

APLICAÇÃO DO MÉTODO DOS ELEMENTOS DISCRETOS PARA MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO DE MINÉRIO DE MANGANÊS

Hugo Mesquita, PCMEC/UNB, hugomsq@hotmail.com
Pedro Henrique da Silva Macias, NDAE/UFPA, henriquemacias@gmail.com
André Luiz Amarante Mesquita, NDAE/PPGINDE/UFPA, andream@ufpa.br
Kelvin Alves Pinheiro, PPGEM/UFPA, kelvin.pinheiro@itec.ufpa.br
Alexandre Luiz Amarante Mesquita, PPGEM/PPGINDE/UFPA, alexmesq@ufpa.br
Helder Silva Souza, CONSULTOR INDEPENDENTE, souzahelder@ymail.com
Arildo Henrique de Oliveira, VALE, arildo.oliveira@vale.com
Hugo Leonardo Santos de Brito, VALE, hugo.brito@vale.com

Resumo: A planta de processamento de manganês localizada em Carajás possui operações de britagem, escrubagem, peneiramento e classificação. A fração granulada e o sinter feed compõem o portfólio de produtos da planta. A tipologia Pelito Manganésífero Siltito (PMS) tem relevante participação no depósito e apresenta características de alta coesividade, aumentando a dificuldade nas transferências. Com o objetivo de simular o comportamento do escoamento das partículas do minério, utilizou-se o Método dos Elementos Discretos (DEM). De acordo com os resultados das simulações do fluxo do minério através dos chutes e silos foi possível propor adequações na geometria e inclinações dos equipamentos, atendendo não somente a capacidade de projeto do sistema de transferência, mas também para obter um fluxo contínuo, centralizado e alinhado evitando entupimentos e possíveis desalinhamentos. As propriedades do minério foram determinadas por meio de ensaios em célula de cisalhamento e em caixas de fluxo, para calibração dos modelos. Os resultados dos testes de caracterização, modelamento e simulação numérica são apresentados e discutidos.

Palavras-chave: Método dos elementos discretos, minério de manganês, chute de transferência, escoamento de minérios, silo.

USE OF D.E.M. IN THE MODELLING AND SIMULATION OF THE MANGANESE ORE FLOW

Abstract: In the manganese mine located in Carajás, the ore is processed by equipment such crushers, scrubbers, screens and a spiral classifier. The lump ore and the sinter feed make up the portfolio of products from the plant. The Pelite Siltite (PMS) lithology has a relevant presence in the deposits and characterized by its cohesiveness, which has a significant difficulty on handling transferences. In order to simulate the behavior of the flow of the ore particles, we used the Discrete Element Method (DEM). According to the simulation results of the ore flow through chutes and silos it was proposed adjustments in geometry and inclinations of the equipment, in order to comply with the designed capacity of the transfer system, and also to achieve a continuous, centered and aligned flow avoiding clogging and possible misalignments. The properties of the particulate material were obtained by a shear cell and visual tests, with box flow models to calibrate the DEM. Results of characterization, modeling and simulation of particle flow tests are presented and discussed.

Keywords: Discrete Element Model, manganese ore, transfer chutes, ore flow, silo.

1. INTRODUÇÃO

A planta de processamento de Manganês do Azul, na Serra dos Carajás-PA, beneficia os litotipos Minério de Manganês Maciço (MMM), Minério de Manganês Detrítico (DET), Pelito Manganésífero (PMN), e em menor proporção (pela dificuldade de manuseio e baixo teor dos

produtos) diluído com litotipos mais ricos o Pelito Manganésífero Siltito (PMS). Este último é constituído por elevada presença de argilas que tornam o minério coesivo, além de formar polpas com alta viscosidade.

O circuito da planta de processamento mineral é constituído por britagem, escrubagem para desagregação, peneiramento e classificação (classificador espiral). Os produtos produzidos são o granulado, que corresponde a fração grossa entre 75 e 9 mm, e o sinter feed, que corresponde à fração entre 9 e 0,15mm. Todo material abaixo de 0,15mm é descartado como rejeito nas barragens. Com a operação da mina, o minério de alto teor vem sendo exaurido, restando grandes quantidades de minério de baixo teor, principalmente do PMS, que atualmente é beneficiado diluído em pequenas proporções com minério de alto teor. Isto ocorre devido ao fato que o PMS não apresenta produtos com teores adequados, além da dificuldade de manuseio devido à alta presença de argilas, que tornam o minério coesivo, com elevada degradação do granulado além de formar polpas com alta viscosidade.

Devido às características de elevada coesividade dos minérios de manganês particularmente do litotipo PMS foram realizados estudos de simulações utilizando a modelagem de escoamento de partículas por meio do método dos Elementos Discretos (DEM – Discrete Element Method) (Cundall e Strack, 1979; Zhou et al., 2007, 2008; Cleary, 2010). Atualmente, o DEM está cada vez mais sendo usada no projeto de chutes (Kessler e Prenner, 2009; Kim, 2010; Assumpção et al., 2015) e silos (Ketterhagen et al, 2009; GonzálezMontellano et al., 2012). Com esta ferramenta de simulação pode-se prever e estimar o comportamento do escoamento do minério através dos chutes e silos, e assim possibilitar, antecipadamente e preventivamente, ajustes na geometria e inclinações dos equipamentos. Desta forma, permitindo atender a capacidade de projeto do sistema e obter um fluxo contínuo, centralizado e alinhado, além do propósito de diminuir o impacto do minério na estrutura dos equipamentos, otimizando a vida útil dos componentes, minimizando o desgaste, perdas e evitando condições de entupimento e possíveis desalinhamentos, entre outros benefícios. Contudo, para obtenção de resultados confiáveis, é indispensável a calibração do modelo numérico (Levy e Ooi, 2011).

Assim, os objetivos do presente trabalho são apresentar e discutir os resultados dos testes experimentais para determinação das propriedades de escoamento do minério particulado do litotipo PMS; e também apresentar os resultados de simulação do escoamento do minério nos projetos otimizados de chutes, moegas e silos utilizando o Método dos Elementos Discretos.

As propriedades do material particulado foram obtidas por meio de ensaios em célula de cisalhamento, para obtenção de atrito com a parede e ângulo de atrito interno, e em caixas de fluxo, para calibração do método DEM. O ângulo mínimo de parede para silos foi calculado utilizando os dados dos ensaios em célula de cisalhamento em conjunto com a teoria de Jenike (Jenike, 1964) e confirmados pelo método DEM. Para chutes, a condição dinâmica exigiu o cálculo somente pelo DEM.

2. MATERIAIS E MÉTODOS (METODOLOGIA-K)

A partir de testes industriais de beneficiamento do litotipo PMS, amostras foram coletadas para caracterização do minério particulado. A granulometria foi realizada em acordo com norma ABNT NBR 7181 (1984), a massa específica do sólido foi obtida obedecendo-se a norma ABNT NBR 6508 (1984) e a compressibilidade da fração menor que 3 mm do minério foi obtida conforme norma NBR 6122 (2010). Para esta compactação foi utilizada uma máquina universal de ensaios, marca SERVO PULSER, modelo EHF – EM100K1-020-1A, eletromecânica, com capacidade máxima de 100 kN e velocidade de deslocamento do eixo de 1 mm/min.

Após a compactação do material, foram realizados ensaios com a fração menor que 3 mm em célula de cisalhamento Jenike (Figura 1a) de 95 mm para obtenção de ângulo de atrito com a parede, ângulo de atrito interno (ϕ_i) e ângulo de atrito interno efetivo (ϕ_e) empregando-se a norma ASTM D-6128-97 (1997). O ensaio consiste em se registrar a tensão cisalhante limite para o escoamento do material (τ_c) em função da tensão normal de consolidação (σ_c), conforme Figura 1b, permitindo a análise qualitativa da facilidade ou não de escoamento do material através da função de fluxo - definida como a razão entre a tensão principal do escoamento (σ_1) e a tensão não confinada (σ_c). Maiores detalhes sobre a teoria e a utilização de células de cisalhamento podem ser encontrados em ASTM D-6128-97 (1997) e Schulze (2007).

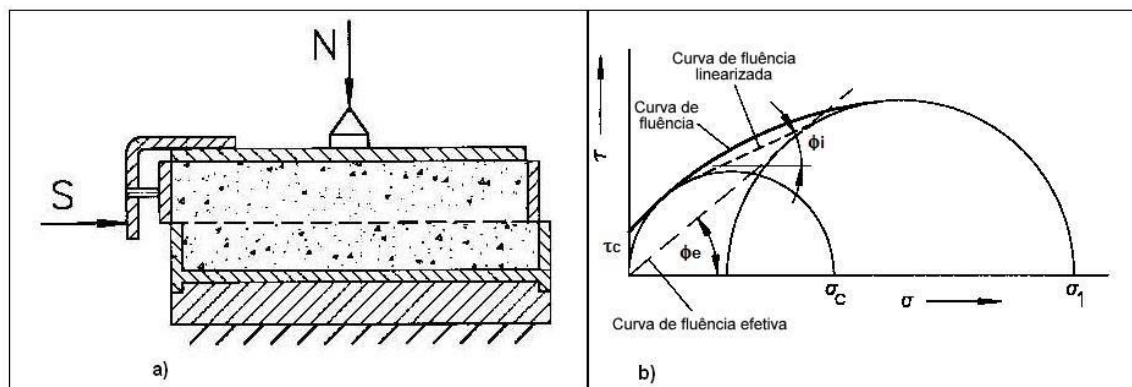


Figura 1 – Célula de cisalhamento. a) Esquema. b) Resultados de ensaios (adaptado de ASTM D-6128-97, 1997).

Para visualização do comportamento do material e a calibração do DEM foram realizados ensaios de visualização do escoamento do minério em pequenos modelos do tipo caixa (“box flow”) que é uma prática bastante utilizada na calibração de modelos DEM (Li et al., 2005; Coetzee e Els, 2009). No presente trabalho utilizou-se um caixa de seção 80 x 400 mm e altura de 250 mm, com fundo na forma de uma válvula guilhotina, permitindo tanto escoamento lateral, quanto escoamento central e com abertura regulável. Também foi empregada uma caixa de fluxo de grande porte (“Big Box Flow”, concebido pela empresa Solve Engenharia) para melhor representação do escoamento. Essa caixa possui dimensões de 500 x 1000 mm, com altura de chute variando de 1 a 4 m. Para as simulações através da modelagem DEM foi utilizado o software Bulk Flow Analyst - BFA, versão 11.0.

Após a etapa de ensaios de caracterização e calibração do modelo DEM foi realizada uma campanha de verificação de projetos de chutes e silos a partir dos resultados obtido das simulações no DEM. As transferências analisadas foram: descarga na moega de alimentação de ROM e escoamento na moega; chute de alimentação para o britador primário; descarga do britador prismático para correia de recepção; escoamento em divisor de fluxo para a alimentação de peneiras e silo de sinter feed.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Ensaios de Caracterização

A Figura 2 apresenta a distribuição granulométrica da amostra de PMS ROM e sinter feed e Tabela 1 o resultado para a massa específica real do minério. A Figura 3 apresenta o resultado para o ângulo de atrito com a parede, instantâneo e com uma consolidação de 24h, para

utilizando a fração < 3,0 mm na célula de cisalhamento e com umidade de 30%. Os ensaios mostraram um ângulo de 29,7 graus, significando um fator de atrito do material com ao aço de 0,57, para a condição instantânea e um ângulo de 56,4 graus, gerando um fator de atrito de 1,5, para a condição de consolidação de 24h. Considerando a metodologia estabelecida por Jenike para projeto de silos (Jenike, 1964), este valor de ângulo de atrito na parede com consolidação de 24 h inviabiliza qualquer projeto de silo que considere o fluxo mássico. O valor do ensaio instantâneo foi empregado na simulação dos chutes.

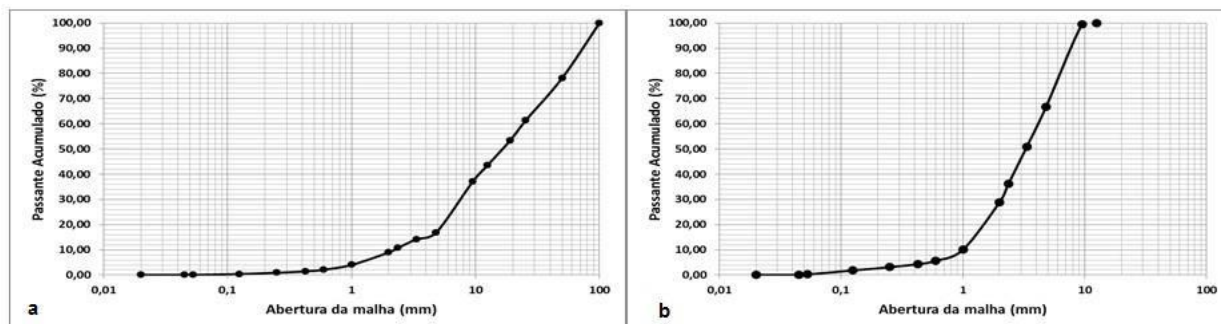


Figura 2 – Análise granulométrica da amostra PMS - a) ROM, b) sinter feed.

Tabela 1 – Massa específica real do manganês PMS.

Material	Manganês PMS		
Massa específica real (kg/m ³)	3.130,8	2.941,8	2.871,1
Média	2.981,2		

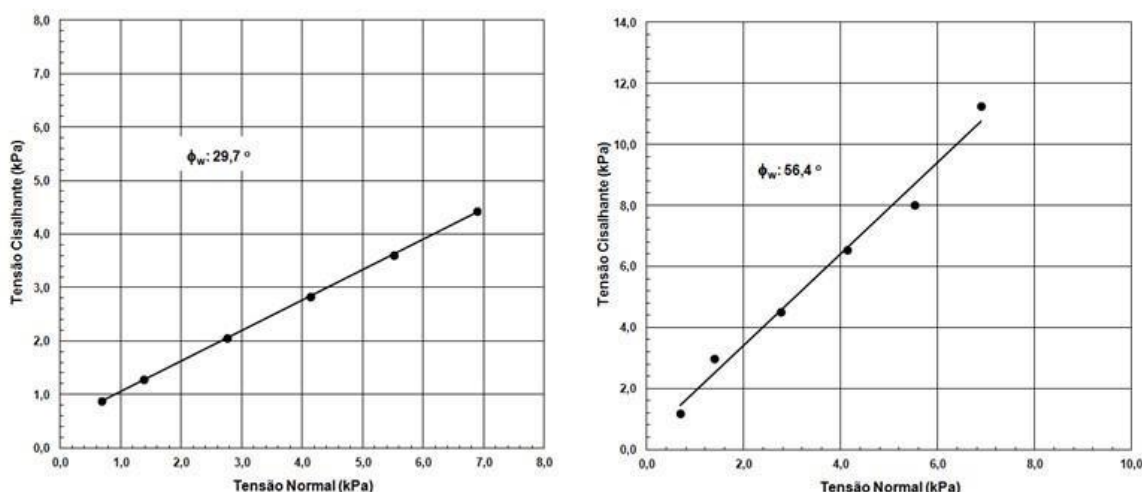


Figura 3 – Atrito com aço do manganês PMS e umidade de 30 %: a) instantâneo, b) consolidação de 24h.

Os ensaios de cisalhamento para a determinação do ângulo de atrito interno e outros parâmetros de caracterização do escoamento de sólidos, conforme Figura 1, em uma condição quase estática, são apresentados na Figura 4. Verifica-se um aumento do ângulo de atrito interno efetivo de 57,7 graus para 79,0 graus, o que demonstra a grande dificuldade de escoamento se o

material for consolidado por 24 h. O escoabilidade deste material, segundo a classificação de Jenike, é muito coesivo.

Os ensaios de escoamento dos materiais em caixa de fluxo padrão e em caixa fluxo de grande porte, demonstraram que o ROM e o sinter feed têm comportamento semelhantes, justificado pela grande quantidade de finos presentes no ROM, conforme Figura 2. Estes ensaios são apresentados na Figura 5 e foram utilizados também para a calibração do modelo de simulação numérica do tipo DEM. O resultado da qualidade desta calibração é apresentado na Tabela 2.

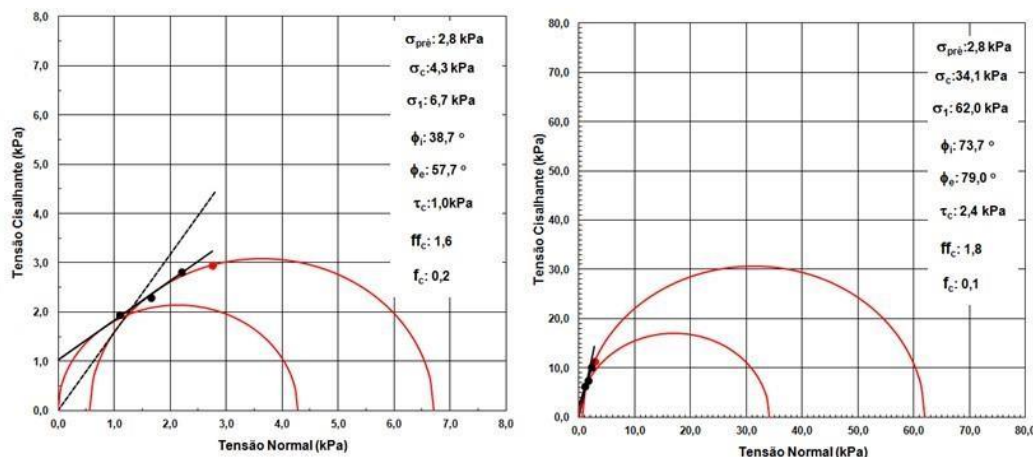


Figura 4 – Ensaio de cisalhamento do manganês PMS e umidade de 30 %: a) instantâneo, b) consolidação de 24h.

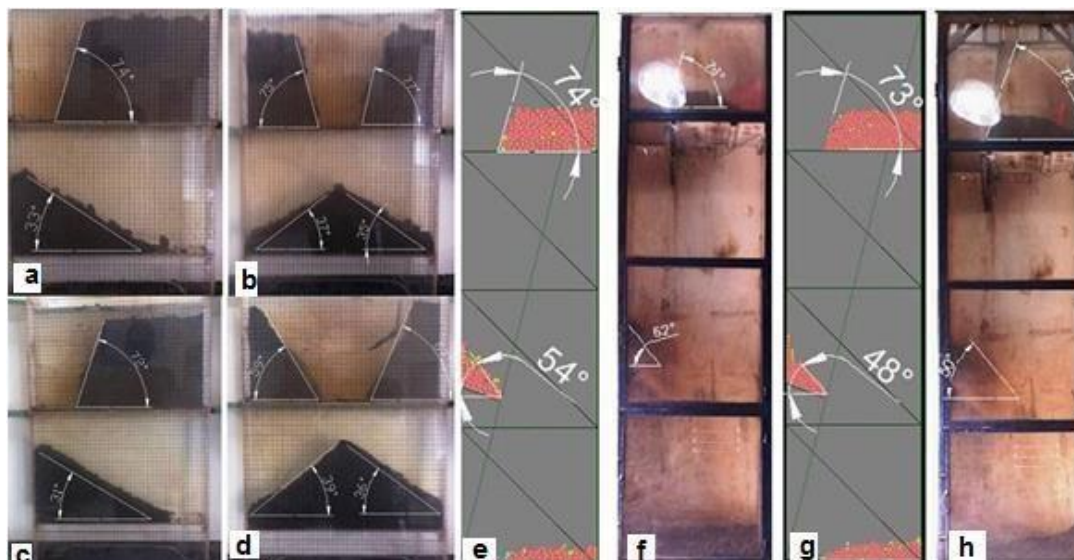


Figura 5 – Escoamento em caixa de fluxo em laboratório - usando ROM: (a), (b) e (f); usando sinter feed: (c), (d) e (h). Escoamento por DEM - simulação com ROM: (e); simulação com sinter feed: (g).

Tabela 2 – Parâmetros de calibração ROM de PMS.

Material	Experimental	Simulação DEM	Erro (%)
Angulo drenado	74,0	76,0	2,7
Angulo de repouso	54,0	52,0	3,7

3.2. Exemplos de Simulações de Moega, Chutes e Silo

Após a etapa de ensaios de caracterização e calibração do modelo DEM foi realizada uma campanha de verificação de projetos de chutes e silos. As transferências analisadas foram: descarga na moega de alimentação de ROM e escoamento na moega; chute de alimentação para o britador primário; descarga do britador prismático para correia de recepção; escoamento em divisor de fluxo para a alimentação de peneiras e silo de sinter feed.

O primeiro exemplo trata da descarga de caminhão e uma moega de recebimento de ROM. O projeto original desta moega apresentava uma grelha de malha 400 x 400 mm formada por um conjunto de vigas I, conforme mostra a Figura 6a. Esse projeto proporciona um bloqueio de material na grelha, conforme mostra a Figura 6b. A solução foi redesenhar a grelha com perfis em V, mantendo a mesma malha. Desta forma não evitará o bloqueio do fluxo de material proveniente do caminhão (Figura 6c).

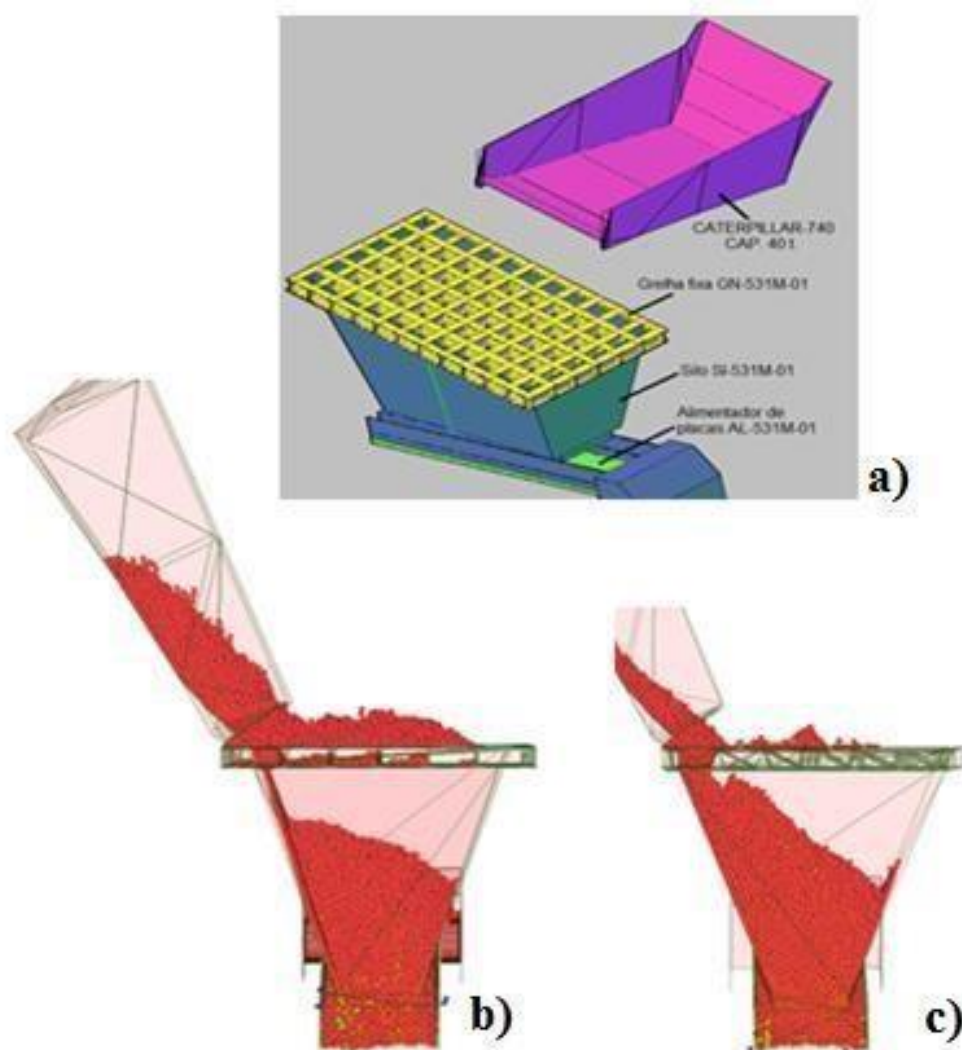


Figura 6 – Alimentação de moega de ROM: a) grelha da moega; b) simulação do projeto original; c) simulação do novo projeto após mudanças nos perfis da grelha.

Outro estudo de caso é alimentação de um britador. No projeto original, a posição do britador não estava ajustada com a trajetória do material proveniente de um alimentador, como

mostra a Figura 7a. Com o posicionamento adequado do britador, como mostrado na Figura 7b, a alimentação torna-se alinhada com o seu eixo, proporcionando uma operação adequada.

O terceiro estudo de caso é o projeto de alteração de placas defletora de um chute com descarga para duas correias transportadora. No projeto original, uma correia de recebimento estava sendo sobrecarregada em relação a outra correia, conforme mostra o resultado de simulação na Figura 8a. Na Figura 8b é mostrado o escoamento com a alteração do projeto da defletora, que permitiu se obter uma operação adequada para a alimentação simultânea dos transportadores de recepção, assim como um bom alinhamento das correias para todas as condições operacionais.

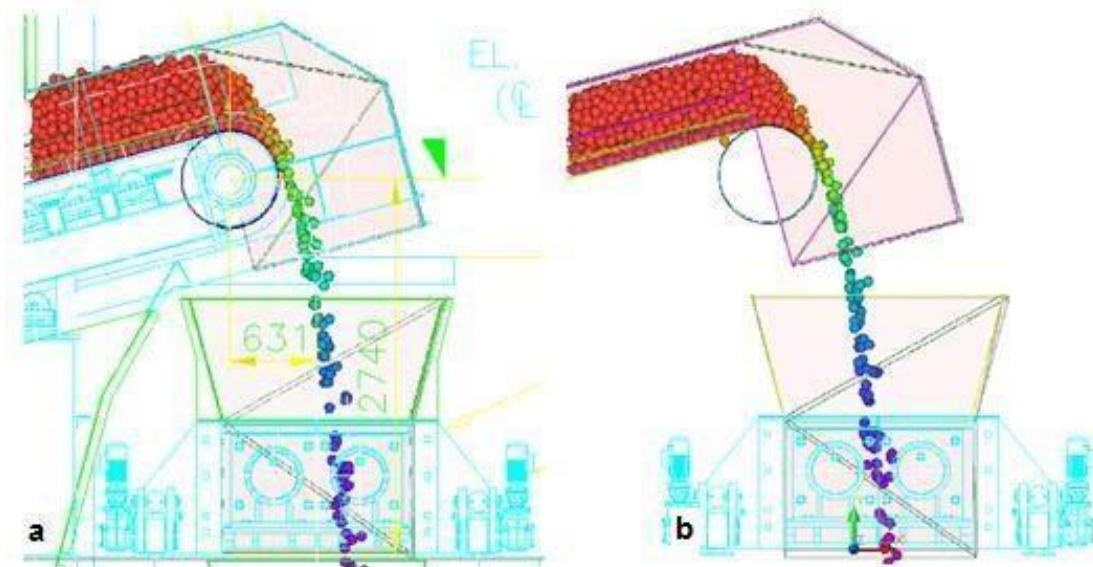


Figura 7 – Alimentação de britador: a) projeto original; b) novo projeto com o deslocamento do britador.

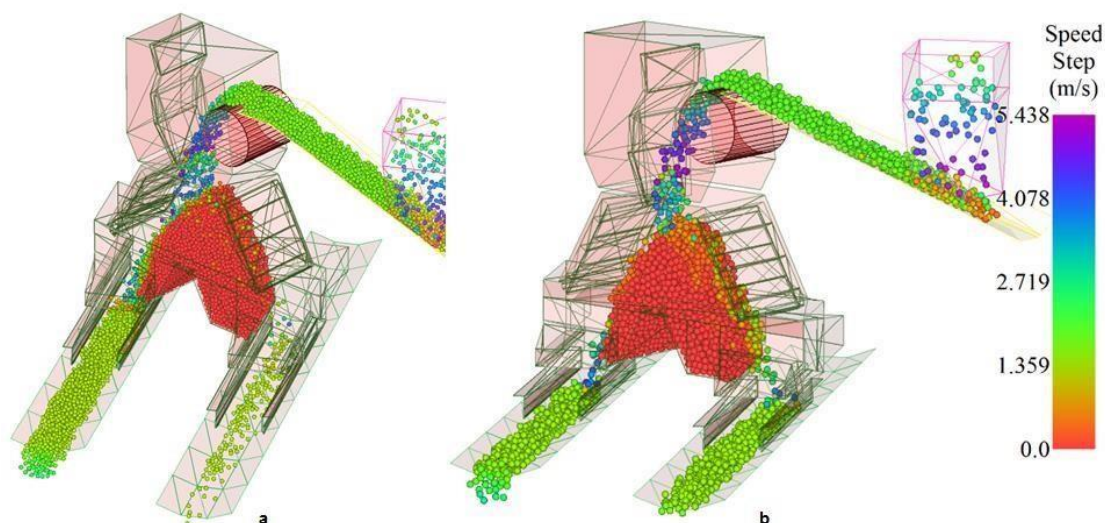


Figura 8 – Simulação DEM do escoamento de manganês através de um desviador: a) projeto básico inicial, b) projeto básico alterado.

Em relação à análise em silo, foi estudado um projeto preliminar de um silo de sinter feed (para enchimento em caminhões) utilizando os ensaios de cisalhamento em célula Jenike. A Figura 9 apresenta três pontos de condições de projeto sobre o gráfico de tipo de escoamento, seguindo a metodologia estabelecida por Jenike (Jenike, 1964, Schulze, 2008). Para materiais coesivos, o princípio de projeto é promover o escoamento mássico, pois o escoamento do tipo funil pode produzir entupimento, além de diminuir a capacidade útil do silo. O ponto 1 é a condição do projeto básico preliminar, com um ângulo de moega do silo que produziria o escoamento do tipo funil, portanto não adequado. Aumentando-se o ângulo da moega atinge-se um escoamento mássico, mostrado pelo ponto 2 na figura. O ângulo da moega é fundamental para o projeto de toda a instalação, considerando ainda a altura necessária para a movimentação dos caminhões. Para diminuição deste ângulo, favorecendo o projeto da instalação, poderiamse revestir as paredes internas da moega, diminuindo o fator de atrito. Esta condição é mostrada pelo ponto 3. Para determinação exata deste ponto são necessários ensaios com os materiais de revestimento. Essas condições de escoamento foram também verificadas por simulações DEM.

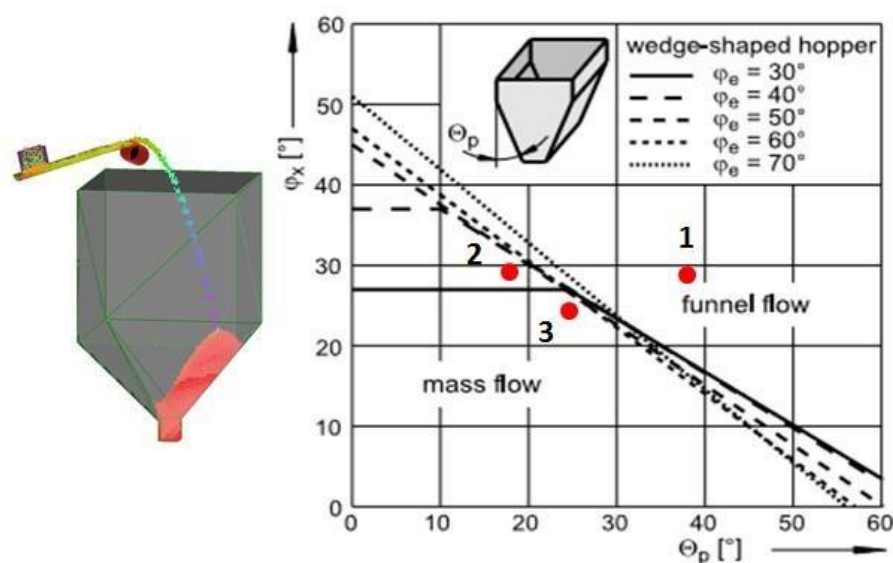


Figura 9 – Análise de condições de projeto de silo - ponto 1: projeto básico inicial; ponto 2: projeto básico alterado; ponto 3: uso de material de menor atrito para revestimento da moega.

4. CONCLUSÕES

Os ensaios apresentados fizeram a caracterização do comportamento do minério de manganês Pelito Manganífero Siltito, visando aplicação em projetos de manuseio. Verificou-se que se trata de um material muito coesivo, com dificuldade de escoamento. Os ensaios em caixa de fluxo permitiram a calibração dos modelos de simulação numérica do tipo DEM para estudos em situações onde havia problemas com fluxo de material.

Foram apresentados resultados quatro estudos de casos. Inicialmente apresentou-se a necessidade de alterações nas seções das vigas longitudinais e transversais da grelha da moega de recebimento de ROM. Em seguida, verificou-se a necessidade de deslocamento do britador primário, a fim de melhorar sua eficiência. Apresentou-se também o estudo de caso de alteração na placa defletora de chute para carregamento uniforme nas duas correias de recebimento, assim evitando impactos e vazamentos e o desalinhamento das correias. Em relação ao silo de sinter feed, verificou-se que o ângulo de parede do projeto original do silo não é adequado e propicia condições favoráveis ao entupimento. Necessitando da alteração da geometria da moega de

descarga. Também se verificou que o uso de revestimento de parede com menor coeficiente atrito favorece o projeto da moega do silo.

Assim, a metodologia de caracterização do manganês Pelito Manganífero Siltito e da calibração de modelo DEM se mostraram adequadas para a análise do comportamento do minério visando aplicação em projetos de manuseio.

REFERÊNCIAS

ASSUMPCÃO, M.E.; MAZZINGHY, D.B.; SOUZA, L.D.; RUSSO, J.F.C; BAILONA, B.A.; SPOGIS, N. *Aplicação do método dos elementos discretos na avaliação de chutes de escoamento de minérios de ferro itabiríticos. Holos*, v.7, ano 31, p. 34-42, 2015.

ASTM D 6128-97. *Standard shear testing for bulk solids using Jenike shear cell*, 1997.

CLEARY, P.W. *DEM prediction of industrial and geophysical particle flows, Particuology*, v8, pp 106-118, 2010.

COETZEE, C.J.; ELS, D.N. *Calibration of granular material parameters for DEM modelling and numerical verification by blade–granular material interaction. Journal of Terramechanics*, 46:15–26, 2009.

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

GONZÁLEZ-MONTELLANO, C.; GALLEGRO, E.; RAMIREZ-GÓMEZ, A.; AYUGA, F. *Three dimensional discrete element models for simulating the filling and emptying of silos: Analysis of numerical results, Computers and Chemical Engineering*, v. 40, p. 22-32, 2012.

JENIKE, AW. *Storage and flow of solids. Salt Lake City, University of Utah. Bulletin. Utah Engineering Experiment Station, n°123*, 1964.

KETTERHAGEN, W.R.; CURTIS, J.S.; WASSGREN, C.R.; HANCOCK, B.C. *Predicting the flow mode from hoppers using the discrete element method. Powder Technology*, v. 195, p. 1-10, 2009.

LEVY, A.; OOI, J.Y. *Discrete element simulation: challenges in application and model calibration. Granular Matter* 2011.

LI, Y.; XU, Y.; THORNTON, C.A. *Comparison of discrete element simulation and experiments for sandpiles composed of spherical particles. Powder Technology*, 260:219-228, 2005.

NBR 6122. *Projeto e execução de fundações. Associação Brasileira de Normas Técnicas*, 2010.

NBR 6508. *Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica. Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT*, 1984.

NBR 7181. *Solo - Análise Granlométrica. Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT*, 1984.

SCHULZE, D. *Powder and bulk solids – behavior, characterization, storage and flow.* Springer-Verlag, 2008.

ZHU, H.P.; ZHOU, Z.Y.; YANG, R.Y.; YU, A.B. *Discrete particle simulation of particulate systems: Theoretical developments.* *Chemical Engineering Science*, V. 62, 3378 – 3396, 2007.

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*, V.63, 5728 – 5770, 2008.