



Universidade Federal
do Rio de Janeiro
Escola Politécnica

VIRAGEM DE VAGÕES DE *PELLET FEED* DE MINÉRIO DE FERRO: DISPOSITIVO DE ENSAIO E MODELAGEM.

Pietro Giuseppe De Seta Cosentino

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.

Orientador: Rodrigo Magalhães de Carvalho

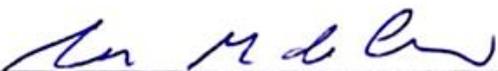
Rio de Janeiro
Setembro de 2018

VIRAGEM DE VAGÕES DE PELLET FEED DE MINÉRIO DE FERRO:
DISPOSITIVO DE ENSAIO E MODELAGEM.

Pietro Giuseppe De Seta Cosentino

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

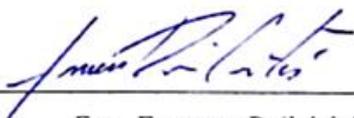
Examinado por:



Prof. Rodrigo Magalhães de Carvalho, D.Sc.



Prof. Luis Marcelo Marques Tavares, D.Sc.



Eng. Emerson Reikdal da Cunha, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
de 2018

Cosentino, Pietro Giuseppe

Viragem de vagões de *pellet feed* de minério de ferro:

Dispositivo de ensaio e modelagem./ Pietro Giuseppe De Seta Cosentino – Rio De Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2018

x, 50 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Rodrigo Magalhães de Carvalho

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

Referências Bibliográficas: p. 48-50.

1.Virador de vagões, 2.*pellet feed*, 3.DEM, 4.JKR

I. Rodrigo Magalhães de Carvalho II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Metalúrgica III. Título.

“Piano piano se va lontano.”

Giuseppe.

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a minha mãe que sempre esteve ao meu lado em qualquer hora. Para me apoiar e me ajudar a seguir o caminho que eu escolhesse.

Aos meus avós, que me ensinaram tudo que eu sou hoje e tenho certeza de que estão orgulhosos de mim.

Ao professor Rodrigo Carvalho que sempre me incentivou e abriu portas e ao professor Luís Marcelo Tavares, que apoio este projeto.

A Verônica pelo seu companheirismo e dedicação.

A minha irmã, que sempre esteve presente nos momentos mais difíceis.

Ao pessoal do LTM, Pedrão, Emerson, Renan, Thiaguinho, Rangler, Lu, Rafa, DeLuca, Hayla, Flávio e Túlio. Vocês têm o ímpeto de se ajudar e isso é muito raro de se encontrar.

A Rapaziada, Honda, Tota, Carlos, Cris, Guilherme, Kuruma, Leo, Luís, Pf, Stiffler e Vava.

Ao time do cabo de guerra e ao pessoal da atlética, em especial ao Daniel e Gui, sozinho somos fortes, juntos somos invencíveis.

E por fim, mas não menos importante ao meu pai que trouxe a inspiração de me tornar engenheiro.

Sem vocês, seria impossível trilhar esse caminho na UFRJ.

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

VIRAGEM DE VAGÕES DE *PELLET FEED* DE MINÉRIO DE FERRO:
DISPOSITIVO DE ENSAIO E MODELAGEM.

Pietro Giuseppe De Seta Cosentino
Setembro/2018

Orientador: Rodrigo Magalhães de Carvalho

Curso: Engenharia Metalúrgica

A adesão causa diversas falhas e perdas no processo de transporte de materiais de granulometria fina. Devido as características hidrofílicas destes materiais, nota-se um aumento na adesão em função do seu teor de umidade. O objetivo do presente trabalho é representar este efeito da umidade no material particulado em escala laboratorial e simular o fenômeno numericamente, utilizando a modelagem do DEM acoplada ao modelo de contato coesivo JKR.

Para tal, os modelos físico e numérico foram baseados na geometria e parâmetros do processo industrial de viragem de vagão, pois este sofre diretamente com a adesão dos particulados, gerando perdas financeiras devido a danos ao equipamento e perdas de material.

Foi desenvolvido o Equipamento de Viragem Laboratorial (EVL), onde foi testado o comportamento adesivo do *pellet feed* de minério de ferro para diversos teores de umidade.

O modelo computacional utilizou os parâmetros e geometria dos testes físicos a fim de observar como a massa aderida varia em função da energia de superfície.

Ao final foi possível traçar uma correlação numérica entre os resultados, relacionando a energia de superfície do modelo numérico com a umidade do *pellet feed*.

Palavras-chave: Virador de vagões, Elementos discretos, DEM, Modelo Numérico, JKR, coesão, *pellet feed*

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

CAR DUMPING OF IRON ORE PELLET FEET:
TESTING DEVICE AND MATHEMATICAL MODELLING.

Pietro Giuseppe De Seta Cosentino

September/2018

Advisors: Rodrigo Magalhães de Carvalho

Course: Metallurgy Engineering

Adhesion is a recurrent problem in transporting and handling fine materials, that causes failure and losses in the process. Due to the hydrophilic characteristics of these materials, the increase of humidity can be correlated to the increase in the adhered material. The aim of this work is to represent this effect of humidity in lab scale and simulate this phenomenon using the DEM, coupled with the JKR cohesive contact modelling.

The physical and numerical models were based in the geometry and process parameters of the car dumping process, which suffers with adhesion of particulates, increasing costs with damages and material losses.

The Laboratory-scaled Car Dumper Device (EVL) was developed, where the adhesive behavior of pellet-feed was tested for different humidity levels.

The computational model used the same lab-scaled geometry and test parameters as input to observe how the retained mass varies with the surface energy of the material.

As a result, it was possible to numerically correlate the model results with the physical ones, correlating the model's surface energy with the humidity of the *pellet feed*.

Keywords: Car Dumper, Discrete Elements Method, DEM, JKR, Cohesion, *Pellet feed*

SUMÁRIO

Agradecimentos	v
Lista de Figuras.....	ix
Lista de Tabelas	xi
1. Introdução	1
1.1 Considerações Iniciais.....	4
1.2 Objetivos	5
1.3 Estruturação do Trabalho	5
2. Revisão Bibliográfica	7
2.1 Minérios de ferro brasileiros.....	7
2.2 Virador de Vagões	8
2.3 Vagões GDT.....	10
2.4 Efeitos microscópicos da umidade em materiais particulados	11
2.5 Adesão	12
2.6 DEM	12
2.6.1 Ciclo de simulação no DEM	15
2.6.2 Definição de contato	16
2.6.3 Modelo de Hertz-Mindlin	16
2.6.4 Modelo coesivo JKR	17
2.6.5 Equações de movimento.....	19
3. Materiais e Métodos	22
3.1 Construção do Equipamento de Viragem Laboratorial (EVL).....	22
3.2 Caracterização do <i>pellet feed</i> e experimentos de viragem com o EVL..	24
3.3 Calibração de parâmetros de contato	29
3.4 Estratégias e plano de simulação no DEM	32
4. Resultados e Discussões.....	34
4.1 Testes de viragem	34
4.2 Resultados da simulação com DEM	40
4.3 Modelo empírico para massa aderida	42
5. Conclusões.....	47
Bibliografia	48

Lista de Figuras

Figura 1 Correlação entre os tempos de viragem praticados pela empresa 1 com o material de origem 1 (MRS, 2010).	2
Figura 2 Evolução do transporte de minério de jan/03 a jan/10, em vermelho estão marcados os períodos de chuva e em amarelo a crise mundial.	2
Figura 3 Diferentes geometrias de vagões, a) Vagão GDT comum e b) Vagão desenvolvido pela empresa X, feito em aço inoxidável e geometria da chapa lateral modificada para evitar a adesão e comportar mais material.	3
Figura 4 a) Mancal Removível b) guincho manual removível.	5
Figura 5 Exemplos de diferentes tamanhos de minério (CSN, 2018).	7
Figura 6 Variação da umidade do minério de ferro de Carajás em função dos meses do ano (Nogueira, <i>et al.</i> , 2011).	8
Figura 7 (a) Exemplos de virador de vagões e (b) Processo de descarregamento do virador apresentado em a) (Heyl & Patterson, 2014).	9
Figura 8 Vagão modelo GDT (Trentin, 2015).	10
Figura 9 características das ligações em particulados úmidos.	11
Figura 10 Comparação do comportamento da carga em um moinho de bolas a 70% da velocidade crítica com 20% de enchimento em laboratório e na simulação de DEM (Rajamani, <i>et al.</i> , 2000).	13
Figura 11 Espectro de colisões normais e tangenciais da simulação tridimensional para um moinho de bolas de 30cm x 30cm com 30% de enchimento (Carvalho & Tavares, 2009).	14
Figura 12 Simulações de DEM a) Britador cônico de laboratório B90 (Lichter, <i>et al.</i> , 2009) b) Transporte e manuseio de partículas (DEMSolutions, 2018).	14
Figura 13 Ciclo de cálculo adaptado de (DEMSolutions, 2015).	15
Figura 14 Representação do contato simplificado de duas partículas (Johnson, <i>et al.</i> , 1971).	18
Figura 15 Representação gráfica do modelo JKR (Santos, 2013).	19
Figura 16 Imagens do modelo em escala do virador de vagões instalado no Laboratório de Tecnologia Mineral da UFRJ a) Equipamento Físico b) Modelo CAD. ..	23
Figura 17 Diferentes etapas da rotação do Virador.	24
Figura 18 Disposição inicial de 184 kg do <i>pellet feed</i> antes da viragem com 95% de enchimento.	25
Figura 19 Gráfico da granulometria do <i>Pellet feed</i> obtida por difração a laser, apenas 3,5% do material apresentou granulometria maior que 0,3 mm.	27

Figura 20 a) Desenho do equipamento, b) Experimento físico para 13% de umidade.	30
Figura 21 a) Equipamento utilizado para calibração dos parâmetros de contato, b) exemplo do resultado físico obtido no teste.	31
Figura 22 a) Geometria do protótipo de partícula utilizada nas simulações DEM b) Diagrama do arranjo das esferas onde todas tangenciam o centroide das outras duas.	33
Figura 23 Relação entre o Teor de umidade(u) e a porcentagem da massa aderida (xmF) ao fundo do vagão e a curva polinomial que descreve o resultado obtido.	35
Figura 24 Demonstração do processo de viragem do material com 10% de umidade com características similares ao comportamento do material úmido real. 1)0 s, 2)1 s, 3)2 s, 4)4 s, 5)5 s, 6)8 s.	36
Figura 25 Comportamento coesivo observado nas simulações com partículas de 30mm.	37
Figura 26 Efeito da ZTA, demarcada em vermelho e da corrosão localizada na adesão do material com 4,4 % de teor de umidade e comparação com o EVL sem material.....	38
Figura 27 Deformação do EVL durante o descarregamento, as linhas vermelhas indicam a posição retilínea das faces.	39
Figura 28 Reforços estruturais para evitar a deformação, instalados após os testes.	40
Figura 29 Representação gráfica dos resultados obtidos e exemplificados na tabela 7.	42
Figura 30 Comparação entre o resultado do modelo proposto e o obtido pelo DEM.	43
Figura 31 Nuvem de pontos relacionando o modelo proposto com o resultado do DEM.	44
Figura 32 Relação entre a massa aderida e a energia de interface para diferentes granulometrias do DEM.	45
Figura 33 Representação do comportamento para partículas de tamanhos diferentes aos testados.....	46

Lista de Tabelas

Tabela 1 Tipificação de vagões GD para bitola métrica e bitola larga e a relação entre as capacidades de carga de cada tipo (adaptada da NBR 11691, 2016).....	10
Tabela 2 Dados iniciais da amostra de <i>pellet feed</i>	28
Tabela 3 Relação do teor de umidade para os testes realizados.....	28
Tabela 4 Parâmetros considerados para simulação, calibrados para o <i>sínter-feed</i> utilizando uma partícula representativa com 60 mm de diâmetro (Carvalho, 2015). ...	31
Tabela 5 Parâmetros calibrados para <i>pellet feed</i>	32
Tabela 6 Relação dos casos a serem simulados por DEM.	34
Tabela 7 Resultados dos testes de viragem para o <i>pellet feed</i> explicitando a codificação utilizada e a relação entre a umidade e a porcentagem mássica aderida.	34
Tabela 8 Resultados obtidos nas simulações, mantendo igual o parâmetro coesivo para as interações partícula-partícula e partícula-geometria.....	41

1. Introdução

O presente trabalho teve início na análise das perdas no transporte ferroviário Brasileiro, em especial no transporte de minério onde viradores de vagão são utilizados para o descarregamento.

Uma estimativa superficial das perdas do processo pode ser feita considerando o tempo de virada praticamente dobra, como mostrado na Figura 1, isto gera custos com mão de obra, multas por atraso e o manejo da carga residual que não se desprende dos vagões (MRS, 2010).

Algumas medidas são tomadas para contornar estas perdas (MRS, 2010), como:

- A reviragem: repetição do processo de viragem até que o material seja liberado.
- aumento do tempo de viragem, onde o vagão permanece na posição até completar a descarga

O material aderido também causa problemas operacionais (MRS, 2010), como:

- Aumento dos danos por água e sobrecarga, pois na reviragem todo o sistema é utilizado mais intensamente, causando maior desgaste.
- Desalinhamento da correia alimentadora localizada em baixo do virador, onde o material coeso cai como um bloco, causando grande impacto.

Todas estas medidas citadas aumentam o tempo médio do descarregamento, que podem ser correlacionados com a sazonalidade das temporadas de chuvas do clima brasileiro (MRS, 2010), esta correlação está exemplificada na Figura 1 onde pode-se notar um aumento expressivo no tempo de descarregamento nas temporadas de chuvas entre outubro e março, características do clima Brasileiro.

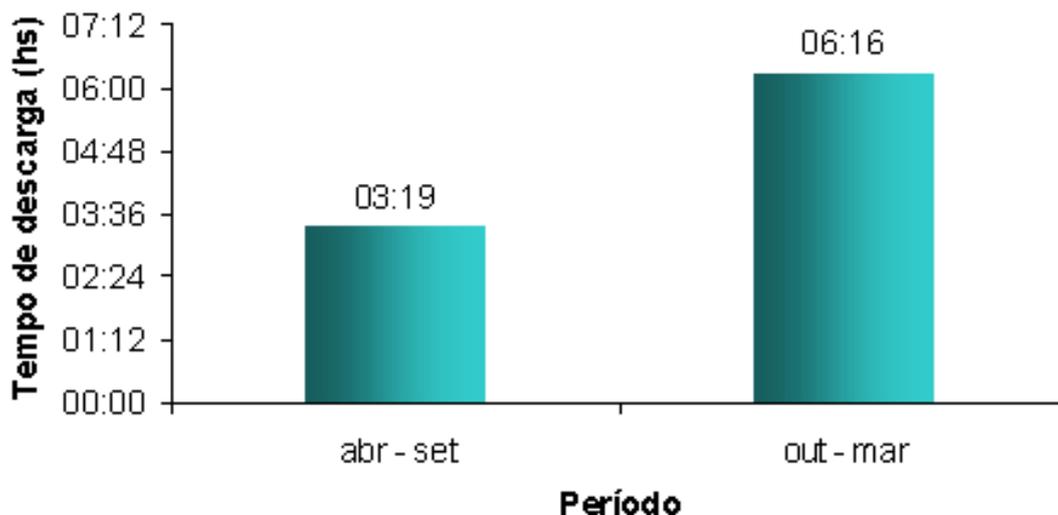


Figura 1 Correlação entre os tempos de viragem praticados pela empresa 1 com o material de origem 1 (MRS, 2010).

Pode-se notar também uma diminuição no transporte de minério nas temporadas de chuva, como exemplificados na Figura 2.

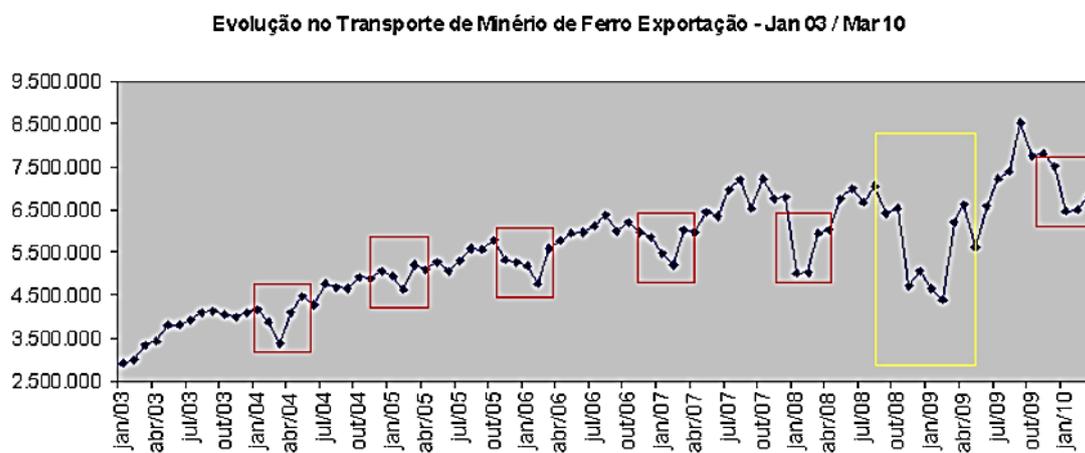


Figura 2 Evolução do transporte de minério de jan/03 a jan/10, em vermelho estão marcados os períodos de chuva e em amarelo a crise mundial.

Todos estes fatores indesejados geram perdas financeiras, motivando o desenvolvimento de novas tecnologias para resolver este problema.

Algumas medidas tem sido desenvolvidas com o intuito de reduzir estas perdas, como a aplicação de chapas antiaderentes (MRS, 2010), e os testes de novas geometrias e materiais, como exposto na Figura 3b, onde pode-se observar um protótipo de vagão de uma empresa X, que lida com este tipo de material.

O vagão é feito em aço inox e com uma geometria lateral desenhada para facilitar a liberação da carga e comportar mais material, as chapas laterais que sofreram modificação estão demarcadas em vermelho.

O aço inox reduz a corrosão gerada pelo material úmido e confere um caráter mais liso e por mais tempo a superfície, isto reduz a adesão de material e aumenta a vida útil do vagão.



Figura 3 Diferentes geometrias de vagões, a) Vagão GDT comum e b) Vagão desenvolvido pela empresa X, feito em aço inoxidável e geometria da chapa lateral modificada para evitar a adesão e comportar mais material.

O objetivo deste trabalho é possibilitar que estas tecnologias sejam testadas em escala laboratorial ou computacionalmente, com custos muito menores comparados a testes industriais. Para colocar em perspectiva, o modelo em escala laboratorial teve um custo total de R\$ 3.500, enquanto apenas a viga central do vagão gôndola construído pela Randon Implementos S/A pode chegar a custar R\$ 4.208,00 (Randon Implementos S/A, 2015).

A operação de viragem de vagões é bem simples em termos de parâmetros para estudo. O vagão gira em torno de seu eixo, até completar um curso de 160 graus. O

material contido dentro do vagão cai por ação da gravidade e em alguns casos são utilizados viradores mecânicos para facilitar a liberação da carga. O material cai primeiramente dentro da moega e em seguida cai em esteiras transportadoras e são transportados até as pilhas de estocagem. Alguns modelos de viradores possuem vibradores que ajudam no desprendimento da carga aderida, facilitando o descarregamento total.

Esta simplicidade de operação facilita a construção de um modelo em escala e possibilidade que sejam feitos testes para melhora do processo com um custo muito menor que o de testes em escala real.

1.1 Considerações Iniciais

O presente trabalho tem caráter exploratório e visa servir de ponto de partida para uma análise mais complexa, onde seriam testados diferentes parâmetros físicos e de simulação para o fenômeno estudado, que é a adesão de particulados em função do seu teor de umidade.

O equipamento de viragem laboratorial construído visa representar o procedimento real e os fenômenos envolvidos, dadas as proporções, a fim de estudar o comportamento do material durante o descarregamento, utilizando uma escala em que se possam fazer testes controlados.

O modelo proposto tem o intuito de relacionar em particular o comportamento do modelo de contato adesivo escolhido (JKR) com o do material de estudo (*pellet feed*) e servir como base para a escolha dos parâmetros do modelo matemático no momento de calibração.

A construção do modelo em escala foi limitada pelos recursos disponíveis, mas foi projetada tendo em vista modificações e melhorias futuras, onde utilizou-se mancais removíveis, que possibilitam a mudança do vagão em escala Figura 4a e a possibilidade de instalação de um acionador elétrico onde hoje está instalada um guincho manual Figura 4b, este ativador teria a finalidade de controlar eletronicamente a velocidade de rotação do vagão e evitar as variações da atividade manual.

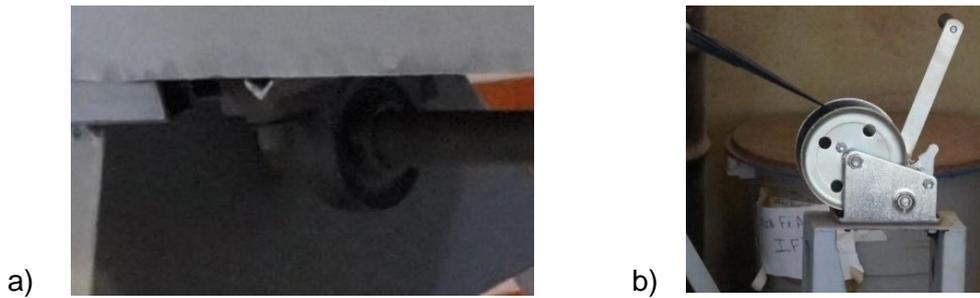


Figura 4 a) Mancal Removível b) guincho manual removível.

1.2 Objetivos

Os objetivos do presente trabalho são:

- Construção de um modelo em escala que mimetize o processo de viragem de vagões
- Testes deste modelo utilizando o *pellet feed* de minério de ferro, correlacionando a umidade com a massa aderida no vagão.
- simulação numérica do efeito adesivo.
- Propor uma correlação entre os parâmetros de simulação com os a umidade presente no material escolhido.

1.3 Estruturação do Trabalho

O presente trabalho é dividido em 3 partes, que são:

➤ Testes físicos:

- Escolha do material a ser estudado:
 - *Pellet feed*

Este material foi escolhido devido a relatos de problemas com adesão durante o descarregamento de particulados de minério de ferro, devido ao seu caráter hidrofílico e da disponibilidade para análise.

- Caracterização do material a ser estudado.
- Testes de viragem variando a umidade, quantificando a massa aderida.

➤ Simulações:

- Definição do modelo numérico a ser utilizado:

- DEM (Cundall, 1979)

O DEM, ou método de elementos discretos tem uma boa reputação na área de simulação de materiais particulados.

- Definição dos parâmetros de entrada do modelo.

- Modelo JKR de contato (Johnson, *et al.*, 1971)

Esta escolha foi fundamentada no estudo deste método onde foi observado que tal modelo retrata ao efeito microscópico que acontece na interação de duas partículas, onde há a formação de um menisco e o “empescoamento” deste menisco até que se formem duas superfícies.

Também baseou-se nos trabalhos de Grima (2011) e Kapelle (2015), onde o modelo JKR se provou útil na representação de materiais particulados coesos.

Este modelo de contato possibilita a representação das forças adesivas em função da superfície de contato e da energia de superfície chamada de γ_{JKR} .

- Calibração dos parâmetros de contato.
- Variação da energia superficial utilizado a mesma métrica dos testes físicos.
- Proposição de um modelo numérico que correlacione a umidade dos testes físicos com o parâmetro coesivo da simulação utilizando a métrica dos testes físicos e das simulações.

2. Revisão Bibliográfica

2.1 Minérios de ferro brasileiros

A economia brasileira tem estreita relação com a produção de minério de ferro. O comércio de minério bruto e beneficiado movimentou em 2015 um montante de R\$42.297.984.853 (DNPM, 2016), representando aproximadamente 1% do produto interno bruto Brasileiro do ano.

O Brasil possui grandes reservas naturais de minério, concentradas principalmente nos estados de Minas Gerais na região do quadrilátero ferrífero, Carajás no Pará e no Maciço de Urucum no Mato Grosso do Sul. A maior empresa produtora de minério de ferro e pelotas no Brasil e no mundo é a Vale (Vale, 2018) tendo como principal consumidora de minério de ferro a indústria siderúrgica.

O minério de ferro é extraído, beneficiado e separado por classes de tamanho, entre material fino (<6,3 mm) e granulado (6,3 – 50 mm). O material granulado tem aplicação direta nos altos-fornos e fornos de redução direta, já o material fino é separado em duas subclasses, *sínter-feed* (6,3 mm - 0,150 mm) e *pellet-feed* (< 0,150 mm), destinadas a aglomeração e produção de sinter e pelotas, respectivamente. Na Figura 5, são apresentados exemplos do aspecto desses materiais.



Figura 5 Exemplos de diferentes tamanhos de minério (CSN, 2018).

Os produtos finos são comercializados e transportados por meio ferroviário ou em forma de polpa por mineroduto. O transporte por ferrovias possui um claro limitante, o carregamento e descarregamento de toneladas de material de modo a suprir uma demanda sempre crescente, em 2017 foram movimentados 416,4 milhões de toneladas

úteis de minério de ferro por meio ferroviário, quantidade 4,7% superior ao ano anterior (MTPA, 2017).

Durante o transporte ferroviário, o material fino é transportado muitas vezes desprotegido, sofrendo ação das intempéries, absorvendo principalmente umidade pelo caminho. Exemplo deste fenômeno é apresentado na Figura 6, onde observa-se que o teor de umidade do minério de ferro acompanha as temporadas de chuva e estiagem, isto é, quanto maior a disponibilidade de água no ambiente, maior a umidade presente no material.

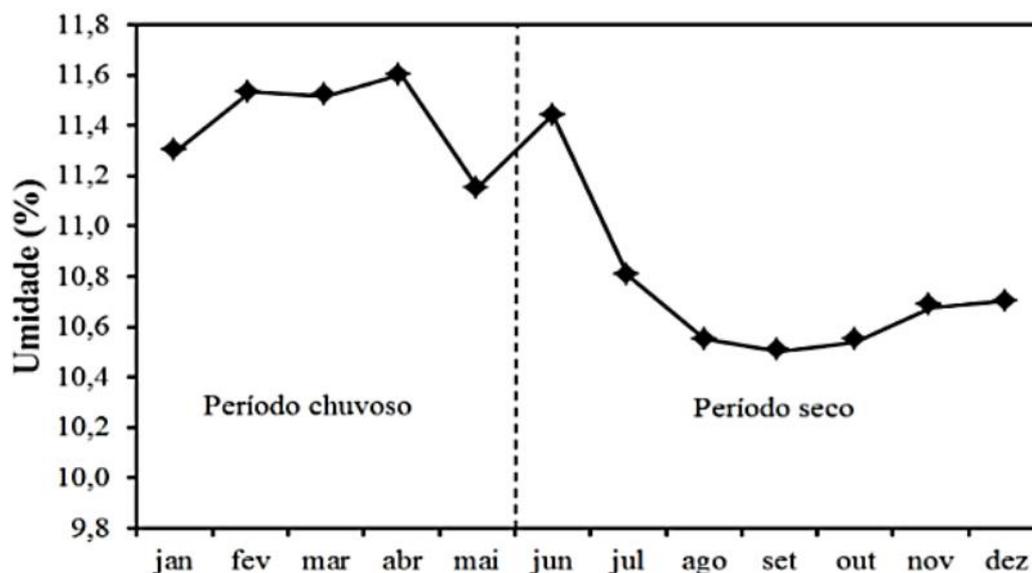


Figura 6 Variação da umidade do minério de ferro de Carajás em função dos meses do ano (Nogueira, *et al.*, 2011).

Pode-se notar a correlação da alta umidade relatada na Figura 6 nos meses de fevereiro e março com o aumento no tempo de viragem expostos na Figura 1. Estes problemas são efeitos indesejados da adesão.

2.2 Virador de Vagões

O modelo de Virador de Vagões mais utilizado no mercado brasileiro é chamado de *O-type*, este equipamento tem função vital para o processo, pois possibilita o rápido descarregamento de um vagão ou par de vagões com apenas um ciclo de operação.

O virador exibido na Figura 7 tem a capacidade de descarregar simultaneamente até dois vagões por vez, chegando a um fluxo de 9.000 t/h de material (Heyl & Patterson, 2014), a capacidade individual de cada vagão varia de acordo com sua classe, o modelo considerado no presente trabalho é da classe GDT, com capacidade de até 100 toneladas.

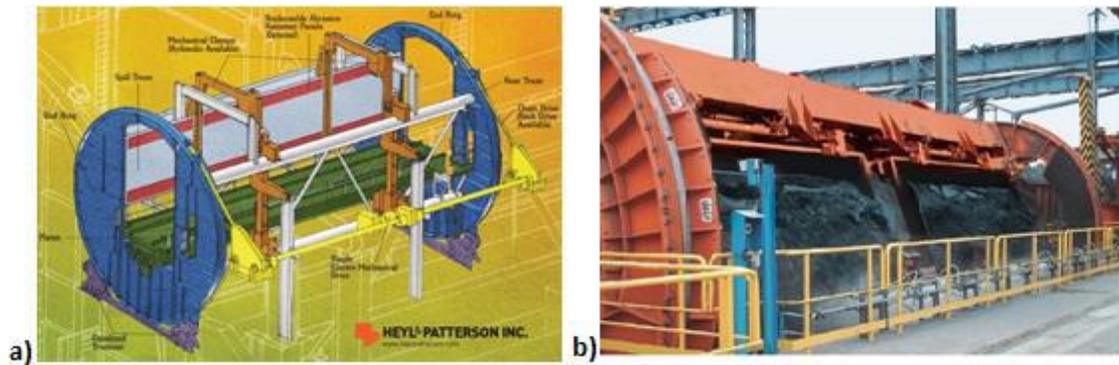


Figura 7 (a) Exemplos de virador de vagões e (b) Processo de descarregamento do virador apresentado em a) (Heyl & Patterson, 2014).

Uma classe específica de vagões, denominado gôndola, é empregada neste tipo de equipamento. Segundo a NBR 11691: Vagão ferroviário – Classificação, identificação e marcação (ABNT, 2016), tais vagões têm sua classificação dada por 3 letras, iniciada com a sigla GD, onde G significa gondola e D indica sua utilização em viradores de vagão (em inglês *Dumper*). A terceira letra indica sua capacidade e tipo de bitola. A terceira letra indica sua capacidade e tipo de bitola, a Tabela 2 apresenta a relação entre a nomenclatura e a capacidade de carregamento de cada tipo de vagão.

Tabela 1 Tipificação de vagões GD para bitola métrica e bitola larga e a relação entre as capacidades de carga de cada tipo (adaptada da NBR 11691, 2016).

Bitola métrica (1 m)	Bitola Larga (1,6 m)
A: 30,0 t	P: 47,0 t
B: 47,0 t	Q: 64,5 t
C: 64,5 t	R: 80,0 t
D: 80,0 t	S: 100,0 t
E: 100,0 t	T: 119,5 t
F: 119,5 t	U: 143,0 t
G: 143,0 t	
H: > 143,0 t	

2.3 Vagões GDT

Os vagões dessa classe são largamente utilizados para o transporte de minério brasileiro. Sua geometria possibilita a rotação em torno do engate sem a necessidade de desacoplamento da composição, o que confere maior agilidade no processo de descarregamento. A Figura 8 ilustra este modelo de vagão.



Figura 8 Vagão modelo GDT (Trentin, 2015).

Pesando em torno de 19 toneladas, com 45 m³ de capacidade volumétrica de carga, os vagões GDT têm como principal aplicação o transporte de minério de ferro. Com o

aumento da demanda de minério de ferro e da produção de aço no Brasil, existe um movimento a favor da melhora do desempenho e aumento da capacidade de minério transportados. Soluções como a aplicação de antiaderentes já foram apresentadas com o intuito de reduzir o tempo de descarregamento e a perda de material (Perdigão, 2010). Uma alternativa abordada é a de novas geometrias e materiais, como pode ser visto na Figura 2b), onde as chapas laterais possuem uma configuração diferente do original, estas chapas são feitas de aço inox, material mais nobre e caro, com menor propensão à corrosão e aderência do material.

2.4 Efeitos microscópicos da umidade em materiais particulados

A presença de umidade em um material particulado tem efeitos macro e microscópicos que influenciam em seu comportamento como um todo. Isto pode ser explicado pelas interações químicas, elétricas e de interface entre o fluido e as partículas. Pode-se classificar o sistema sólido-líquido em quatro estados diferentes, como exemplificados na Figura 9.

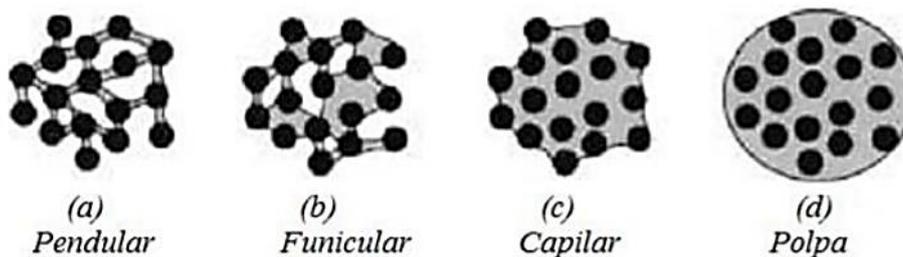


Figura 9 características das ligações em particulados úmidos.

Estes estados dependem do teor de umidade, isto é, da quantidade de água presente no sistema sólido líquido, portanto quanto maior o teor de umidade, mais fortes serão as interações, conferindo diferentes propriedades para cada estado descrito acima.

Este estado também é função da morfologia do material, pois a irregularidade intrínseca das partículas é função da sua origem, composição, arranjo cristalino e do processo de cominuição aplicado (Graça, *et al.*, 2015), todos estes parâmetros afetam a superfície das partículas e isto tem influência direta no comportamento do material em

relação a umidade, isto é, para o mesmo teor de umidade o material pode se comportar como polpa ou como sólido. Todos estes são efeitos explicados pela adesão.

2.5 Adesão

Pode-se explicar a adesão como a atração entre dois corpos sólidos em contato. Ela é produzida pela existência de forças atrativas intermoleculares de ação a curta distância.

As principais componentes da força de adesão são as forças Eletrostática, Capilar e de Van der Waals (Rumpf, 1977), sendo a última a mais importante.

Todas as componentes da força de adesão, em teoria, são afetadas pelo material, pela aspereza da superfície, pela forma, pela duração do contato, pelo tamanho da partícula e pela velocidade inicial do contato (Felicetti, 2004).

Todas estas forças influenciam na resistência à tração teórica σ do aglomerado, que pode ser expressa pela Equação 1 (Kendall, *et al.*, 1986):

$$\sigma = \frac{3 * \pi * W}{8D} \quad \text{Equação 1}$$

Onde W é o trabalho realizado pela força de adesão e D é o diâmetro da partícula.

Vale notar que nesta equação, a força de resistência a tração aumenta com a diminuição do tamanho da partícula .

2.6 DEM

O DEM (Cundall, 1979) é o método computacional que descreve o comportamento de materiais particulados como carvão, minério, solo, rochas, pelotas e pó. Foi criado por Peter A. Cundall, com o intuito de simular a movimentação de solos baseada na interação entre as rochas. Desde então tem sido desenvolvido e adaptado para diversos modelos de contato, como o modelo de contato adesivo estudado neste trabalho (Johnson, *et al.*, 1971). Estes modelos têm o intuito de descrever os efeitos das diferentes interações físicas, químicas e elétricas entre os elementos de simulação.

Por se tratar de um método explícito e não depender diretamente de uma malha refinada para representar fenômenos localizados, o DEM não sofre com as

instabilidades dos métodos baseados em elementos finitos. Dado que o passo de tempo seja suficiente para capturar e estabilizar as forças de contato. Também aplica a uma grande variedade de processos industriais, onde se apresenta como uma ferramenta poderosíssima para o estudo da interação micro e macro mecânica entre partícula-partícula e partícula-superfície, sendo possível mensurar as energias e desgastes envolvidos em cada colisão individualmente.

É importante citar a aplicação do DEM na cominuição, onde pode ser usado para prever o comportamento da carga dentro do moinho de bolas, como ilustrado pela Figura 10 II (Rajamani, *et al.*, 2000), de acordo com os parâmetros operacionais e de projetos como o grau de enchimento, tipo de barras elevadoras, velocidade de rotação, etc.

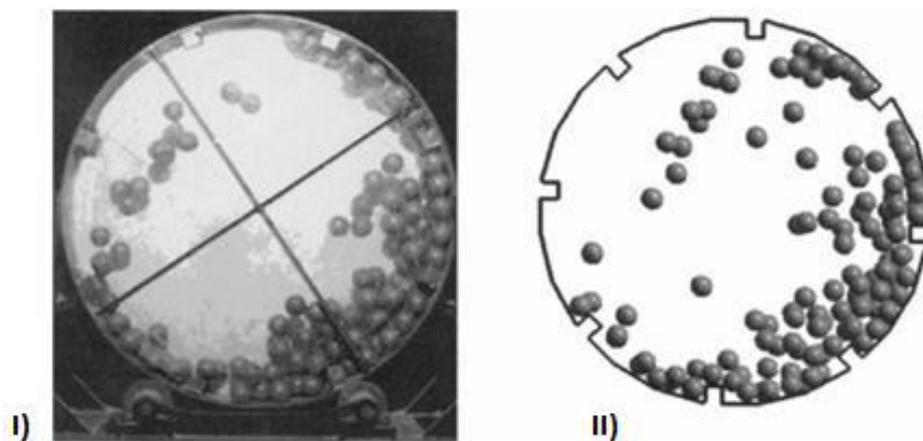


Figura 10 Comparação do comportamento da carga em um moinho de bolas a 70% da velocidade crítica com 20% de enchimento em laboratório e na simulação de DEM (Rajamani, *et al.*, 2000).

A interpretação dos dados do DEM também permite prever a eficiência energética e pode ser utilizado no dimensionamento de equipamentos. No software EDEM (DEMSolutions, 2018) é possível registrar os dados de forma que forneçam o histórico e magnitude das colisões, traduzido pelo espectro de energias de impacto, como demonstrado na Figura 11.

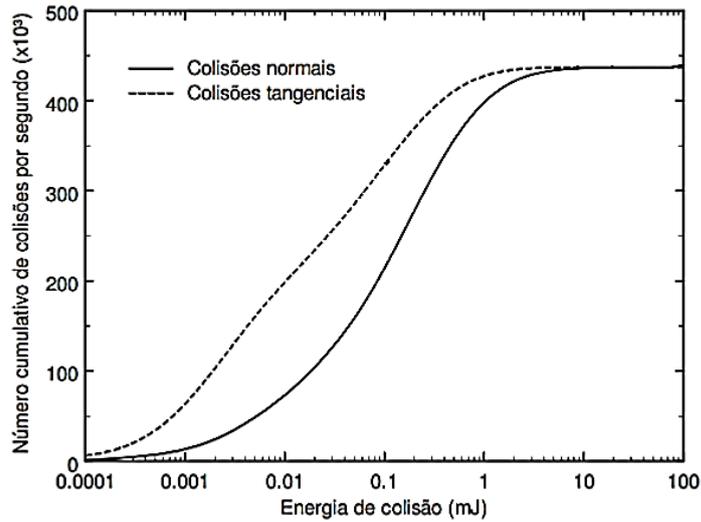


Figura 11 Espectro de colisões normais e tangenciais da simulação tridimensional para um moinho de bolas de 30cm x 30cm com 30% de enchimento (Carvalho & Tavares, 2009).

O método ainda pode ser empregado no projeto de equipamentos para cominuição Figura 12a (Lichter, *et al.*, 2009) e no transporte de materiais particulados, como correias transportadoras de insumos, Figura 12b (DEMSolutions, 2018), como minério, pelotas, coque, etc.

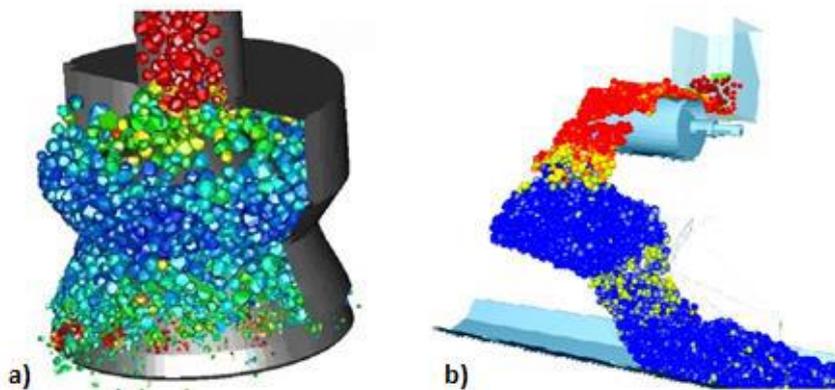


Figura 12 Simulações de DEM a) Britador cônico de laboratório B90 (Lichter, *et al.*, 2009) b) Transporte e manuseio de partículas (DEMSolutions, 2018).

O movimento das partículas no ambiente DEM é descrito a partir da integração das equações da segunda lei de Newton acoplada à mecânica de interação entre partículas.

Baseando-se na impenetrabilidade dos corpos, é prevista uma deformação local ao contato, sendo esta governada pela característica de cada material (Hertz, 1867).

Esta abordagem seria extremamente complexa e dispendiosa. Para contorná-la, define-se uma superposição dos corpos representada por δ e comumente chamada de *gap*. A partir desta superposição pode-se extrapolar as componentes normal e tangencial das forças atuando no contato, ponderando esta superposição com a deformação local ao contato.

2.6.1 Ciclo de simulação no DEM

O ciclo de simulação tem início na definição da geometria, em seguida define-se os materiais, o modelo de contato, a geometria das partículas e as propriedades dos materiais referentes ao modelo utilizado.

Após estipular os parâmetros inicia-se a integração das equações de movimento no tempo, as quais seguem o ciclo representado na Figura 13, onde cada ciclo é executado para um passo no tempo.

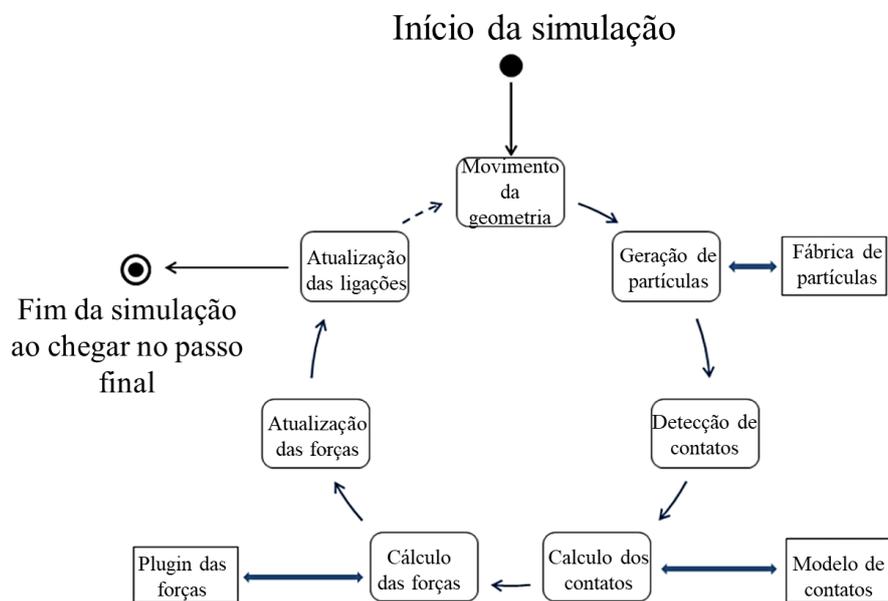


Figura 13 Ciclo de cálculo adaptado de (DEMSolutions, 2015).

2.6.2 Definição de contato

Duas partículas só estão em contato entre si se a distância entre ambas for menor que a soma de seus raios, ou seja, há uma superposição entre os corpos envolvidos. Quando verdadeira, representa-se a superposição pela variável δ .

A forma mais simples de encontrar a superposição consiste primeiramente em calcular o módulo do vetor que aponta do centroide da partícula i para a partícula j , ou vice-versa.

$$\delta = (a_i + a_j) - \|r_i - r_j\| \quad \text{Equação 2}$$

2.6.3 Modelo de Hertz-Mindlin

A penalização proposta pelo de Hertz-Mindlin pondera a força reativa de contato de acordo com o raio da zona de contato. Este modelo faz alusão a deformação local que ocorre durante o choque de partículas. Este modelo foi primeiramente descrito em “Ueber die Berührung fester elastischer Körper” (Hertz, 1867) e posteriormente reformuladas para um formato mais simplificado (Barthel, 2008). Este formato descreve a superposição em função da área de contato como:

$$\delta_{H(a)} = \frac{a^2}{R} \quad \text{Equação 3}$$

E a relação entre a força e o raio de contato:

$$F_{H(a)} = \frac{4E^* a^3}{3R} \quad \text{Equação 4}$$

Onde E^* é o módulo de Young efetivo:

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1}{E_i} + \frac{1}{E_j} \quad \text{Equação 5}$$

E R^* o raio efetivo:

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_j} \quad \text{Equação 6}$$

Este modelo confere uma relação direta entre a superposição e a força reativa de contato, mas para o caso estudado, é necessário também considerar as forças adesivas por meio do modelo coesivo JKR (Johnson, *et al.*, 1971).

2.6.4 Modelo coesivo JKR

Para a adição das forças relativas a adesão, foi proposto o modelo JKR (Johnson, *et al.*, 1971).

No modelo JKR, a superposição e a força reativa do contato podem ser formuladas da seguinte forma:

$$\delta_{JKR}(a) = \frac{a^2}{R^*} - \sqrt{\frac{4\pi a \gamma_{JKR}}{E^*}} \quad \text{Equação 7}$$

$$F_{(a)JKR} = \frac{4E^* a^3}{3R^*} - 2\sqrt{2\pi E^* \gamma_{JKR} a^3} \quad \text{Equação 8}$$

Onde γ é a tensão superficial em J/m^2 e a é o raio da região de contato entre as duas partículas, expresso em metros.

A força de coesão máxima pode ser calculada minimizando a Equação 8, e denota a força que as partículas exercem sobre a outra no limiar do contato.

$$F_{pulloff} = -\frac{3\pi\gamma_{JKR}R^*}{2} \quad \text{Equação 9}$$

Esta força é aplicada mesmo que não haja superposição entre as partículas. A distância máxima para atuação destas forças é calculada com a Equação 10 e pode ser entendida com a distância onde ocorre a ruptura do menisco que liga as duas partículas.

$$\delta_c = \frac{a_c^2}{R^*} - \sqrt{\frac{4\pi a_c \gamma_{JKR}}{E^*}} \quad \text{Equação 10}$$

Pode-se notar que esta abordagem propõe uma superposição das forças de contato, onde uma parcela é responsável pela força do choque e outra pela força de adesão do contato. Isto é facilmente observado na Equação 10, pois ao igualar-se a energia de interface γ_{jkr} a zero, como resultado obtém-se o modelo normal de contato de Hertz.

$$\delta_{JKR}(a) = \frac{a^2}{R^*} - \sqrt{\frac{4\pi a \gamma_{jkr}}{E^*}} \quad \text{Equação 11}$$

$$\delta_H(a) = \frac{a^2}{R^*} \quad \text{Equação 12}$$

$$F_{(a)JKR} = \frac{4E^* a^3}{3R^*} - 4\sqrt{\pi E^* \gamma_{jkr} a^3} \quad \text{Equação 13}$$

$$F_{(a)H} = \frac{4E^* a^3}{3R^*} \quad \text{Equação 14}$$

O modelo JKR pode ser interpretado como uma modificação da superfície de contato, considerando como tal, o raio do menisco formado pela adesão. O diagrama da Figura 14 ilustra este efeito.

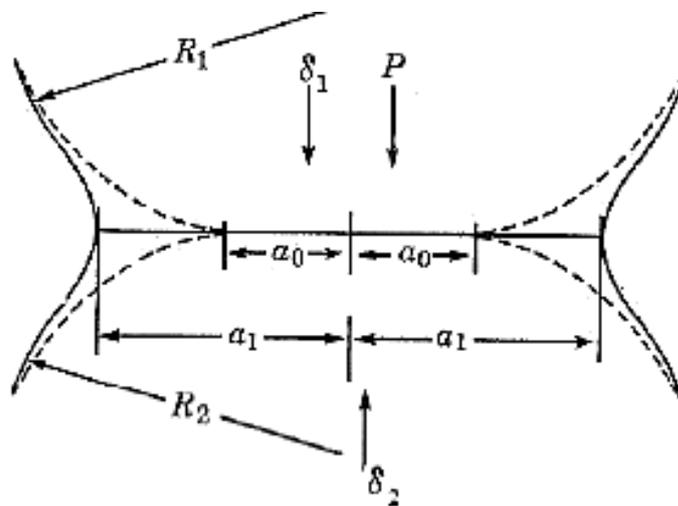


Figura 14 Representação do contato simplificado de duas partículas (Johnson, *et al.*, 1971).

$$m_i \frac{d^2}{dt^2} r_i = f_i + m_i \cdot g \quad \text{Equação 15}$$

Onde m_i é a massa da partícula, $\frac{d^2}{dt^2} r_i$ sua aceleração, f_i é o vetor de forças externas e $m_i \cdot g$ é a parcela gravitacional das forças.

A parcela tangencial das forças pode ser descrita na forma da Equação 16, onde I_i é seu momento de inércia, $\frac{d}{dt} \omega_i$ sua aceleração angular, resultando em t_i que representa o torque.

$$I_i \frac{d}{dt} \omega_i = t_i \quad \text{Equação 16}$$

Com a massa (m_i) posição (r_i) e velocidade angular (ω_i) relativos a uma partícula (i), é possível calcular a força e torques totais relativos ao contato da partícula em questão.

A parcela tangencial das forças pode ser descrita na forma da Equação 17, onde I_i é seu momento de inércia, $\frac{d}{dt} \omega_i$ sua aceleração angular, resultando em t_i que representa o torque.

$$I_i \frac{d}{dt} \omega_i = t_i \quad \text{Equação 17}$$

Com a massa (m_i) posição (r_i) e velocidade angular (ω_i) relativos a uma partícula (i), é possível calcular a força e torques totais relativos ao contato da partícula em questão.

$$f_i = \Sigma_c f_i^c \quad \text{Equação 18}$$

$$t_i = \sum_c (l_i^c \times f_i^c \times q_i^c) \quad \text{Equação 19}$$

Onde q_i^c são os torques aplicados por outros contatos.

As posições subsequentes das partículas são obtidas pela integração explícita da Equação 20 no tempo.

$$r_{i,t+1} = r_{i,t} + \frac{f_i}{2 \cdot m_i} \cdot dt + v_i \cdot d \quad \text{Equação 20}$$

Esta formulação possibilita acoplar diversos modelos de contato, escolhendo sempre os que melhor representam os fenômenos envolvidos no caso real.

A equação utilizada para se encontrar o passo de tempo se baseia no tempo mínimo que o cisalhamento leva para se propagar pela partícula, chamado de passo de tempo de Rayleigh, definido como T_R .

$$T_R = \frac{\pi R}{(0,1631\nu + 0,8766)} \left(\frac{\rho}{G}\right)^{0,5} \quad \text{Equação 21}$$

Onde R denota o raio da partícula menor partícula em metros, G seu módulo de cisalhamento em Pa, ν o coeficiente de Poisson e ρ sua densidade em kg/m³.

Este parâmetro é definido para um sistema estático, onde não há muitas interações entre partículas. Para sistemas mais dinâmicos e com mais interações é comum utilizar-se uma fração deste passo de tempo, tipicamente definido entre 20 e 40% (DEMSolutions, 2014).

3. Materiais e Métodos

A metodologia do presente trabalho se divide em 4 etapas, a primeira etapa consistiu da construção de um equipamento similar ao virador de vagões(EVL). A segunda etapa envolveu a realização de experimentos de viragem do dispositivo, a terceira etapa envolveu a caracterização do material e definição dos parâmetros não coesivos do contato. A quarta etapa compreende a avaliação do efeito da utilização do modelo coesivo nas simulações DEM visando mimetizar os efeitos da umidade, observados na segunda etapa.

3.1 Construção do Equipamento de Viragem Laboratorial (EVL)

Buscou-se mimetizar os parâmetros da operação industrial em escala de laboratório. Os experimentos foram feitos utilizando um modelo em escala que visa replicar as dimensões de vagões do tipo GDT e o movimento do virador de vagões modelo O-type, apresentado na Figura 8. O dispositivo de viragem em escala de laboratório possui um compartimento de carga com 30 cm de altura, 40 cm de largura e 80 cm de comprimento, foi construído utilizando aço com especificação 1020 (mesmo tipo utilizado na calibração dos parâmetros do DEM). O eixo de rotação do dispositivo está localizado à 1.100 mm de altura em relação à base enquanto o fundo do compartimento de carga está a 55 mm do centro de rotação, proporcionalmente similar aos engates presentes nos vagões classe GDT. Uma imagem do equipamento é apresentada na Figura 16.

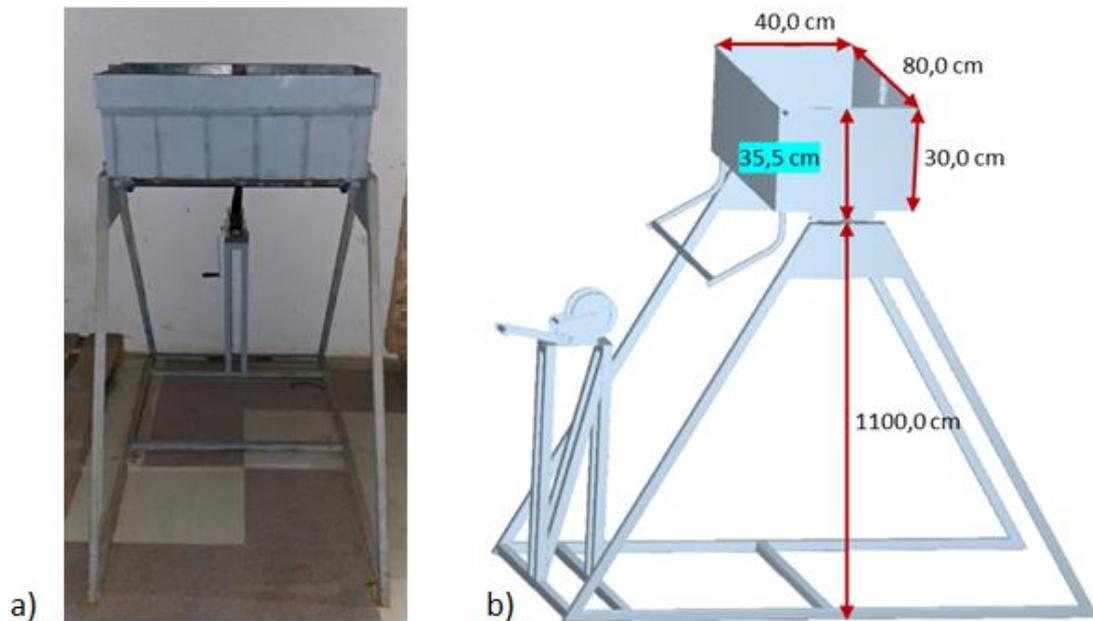


Figura 16 Imagens do modelo em escala do virador de vagões instalado no Laboratório de Tecnologia Mineral da UFRJ a) Equipamento Físico b) Modelo CAD.

O dispositivo de viragem em escala de laboratório foi especialmente desenhado e construído para este projeto pesando em torno de 50 kg, com $0,096 \text{ m}^3$ de volume interno. Foi construído respeitando as razões entre as dimensões observadas pelas fotos e vídeos disponibilizados pela indústria e para que comportasse uma massa que pudesse ser manuseada, permitindo uma amplitude de rotação de 160° em torno de seu eixo horizontal.

O modelo tem o curso de rotação e dimensões internas similares ao processo real. Permite também controlar a velocidade de viragem manualmente, utilizando o guincho preso ao suporte atrás do virador. Este guincho tem resistência máxima a tração de 1,1 toneladas e redução de 3:2:1, o que possibilita o manejo de toda a massa em movimento. O curso do equipamento pode ser observado na Figura 17.



Figura 17 Diferentes etapas da rotação do Virador.

Travas de segurança foram posicionadas na base do vagão e a alavanca está fixada ao guincho para impedir sua rotação indesejada e evitar acidentes.

A equipe Minerva Baja (UFRJ) foi responsável pela parte técnica de dimensionamento dos materiais e reforços mecânicos, construção e soldagem do equipamento.

3.2 Caracterização do *pellet feed* e experimentos de viragem com o EVL

O material utilizado para os ensaios foi disponibilizado pelo LTM e consiste em uma amostra de *pellet feed* oriundo de uma mina no triângulo mineiro. A obtenção da massa específica foi via picnometria e a para a umidade foi retirada uma amostra inicial após homogeneização e quarteamento do material.

Foi utilizada a técnica de pilha longitudinal para a homogeneização da amostra. Para tal foram realizadas sucessivas passagens, distribuindo homogeneamente material com um balde por todo o comprimento da pilha, até que todo o material seja disposto na pilha. Após a construção da pilha, separou-se a mesma na metade de seu comprimento. Uma das frações foi reservada e a outra retornada para o reservatório.

O processo foi repetido até obtermos um volume aparente que fosse suficiente para encher o modelo do vagão com 0.096 m³. A pilha foi dividida em partes iguais e o material guardado em sacos, cada um com uma média de 20 kg de material. Ao carregar o material no vagão, os sacos foram pesados separadamente antes e depois do carregamento, para encontrarmos a massa adicionada ao vagão, pois as balanças disponíveis não comportariam toda a massa. O enchimento inicial do EVL pode ser visto na Figura 18.



Figura 18 Disposição inicial de 184 kg do *pellet feed* antes da viragem com 95% de enchimento.

Com esta disposição pode-se calcular uma densidade aparente em torno de 2.000 t/m³.

Como o estudo será focado no comportamento úmido do material, o teor de umidade foi mantido, pois também para eliminar toda a umidade do material seria necessário a utilização da estufa devido ao ambiente úmido e a limitação de espaço para espalhar este material, isto também é um limitante pois utilizaríamos todas as estufas por um longo tempo para que todo o material fosse seco.

Uma amostra foi retirada do meio da pilha longitudinal e quarteada até que fosse obtida uma massa em torno de 1 kg, que foi seca na estufa a 90 °C durante 24 horas.

Esta amostra foi utilizada para o cálculo da umidade inicial e para a caracterização granulométrica do material.

A picnometria, o peneiramento e a caracterização granulométrica por difração a laser foram executados pelos técnicos do LTM.

As partículas de *pellet feed* apresentaram tamanho menor do que se poderia separar por peneiramento, por este motivo, este material foi analisado pelo método de difração a laser no equipamento Mytos, instalado no LTM.

➤ Picnometria

A picnometria é a medição indireta da densidade aparente de sólidos em um balão volumétrico de fundo chato (picnômetro). O resultado desta análise consta na Tabela 2 com o rótulo de massa específica. As etapas do processo experimental são :

1. Medição da massa do picnômetro seco e limpo.
2. Medição da massa do picnômetro cheio de água destilada a 25 °C até seu menisco.
3. Secagem do picnômetro.
4. Medição da massa do sistema *pellet feed* + picnômetro.
5. Medição da massa do sistema *pellet feed* + picnômetro + água destilada a 25 °C.

As etapas de cálculo da densidade aparente são:

- Obter a massa de água pela diferença entre as massas do picnômetro cheio de água e vazio (2-1).
- Como a densidade da água é conhecida, pode-se calcular o volume de água adicionado. Onde este volume é o próprio volume do picnômetro.
- Determinar a massa de sólidos pela diferença do picnômetro com o *pellet feed* e vazio (4-1).
- Determinar a massa de água adicionada pela diferença do picnômetro com o *pellet feed* com e sem água (5-4).

- Com estes dados, pode-se calcular o volume de água adicionado e o volume dos sólidos. Com a massa e o volume dos sólidos, pode-se calcular a densidade.

➤ Caracterização granulométrica por difração a laser.

Nesta análise, a distribuição granulométrica das partículas é feita pela dispersão do feixe de laser incidente. A medida que o feixe interage com as partículas, as de menor tamanho dispersam a luz com um ângulo menor do que as de maior tamanho. Os dados de intensidade e dispersão são pós processados para calcular o tamanho das partículas responsáveis pelo padrão de dispersão e intensidade medidos. O tamanho das partículas é dado em função do diâmetro da esfera de volume equivalente para a dispersão. Estes dados processados são apresentados na Figura 19.

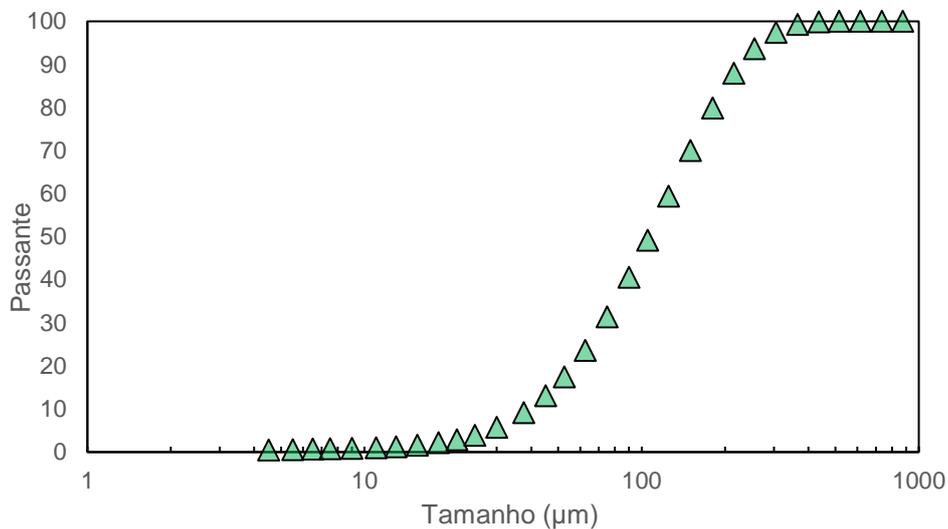


Figura 19 Gráfico da granulometria do *Pellet feed* obtida por difração a laser, apenas 3,5% do material apresentou granulometria maior que 0,3 mm.

Os dados da picnometria em conjunto com as medições de umidade e da massa inicial dos testes se encontram na Tabela 2.

As medições de umidade utilizaram a base úmida para cálculo e foram calculadas por meio da massa perdida após a secagem na estufa a 100 °C por 24 horas.

Tabela 2 Dados iniciais da amostra de *pellet feed*.

Massa (kg)	184
Umidade (%)	4,4
Massa específica (t/m ³)	5,03
Massa Sólida (kg)	176,64

O primeiro teste foi realizado com 4,4 % de umidade, valor original encontrado na amostra. Com esta informação foi definida a quantidade de água a ser adicionada aos próximos testes, representando os valores encontrados nos minérios brasileiros nos períodos de chuva e de estiagem. A Tabela 3 mostra os teores de umidade selecionados para os testes, estes valores são uma aproximação inicial pois não contabilizam as perdas ocorridas durante os testes físicos. Os valores reais serão aferidos posteriormente a cada teste a fim de se traçar a relação correta entre as métricas do ensaio.

Tabela 3 Relação do teor de umidade para os testes realizados.

Teste	Teor de umidade desejado (%)
1	4,4
2	8,0
3	10,6
4	11,6

O ciclo de ensaios de viragem consiste na homogeneização do material dentro de um tambor, realizada com pás, seguida pelo carregamento com baldes. Cada balde foi pesado antes e depois do carregamento, para aferir a massa adicionada ao vagão. Após o carregamento, ajusta-se o setup fotográfico e é liberado o pino de segurança. A manivela é girada a fim de manter-se uma velocidade constante de 10 °/s, totalizando 16 segundos de viragem. Este controle é manual e fica sujeito a variações devido às variações de tração que ocorrem durante o descarregamento.

Considerou-se como velocidade real de operação a média obtida durante os experimentos, que por sua vez, foram registrados com uma câmera filmadora GoPro HeroBlack 4 a 120 Hz, acoplada ao vagão para se ter uma vista superior do comportamento do material e uma câmera Sony Alpha 58 para o registro do desenvolvimento da viragem, da formação da pilha e da velocidade de rotação, a imagem obtida com este posicionamento é mostrada na Figura 20.

Após a viragem do vagão, a pilha formada e o material aderido ao vagão são fotografados para posterior análise digital. O material aderido ao vagão é cuidadosamente retirado, etiquetado e enviado para pesagem. Uma amostra do material da pilha é retirada para que o teor de umidade seja aferido.

3.3 Calibração de parâmetros de contato

Com o objetivo de calibrar os parâmetros de contato para o modelo de Hertz-Mindlin no software utilizado, chamado EDEM[®] foram conduzidos testes de calibração para o *sínter* e *pellet feed*. Para obter tais valores, é necessário comparar distribuição da pilha de material formada ao final do experimento de calibração e posteriormente, realizar simulações manipulando os parâmetros de contato de forma a reproduzir o resultado final.

- *Sínter feed*:

Dois experimentos foram conduzidos considerando teores de umidade de 9,5 e 13%. A amostra foi preparada e homogeneizada dentro de sacos plásticos, utilizando água do suprimento da cidade do Rio de Janeiro para o ajuste da umidade. Esta metodologia foi utilizada para os dois diferentes métodos experimentais, que foram realizados em tréplica e o resultado considerado foi obtido pela média dos três valores obtidos.

Primeiramente o teste para o ângulo de repouso foi conduzido, onde a amostra foi colocada em um cilindro com 19,5cm de diâmetro e 17cm de comprimento, formando uma pilha cônica. O ângulo de repouso da pilha foi aferido pela análise digital da imagem obtida ao final do ensaio.

O segundo teste foi conduzido utilizando o equipamento proposto pelo "Rock Processing Group" da universidade de Chalmers, Suíça, demonstrado Figura 20.

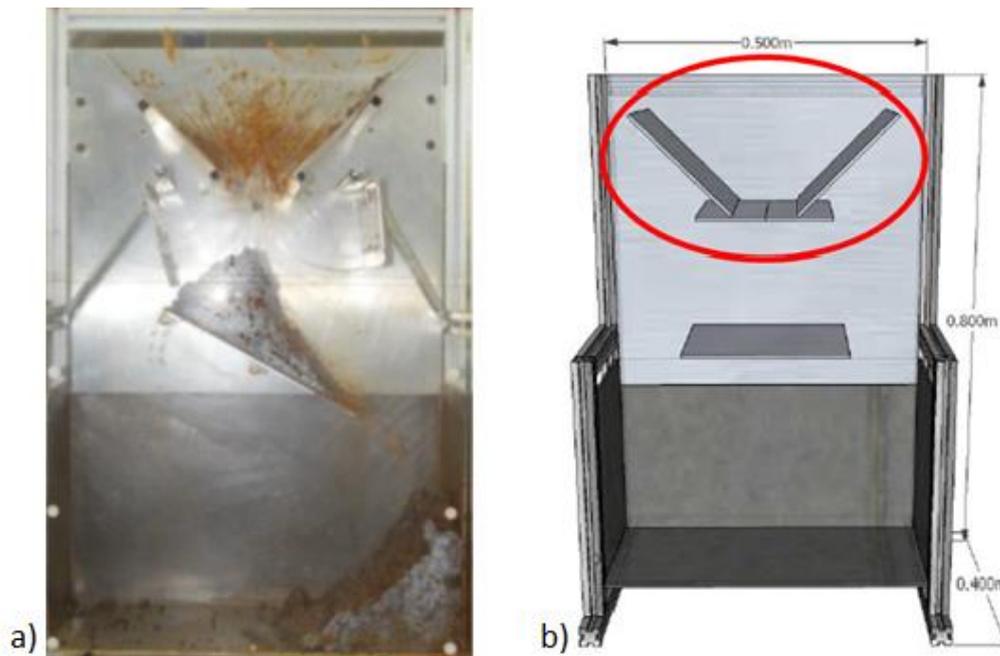


Figura 20 a) Desenho do equipamento, b) Experimento físico para 13% de umidade.

A amostra é carregada no recipiente superior, demarcado em vermelho na Figura 20. O alçapão é aberto e o material escoar pela abertura, formando o arranjo geométrico a ser analisado. As superfícies metálicas são feitas em aço e a parte frontal é feita em acrílico para visualização do arranjo final.

- *Pellet feed* :

A calibração de *pellet feed* foi realizada no equipamento em escala de um chute de minério, Figura 21a. Este equipamento foi desenvolvido por Victor Alfonso Rodriguez e Gabriel Barrios no LTM, os desenvolvedores calibraram os parâmetros de contato do DEM para o mesmo *pellet feed* estudado no presente trabalho e cederam os resultados para comparação com os parâmetros utilizados nas simulações.

Este equipamento consiste em uma correia de borracha, que transporta o material armazenado na moega e despeja sobre uma superfície metálica feita de aço. Os testes foram realizados para o material seco, e umidades 5 e 10%. Os testes foram repetidos uma vez para o material seco e com 10% de umidade, os valores médios dos ângulos obtidos foram utilizados como resultado.

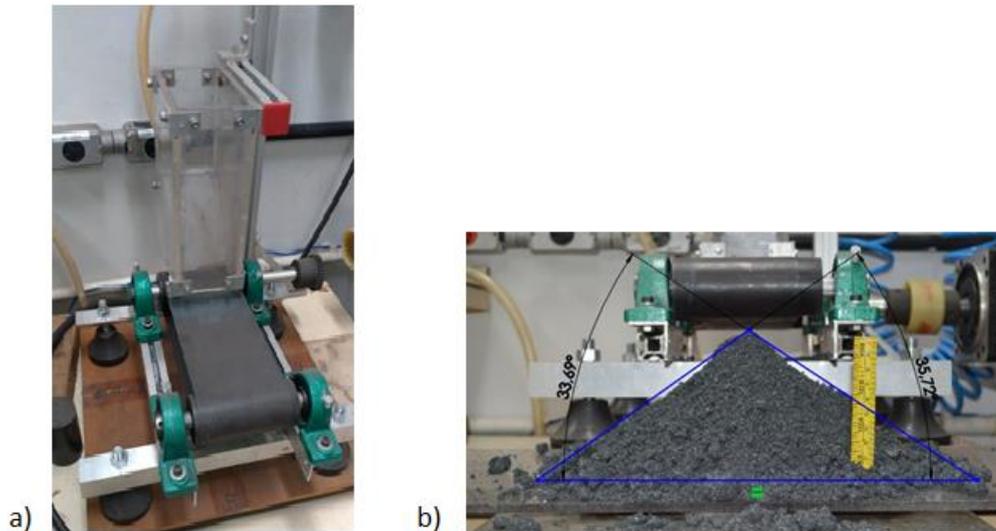


Figura 21 a) Equipamento utilizado para calibração dos parâmetros de contato, b) exemplo do resultado físico obtido no teste.

- Parâmetros de simulação :

A calibração foi feita previamente para o *sínter feed* (Carvalho, 2015). Estes parâmetros já estavam disponíveis e foram calibrados para um tamanho de partícula representativa de 60 mm, que está dentro do intervalo que desejava-se simular a adesão no EVL.

Como o material analisado se trata também de minério de ferro, mas de granulometria menor, considerou-se que não fossem interferir na análise em função da massa aderida. Pois esta depende majoritariamente da força de *pulloff* (Eq.9) que é função apenas do raio efetivo e da energia de superfície de contato.

Tabela 4 Parâmetros considerados para simulação, calibrados para o *sínter-feed* utilizando uma partícula representativa com 60 mm de diâmetro (Carvalho, 2015).

Parâmetros	Minério	Aço
Poisson	0,35	0.35
Cisalhamento	1.6×10^7	1.0×10^8
Densidade	3500	7800
Interações	Minério - Minério	Minério - Aço
Coefficiente. de restituição	0.2	0.3
Coefficiente de atrito estático	0.35	0.35
Coefficiente de atrito de rolamento	0.15	0.25

Análises posteriores mostraram que os parâmetros de contato não diferem muito para o *pellet feed*, esta afirmação pode ser confirmada com a análise da Tabela 5. Onde os parâmetros calibrados por Victor Alfonso Rodriguez e cedidos para este trabalho estão exemplificados. O trabalho de Rodriguez ainda está em fase de preparação para publicação e não se encontra na literatura.

Tabela 5 Parâmetros calibrados para *pellet feed*.

Interações	Minério - Minério	Minério - Aço
Coefficiente. de restituição	0.3	0.33
Coefficiente de atrito estático	0.40	0.40
Coefficiente de atrito de rolamento	0.15	0.25

3.4 Estratégias e plano de simulação no DEM

Como ficou evidente desde a primeira simulação, devido ao imenso número de partículas que seria necessário para representar a granulometria média do material do *pellet feed* (0,1mm), seria necessário um número superior a 220 bilhões de elementos para tal, o que levaria, no melhor dos casos, mais de 18 mil anos para o término do cálculo de 15 segundos de simulação, evidencia-se a necessidade de criar um elemento representativo de maior tamanho, mas com mesmo comportamento do material fino para que as simulações sejam factíveis. Este comportamento foi calibrado com a metodologia supracitada.

A forma das partículas representativas também foi simplificada pois, mesmo que seja possível a representação de complexas geometrias (Ferrellec & McDowell, 2010), estas abordagens aumentam o tempo de simulação, um expressivo limitante no presente trabalho. A geometria foi escolhida para representar as irregularidades presentes na superfície do material e mesmo que não seja fidedigna a original, os parâmetros calibrados aproximam seu comportamento ao comportamento real. O protótipo da partícula e o diagrama exemplificando sua construção estão apresentados na Figura 22.

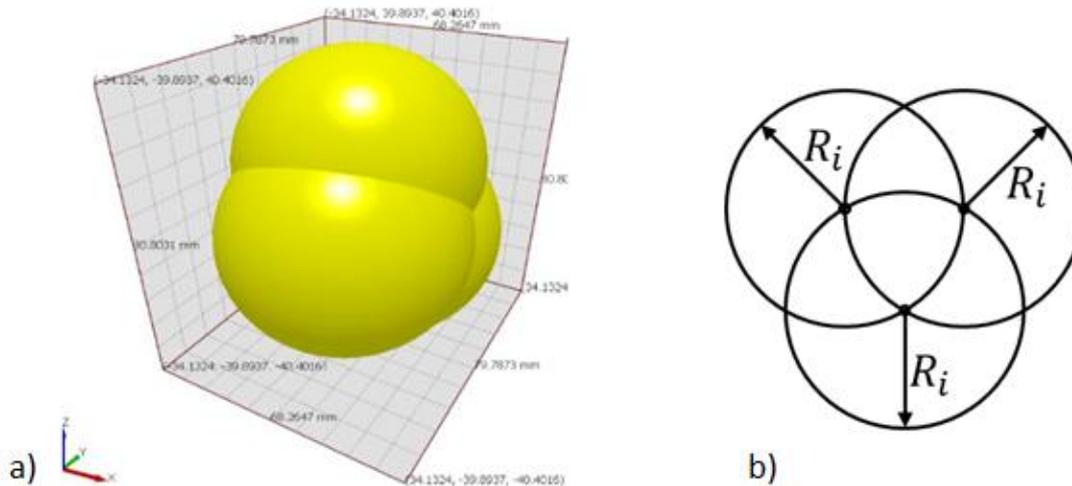


Figura 22 a) Geometria do protótipo de partícula utilizada nas simulações DEM b) Diagrama do arranjo das esferas onde todas tangenciam o centroide das outras duas.

As partículas foram originalmente criadas utilizando um diâmetro de 30 mm. Para cada teste o protótipo original foi escalonado para se adequar ao tamanho desejado.

O passo de tempo foi fixado em 29% do passo de tempo de Rayleigh para todas as simulações. Esta porcentagem foi escolhida a partir de uma análise de sensibilidade, onde foram testados diversos passos de tempo a fim de escolher a maior porcentagem onde as partículas se estabilizam. Esta análise tem o objetivo de reduzir o tempo consumido pelo cálculo.

Ao início da simulação, inicia-se a geração de partículas em uma superfície criada 20 cm acima do vagão, com o intuito de simular a queda do material e com isso sua compactação, as partículas são inicializadas com uma velocidade de queda igual a 4 m/s. Esta velocidade foi estipulada para igualar-se a uma queda de 1 m de altura. Após a geração dos 190 kg definidos inicialmente e da estabilização desse material, o vagão começa a rotacionar com uma velocidade angular de 12 °/s.

A Tabela 6 foi criada relacionando o tamanho da partícula simulada, o tempo total de cálculo e o intervalo do número de partículas para representar 0,1 a 0,2 % da massa total. Os tamanhos da partícula foram estipulados para que fique claro a influência do tamanho da partícula na variação da massa aderida em função do ψ_{JKR} .

Tabela 6 Relação dos casos a serem simulados por DEM.

Caso	Diâmetro das partículas	Número de partículas	Tempo estimado (minutos)	Intervalo de partículas ¹ .
1	10,04	211000	420	210 - 420
2	15,20	61000	120	61-122
3	20,07	25600	60	26-52
4	30,00	7600	9	7-14

¹Número de partículas entre a faixa de 0,1 a 0,2 % da massa aderida em relação a massa total.

4. Resultados e Discussões

Esta seção é dividida em 3 partes, onde primeiramente serão apresentados os testes físicos e as considerações relevantes a resultado e algumas observações feitas durante e após os ensaios. Depois será mostrado os resultados do DEM e por final será proposto um modelo de relação entre os resultados numéricos do DEM e os físicos utilizando o EVL.

4.1 Testes de viragem

Os testes de viragem apresentaram grande dificuldade técnica devido, a massa requerida pelo teste e a altura que esta precisava ser erguida. O material foi carregado utilizando-se baldes, cada um com aproximadamente 10 kg, sendo necessário em torno de 20 repetições para completar o carregamento do material.

A massa aderida no vagão em cada teste foi quantificada, por pesagem, e a umidade aferida, a partir da retirada de amostras. A Tabela 7 relaciona os resultados obtidos juntamente com a codificação que foi utilizada para identificar cada teste.

Tabela 7 Resultados dos testes de viragem para o *pellet feed* explicitando a codificação utilizada e a relação entre a umidade e a porcentagem mássica aderida.

Teste	1	2	3	4	5
Massa Total (kg)	184,00	192,00	191,26	190,58	188,44
%Umidade (%)	4,40	8,70	10,10	11,20	12,20
Massa aderida (g)	0,19	0,26	0,28	0,31	0,32
Porcentagem aderida (%)	0,11	0,13	0,15	0,16	0,17

Relacionando graficamente os resultados da porcentagem mássica aderida com o teor de umidade, obteve-se o gráfico representado pela Figura 23.

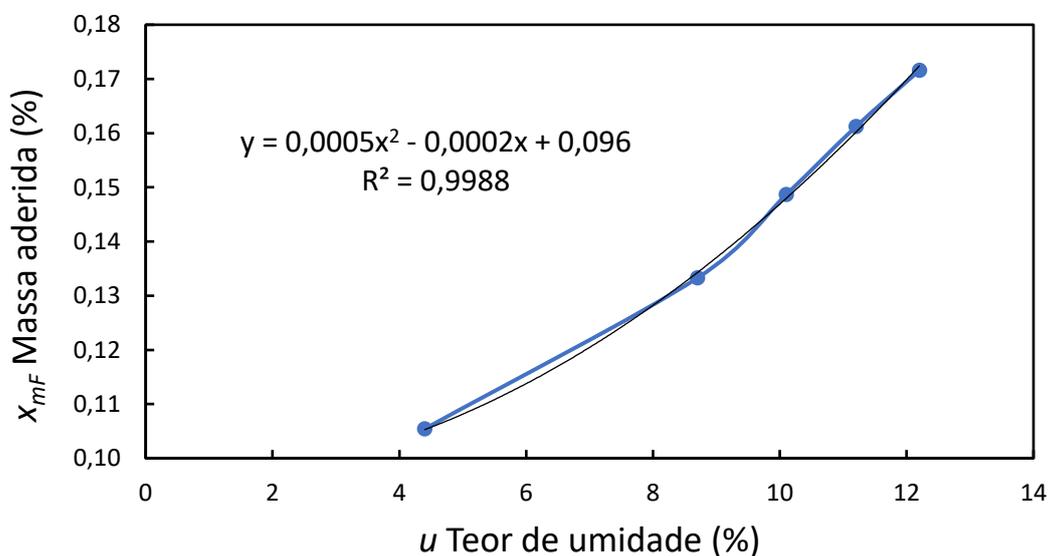


Figura 23 Relação entre o Teor de umidade(u) e a porcentagem da massa aderida (x_{mF}) ao fundo do vagão e a curva polinomial que descreve o resultado obtido.

Observando a tendência da curva apresentada na Figura 23 foi possível correlacionar a massa aderida com a umidade presente no material pelo polinômio presente na Equação 22.

$$x_{mF} = 5,38 * 10^{-4} * u^2 - 0,023 * 10^{-2} * u + 0,096 \quad \text{Equação 22}$$

Onde x_{mF} representa a porcentagem mássica obtida nos testes físicos e u o teor de umidade presente no material.

A Equação 22 apresenta uma boa descrição ao comportamento da curva, evidenciado pelo R2 igual a 0,998.

Vale ressaltar também alguns dos efeitos observados nos testes, como o desmoronamento da carga durante o descarregamento conforme ilustrado na da Figura 24.

Comportamento semelhante também foi observado nas simulações em DEM, ao se utilizar o valor de 20 J/m² para a interação partícula-partícula e 10 J/m² para partícula-geometria, como observado na Figura 25. Foram feitos testes iniciais com estes parâmetros de modo a representar o comportamento do material durante o descarregamento, mas a combinação entre estes parâmetros fugiria do escopo do presente trabalho, que consiste em analisar apenas a massa aderida ao equipamento.

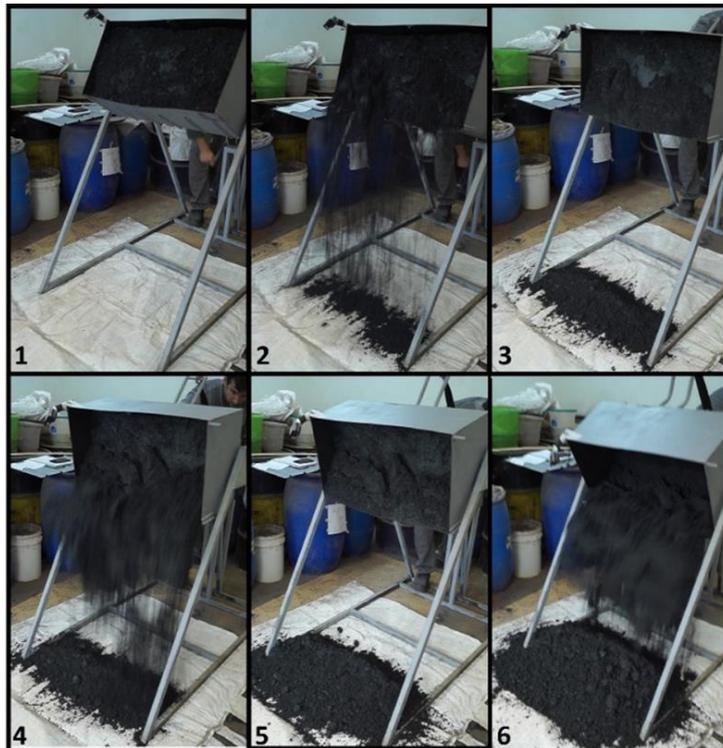


Figura 24 Demonstração do processo de viragem do material com 10% de umidade com características similares ao comportamento do material úmido real. 1)0 s, 2)1 s, 3)2 s, 4)4 s, 5)5 s, 6)8 s.

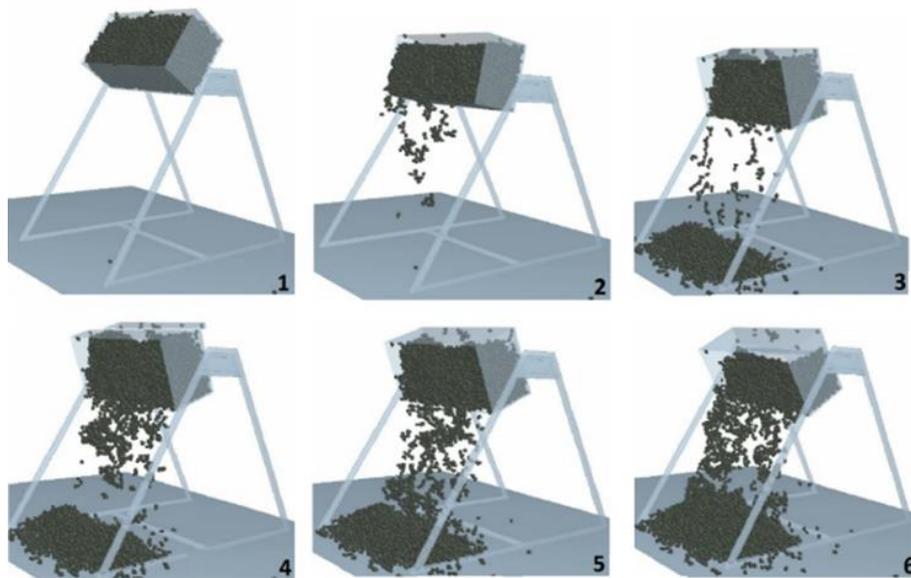


Figura 25 Comportamento coesivo observado nas simulações com partículas de 30mm.

Dos ensaios de viragem, observou-se também uma possível influência que a soldagem e a zona termicamente ativada (ZTA) têm na adesão das partículas. A ZTA se apresenta como uma zona de alta rugosidade e onde a corrosão é mais acentuada.

Estes dois fatores influenciam positivamente na adesão do material, isto pode ser observado fazendo a comparação entre a Figura 26 e a Figura 27, onde as zonas demarcadas em vermelho apresentaram maior adesão de material.



Figura 26 Zonas que apresentaram corrosão devido a soldagem demarcadas em vermelho.



Figura 27 Efeito da ZTA, demarcada em vermelho e da corrosão localizada na adesão do material com 4,4 % de teor de umidade.

A estrutura do EVL sofreu deformações elásticas durante os ensaios, devido a grande massa a ser suportada. O efeito ocorreu principalmente na face voltada para a base do equipamento durante a viragem. A deformação da chapa desta face é evidenciada na Figura 28.



Figura 28 Deformação do EVL durante o descarregamento, as linhas vermelhas indicam a posição retilínea das faces.

Posteriormente, propôs-se o acréscimo de reforço estrutural na chapa de forma a minimizar a deformação. Tais reforços horizontais foram adicionados à estrutura e podem ser observados na Figura 29.



Figura 29 Reforços estruturais para evitar a deformação, instalados após os testes.

4.2 Resultados da simulação com DEM

Os testes foram iniciados para as partículas de 30 mm, onde foram utilizados valores de 1,4 a 4 J/m² com o intuito de se ter uma noção inicial dos parâmetros a serem utilizados. Devido ao rápido tempo de cálculo, essa granulometria mais grossa foi escolhida para agilizar o processo de escolha inicial dos parâmetros dos testes seguintes, com partículas menores.

Ao início já havia a suspeita que as energias de interface diminuíssem junto com a granulometria da partícula. Fato confirmado ao fim dos testes.

Essa suspeita foi levantada levando em conta a superfície relativa de contato e o número total de contatos. Ambos crescem inversamente proporcionais ao tamanho da partícula. Com isso, a energia de superfície deve diminuir para compensar este efeito, para que se tenha a mesma energia total de superfície.

Os testes com 20, 15 e 10 mm vieram a seguir, onde tentou-se manter o resultado entre a faixa de 0,1 a 0,2 % de massa aderida, resultado obtido no experimento físico.

A relação entre os resultados obtidos e os parâmetros coesivos para o contato partícula-partícula e partícula-geometria (aço) são apresentados na Tabela 8:

Tabela 8 Resultados obtidos nas simulações, mantendo igual o parâmetro coesivo para as interações partícula-partícula e partícula-geometria.

Caso e diâmetro.	Simulação	γ_{jkr} Partícula- Partícula	γ_{jkr} Partícula- Geometria	Porcentagem mássica aderida (%)
1 (10 mm)	1	0,1	0,1	0,00
	2	0,5	0,5	0,04
	3	0,7	0,7	0,09
	4	0,9	0,9	0,18
	5	1,1	1,1	0,28
3 (15 mm)	6	0,3	0,3	0,00
	7	0,5	0,5	0,01
	8	0,8	0,8	0,04
	9	1	1	0,09
	10	1,2	1,2	0,10
5 (20 mm)	11	1,35	1,35	0,18
	12	1,5	1,5	0,21
	13	0,7	0,7	0,00
	14	1,5	1,5	0,06
	15	1,7	1,7	0,12
7 (30 mm)	16	2	2	0,16
	17	2,5	2,5	0,22
	18	3	3	0,62
	19	5	5	1,96
	20	1,3	1,3	0,00
7 (30 mm)	21	2	2	0,04
	22	3	3	0,12
	23	3,5	3,5	0,34
	24	4	4	0,24

A representação gráfica dos resultados na Figura 30 evidencia a dependência da massa aderida com o diâmetro da partícula representativa.

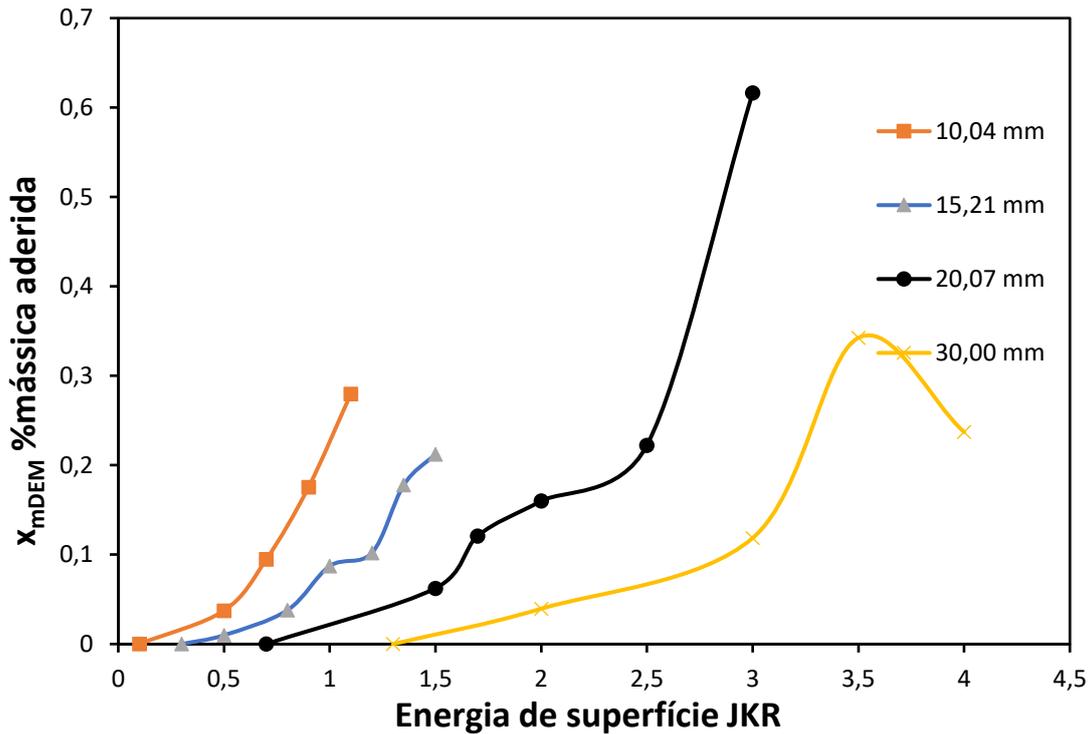


Figura 30 Representação gráfica dos resultados obtidos e exemplificados na tabela 7.

As variações para 30 mm são devido ao baixo número de partículas aderidas, na faixa de 7 a 20 partículas. Este pequeno número não representa estatisticamente os resultados e isso confere um aspecto ruidoso ao resultado. Mesmo assim a curva segue a mesma tendência dos tamanhos menores.

O aumento do diâmetro das partículas influencia na massa que o contato deverá suportar para que a partícula permaneça aderida a superfície. Este aumento no número de partículas também influencia positivamente no número total de contatos e na superfície total de contato entre as partículas.

4.3 Modelo empírico para massa aderida

A partir dos resultados do DEM expostos na Tabela 9 e baseados nas equações 8 e 17, foi proposto um modelo matemático que relaciona o teor de umidade do *pellet feed* com a energia de interface denotada como o parâmetro γ_{JKR} .

O cálculo deste modelo empírico não considerou os testes de 30 mm, pois estes representaram um resultado ruidoso. Esta escolha foi visando minorar os erros do modelo.

Primeiramente foi necessário descrever o comportamento massa aderida em relação ao tamanho da partícula (dp), expresso em mm, e da força de coesão específica para o modelo JKR (γ_{JKR}), expresso em J/m^2 . Os valores obtidos para o presente modelo foram ajustados minimizando o erro quadrático (EQ) entre x_m e x_{mDEM} utilizando o solver GRG não linear, disponível no Excel.

A formulação da curva é apresentada na Equação 23.

$$x_m = 0,0158 * e^{24,268 * \frac{\gamma_{JKR}}{dp}} \quad \text{Equação 23}$$

Onde x_m denota a porcentagem da massa aderida prevista pelo modelo empírico, a constante exponencial tem grandeza de m^3/J e o termo pré-exponencial é um fator adimensional, ambas constantes foram calculadas para minimizar-se o EQ.

Representando graficamente os resultados obtidos pelo modelo, junto com os obtidos pelo DEM, pode-se observar uma boa correlação entre as tendências das curvas exibidas na Figura 31 .

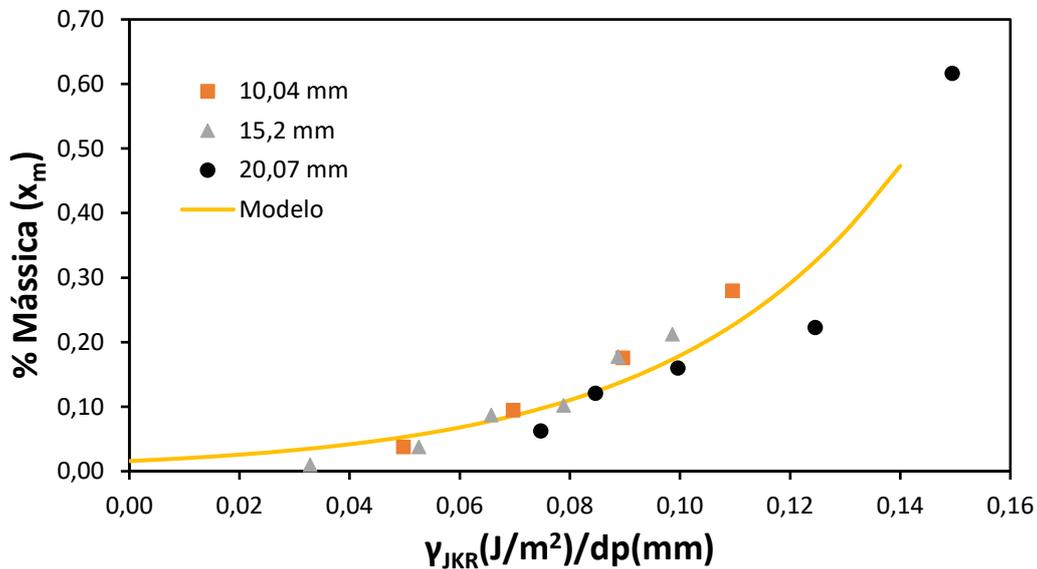


Figura 31 Comparação entre o resultado do modelo proposto e o obtido pelo DEM.

O resultado pode ser melhor comparado observando a Figura 32, onde é apresentada a comparação entre o x_m (porcentagem mássica aderida) calculado pelo modelo e o x_{DEM} (porcentagem mássica aderida) obtido nas simulações.

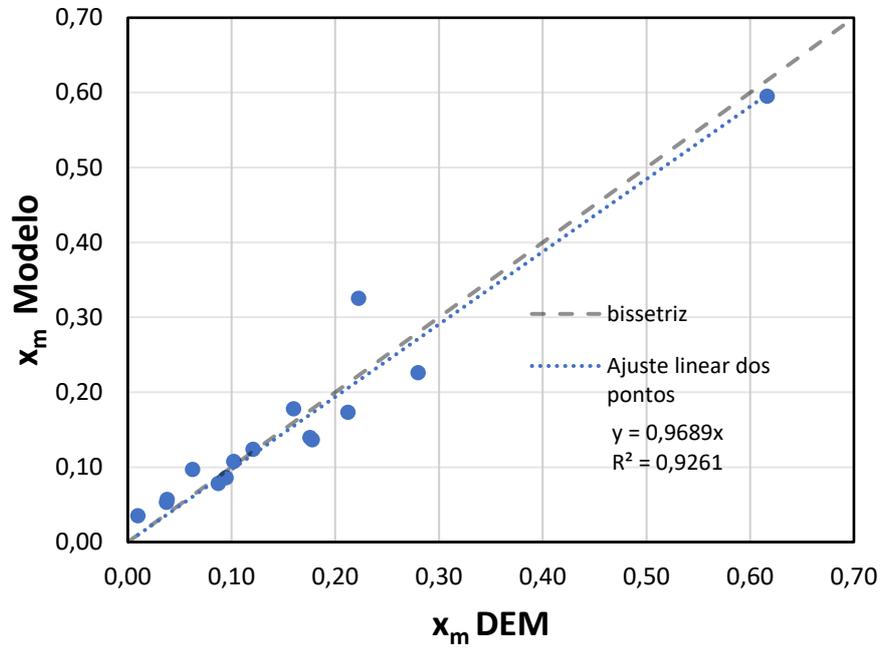


Figura 32 Nuvem de pontos relacionando o modelo proposto com o resultado do DEM.

Igualando a Equação 22 com a Equação 23, pode-se relacionar o teor de umidade com a energia de interface do modelo JKR na forma da Equação 24.

$$\gamma_{JKR} = \ln(0,03405 * u^2 - 0,0156 * u + 6,075)^{\frac{dp}{24,268}} \quad \text{Equação 24}$$

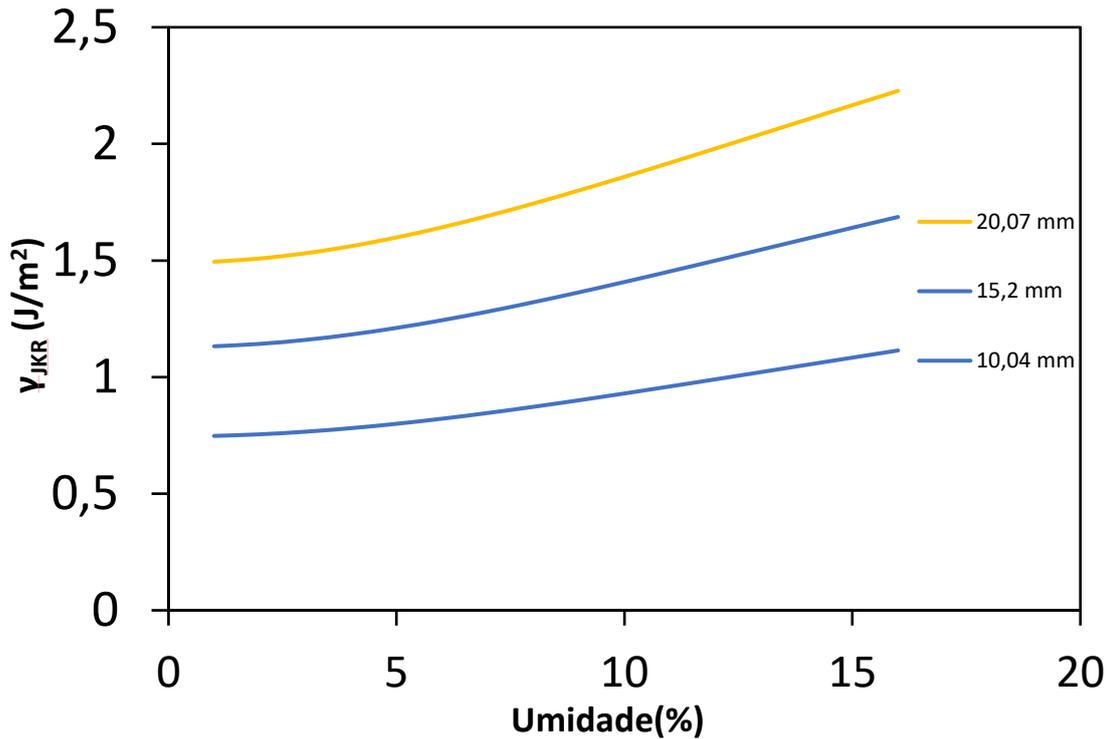


Figura 33 Relação entre a massa aderida e a energia de interface para diferentes granulometrias do DEM.

Com este resultado pode-se por exemplo, prever o comportamento do *pellet feed* estudado para diferentes granulometrias, sem a necessidade da calibração deste parâmetro para tal granulometria.

Na Figura 34, foram adicionadas as curvas que descrevem o comportamento do *pellet feed* para partículas de 5, 40 e 60 mm. Ou seja, para simular a massa aderida no Teste 1, com 4,4 % de umidade, o Y_{JKR} para uma partícula de 5 mm seria igual a 0,4 J/m², já para uma umidade de 13 %, deve-se utiliza 0,5 J/m².

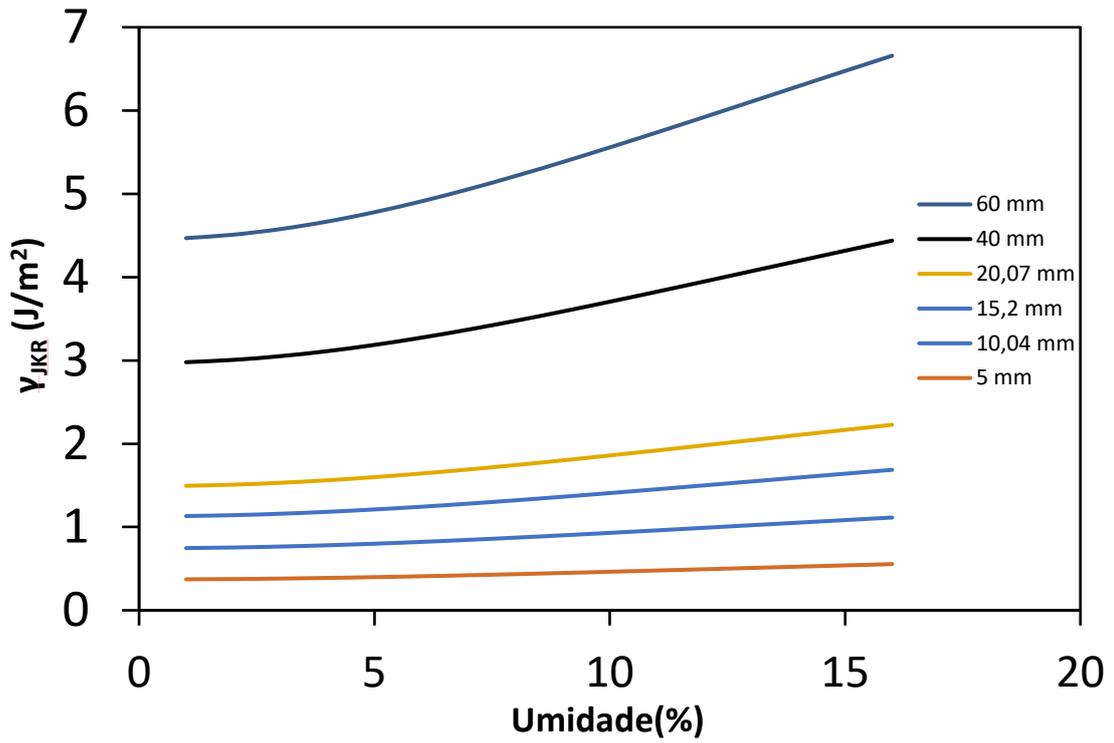


Figura 34 Representação do comportamento para partículas de tamanhos diferentes aos testados.

5. Conclusões

O modelo físico em escala do vagão e do sistema de viragem apresentou um bom desempenho e comportamento similar a operação industrial de descarregamento, onde foi possível observar em escala laboratorial fenômenos relatados pela indústria como a adesão do material úmido e o aumento do material aderido com o aumento da umidade. Este modelo pode ser utilizado para futuros testes em escala de geometrias e técnicas de viragem em escala laboratorial.

O modelo também pode ser útil não só para testes de adesão, mas também para testes de queda, facilitando o manejo de grandes massas de material.

Foi possível observar e registrar o efeito do teor de umidade na adesão do *pellet feed*, isto possibilitou a calibração do modelo em função da massa aderida do material ao final do teste.

As simulações do DEM, utilizando o modelo JKR para descrever a energia de interface, possibilitaram a representação do efeito da adesão, manipulando o parâmetro coesivo JKR.

Aliando os resultados da simulação com os testes físicos foi possível traçar uma correlação entre a umidade, o γ_{JKR} e a granulometria utilizada para a simulação, esta relação se faz útil como ponto de início para a calibração do parâmetro coesivo, onde é necessário o uso de partículas representativas com tamanho maior que o real.

Vale ressaltar que este modelo empírico de correlação é particular para o caso estudado.

Bibliografia

Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016, **NBR 11691: Vagão ferroviário – Classificação, identificação e marcação**, Rio de Janeiro, Brasil.

BARTHEL, E. **Adhesive elastic contacts – JKR and more**. Journal of Physics, p. 41, 2008.

CARVALHO, L. C. D. S. *et al.* **Analysis of capillarity cohesion models for granular flow**. Pará. 2014.

CARVALHO, R. M.; TAVARES, L. M. **Dynamic modeling of comminution using a general microscale breakage model**. Computer-aided Chemical Engineering, 2009.

CSN. **Minério de Ferro**, 2018. Disponível em: <http://www.csn.com.br/conteudo_pti.asp?idioma=0&tipo=61062&conta=45>. Acesso em: 18 ago. 2018.

CUNDALL, P. A. **A discrete numerical model for granular assemblies**. Geotechnique, 1979. 47-65.

DEMSOLUTIONS. **EDEM2.6 User Guide**. Edinburgh. 2014.

DEMSOLUTIONS. **EDEM2.7 Coupling Interface programming guide**. Edinburgh. 2015.

DEMSOLUTIONS. **DEM, 2018**. Disponível em: <www.demsolutions.com>.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PESQUISA MINERAL. **Anuário mineral Brasileiro**. Departamento Nacional de Pesquisa Mineral. 2016.

FELICETTI, M. A. **Determinação da força de adesão entre partículas e uma superfície aplicando a técnica centrífuga**. Universidade Federal de São Carlos. São Carlos. 2004.

FERELLEC, J.-F.; MCDOWELL, G. R. **A method to model realistic particle shape and inertia in DEM**. Granular Matter, v. 12, p. 459–467, 2010.

GRAÇA, L. M. *et al.* **Effect of the Morphological Types in Grinding of Iron-Ore Products**. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, p. 324-331, 2015.

GRIMA, A. P. **Quantifying and modelling mechanisms of flow in cohesionless and cohesive granular**. University of Wollongong. Wollongong. 2011.

HERTZ, H. H. **Ueber die Berührung fester elastischer Körper**. In: HERTZ, H. H. Die Lehre von der Elastieität und Festigkeit. Prag: [s.n.], 1867. p. 43.

HEYL & PATTERSON. **Railcar dumping systems [Brochura]**. Pennsylvania. 2014.

JOHNSON, K. L.; KENDALL, K.; ROBERTS, A. D. **Surface Energy and the Contact of Elastic Solids**. Proc. R. Soc. Lond. A, p. 301-313, 1971.

KAPELLE, R. **Calibration and Verification experiments for Discrete Element Modeling of cohesive materials**. Delft University of Technology. Delft. 2015.

KENDALL, K, ALFORD, M. & BIRCHALL, J.D. **The strength of green bodies**, Br Ceram. Proc, v.37, p. 255-265, 1986.

LICHTER, J. *et al.* **New developments in cone crusher performance optimization**. Minerals Engineering, v. 22, p. 613-617, 2009.

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES PORTOS E AVIAÇÃO CIVIL. **Balanço 2017**, 2017. Disponível em: <<http://www.transportes.gov.br/ultimas-noticias/6813-ferrovias->

transportam-538,8-milh%C3%B5es-de-toneladas-em-2017,-um-recorde-dos-
%C3%BAltimos-12-anos.html>. Acesso em: 10 set. 2018.

MRS. Aplicação de antiaderente em vagões GDT. 2010.

NOGUEIRA, L. R. *et al.* **Uma metodologia para a simulação de chutes de transferência aplicação para o minério de ferro.** 41º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 12º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, p. 1-12, 2011.

PERDIGÃO, J. R. D. C. Aplicação de antiaderente em vagões GDT. 2010.

RAJAMANI, R. K. *et al.* **Discrete element analysis of tumbling mills.** Powder Technology, v. 109, n. 1-3, p. 105 - 112, 2000.

RANDON IMPLEMENTOS S/A. **Arquivos Diversos.** Caxias do Sul. 2015.

RUMPF, H., **Particle Adhesion**, em: Sastra, K.V.S. (Ed.) agglomeration 77, American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, New York, p. 97-129, 1977.

TRENTIN, F. **Verificação estrutural utilizando o MEF em perfis na construção de vigas centrais em vagões ferroviários do tipo gôndola.** CAXIAS DO SUL. 2015.

VALE. **Mineração Minério de Ferro e Pelotas**, 2018. Disponível em: <<http://www.vale.com/brasil/PT/business/mining/iron-ore-pellets/Paginas/default.aspx>>. Acesso em: 14 Setembro 2018.