâmetros de contato entre partículas de pelota queimada com aço e borracha.

Tabela IV.1: Propriedades individuais dos materiais que constituem os componentes do equipamento, aço e borracha. (Barrios *et al.*, 2013)

	Aço	Borracha
Coefficiente de Poisson	0,3	0,5
Módulo de cisalhamento (Mpa)	$7,0 \times 10^{10}$	$7,0 \times 10^6$
Densidade (kg/m³)	7800	860

IV.2.2 Materiais de carga

A escolha dos materiais granulares utilizados como carga do equipamento nas simulações com elementos discretos foi realizada sob alguns critérios. Como dito na Seção III.4, o manuseio de materiais granulares engloba diversos setores da indústria. Neste projeto, o foco está em avaliar materiais de interesse da indústria mineral e siderúrgica. Adicionalmente, buscou-se avaliar o comportamento do protótipo sob cargas de características diferentes no que diz respeito a forma da partícula, presença de forças coesivas entre as partículas, e diferentes distribuições granulométricas. Os três materiais escolhidos foram aqueles cujas características e aplicações foram brevemente comentados na Seção III.4: Pelotas Queimadas (PQ), Pelotas Verdes (PV) e coque.

Todos os dados foram obtidos de publicações que utilizaram estes materiais como alvo de duas simulações usando DEM. As informações acerca da Pelota Queimada foram obtidas do artigo de Barros *et al.* (2013), que objetivou a estimação dos parâmetros de contato na manipulação das pelotas queimadas. O trabalho de Silva (2017), que consistiu do modelamento da classificação de pelotas verdes de minério de ferro em peneiras de rolos, foi usado para o levantamento das informações acerca das pelotas verdes enquanto que para o coque os dados foram obtidos do trabalho de Lima (2016), que avaliou o sistema de carregamento de um alto forno usando DEM. As propriedades individuais para esses três materiais são dadas na Tabela IV.2.

Tabela IV.2: Dados individuais dos materiais usados como cargas do equipamento

	Pelota queimada	Pelota Verde	Coque
Coefficiente de poisson	0,25	0,25	0,25
Módulo de cisalhamento (MPa)	1,60E+07	1,80E+06	1,00E+08
Densidade (Kg/m³)	3350	3150	1180

As simulações usam modelos virtuais para as partículas, modelados de a maneira representarem mais precisamente possível a sua forma real. O software EDEM® permite a modelagem da partícula como um uma esfera ou um aglomerado de esferas com volumes variáveis. A forma padrão das partículas de cada material usadas nas simulações está

ilustrada na Figura IV.5, enquanto que suas respectivas massas e volumes são mostrados na tabela IV.3.

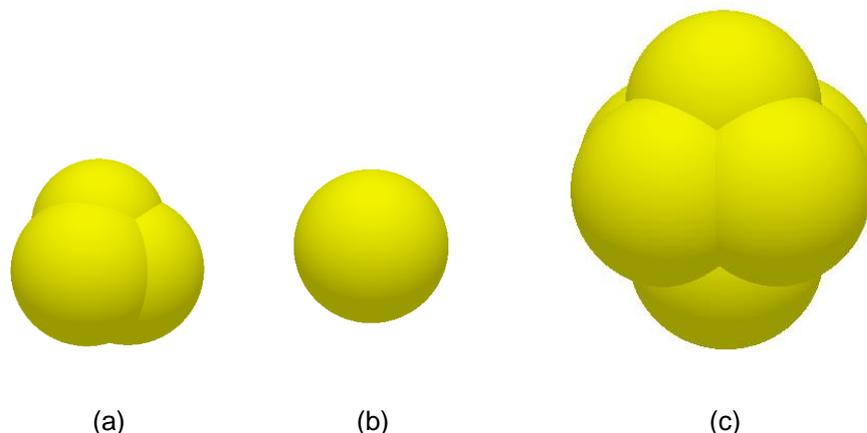


Figura IV.5: Representação das partículas no EDEM[®]: (a): pelotas queimadas (Barrios *et al.*,2013) (b) pelotas verdes (Silva, 2017) (c) coque siderúrgico (Lima,2016) (DEM Solutions, 2017)

Tabela IV.3: Massa e volume do protótipo de partícula modeladas no EDEM[®]

Material	Massa (kg)	Volume (m³)
Pelota Queimada	0,002	6,57E-07
Pelota Verde	0,010	4,12E-06
Coque	0,016	1,54E-05

As distribuições de tamanhos dos materiais também foram obtidas das respectivas publicações tomadas como base para a obtenção das propriedades de cada material. A inserção da distribuição de tamanhos no EDEM[®] segue uma divisão de classes de partículas, cujo volume tem como base o volume de partícula dado na Tabela IV.3. A exemplificação desse processo é dada para o coque, mostrada na Tabela IV.4. Tem-se uma distribuição com quatro classes, ou seja, partículas de coque com quatro volumes diferentes, proporcionais ao volume da partícula padrão de coque dado na Tabela IV.3. Com o objetivo de comparar as distribuições dos três materiais, as distribuições volumétricas foram transformadas para distribuições de diâmetro de partícula e lançadas num mesmo gráfico, Figura IV.6. A distribuição de tamanhos de um material foi baseada em uma publicação diferente da usada para outro material, e por isso se tem quantidades diferentes de classes de tamanhos de um material para outro, como pode ser visto pelo número de pontos em cada distribuição de tamanhos mostrada na Figura IV.6. O coque possui apenas quatro classes de tamanhos enquanto que as pelotas queimadas possuem sete e as pelotas verdes possuem trinta e cinco.

Os parâmetros de contato entre as partículas do material granular, e entre estas e os materiais constituintes do equipamento são listados no Anexo A, bem como os valores das energias superficiais para o modelo de coesão JKR utilizado nas simulações com pelotas verdes.

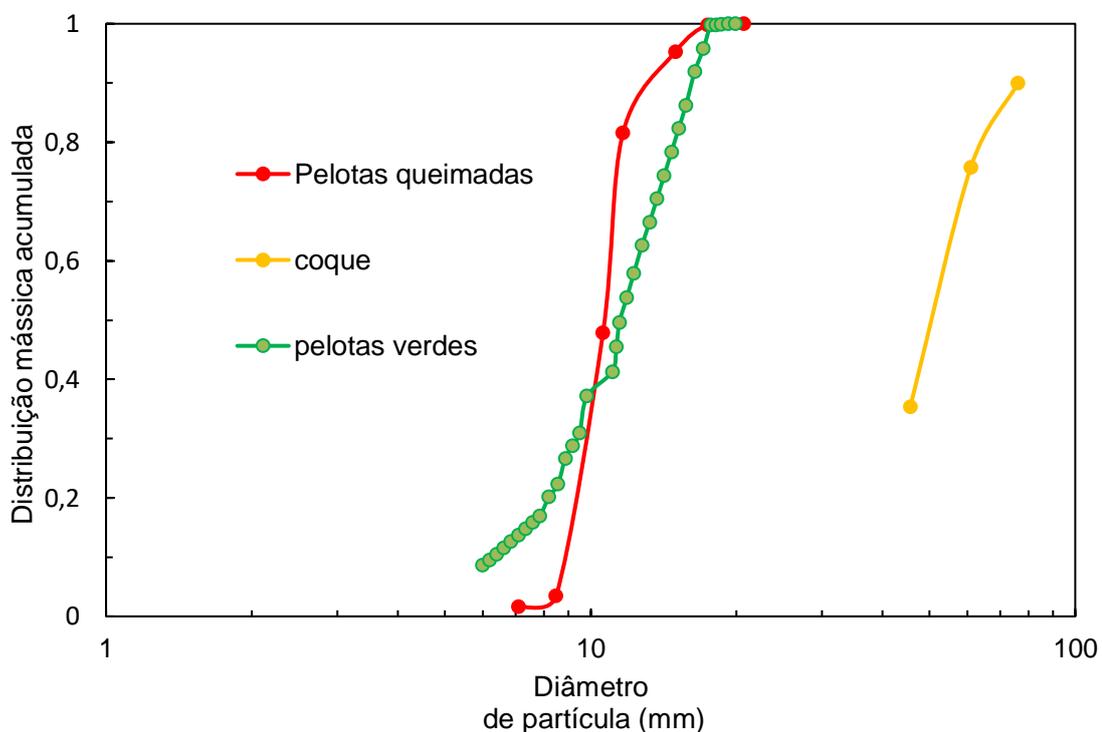


Figura IV.6: Distribuições mássicas acumuladas das partículas virtuais

Tabela IV.4: Classes de tamanho para as partículas virtuais de coque

Classe	Escala com relação ao protótipo	Volume (m ³)	Diâmetro (mm)
1	1,03	1,71E-05	33,53
2	1,33	3,65E-05	45,69
3	1,78	8,65E-05	60,92
4	2,22	1,69E-04	76,14

IV.3 Simulações DEM

As simulações com elementos discretos constituíram a base do desenvolvimento de todo este trabalho, sendo primeiramente fonte de testes para definição da melhor disposição dos componentes do protótipo e posteriormente ferramenta de análise das variáveis operacionais do protótipo. Todas as simulações DEM da operação do protótipo virtual possuíram as seguintes características, no que diz respeito à parâmetros computacionais: o método de integração usado foi o de Euler, com o passo de tempo (*time step*) de 30% do

tempo de Rayleigh (definido como o tempo em que uma onda acústica demora para atravessar o menor elemento do sistema de partículas simulado). A gravação de dados nas simulações foi configurada para ser efetuada a cada 0,1segundo.

O hardware disponível para as simulações foi uma estação de trabalho com sistema operacional Windows 7, dotado de processador Intel Xeon CPU @3.000 GHz 2.99 GHz com 4 GB de memória. Foram simulados sempre 60 segundos da operação do equipamento virtual e, com as configurações de Hardware citadas e uso da versão 2017 do software EDEM®, o tempo de processamento de cada simulação envolvendo pelotas queimadas e pelotas verdes variou entre 1 dia e meio a 2 dias. Para as simulações envolvendo coque, o processamento simulações durava em média 2 horas, devido ao material ser maior e a quantidade de material no sistema ser menor.

A massa total de partículas (configurada para kg) utilizada e também a taxa com que o material é inserido no sistema (configurado para kg/s) são parâmetros a serem fornecidos ao software EDEM® em cada uma das simulações efetuadas.

As simulações DEM da operação do protótipo virtual tiveram seguintes condições para as correias: A correia de retorno, de velocidade regulável no projeto, foi mantida com velocidade fixa de 0,5 m/s. O objetivo é simplificar as análises realizadas e também reduzir efeitos de degradação do material quando o material é projetado para o silo de alimentação, uma vez que nesta zona do equipamento o objetivo é somente garantir que as partículas do material cheguem novamente à correia de projeção. Para a correia de projeção, as velocidades utilizadas nas simulações foram 1, 2 e 3 m/s enquanto que as inclinações foram 5, 10 e 15 graus.

Além das avaliações da operação do protótipo, também foram realizadas simulações com DEM de ensaios para aferição da densidade aparente das partículas virtuais utilizadas.

IV.3.1 Aferição da densidade aparente no DEM

O volume de material usado para um ensaio no equipamento é uma medida de grande importância, que influenciará diretamente em sua operação, tendo em vista a capacidade máxima do equipamento em transportar o material granular. O valor de densidade aparente para um volume de partículas leva em consideração a presença dos vazios, sendo uma medida que melhor caracteriza o volume de material em comparação à massa específica de uma partícula. Foram realizados, portanto, ensaios de simulação para determinação da densidade aparente de um volume de partículas virtuais para cada um dos materiais utilizados neste trabalho com o software EDEM®. O procedimento consistiu em simular o preenchimento de um recipiente cúbico com material à taxa constante até se atingisse todo o volume do recipiente. Para as pelotas queimadas e verdes, o recipiente cúbico tinha 0,3m de lado, enquanto que para o coque o recipiente utilizado foi um pouco maior pelo coque ser um material maior, com 0,5m de lado. Uma leve vibração de 60Hz e amplitude de 1 cm foi imposta ao recipiente, de forma que as partículas se acomodassem na forma mais compacta possível. No EDEM® é possível medir a massa de material no interior do recipiente a cada instante de tempo. Para determinação da massa total adicionada ao volume, simulou-se o sistema até que atingisse valor constante. Assim, com o valor da massa média de material que preenche

todo o recipiente e o seu volume previamente conhecido, a densidade aparente é calculada pela razão:

$$\rho_{ap} = \frac{M_{rcp}}{V_{rcp}} \quad \text{IV.1}$$

IV.3.2 Simulações preliminares

Inicialmente, foram realizadas simulações para verificação do desempenho do equipamento considerando apenas partículas de pelotas queimadas como carga de material, com velocidade da correia de projeção igual a 2 m/s e inclinação da mesma em 10 graus, de forma a obter a consolidação da geometria do equipamento virtual (apresentada no esboço da Figura IV.1), eliminando problemas de acúmulo de material e fuga de material do equipamento.

Com a geometria consolidada, três simulações (caso 1 a 3) foram executadas, uma para cada um material (pelotas queimadas, pelotas verdes e coque) sob as mesmas configurações de velocidade de correia de projeção (2 m/s) e inclinação de correia de projeção (10 graus). A massa de material utilizado e a vazão de alimentação também foram as mesmas, de 50 kg e 2 kg/s respectivamente. As condições operacionais estão listadas na Tabela IV.5. O intuito foi observar o comportamento de cada material no equipamento, a fim de detectar tendências e preparar simulações mais adequadas. As simulações preliminares também serviram para a definição e implementação das rotinas de pós-processamento e análise.

Tabela IV.5: Plano de simulações preliminares

Caso	Material	Inclinação da correia de projeção (°)	Velocidade da correia de projeção (m/s)	Vazão de alimentação (kg/s)	Massa total carregada (kg)
1	Pelota Queimada	10	2	2,0	50,0
2	Pelota Verde	10	2	2,0	50,0
3	Coque	10	2	2,0	50,0

IV.3.3 Pós processamento das simulações do equipamento

O pós-processamento das simulações do equipamento seguiu três etapas principais e foram replicadas para todos os estudos de caso. Três análises principais foram realizadas: a primeira, visando a análise da estabilidade do fluxo mássico na correia de projeção, a segunda sobre a distribuição mássica e finalmente, a análise da distribuição de tempos de residência ou circulação no equipamento. O procedimento de cada uma das análises é descrito a seguir:

1. **Testes de estabilidade:** utilizou-se um sensor virtual localizado na seção transversal da correia, de modo a medir o fluxo mássico de material, quantificado a cada intervalo de tempo de 0,1 s. A Figura IV.7 destaca o fluxo da correia de projeção, com as partículas contidas no interior do sensor marcadas com coloração laranja.

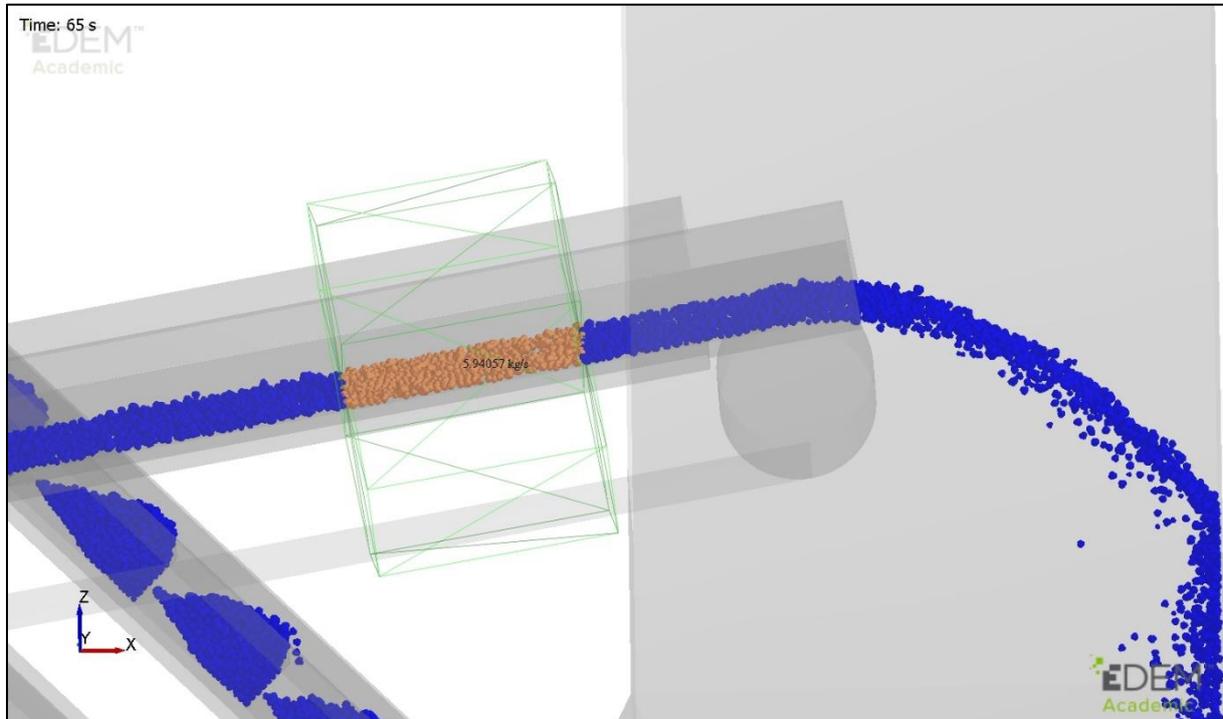


Figura IV.7: Medição do fluxo mássico na correia de projeção. Visualização das geometrias em transparência, permitindo visualizar o fluxo de partículas no equipamento. Sensor (linhas em verde) colocado na seção transversal da correia de projeção. Partículas contidas na região do sensor destacadas em laranja.

2. **Distribuição mássica:** Um sensor de massa em forma de malha é inserido ao longo da correia de projeção, dividindo suas seções transversais em 10 regiões de igual espaçamento. A cada 0,1 segundos quantifica-se a quantidade de massa em cada uma das regiões, obtendo assim a distribuição da massa (em fração) ao longo da seção da correia, tomando como origem o seu centro. A Figura IV.8 mostra o equipamento em vista superior detalhando a região em que a medida de distribuição mássica é realizada, colorida de maneira diferente do resto do fluxo de partículas.

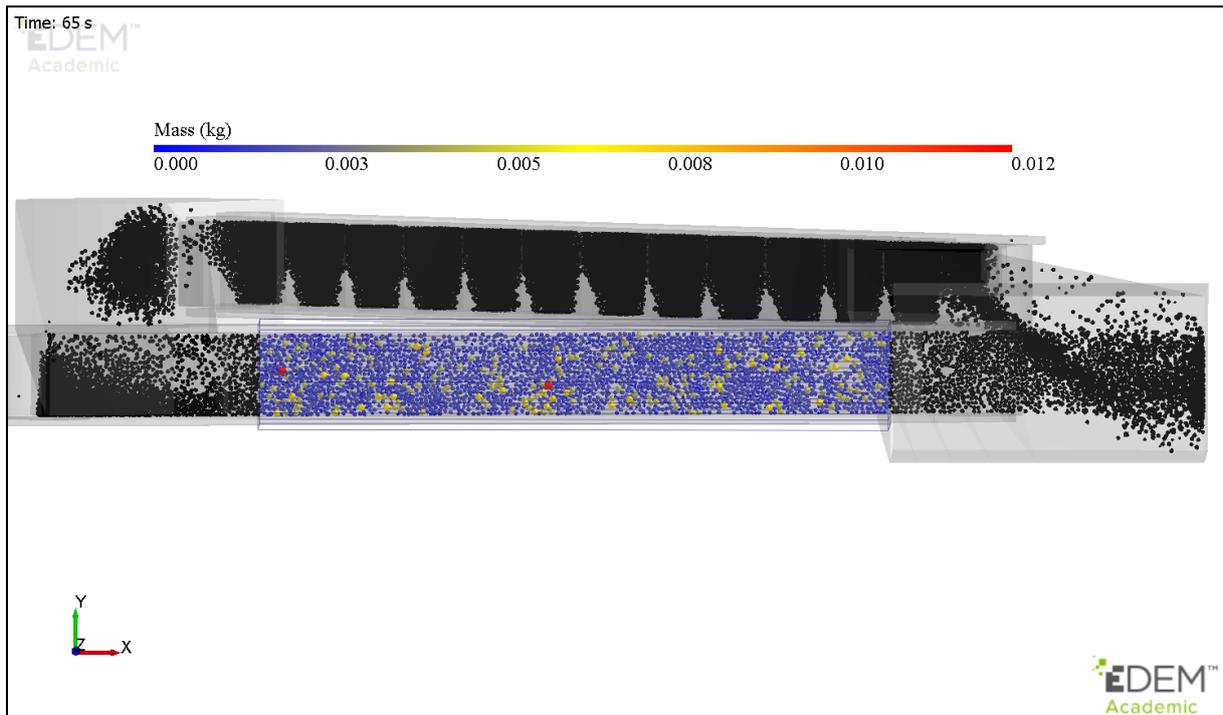


Figura IV.8: Vista superior do equipamento. As partículas contidas no sensor, cuja medição da distribuição da é realizada estão coloridas de acordo com sua massa (legenda na Figura), enquanto que demais partículas do sistema estão coloridas de preto.

3. Tempos de residência: A análise dos tempos de residência das partículas no equipamento visou quantificar o tempo em que cada partícula leva para percorrer todo o ciclo do equipamento e traçar a curva de distribuição de tempos para toda a população. Um sensor em formato de caixa foi inserido na correia de projeção (Figura IV.9). São registradas em intervalos de 0,1 segundo, a identificação, massa e diâmetro das partículas no interior do sensor. O processamento dos dados extraídos do EDEM® foi realizado com rotinas Matlab contabilizando o tempo necessário para cada partícula completar uma volta no equipamento. Por fim, atribuiu-se para cada partícula, seu tempo de residência como sendo o valor médio dos diversos valores de tempo calculados.

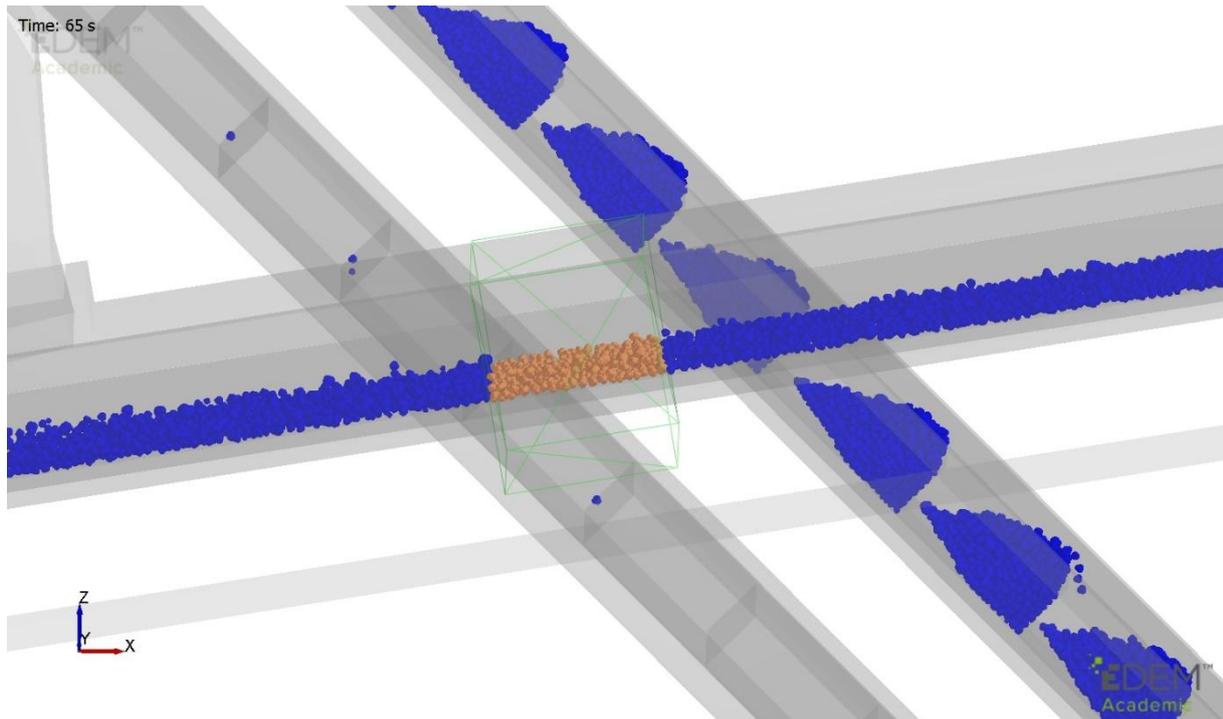


Figura IV.9: Extração de informações para o processamento dos tempos de residência. Equipamento em vista lateral com destaque para a correia de projeção. Sensor em formato de caixa (linhas verdes) que realiza a extração das informações das partículas. Velocidade de correia 2 m/s e largura do sensor 20 cm. Partículas contidas na região do sensor coloridas de laranja e demais partículas coloridas de azul

IV.3.4 Estudos de caso

Além do tipo de material granular utilizado, também são importantes a inclinação e velocidade da correia de retorno. Adicionalmente, o controle da vazão de alimentação também é um fator importante a ser explorado, e por isso o próximo plano de simulações, Tabela IV.6 foi executado visando compreender o efeito da vazão de alimentação no desempenho do equipamento em conjunto com as demais variáveis. Isso torna possível obter o valor da taxa ideal de alimentação em cada simulação executada neste plano, sendo a definição de taxa ideal aquela que garante um fluxo constante de material na correia de projeção, minimiza vazios e elimina a sobreposição da alimentação nova com o volume de material recirculante. Para isso, utilizou-se a distribuição de tempos de circulação (ou residência) no equipamento como métrica. Porém para efeito de simplificação da nomenclatura, neste trabalho este fator será tratado também como tempo de residência. Da distribuição de tempos de residência, optou-se por escolher o valor do primeiro percentil ou seja, τ_1 , que é o instante de tempo em que 99% das partículas possuam instante de tempo maior ou igual a τ_1 . Assim, calcula-se a vazão de alimentação ótima, W_o , a partir da razão entre a massa total de material alimentado e o tempo de circulação equivalente ao primeiro percentil segundo a equação IV.2.

$$W_o = \frac{M}{\tau_1} \quad \text{IV.2}$$

sendo M a massa total de partículas do material usada no ensaio, em kg e W_o é a vazão de alimentação ótima, em kg/s.

Para esse plano de simulações, foi instituído um caso base que consistiu da simulação usando as seguintes variáveis: pelota queimada (PQ), velocidade da correia de projeção igual a 2 m/s e inclinação da mesma de 10 graus. Todos os demais casos são variações do caso base, modificando uma das variáveis de processo.

Tabela IV.6: Plano de simulações visando obter vazões de alimentação ótimas. O caso 4 é o caso base, e os outros foram simulados variando uma de suas variáveis de operação

Caso	Material	Inclinação da correia de projeção(°)	Velocidade da correia de projeção (m/s)	Massa de material utilizada (kg)	Vazão de alimentação utilizada (kg/s)
4	Pelota Queimada	10	2,0	50,0	6,6
5	Pelota Verde	10	2,0	50,0	6,0
6	Pelota Queimada	10	3,0	50,0	6,6
7	Pelota Queimada	10	1,0	50,0	6,6
8	Pelota Queimada	15	2,0	50,0	6,6
9	Pelota Queimada	5	2,0	50,0	6,6

É importante frisar que as vazões de alimentação utilizadas nesse grupo de simulações não são os valores ótimos. Estes valores foram estipulados a partir da observação visual do fluxo de material no equipamento para as três simulações preliminares (Tabela IV.6) e são uma tentativa de obter valores próximos a taxa ótima. Por ser um equipamento cuja carga opera de maneira cíclica, a tendência é que se atinja um regime estacionário em pouco tempo após o término da alimentação de material no equipamento e, a partir disso, a expectativa inicial é de que a influência da vazão de alimentação no tempo de residência médio das partículas não seja significativa. Este resultado é mostrado na Seção V.4. Então se admite que a vazão de alimentação não influi de maneira significativa o tempo de residência, não modificando acentuadamente as curvas de distribuição de tempos de residência. Os valores encontrados para a vazão de alimentação ótima a partir de τ_1 em cada um dos casos, são representativos, específicos para a combinação das variáveis de operação de cada um dos casos.

A observação dos tempos de residência de toda a população de partículas é um processo complexo, e portanto é uma medida difícil de se obter em um experimento real. Por isso, é necessário que a vazão de alimentação possa ser calculada não em função do tempo de residência, mas em função das variáveis operacionais do equipamento, de fácil controle na realização de um ensaio:

$$W_{alimentação} = f(\text{velocidade, inclinação, material})$$

IV.3

As vazões ótimas obtidas pelas curvas de tempo de residência serviram como dados para que, por meio de um ajuste, um modelo da vazão de alimentação pudesse ser proposto. O desenvolvimento da Equação IV.3 e os resultados deste modelo são discutidos na Seção V.3, bem como as vazões de alimentação ótimas calculadas pelas curvas de tempo de residência. Todos os outros planos de simulações deste trabalho se utilizaram do modelo para calcular as vazões de alimentação de seus casos.

Com as vazões de alimentação ótimas obtidas, a próxima etapa consistiu em reproduzir novamente o plano de simulações da Tabela IV.6. Desta forma, são definidos novos casos numerados como 10,11,12,13 e 14 que são respectivamente equivalentes aos casos 4,5,6,7,8 e 9, com relação às variáveis de operação. A diferença é que para estes novos casos, são usadas as vazões de alimentação ótimas e a massa usada em cada caso é ajustada de forma que o volume de material inserido seja igual em todos os casos. Este volume foi definido como sendo o volume de partículas do caso base (caso 4). Como dito anteriormente, o software EDEM[®] utiliza como parâmetro de entrada a massa de material ou quantidade de partículas inserida na simulação e, para realizar o ajuste do valor de massa de forma que o volume seja o mesmo em cada caso, os valores obtidos nos ensaios de densidade aparente dos materiais foram utilizados para obter a massa a partir do volume usando a expressão IV.1.

A avaliação da adequação do modelo de vazão de alimentação para partículas de coque foi realizada em separado, no plano de simulações descrito na Tabela IV.7, o qual contém casos avaliando as mudanças na velocidade e inclinação da correia de projeção de maneira idêntica ao plano da tabela IV.6.

A escolha do volume como grandeza que controla a quantidade de material ao invés da massa se deu em razão de ser uma medida mais utilizada em testes de fluxo de material granular no laboratório e também da observação da própria natureza do equipamento nas simulações preliminares, que indicavam o volume de material como fator limitante da quantidade de material a ser carregada para um ensaio. Neste novo plano de simulações, com o equipamento operando à vazões otimizadas e mesmo volume de material usado em todos os casos, buscou-se implementar outras análises de performance do equipamento. Medições do fluxo mássico na correia de projeção foram efetuadas, como um meio de verificação da estabilidade do equipamento e estimativa do demandado para que o equipamento atinja o estado estacionário de condução de partículas. Verificou-se também como se dá a distribuição mássica ao longo da largura da correia de projeção para cada caso. O Capítulo V apresenta estes resultados para cada um dos planos de simulações efetuados neste trabalho.

Tabela IV.7: Plano de simulações para o coque, sob diferentes velocidades e inclinações da correia de projeção

Caso	Material	Inclinação da correia de projeção (°)	Velocidade da correia de projeção (m/s)
16	Coque	10	2
17	Coque	10	3
18	Coque	10	1
19	Coque	15	2
20	Coque	5	2

Simulações adicionais foram realizadas visando explorar a capacidade do equipamento em operar a diferentes cargas volumétricas. Procurou-se estabelecer com as simulações qual o maior volume de material que poderia ser carregado no equipamento sem que sua operação fosse comprometida. Tendo em vista que o coque, em virtude de sua maior granulometria, tenderia a ser o material granular mais limitante deste trabalho, realizou-se uma simulação com este material com o intuito de se observar qual seria o volume limitante de material suportado pelo equipamento.

O volume máximo de coque foi adotado como a capacidade máxima suportada pelo equipamento e, baseado neste valor, um novo grupo de simulações foi implementado, como mostra a tabela IV.8. Nessas simulações foram usadas para as variáveis operacionais inclinação e velocidade da correia de projeção, os valores do caso base. Também é realizada a quantificação do material que é carregado no espaço entre taliscas.

Tabela IV.8: Plano de simulações para avaliação da capacidade volumétrica do equipamento

Caso	Material	Percentual da carga máxima (%)
21	Pelota Verde	100
22	Pelota Queimada	100
23	Pelota Queimada	95
24	Pelota Queimada	75

Como última análise, foi realizada a avaliação da influência da instalação de uma caixa de pedra no silo de análise, no fluxo de material projetado pela correia de projeção. O objetivo é entender como a caixa de pedra influencia nas análises realizadas nos planos anteriores (estabilidade, distribuição mássica e tempo de residência) e também na vazão de alimentação, modificando a expressão para seu modelo matemático. A Tabela IV.9 mostra o plano de simulações realizado.

Tabela IV.9: Plano de simulações para testes de fluxo granular com caixa de pedra

Caso	Material	Volume de caixa de pedra (L)	Percentil da carga Máxima (%)
25	PQ	15,62	100
26	PQ	21,87	100
27	PV	21,87	100

V. Resultados e Discussão

V.1 Determinação da densidade aparente

Os resultados das simulações do preenchimento de um recipiente cúbico para determinação da densidade dos ensaios encontram-se na Tabela V.1. Nela são listados para cada material o volume do recipiente preenchido, a massa das partículas no interior do volume e a densidade aparente calculada pela expressão IV.1. A densidade aparente é comparada com a densidade real, de modo que se faça o cálculo da porcentagem de vazios de cada material. Imagens das simulações são apresentadas na Figura V.1, onde é possível observar o preenchimento quase total do recipiente cúbico como o excesso de partículas sendo alimentadas, conforme apresentado na Seção IV.3.1. Os valores de densidade aparente obtidos serão usados diretamente na expressão do modelo matemático para previsão da vazão de alimentação ideal do equipamento, como será visto na Seção V.2.

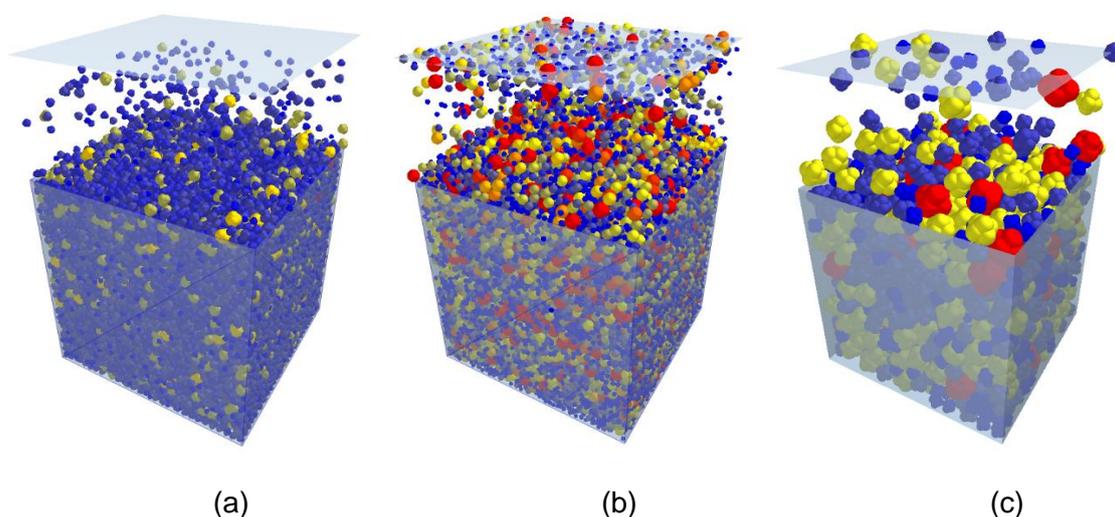


Figura V.1: Simulação DEM de densidade aparente para os materiais de teste do protótipo. Partículas coloridas pelo seu tamanho, caixa transparente com vista em perspectiva. (a) Pelota queimada (b) Pelota Verde (c) Coque

Tabela V.1 Resultados das simulações DEM de densidade aparente

Material	Volume do recipiente (m ³)	Massa de material (kg)	Densidade aparente (kg/m ³)	Densidade real (kg/m ³)	% de vazios
Pelota Queimada	0,027	59,80	2214,8	3350	42,83
Pelota Verde	0,027	45,98	1703,0	3150	33,89
Coque	0,125	84,32	674,6	1180	45,94

V.2 Avaliações preliminares do protótipo

As simulações preliminares com a versão consolidada do protótipo, Tabela IV.6, tiveram como objetivo principal observar o comportamento em operação exibido pelos três materiais escolhidos para carga, a fim de utilizar seus resultados para guiar a condução dos posteriores planos de simulações. A Figura V.2 mostra o carregamento da correia de projeção com a alimentação nova, do caso 1 para pelota queimada. Em todos os demais estudos de caso deste trabalho, a alimentação foi introduzida nessa região do silo de análise.

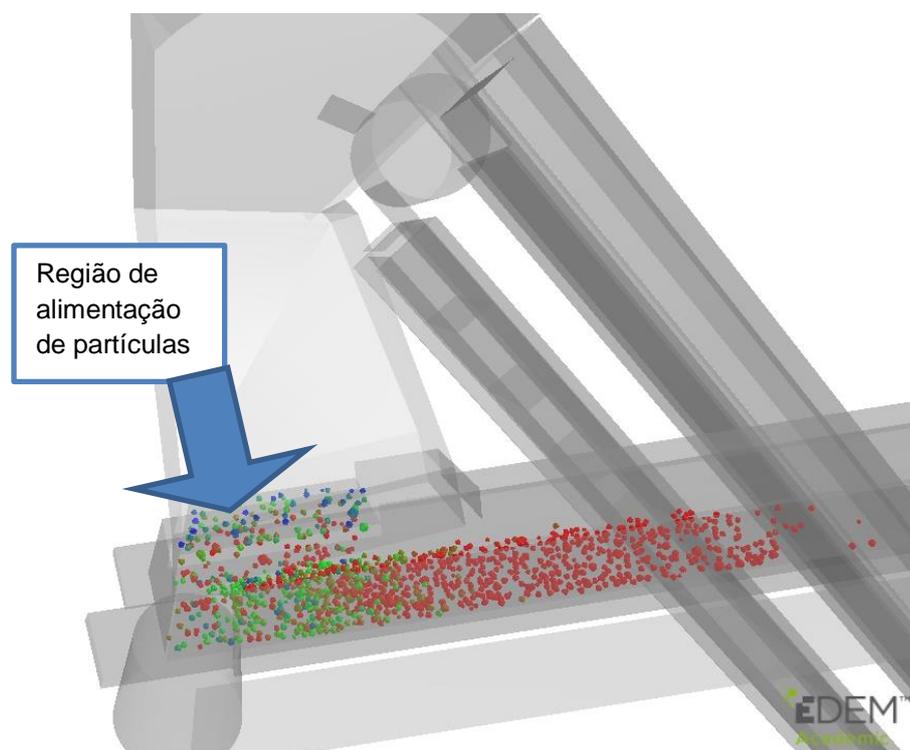


Figura V.2: Alimentação do equipamento, na região do silo de análise. Partículas coloridas de acordo com sua velocidade.

A observação dos resultados permite obter algumas conclusões: O sistema transporta partículas de pelotas queimadas e pelotas verdes de maneira satisfatória, formando leitos em monocamada na correia de projeção em condições de serem projetados e acompanhados na região do silo de análise. A vazão de alimentação utilizada de 2 kg/s para ambos os materiais (casos 1 e 2) se mostrou lenta, pois o material que circula por todo o equipamento e retorna para o silo de alimentação (carga recirculante) entra em contato com o material que ainda está sendo alimentado, como mostrado na Figura V.3, acarretando na sobrecarga da correia transportadora.

A simulação com partículas de coque (Caso 3), apresentou problemas, pois não se formou um leito de partículas estável na correia de projeção. Além disso, pouco depois de 40

segundos de simulação transcorridos, houve acúmulo de partículas no silo de análise e o fluxo de material pelo equipamento foi interrompido, como mostrado na Figura V.4. A Figura V.5 mostra a análise de estabilidade do equipamento, da qual se pode confirmar as conclusões obtidas da análises visuais. A dinâmica do sistema simulado atingiu a estabilização rapidamente para a PQ e PV, após cerca de 30 segundos, com a presença de pulsos no fluxo mássico da correia de projeção antes de atingir a estabilidade. Os pulsos são o reflexo da sobreposição da alimentação com o material recirculante do equipamento, o que foi confirmado na observação visual das simulações. A Figura V.5 mostra que o fluxo mássico de coque não atinge um regime estacionário e o entupimento do silo de análise é representado pela queda brusca do fluxo após pouco mais de 45 segundos de operação, até atingir o zero em 60 segundos.

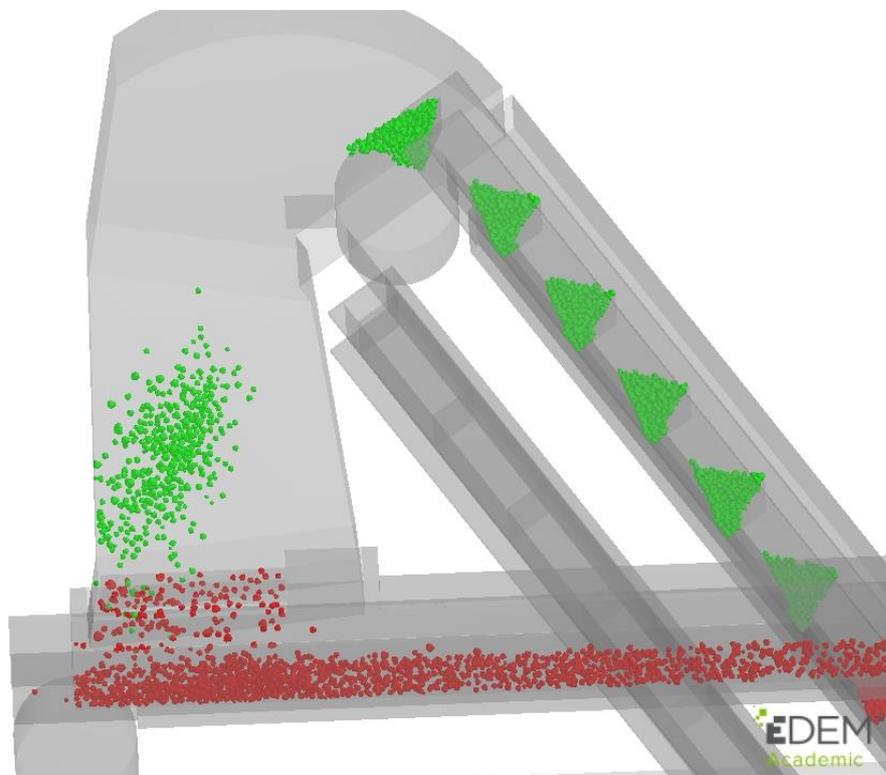
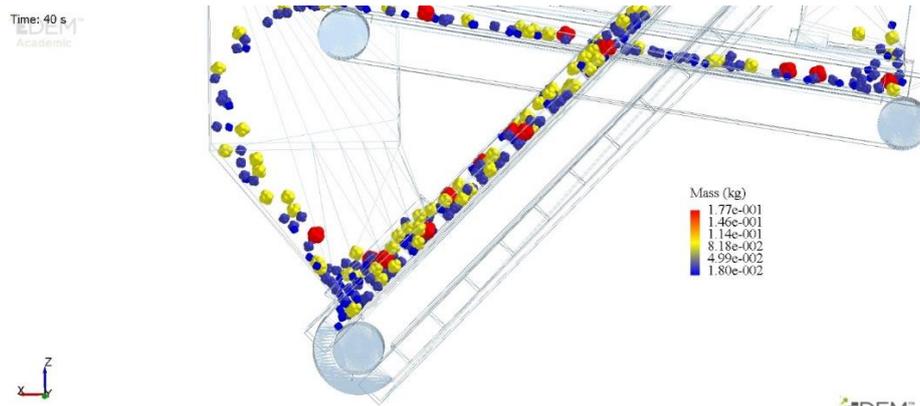
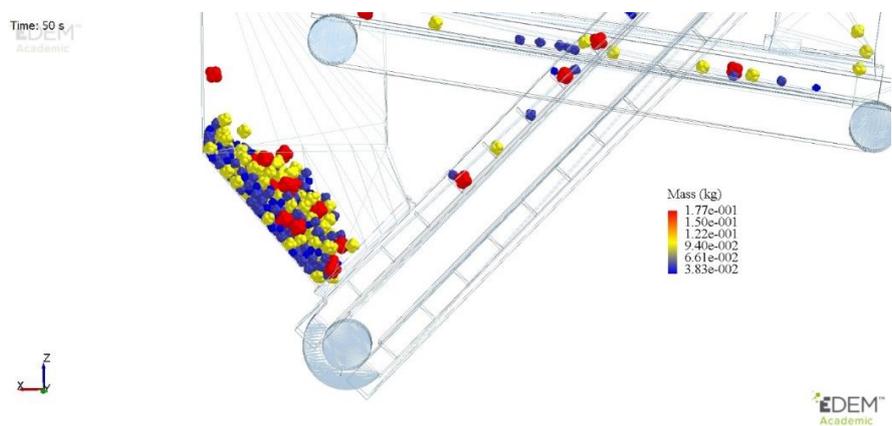


Figura V.3: Sobreposição da alimentação nova do equipamento, partículas coloridas em vermelho, com a carga recirculante carregada pela correia de retorno, partículas coloridas em verde (DEM Solutions, 2018)



(a)



(b)

Figura V.4: Simulação do caso 3, que mostra (a) Início do processo de acúmulo, com sobrecarga nas taliscas e (b) acúmulo de partículas no silo de análise. Visualização em malha, com vista frontal dos componentes do equipamento voltada para a correia de retorno. Partículas de coque coloridas conforme sua massa, com escala presente na figura.

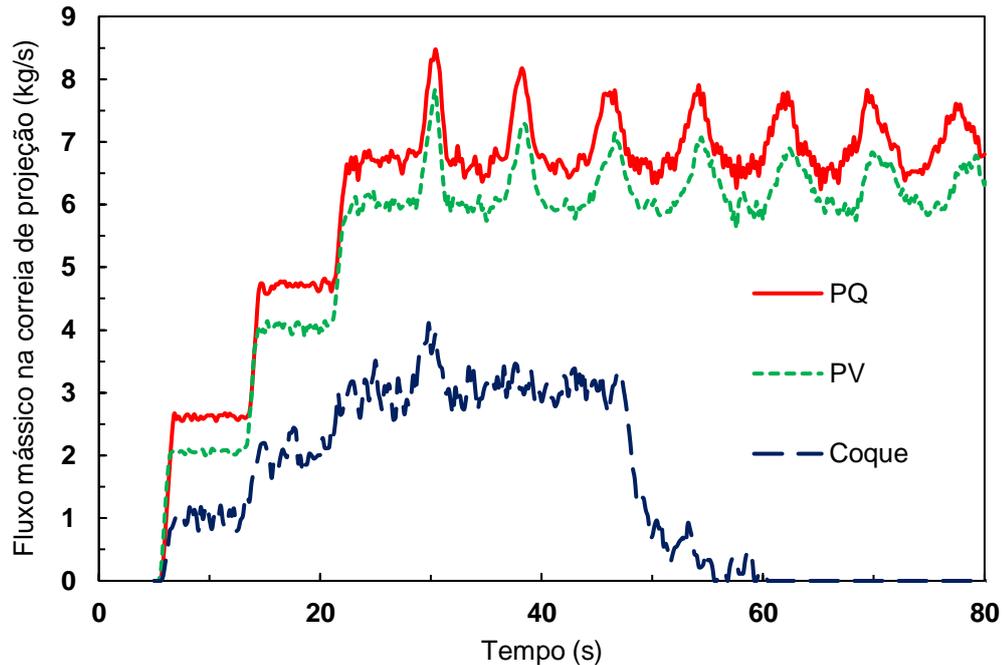


Figura V.5: Resultados da análise de estabilidade para o plano de simulações preliminar: Fluxos mássicos dos materiais (kg/s) na correia de projeção em função do tempo de simulação

A sobreposição de partículas indicou a necessidade da correção da vazão de alimentação do material em função das condições operacionais utilizadas. Além disso, a dificuldade na simulação com o coque levanta a questão primordial relacionada ao tamanho máximo de partícula que pode ser usado como ensaio sem ultrapassar os limites dimensionais do equipamento, além de procurar entender como o volume de material utilizado afeta a operação do equipamento.

Com relação à distribuição mássica na correia de projeção, foi possível identificar diferentes repostas do equipamento em função do material granular como ilustrado de forma comparativa na Figura V.6, onde tem-se a vista superior da correia de projeção, evidenciando as partículas carregadas nos Casos 1, 2 e 3 simulados, com respectivamente, pelotas queimadas, pelotas verdes e coque. Nos três casos, as partículas possuem o mesmo padrão de coloração, segundo seu tamanho (partículas menores em azul, intermediárias em amarelo e maiores em vermelho).

Os resultados mostram que as partículas de PV e PQ, que ocupando toda a largura da correia enquanto que esse perfil não é atingido pelo coque. Observa-se segregação mássica na simulação usando PV, com as partículas de maior massa se concentrando na borda externa da correia de projeção. Isto levou a modificações no projeto do silo de alimentação, visando melhorias no mecanismo de deposição das partículas na correia de projeção com a possível adição de defletores. A Figura V.7 quantifica as frações mássicas ao longo da correia tomando como origem o centro da mesma e os resultados estão coerentes com o que foi apresentado na Figura IV.9, com a distribuição mais uniforme no caso usando Pelota queimada, a segregação mássica do caso usando pelota verde e a instabilidade do caso da simulação usando coque.

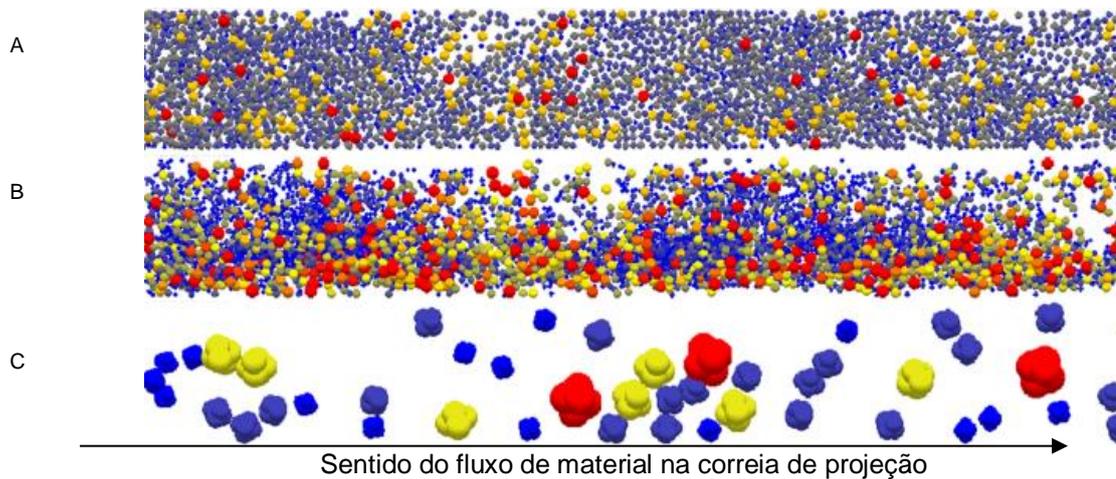


Figura V.6: Vista superior das partículas transportadas na correia de projeção: (A) PQ; (B) PV; e (C) Coque

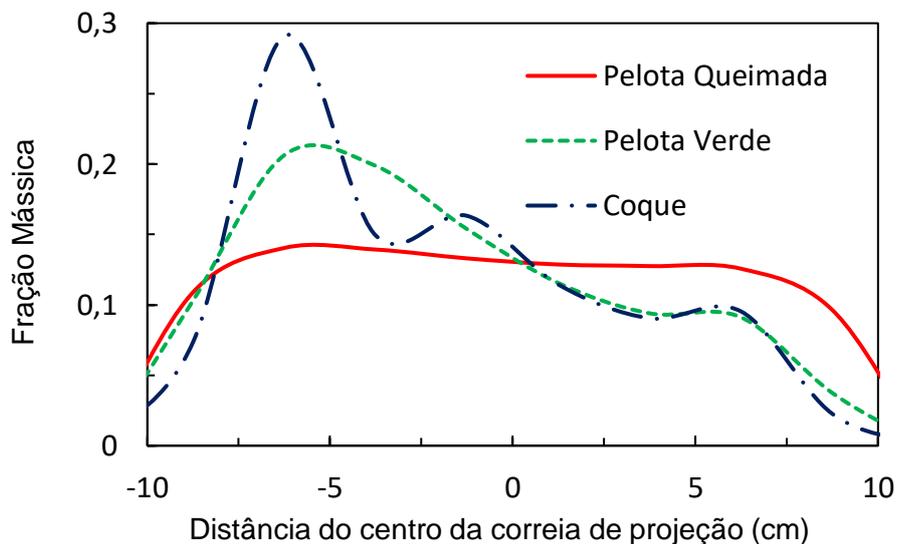


Figura V.7: Distribuição mássica média transversal na correia de projeção.

V.3 Modelo matemático para obtenção da vazão de alimentação ótima

Uma conclusão importante das avaliações preliminares é a necessidade de se controlar a vazão de alimentação do equipamento, de forma a garantir um fluxo de material estável. Os casos anteriores (1, 2 e 3) mostraram sobreposição da alimentação e carga circulante, uma vez que a vazão de alimentação era baixa demais. O caso oposto pode também ocorrer, com vazões muito altas que alimentem o equipamento rápido demais e causem vazios na correia de projeção. Por conseguinte, deve-se buscar a vazão de alimentação ótima, de modo a garantir que a massa de material carregado pela correia de projeção não sofra grandes alterações, garantindo um fluxo contínuo e resultados acurados nas avaliações as quais o equipamento se propõe. Como mencionado na Seção IV.3.3, o critério usado para calcular a

taxa ótima de alimentação foi a avaliação da distribuição de tempo de residência, retirando-se de cada curva o seu valor de τ_1 correspondente.

O plano de simulações da Tabela IV.7 foi então executado, como forma de avaliar o comportamento das distribuições de tempo de circulação (ou residência) sob as diferentes condições operacionais, cujos resultados são apresentados nas Figuras V.8, V.9 e V.10. A Figura V.8 mostra a influência da velocidade da correia de projeção nas curvas de distribuição. Observa-se um deslocamento da curva para esquerda conforme a velocidade aumenta, o que é coerente uma vez que se espera que as partículas percorram um equipamento mais rápido quando carregadas e projetadas com uma velocidade maior pela correia.

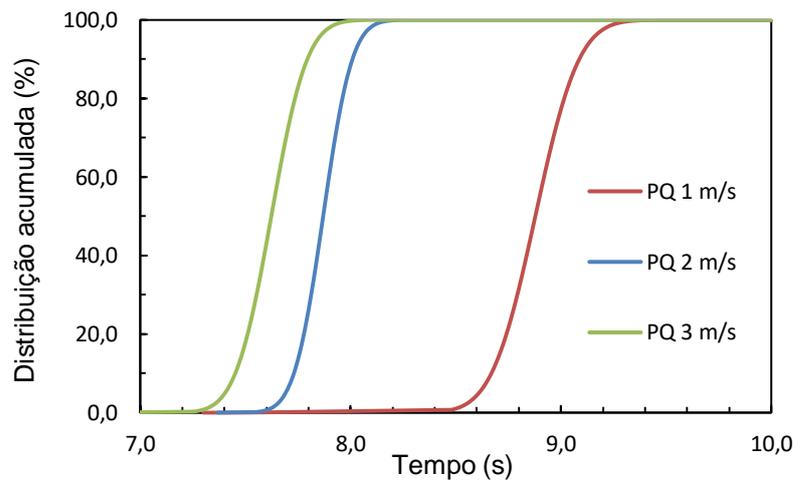


Figura V.8: Distribuições de tempo de residência para diferentes velocidades da correia de projeção. Correspondência com o plano de simulações: PQ 1 m/s (caso 7); PQ 2 m/s (caso 4); PQ 3 m/s graus (caso 6)

A Figura V.9 mostra a influência da inclinação da correia de projeção nas curvas de distribuição de tempos de circulação, mostrando que a curva se desloca para a direita conforme a inclinação aumenta, ou seja, o tempo médio de residência das partículas aumenta.

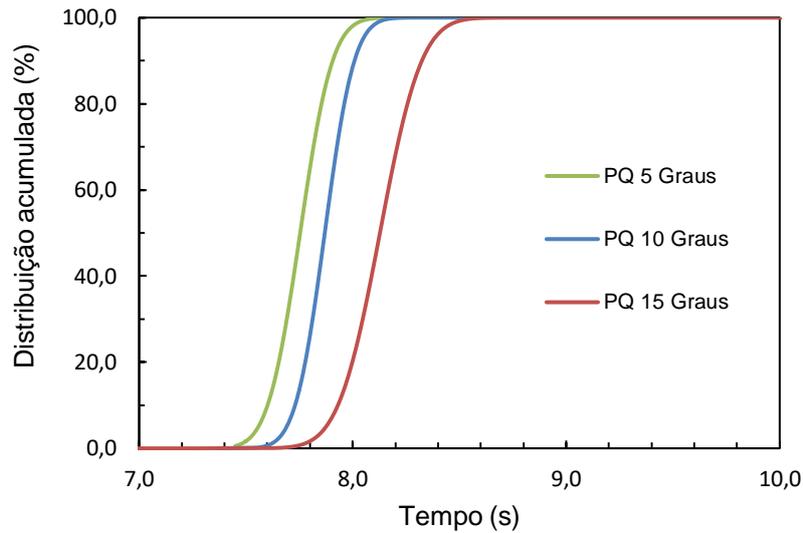


Figura V.9: Distribuições de tempo de residência para diferentes inclinações da correia de projeção. Correspondência com o plano de simulações: PQ 5 graus (caso 9); PQ 10 graus (caso 4); PQ 15 graus (caso 8)

A Figura V.10 compara as distribuições para dois tipos de materiais, pelotas queimadas e pelotas verdes (Casos 4 e 5). Observa-se um pequeno efeito do tipo de material, neste caso evidenciado pela presença do modelo de contato coesivo no caso das simulações com pelotas verdes.

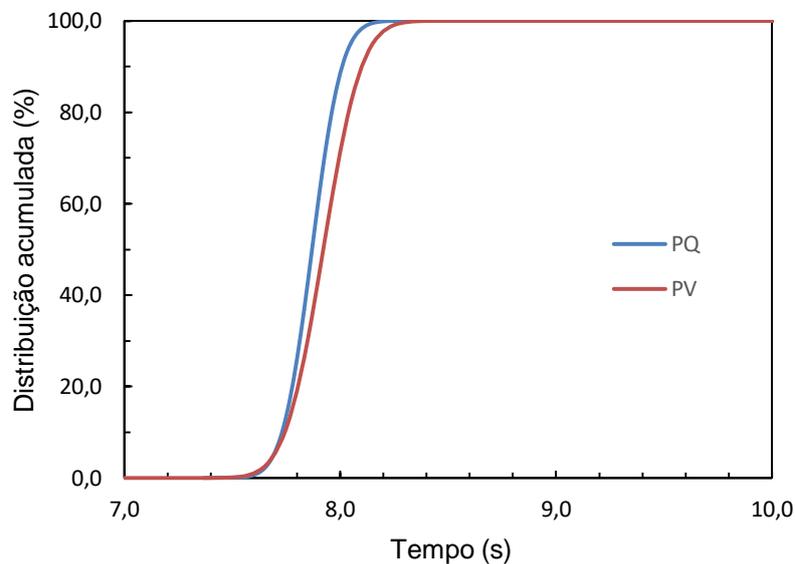


Figura V.10: Comparação das distribuições de tempo de residência para PQ e PV. Correspondência com o plano de simulações: PQ (caso 4); PV 10 graus (caso 5); PQ 15 graus (caso 8)

Posteriormente, com o ajuste dos volumes (Seção V.4), um plano de simulações foi executado para simulações com coque, de modo a validar o modelo de vazão de alimentação para este material.

Os valores τ_1 de cada caso foram então obtidos a partir das distribuições mostradas nas Figuras V.8, V.9 e V.10. Como mostrado na Tabela IV.7, todos os casos deste plano de simulações utilizaram a mesma massa total igual a 50 kg de material carregado no equipamento. A Tabela V.2 mostra os valores de τ_1 encontrados para cada um dos casos, juntamente com as respectivas vazões de alimentação ótimas obtidas da Equação IV.2.

Tabela V.2: vazões de alimentação ótimas, obtidas a partir das distribuições de tempo de residência dos casos simulados

Caso	τ_1	Vazão de alimentação (kg/s)
10	7,61	6,57
11	8,49	5,89
12	7,31	6,84
13	7,78	6,43
14	7,48	6,68
15	7,59	6,59

De posse dos valores de taxa calculados, há condições para a criação de um modelo empírico, que forneça vazões de alimentação em função das variáveis de projeto como descrito na equação IV.3. Partindo da equação IV.2, pode-se representar a massa de material usada em uma simulação como o produto do volume aparente das partículas pela sua densidade aparente, (Equação IV.1.) Dessa forma, a expressão da vazão de alimentação Mássica ideal é

$$W_o = \frac{\rho_{ap} * V_{mat}}{\tau_1} \quad V.1$$

A expressão da vazão de alimentação como função do volume traz vantagens, uma vez que geralmente o volume aparente é uma medida mais utilizada em ensaios com manuseio de materiais granulares. A densidade aparente pode ser medida facilmente, realizando em laboratório para as partículas do material, com procedimento semelhante ao simulado na Seção IV.3.1.

Como visto nas Figuras V.8 e V.9, as distribuições de tempo de residência e logicamente o valor de τ_1 dependem principalmente da inclinação θ e velocidade v da correia de projeção. Assim, assume-se que o valor de τ_1 seja função destas variáveis. O tipo de material granular também influencia ligeiramente o valor de τ_1 (Figura V.10) de tal forma que sua contribuição para a vazão de alimentação já está contabilizada no numerador da Equação V.1.

Para estimar a expressão de τ_1 , analisou-se a influência individual dessas variáveis nas vazões de alimentação ótimas calculadas. Da Figura V.11, o resultado sugere uma dependência quadrática proporcional na vazão de alimentação em relação da vazão de alimentação em relação à velocidade da correia de projeção, enquanto que para a inclinação, Figura V.12, sua influência apresenta um aspecto linear e inversamente proporcional em relação à vazão de alimentação. τ_1 então é representado como a soma da influência das duas variáveis, e a expressão para a vazão de alimentação ótima torna-se:

$$T_o = \frac{\rho_{ap} * V_{material}}{A * v^2 + B * v + C * \theta + D}$$

V.2

Pode-se então buscar os valores dos coeficientes A, B, C e D que melhor ajustem a equação, V.2, usando como dados para o ajuste as vazões ideais calculadas e os dados do plano de simulações da Tabela IV.7.

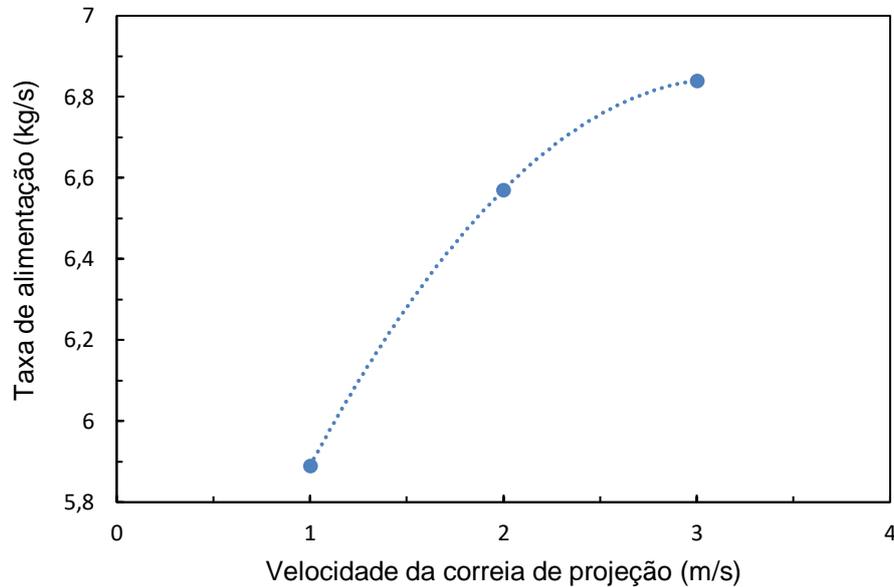


Figura V.11: Influência da velocidade da correia de projeção na vazão de alimentação

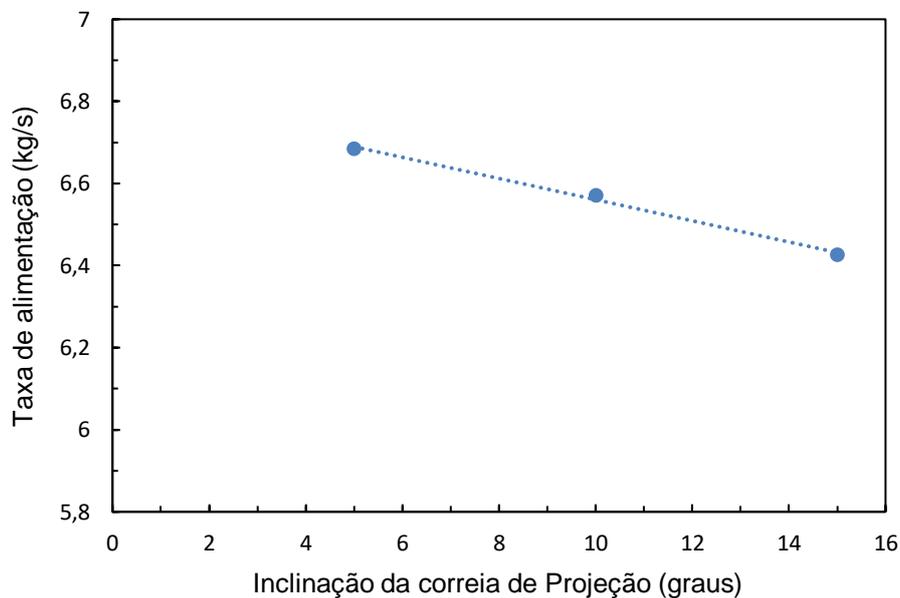


Figura V.12: Influência da inclinação da correia de projeção na vazão de alimentação

Após o ajuste dos parâmetros por minimização usando o algoritmo de busca direta, são obtidos os coeficientes A, B, C, D, cujos valores estão na Tabela V.3. O modelo ajustou-se bem aos dados, como se pode verificar no gráfico da Figura V.13 que relaciona os valores

de vazões calculado pela equação V.2, com os valores obtidos através das distribuições de tempo de residência. No ajuste realizado, o erro foi da ordem de 10^{-4} . Todos os demais planos de simulações deste trabalho, cujos resultados se encontram nas Seções seguintes desse capítulo, se basearam no modelo para calcular a vazão de alimentação ótima de cada caso.

Tabela V.3: Parâmetros do modelo de vazão de alimentação

Coeficientes	Valores ajustados
A	0,285
B	-1,730
C	0,029
D	9,637

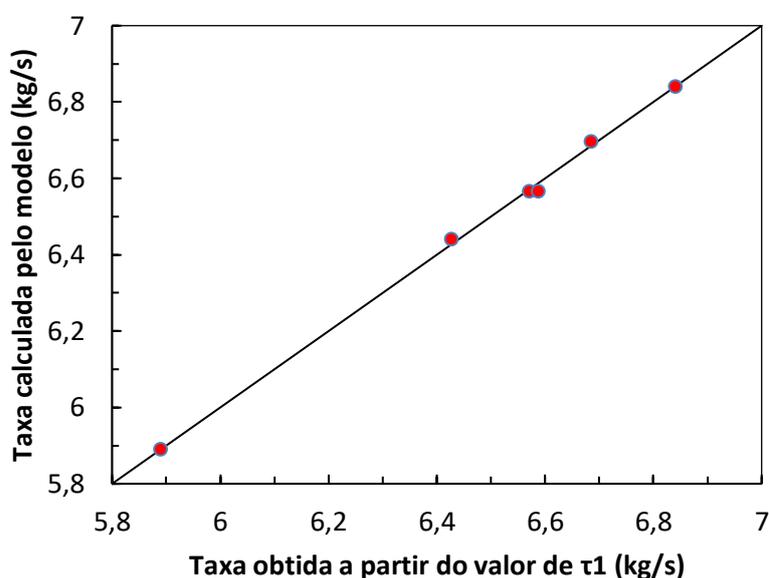


Figura V.13: Comparação entre os valores de taxa calculados pelo modelo e pelo τ_1 , medido das simulações (Casos 10 a 15). Quanto os pontos se encontram próximos da bissetriz traçada no gráfico, melhor a acurácia do modelo proposto.

V.4 Estudos de caso: Estabilidade, Distribuição Mássica e Tempo de Residência

Como detalhado na Seção IV.3.3, a obtenção do modelo de vazão de alimentação permite avaliar a performance do equipamento em condições de operação mais próximas do que se espera um ensaio real. As condições para o plano de simulações anterior (Tabela IV.7) são repetidas, porém desta vez utilizando as vazões ideais de alimentação calculadas na seção anterior. A Tabela V.4 lista as condições operacionais do novo plano de simulações. Deste, o caso 10 é definido como o novo caso base (equivalente ao caso 4 da Tabela IV.7).

Além da mudança nas vazões de alimentação, nesse plano de simulações as massas totais adicionadas ao equipamento foram ajustadas para que o mesmo volume de material fosse usado em todos os casos, ou seja, $22,6 \text{ m}^3$, valor este igual ao volume do caso base.

Tabela V.4: Plano de simulações, incluindo as vazões de alimentação ótimas

Caso	Material	Velocidade de correia de projeção (m/s)	Inclinação da correia de projeção (°)	Vazão de alimentação (kg/s)	Volume de material (l)	Densidade aparente (kg/m ³)	Massa de material (kg)
10	Pelota queimada	2	10	6,57	22,6	2214,81	50,00
11	Pelota Verde	2	10	5,89	22,6	1702,96	38,44
12	Pelota Queimada	1	10	6,84	22,6	2214,81	50,00
13	Pelota Queimada	3	10	6,43	22,6	2214,81	50,00
14	Pelota Queimada	2	15	6,68	22,6	2214,81	50,00
15	Pelota Queimada	2	5	6,59	22,6	2214,81	50,00

O plano de simulações de coque realizado posteriormente teve dentre outros objetivos o de validar a aplicabilidade do modelo da taxa alimentação, onde espera-se que este funcione para um material com características bem diferentes das pelotas queimada e verde. A Tabela V.5 lista os dados de simulação para os casos com o coque, com a vazão de alimentação calculada usando a equação V.2.

Tabela V.5: Plano de simulações com coque, incluindo as vazões ótimas de alimentação calculadas pelo modelo matemático proposto

Caso	Material	Velocidade da correia de projeção (m/s)	Inclinação da correia de projeção (°)	Vazão de alimentação (kg/s)	Volume de material (l)	Densidade aparente (kg/m ³)	Massa de material (kg)
16	Coque	2	10	2,00	22,6	674,56	15,23
17	Coque	3	10	2,08	22,6	674,56	15,23
18	Coque	1	10	1,79	22,6	674,56	15,23
19	Coque	2	15	1,96	22,6	674,56	15,23
20	Coque	2	5	2,04	22,6	674,56	15,23

A análise visual dos resultados dos casos simulados na Tabela V.3, permitiu realizar algumas análises qualitativas da performance do equipamento. A Figura V.14 mostra a operação simulada para o caso 10, com o sistema já tendo atingido o estado estacionário. Esta mostra a distribuição das partículas no interior do equipamento, e representa alguns comportamentos observados em todos os estudos de caso.

As partículas estão coloridas pela magnitude de sua velocidade, cujos valores máximos encontrados foram da ordem de 3 m/s, com a escala na mostrada na figura nos pontos de transferência dos silos para as correias. Quando as partículas chegam à correia de projeção pelo silo de alimentação, percebe-se uma pequena região de acúmulo de material, rapidamente carregado pela correia.

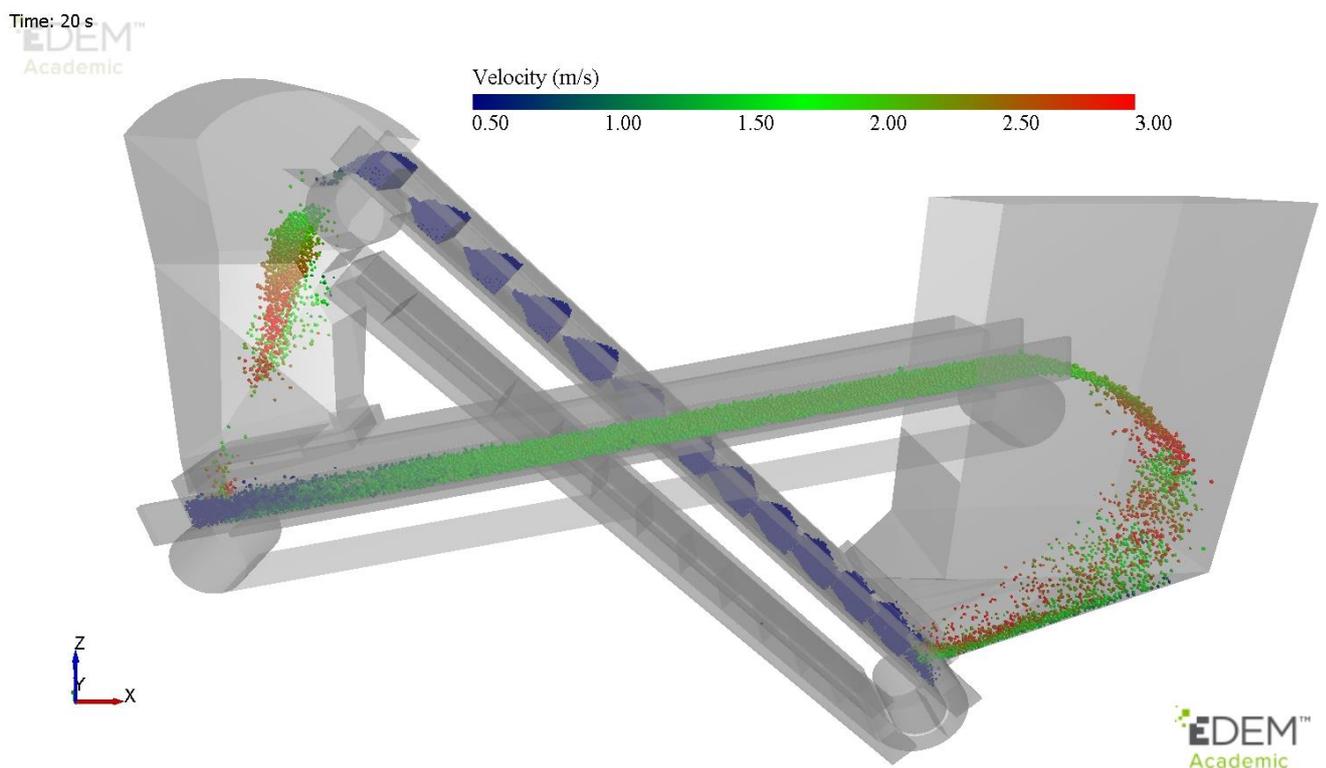


Figura V.14: Simulação da operação do equipamento, com o sistema em estado estacionário. Partículas coloridas conforme sua velocidade, com escala na figura

A análise dos fluxos mássicos na correia de projeção foi realizada para cada estudo de caso, como meio de avaliar a estabilidade do equipamento e a validade de metodologia proposta para o cálculo da vazão de alimentação ótima. A Figura V.15 mostra a evolução dos fluxos mássicos nos casos de pelotas queimadas envolvendo três diferentes velocidades de correia.

As curvas partem do valor nulo. Quando não há material ainda na correia e crescem conforme se dá a alimentação de material no sistema, até atingir a estabilidade em cerca de 10 segundos decorridos desde o início da alimentação. Percebe-se, em comparação com a os resultados das simulações preliminares, Figura V.5, que agora não há flutuações na Figura V.8. Isto evidencia que as vazões de alimentação utilizadas nestas novas simulações se mostram ideais para garantir que a correia de projeção opere com fluxo estável e constante

de material. Observa-se também em todos os casos que o fluxo mássico, após atingir o estado estacionário, oscila em torno de um fluxo médio ao longo do tempo. A Figura V.16 mostra o fluxo médio calculado para cada uma das três velocidades, bem como seu desvio padrão. A Figura V.17 mostra os fluxos mássicos de casos envolvendo pelotas queimadas sob diferentes inclinações da correia de projeção. Percebe-se que o padrão das curvas de fluxo mássico é o mesmo descrito na Figura V.15, com ausência de pulsos e comportamento estável.

Como última análise, compara-se a diferença dos fluxos mássicos dos três materiais, sob as mesmas condições operacionais (volume de material carregado, velocidade inclinação da correia de projeção). A Figura V.18 mostra os fluxos mássicos para os casos 10, 11 e 16, respectivamente pelota queimada, pelota verde e coque. Observa-se o fluxo mássico para o coque, embora contenha oscilações de magnitudes maiores do que para os casos com pelotas queimadas e pelotas verdes, assume o mesmo padrão que os outros, diferente do que foi mostrado nas simulações preliminares (Figura V.5), o que evidencia que o modelo para estimação da vazão de alimentação se mostrou também adequado para simulações com um material com características diferentes daquelas usadas na calibração, como o coque.

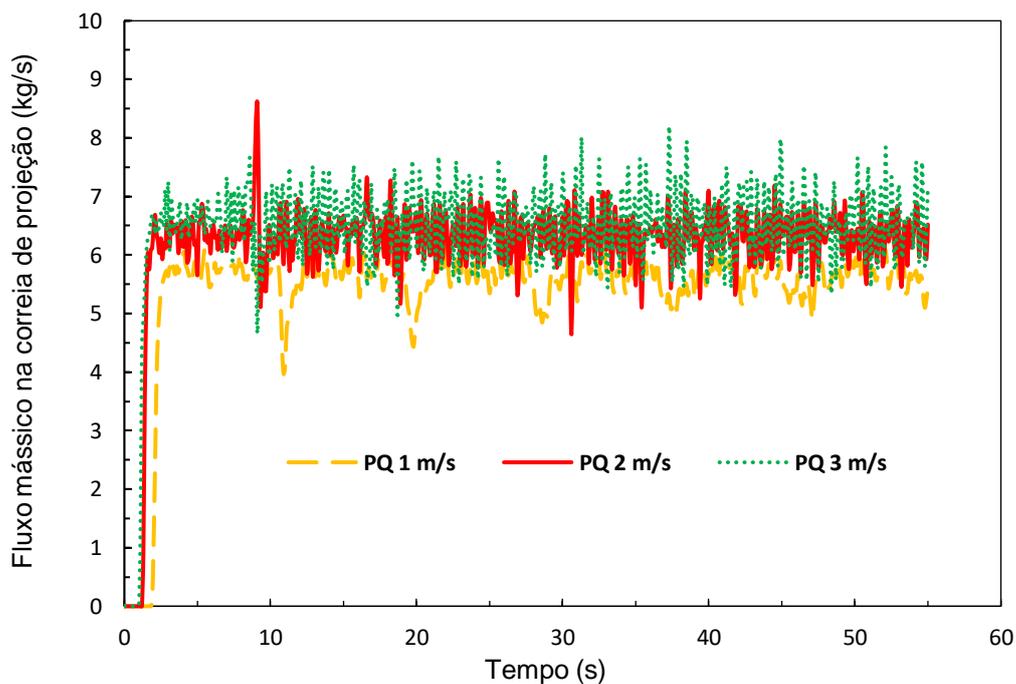


Figura V.15: Análise de estabilidade: Fluxos mássicos na correia de projeção, para diferentes velocidades de correia de projeção.

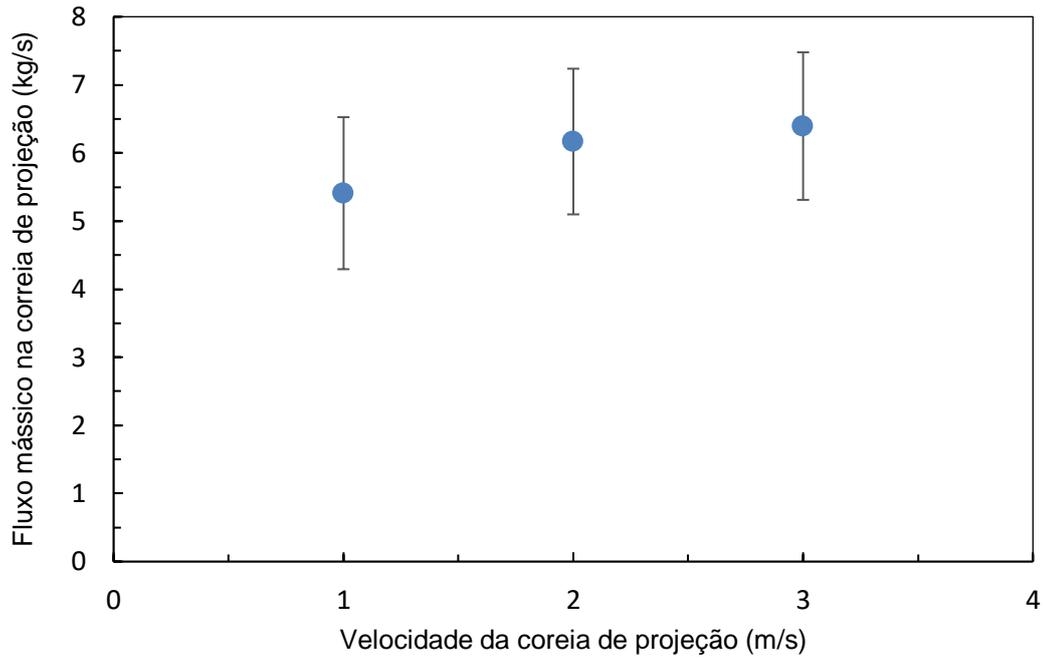


Figura V.16: Fluxos mássicos médios na correia de projeção, para diferentes velocidades de correia

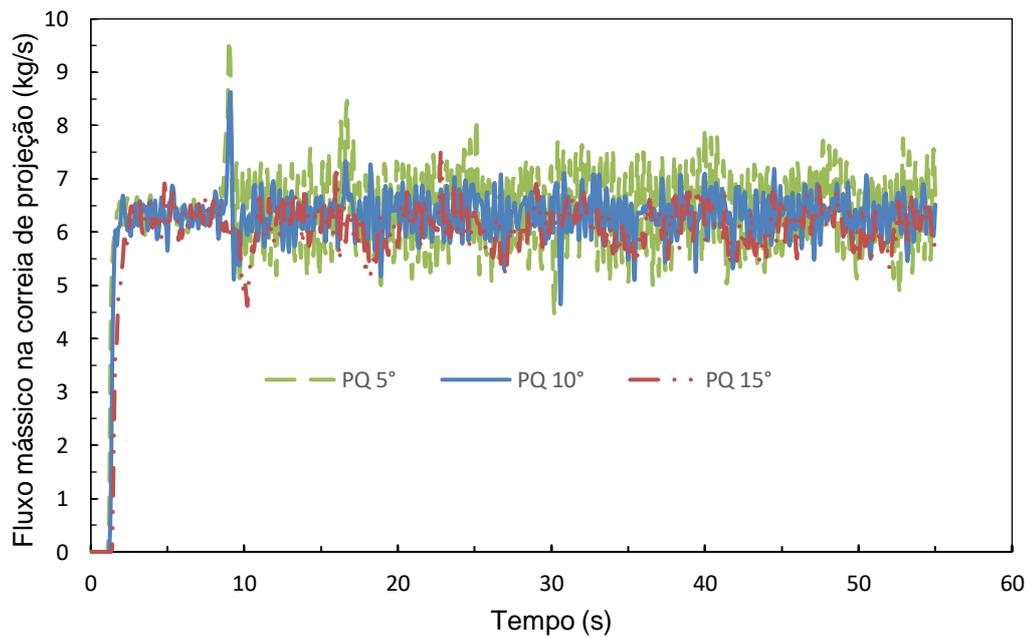


Figura V.17: Medidas de estabilidade: Fluxos mássicos na correia de projeção, para diferentes inclinações de correia

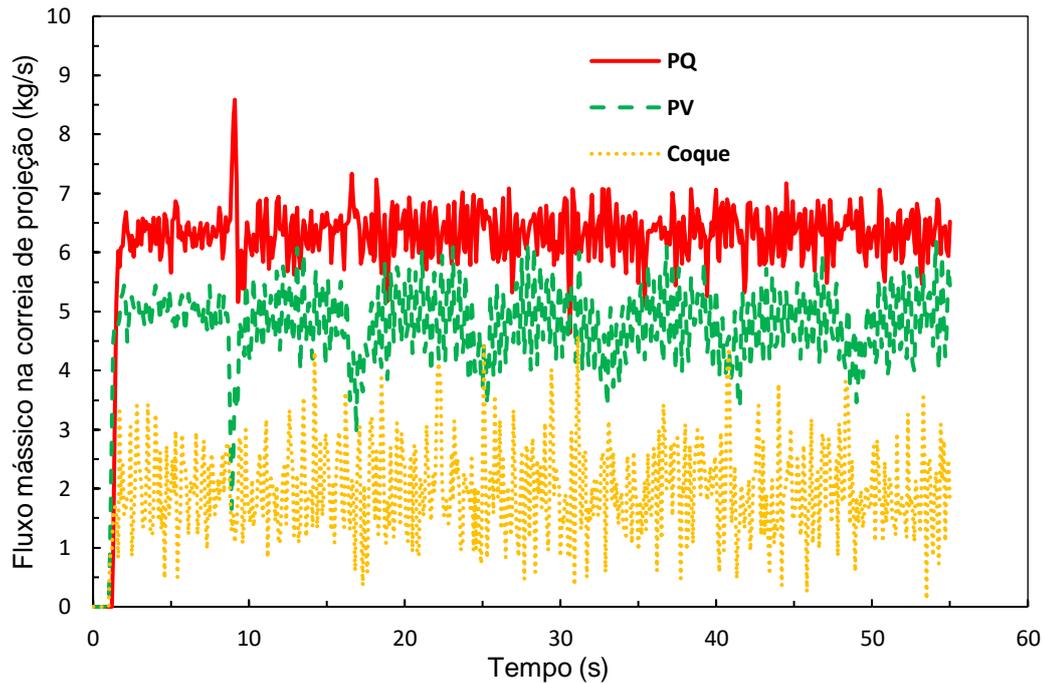


Figura V.18: Fluxos mássicos na correia de projeção para pelotas queimadas, pelotas verdes e coque. Mesmo volume de material carregado no equipamento, para cada caso.

Uma vez que a análise da estabilidade do fluxo no interior do equipamento corrobora com a validação do modelo para determinação da vazão de alimentação, é possível verificar também efeitos relacionados à dispersão e segregação de material na correia de projeção.

Analisando visualmente a distribuição mássica nos casos envolvendo pelotas queimadas não se notam diferenças significativas. Entretanto ao quantificar a massa das partículas ao longo da largura da correia, há evidências de segregação quando a operação é realizada com inclinação de 5° (Figura V.19). Indicada pela maior presença de material próximo à borda à direita do centro da correia. Esse resultado indica que as pelotas provavelmente ficam mais suscetíveis ao rolamento em sentido oposto ao da descarga do silo de alimentação, e este efeito se agrava quando a correia opera com inclinações próximas de 0° .

Na Figura V.20 compara-se as distribuições mássicas sob diferentes velocidades de correia de projeção, onde é possível identificar pequena segregação ocorrida na simulação operando com a maior velocidade (3 m/s), situada na região cerca de 8 cm distante do centro da correia.

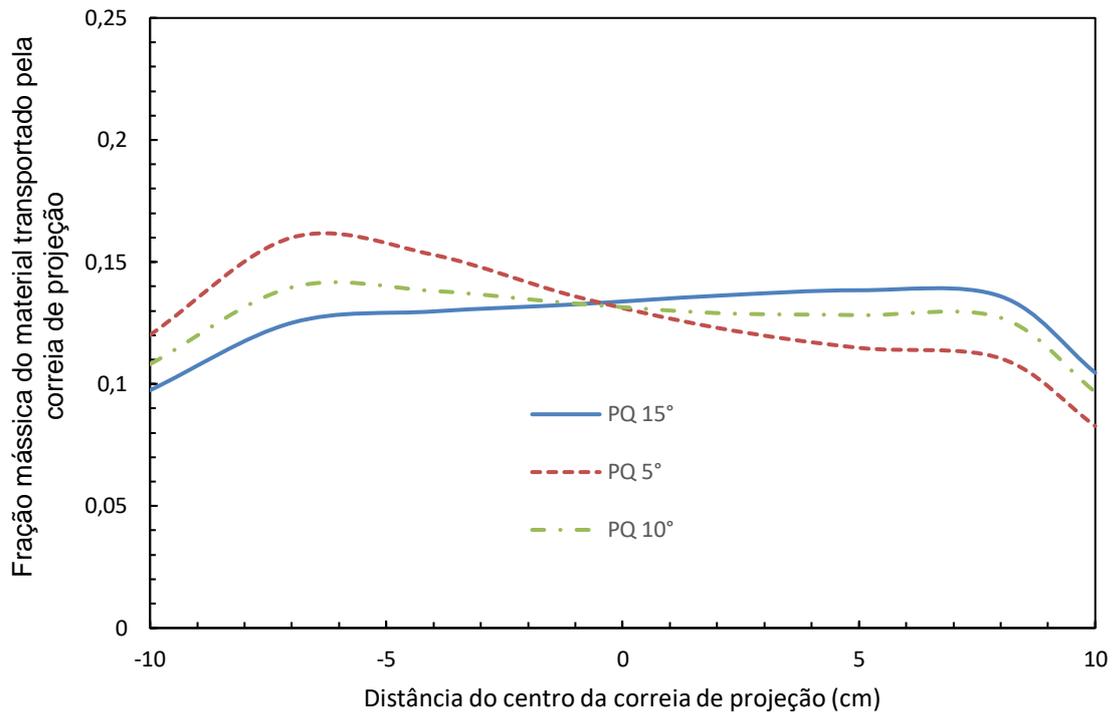


Figura V.19: : Distribuições mássicas na correia de projeção usando pelotas queimadas, sob diferentes inclinações de correia de projeção

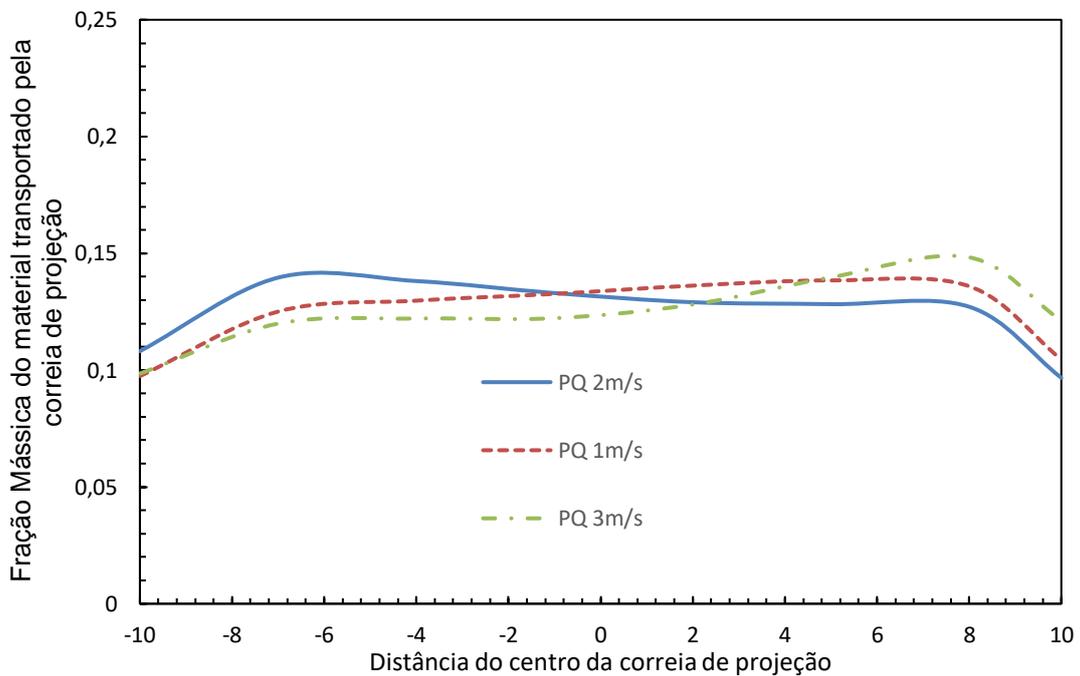


Figura V.20: Distribuições mássicas na correia de projeção usando pelotas queimadas, sob diferentes inclinações de correia de projeção

O efeito mais acentuado de segregação foi observado para o caso das pelotas verdes, mesmo com a utilização das vazões ideais. A Figura V.21, analogamente à Figura V.9 mostra a vista superior da correia de projeção, com as partículas coloridas conforme seu tamanho, sendo (A) o caso base (caso 10) usando pelotas queimadas e (B) o caso usando pelotas Verdes (caso 11). Nota-se que, possivelmente devido ao efeito coesivo entre as partículas de Pelotas verdes, as partículas que caem do silo de alimentação na correia de projeção concentram-se claramente na borda mais exterior da correia formando uma quantidade considerável de vazios na correia de projeção, enquanto que as pelotas queimadas se depositam de maneira uniforme.

Isso confirma que o modelo de vazão de alimentação garante a estabilidade do fluxo de material transportado pela correia, mas não é suficiente para garantir que a distribuição seja uniforme para todos os tipos de materiais. Por isso, se reforça a ideia de uma modificação na parte inferior do silo de alimentação, de modo a conduzir o material até a correia de projeção de forma melhor distribuída. Esse resultado é quantificado pela Figura V.22, que mostra a segregação acentuada para o caso usando pelota verde.

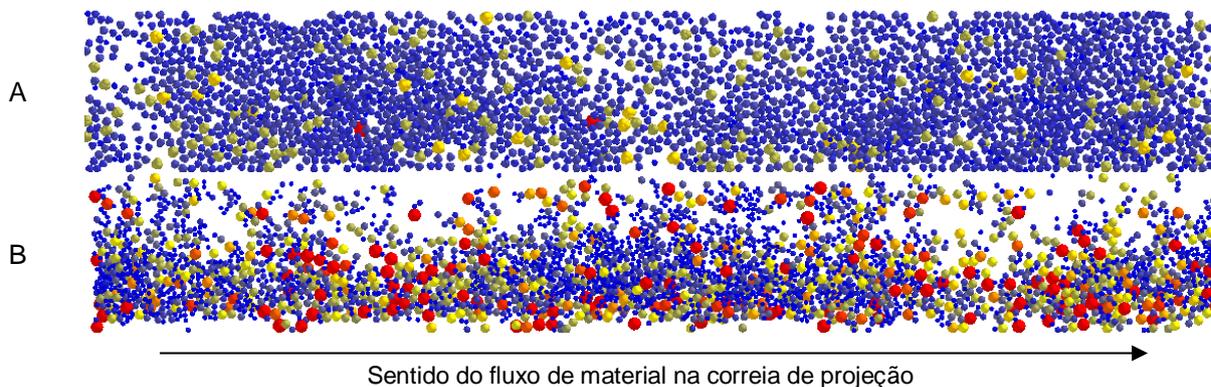


Figura V.21: Vista superior das partículas transportadas na correia de projeção: (A) PQ; (B) PV

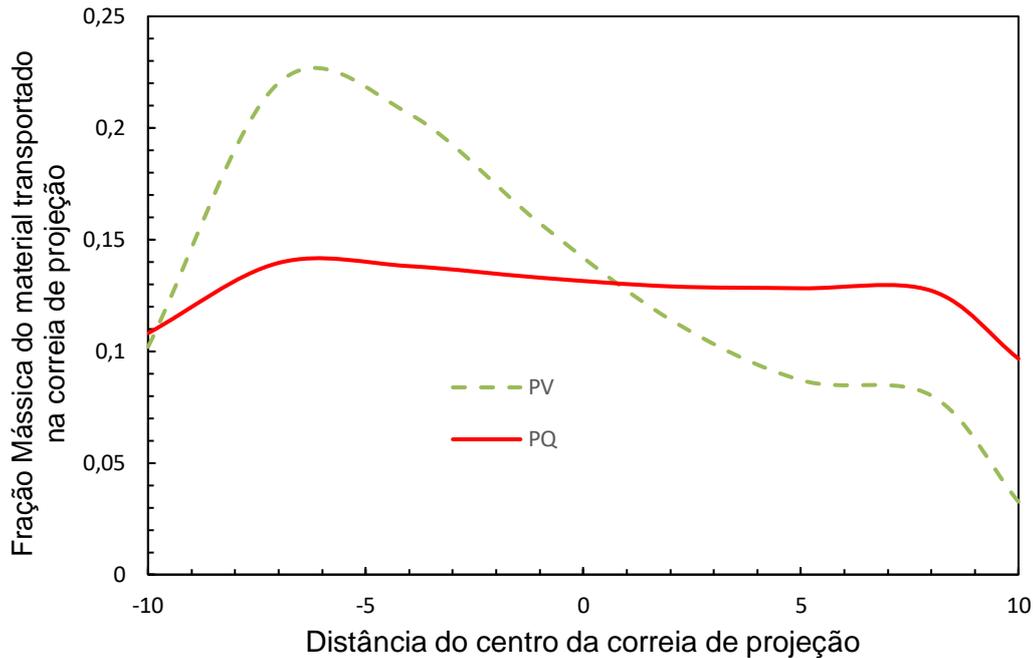


Figura V.22: Distribuições mássicas na correia de projeção usando pelotas queimadas e pelotas verdes

Nenhuma das simulações para o coque, Tabela V.4, apresentou problema de entupimento da simulação preliminar, validando a aplicação do modelo matemático da vazão de alimentação para este material. Dos casos simulados, o caso 18 apresentou-se como sendo aquele que permite maior quantidade de coque na correia de projeção, uma vez que a velocidade da correia é menor, igual a 1 m/s. Mesmo assim, não se forma um fluxo contínuo de material para ser projetado. Conclui-se que para que ensaios com coque possam ser realizados no equipamento, é necessário que sua distribuição de tamanhos seja ajustada antes, por meio de algum método de cominuição primária, como britagem.

V.5 Ensaios de capacidade volumétrica do equipamento

Como explicado na Seção IV.4, adotou-se as simulações de coque como forma de avaliar o volume máximo de material que pode ser carregado no equipamento. A observação dos resultados das simulações de coque mostrou que o entupimento do equipamento começa a ocorrer para volumes de material próximos a 44,4 litros de material.

Dessa maneira, calcula-se qual a massa máxima que pode ser carregada no equipamento para os outros dois materiais, usando a Equação IV.1 e os valores de densidade aparente da Tabela V.1. A Tabela V.6 mostra os resultados obtidos.

Tabela V.6: Capacidade máxima do equipamento

Material	Volume Máximo (l)	Carga máxima (kg)
Pelota Verde	44,4	98,50
Pelota Queimada	44,4	75,74

O plano de simulações de Tabela IV.9 foi então executado. As respectivas vazões de alimentação foram calculadas usando o modelo matemático desenvolvido. A Tabela V.7 sintetiza as vazões de alimentação simuladas e massas de material utilizadas para cada caso.

Tabela V.7: Plano de simulações para avaliação da capacidade do equipamento. Respetivos valores de vazão de alimentação calculados para cada caso, bem como a massa total usada

Caso	Material	Vazão de alimentação (kg/s)	Massa de material (kg)	Porcentagem da carga máxima (%)
21	Pelota Verde	9,95	75,74	100
22	Pelota Queimada	12,94	98,50	100
23	Pelota Queimada	12,29	93,58	95
24	Pelota Queimada	9,70	73,88	75

Os casos usando pelota queimada com 100, 95 e 75% da carga máxima foram avaliados no que diz respeito à estabilidade. A Figura V.23 mostra os resultados. Logicamente, o fluxo mássico na correia de projeção aumenta nos casos com maior massa utilizada. Observa-se que o fluxo mássico mantém o padrão de estabilidade, com as oscilações se mantendo constantes após o regime estacionário.

Isso evidencia que o equipamento reage bem a diferentes volumes, mantendo o fluxo de material estável. A limitação do sistema nesse caso foi detectada na elevação do material do material pelas taliscas da correia de retorno. A Figura V.24 mostra a vista em perspectiva das taliscas da correia de retorno, para a simulação com pelota queimada usando 100% da carga máxima do material (Caso 22). Nela se visualiza que o limite de material carregado pelas taliscas foi excedido, e assim as partículas transbordam o volume entre taliscas, sofrendo queda. Na Figura V.24, o material carregado pelas taliscas tem coloração marrom, enquanto que as partículas que sofrem queda têm coloração verde.

O comportamento do equipamento não tem mudanças significativas ao mudar o material de pelotas verdes para pelotas queimadas.

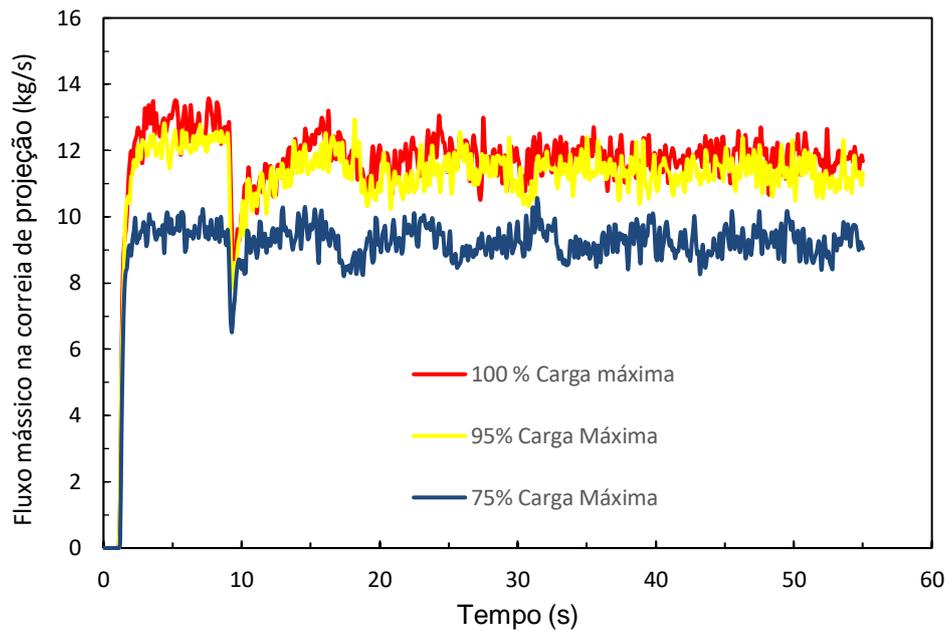


Figura V.23: Fluxos mássicos na correia de projeção ao longo do tempo de simulação, para diferentes percentagens da carga máxima de pelotas queimadas do equipamento

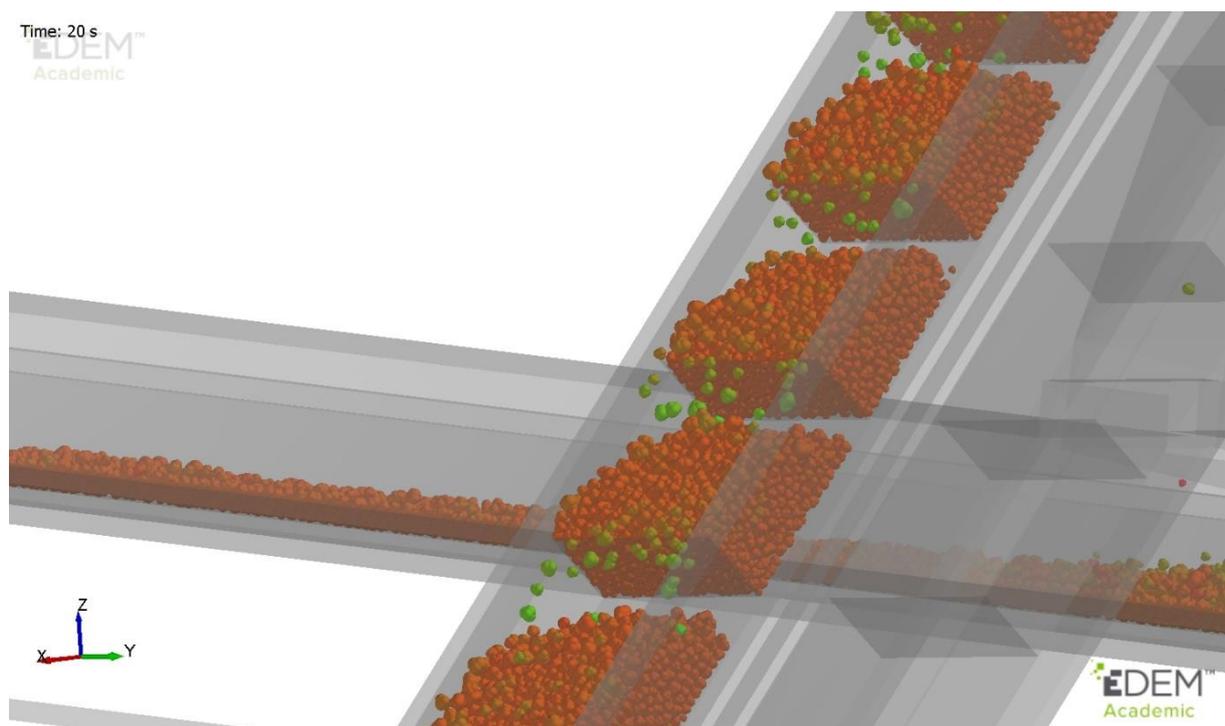


Figura V.24: Representação da queda de partículas das taliscas, ao atingir o volume máximo.

Como recolhimento de informações operacionais do equipamento, visando compreender a natureza de sua operação, procurou-se quantificar a massa média de material carregada pelas taliscas, para os casos envolvendo pelotas queimadas 22 a 24. A Tabela V.8 mostra os resultados obtidos. Observa-se que com a carga máxima de material, as taliscas

carregam em média 4,69 kg de material, ocupando quase metade do volume entre taliscas, cerca de 43%.

Tabela V.8: Massas médias carregadas pelas taliscas e porcentagem do volume entre taliscas preenchido com material, para os casos usando pelotas queimadas

Caso	Carga volumétrica total(l)	Massa média carregada pela talisca (kg)	Volume médio de material na talisca (l)	Volume entre taliscas com material (%)
22	44,4	4,69	1,4	43,72
23	42,0	3,39	1,0	31,66
24	33,0	3,69	1,1	34,41

VI. Conclusões

A observação dos resultados de todas as simulações realizadas com DEM visando caracterizar a operação do equipamento, permitiram as seguintes conclusões:

- O protótipo transporta de maneira satisfatória materiais com distribuição de tamanhos das pelotas queimadas e verdes, necessitando o coque passar por ajustes de tamanho antes de ser inserido no equipamento. A operação atinge a estabilidade rapidamente.
- A geometria ainda carece de melhorias, principalmente na modificação do silo de alimentação de forma a suavizar o impacto do material que é projetado pelas taliscas, e conduzir o material à correia de projeção de forma que este se distribua na correia de projeção de maneira uniforme.
- A operação em ciclo fechado pode permitir realizar posteriormente estudos de degradação de materiais, usando o ambiente do EDEM® para contabilizar as colisões das partículas de material quando este é projetado no silo de análise.
- A capacidade do equipamento de transportar diferentes volumes de material foi avaliada, e se observa que o mecanismo de retorno com as taliscas é o fator limitante, pois atinge a saturação a partir de um valor limite de volume de material usado.
- A simulação da operação do protótipo permite visualizar o fluxo de material granular projetado no silo de análise, permitindo caracterizar sua trajetória e posteriormente comparar os resultados com resultados da abordagem do contínuo, mostrada no capítulo III.
- Um modelo empírico para a determinação vazão de alimentação do equipamento foi proposto com simulações a partir do tempo de ciclo e posteriormente validado para diferentes condições operacionais e tipos de materiais. O mesmo permitiu a realização de experimentos virtuais nos quais foi possível atingir a estabilidade do fluxo granular rapidamente.
- A elaboração da geometria do protótipo virtual, bem como o conhecimento da natureza de sua operação adquiridos com as análises das simulações usando DEM, estabelece as condições iniciais para que um projeto mecânico seja iniciado, de forma a construir o equipamento físico e comparar sua performance com os dados obtidos nas simulações.

VII. Referências Bibliográficas

BARRIOS, G. K.; DE CARVALHO, R. M.; KWADE, A.; TAVARES, L. M. Contact parameter estimation for DEM simulation of iron ore pellet handling. **Powder Technology**, v. 248, p. 84–93, 2013.

BOECHAT F. O; CARVALHO R. M; TAVARES L. M. (2017) Simulation of mechanical degradation of iron pellets in a direct reduction furnace. **Kona Powder and Particle Journal**, Jan.2018

CAMPBELL C. S Granular Material Flows : An overview, Aerospace and Mechanical Engineering, University of Southern California, Los Angeles, 2005

CARVALHO, R. M. (2013). Mechanistic Modelling of Semi-Autogenous Grinding, Tese de Doutorado – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais – PEMM/UFRJ

CAVALCANTI, P.P.S. Calibração e Validadação de modelo matemático de pelotas queimadas de minério de ferro durante manuseio e transporte. Dissertação de Mestrado, programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais PEMM/UFRJ

COETZEE C. J. Review: Calibration of the discrete element method. Department of Mechanical and Mechatronic Engineering, Stellenbosch University, Stellenbosch, South Africa, 2017

CROSTA G. B; CALVETTI F; IMPOSIMATO S; RODDEMAN D; FRATINNI P; AGLIARDI F. Granular flows and numerical modelling of landslides Dip.Science Geologiche e Geotechnologie, Università degli Di Milano Bicocca, 2001

DEM SOLUTIONS 2017. User Guide, Edinburgh. Uk.

DONOHOU T. J., ILLIC D., BELL R., NEWMANN L. The use of DEM in the design and analysis of wearback transfer chutes

HASTIE D. B; WYPYCH P. W. Experimental validation of particle flow through conveyor transfer hoods via continuum and discrete element methods, University of Wollongong, Australia, 2010

HASTIE D, B; WYPYCH P.W; ARNOLD P. C. The profile of conveyor trajectories University of Wollongong, Australia, 2007

ILIC D. Transfer chute Analysis Techniques Including Continuum Modelling and the Discrete Element Method (DEM) Turna Bulk Solids, University of Newcastle, Australia. 2014

LIMA, B. R. M. (2016) simulação do carregamento do alto forno dotado de um sistema Bell Less Top® usando o método de elementos discretos (DEM), projeto de graduação, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, UFRJ.

LOPES P. F. T modelagem de fluxo em meios granulares: Uma abordagem física, matemática e numérica Tese de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral – PPGEM Universidade Federal de Ouro Preto, maio de 2015

MARIGO M.; E. H. Discrete Element Method (DEM) for Industrial Applications: Comments on Calibration and Validation for the Modelling of Cylindrical Pellets Johnson Matthey Technology Centre, UK, 2015

MISHA B. K., RAJAMANI, R. K., (1992) The Discrete Element Method for the simulation of ball mills, App. Math. Modeling

QUIST J.; EVERTSSON M. Framework for DEM calibration and validation, Chalmers Rock Processing Systems, Department of Product Development, Chalmers University of Technology, Sweden, 2015

RACKL M; HANLEY K. J. A Methodical calibration procedure for discrete element models, Insituite for Materials Handling, Material flow and logistics, Technical University of munich, Germany, 2016

RODRIGUEZ, V.A (2016) Modelo Mecanicista Aplicado à Cominuição em Moinhos de Bolas Descontínuos. Tese de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, PEMM/UFRJ

SILVA A. M. B.; ASSIS P. S.; SILVA G. L. R. S; QUINTAS A. C. B. Degradação mecânica do coque em testes de tamboramento, Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração – ABM, 2016

SILVA, B. B. (2017) Material and contact parameters estimation of green iron ore pellets for simulation using the discrete element method. Dissertação de mestrado. UFRJ

SCOTT D. J., CHOULES P. R. The use of impact plates in conveyor transfers. Tribology International, 1993

TAVARES, L. M.; CARVALHO, R. M. Modeling breakage rates of coarse particles in ball mills. **Minerals Engineering**, v. 22, n. 7–8, p. 650–659, 2010

TREJO A. M. N; OLIVEIRA; NETO O. N; MESQUITA A. L Projeto de um chute de transferência de aluminahidratada usando DEM IV Congresso internacional do Alumínio, 2010

WEERASEKARA, N.S.; POWELL, M.S.; CLEARY, P.W.; TAVARES, L.M.; EVERTSSON, M.; MORRISON, R.D.; QUIST, J.; CARVALHO, R.M. The contribution of DEM to the science of comminution. **Powder Technology**, v. 248, p. 3–24, nov. 2013.

ZHU H.P; ZHOU Z.Y. YANG R. Y; YU A.B. Discrete particle simulation of particulate systems: a review of major applications and findings. Chemical Engineering Science, 2008

SILVA, B. B. (2017) Material and contact parameters estimation of green iron ore pellets for simulation using the discrete element method. Dissertação de mestrado. UFRJ

CHENLONG D., CHENG S, LINGLING W, YUEMIN Z., JINFENG H. CFD-DEM simulation of fluid-solid flow of a tapered column separation bed. School of Chemical Engineering and Technology, China University of Mining & Technology, Xuzhou

HORABIK J.; MOLEND A. Parameters and contact models for DEMsimulations of agricultural granular materials: a review Institute of Agrophysics Polish Academy of Sciences, Doświadczalna 4, 20-290, Lublin, Poland

TREJO A. M. N; OLIVEIRA; NETO O. N; MESQUITA A. L Projeto de um chute de transferência de aluminahidratada usando DEM IV Congresso internacional do Alumínio, 2010

Anexo A: Parâmetros do modelo de contato

Tabela A.1: Parâmetros de contato para a pelota queimada (Barrios *et al.*, 2013)

Contato	Coefficiente de restituição	Coefficiente de atrito estático	Coefficiente de atrito de rolamento
pelota queimada - pelota queimada	0,51	0,49	0,02
pelota queimada - aço	0,42	0,50	0,01
pelota queimada - borracha	0,50	0,50	0,01

Tabela A.2 Parâmetros de contato para a pelota verde (Silva, 2017)

Contato	Coefficiente de restituição	Coefficiente de atrito estático	Coefficiente de atrito de rolamento
coque - coque	0,40	0,30	0,20
coque - aço	0,40	0,40	0,10
coque - borracha	0,10	0,34	0,90

Tabela A.3: Parâmetros de contato para o coque (Lima,2016)

	Coefficiente de restituição	Coefficiente de atrito estático	Coefficiente de atrito de rolamento
Pelota verde-pelota verde	0,10	0,30	0,10
pelota verde-aço	0,10	0,35	0,25
pelota verde-Borracha	0,10	0,35	0,25

Tabela A.4: Energias de superfície, que estabelecem a força coesiva presente nas partículas de pelota verde. Valores de energia de superfície para o contato partícula-partícula e partícula-componentes do equipamento (Silva, 2017)

	Energia de superfície (J/m ²)
Partícula - Partícula	1,5
Partícula – Equipamento	0,5