

# UMA METODOLOGIA PARA A SIMULAÇÃO DE CHUTES DE TRANSFERÊNCIA – APLICAÇÃO PARA MINÉRIO DE FERRO<sup>1</sup>

*Luís Rogério Nogueira<sup>2</sup>*

*Manoel Patrocínio<sup>3</sup>*

*Pablo Jordano Sacramento Mendes<sup>4</sup>*

*Marco Aurélio Guimarães<sup>5</sup>*

*Rita Virgínia Gabriel da Silva<sup>6</sup>*

*André Luiz Amarante Mesquita<sup>7</sup>*

*Antonio Mauricio Trejo Martelli<sup>8</sup>*

## Resumo

Atualmente o Método dos Elementos Discretos – DEM – é a ferramenta mais moderna para a análise do escoamento em chutes. Este trabalho apresenta uma metodologia de calibração para um *software*, visando obter resultados de simulação que sejam realísticos, podendo efetivamente servir como ferramenta de projetos de chutes de transferência. A metodologia utiliza uma pequena bancada de visualização para o escoamento de uma amostra de minério e resultados de ensaios com uma célula de cisalhamento do tipo Jenike. Resultados são apresentados para análise de chutes de transferência de minério de ferro do Sistema Norte da Vale, com foco nos projetos de expansão do porto Ponta da Madeira..

**Palavras-chave:** Chutes de transferência; Minério de ferro; Método dos elementos discretos.

## A METHODOLOGY FOR TRANSFERS CHUTES SIMULATION – APPLICATION TO IRON ORE

### Abstract

At present, the Discrete Element Method - DEM - is the modern tool for chute flow analysis, This paper presents a methodology for calibration for specific software, which can be extended to other software, in order to obtain simulation results that are realistic and can effectively employed as a tool for transfer chutes design. The methodology uses a box flow to visualizing purpose, and measurements from a Jenike type shear tester cell. Results are presented for a iron ore transfer chute of the Vale's North System, focusing on the Ponta da Madeira Port expansion project.

**Key words:** Transfers chutes; Iron ore; Discrete element method.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 41º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 12º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 12 a 26 de setembro de 2011, Vila Velha, ES.*

<sup>2</sup> *Eng. Mecânico Sr, Vale SA.*

<sup>3</sup> *Gerente de Engenharia Mecânica Projeto CLN, Vale SA.*

<sup>4</sup> *Gerente Geral de Qualidade e Programação Carajás-São Luís, Vale SA.*

<sup>5</sup> *Gerente de Desenvolvimento, Otimização de Processo e Laboratório Carajás, Vale SA.*

<sup>6</sup> *Engenheira Master Laboratório São Luís-Carajás, Vale SA.*

<sup>7</sup> *Eng. Mecânico, Dr. Ing., Solve Ltda.*

<sup>8</sup> *Eng. Mecânico, M. Eng., Solve Ltda.*

## 1 INTRODUÇÃO

Os pontos de transferência permitem mudar a direção do transporte de materiais granulados através de correias transportadoras. São aberturas em forma de calha destinada a dirigir o material a um determinado ponto ou região através da qual o material flui pela ação da gravidade. Diversos problemas são encontrados quando o projeto destes elementos não é adequado, como entupimento, desalinhamento da correia receptora, geração de pó e desgaste prematura de materiais. Atualmente, o Método dos Elementos Discretos – DEM – é a ferramenta mais moderna o projeto destes elementos.<sup>(1,2)</sup> Entretanto a calibração de modelos numéricos utilizando o Método dos Elementos Discretos é ainda um desafio, conforme relatado por Levy e Ooi<sup>(3)</sup> em 2011.

O presente artigo apresenta resultados de um trabalho de calibração de um modelo numérico utilizando o método DEM, visando a análise do escoamento de minérios de ferro em chutes de transferência. A metodologia utiliza testes com células de cisalhamento e ensaios de visualização em modelos do tipo caixa. A metodologia permite contabilização da influência da umidade no escoamento do minério. Em seguida, o modelo calibrado é utilizado para a análise de chutes de transferência, tendo fazendo parte do projeto de expansão do porto Ponta da Madeira da Vale, em São Luis.

## 2 DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA

### 2.1 Célula de Cisalhamento

A célula de cisalhamento (Figura 1a) permite a obtenção de parâmetros do escoamento de sólidos, como ângulo de atrito de parede, ângulo de atrito interno (Figura 2b), trazendo informações importantes sobre coesão e adesão do material granulado. O ensaio consiste em se registrar a tensão cisalhante limite para o escoamento do material,  $S$ , em função da tensão normal de consolidação,  $N$ . O ensaios permite a análise qualitativa da facilidade ou não de escoamento do material através da função de fluxo, definida com a razão entre a tensão principal do escoamento,  $\sigma_1$ , e a tensão não-confinada  $\sigma_c$ . Maiores detalhes sobre a utilização sobre a teoria e a utilização de células de cisalhamento podem ser encontrado em Schulze.<sup>(4)</sup> A Figura 2 apresenta a célula de cisalhamento, do tipo Jenike, utilizada neste trabalho.

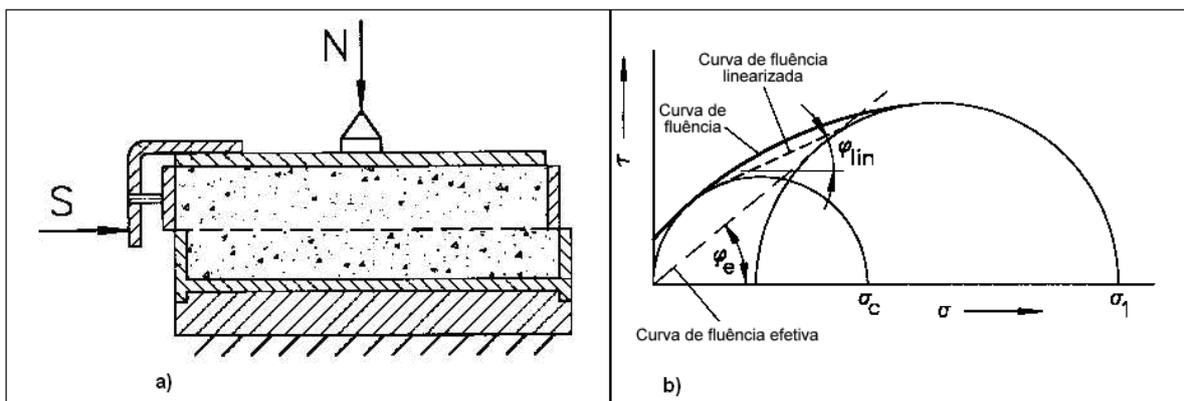


Figura 1. Célula de cisalhamento. a) Esquema. b) Resultados de ensaios.<sup>(5)</sup>



a)

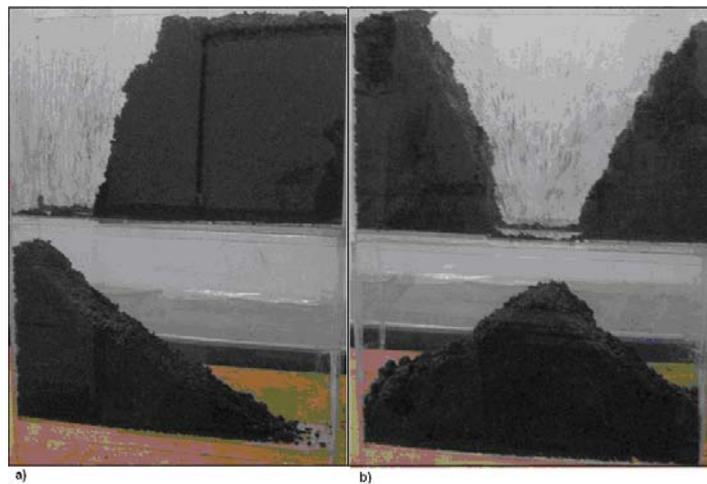
b)

Figura 2. Célula de cisalhamento. a) preparação do material; b) ensaio em realização.

## 2.2 Caixa de Visualização de Escoamento

A utilização dos ensaios de visualização do escoamento de materiais granulados em pequenos modelos do tipo caixa (*box flow*) é uma prática bastante utilizada na calibração de modelos DEM.<sup>(6,7)</sup>

No presente trabalho utilizou-se um caixa de seção 80 mm x 400 mm e altura de 250 mm, com fundo na forma de uma válvula guilhotina, permitindo tanto escoamento lateral (Figura 3a), quanto escoamento central (Figura 3b) e com abertura regulável.



a)

b)

Figura 3. Escoamento do tipo caixa. a) lateral; b) central.

## 2.3 Parâmetros de Calibração

Para materiais granulares úmidos, a força de coesão é fortemente influenciada pela ponte de ligação formada pela presença do líquido entre as partículas. Segundo Gröger, Tüzün e Heys,<sup>(8)</sup> no escoamento de materiais granulares úmidos, a força coesiva que tende a aglomerar as partículas é devido a ação destas pontes de ligação e está diretamente correlacionada com a tensão superficial do líquido e com a granulometria do material. Assim, o efeito da umidade do material pode ser contabilizado na medida do atrito interno, o qual é obtido através de ensaios com a célula de cisalhamento.

O *software* utilizado neste trabalho é o *Bulk Flow Analyst*<sup>TM</sup>, desenvolvido pela empresa Overland Conveyor. Neste *software*, os principais parâmetros que permitem a calibração do modelo numérico, são: coeficiente de coesão, que globalmente está correlacionado com o coeficiente de atrito interno; o coeficiente de atrito interpartícula, que difere do coeficiente de atrito interno, e está correlacionado com a forma e material da partícula; e o coeficiente de adesão da partícula à parede. O coeficiente de atrito com a parede é medido diretamente em ensaios de cisalhamento entre o material granulado e o material da parede do chute. Também neste *software*, pode-se distribuir as partículas em quatro diâmetros, seguindo o ensaio de granulometria. A calibração do coeficiente de coesão também é modulada pelo diâmetro de finos, que representa um diâmetro médio da fração fina presente no material granular.

## 2.4 Calibração do Modelo para Escoamento de Minério de Ferro

No presente trabalho utilizaram-se amostras de minérios de ferro de Carajás (*sinter feed*). A Figura 4a apresenta a granulometria das amostras ensaiadas. As amostras foram coletadas no Porto da Ponta da Madeira. A variação típica da umidade do minério ao longo do ano é apresentada na Figura 4b. A umidade das amostras nos ensaios foi alterada através da adição de água, realizando-se ensaios de visualização e de cisalhamento. Os parâmetros de calibração foram alterados até se encontrar uma boa concordância entre os ensaios de visualização e de simulação numérica. As Figuras 5 e 6 apresentam resultados de visualização e simulação numérica para umidade de 7% e 12%. Observa-se uma boa concordância entre a visualização e o resultado numérico.

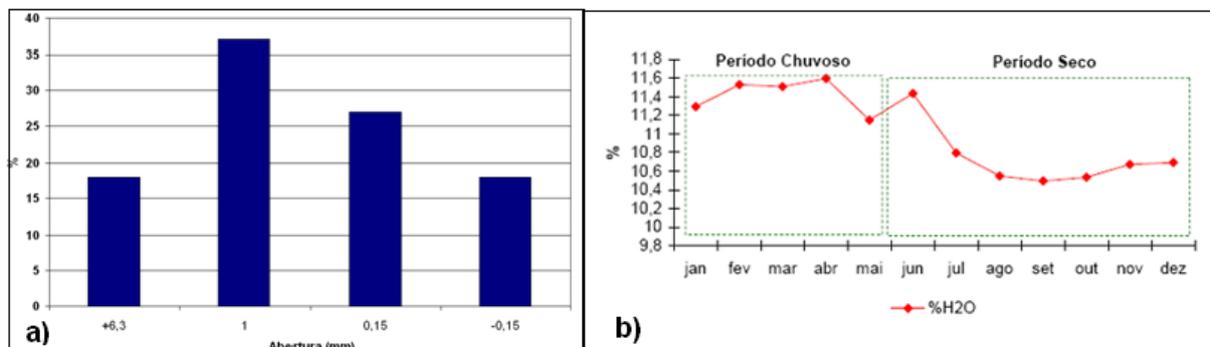
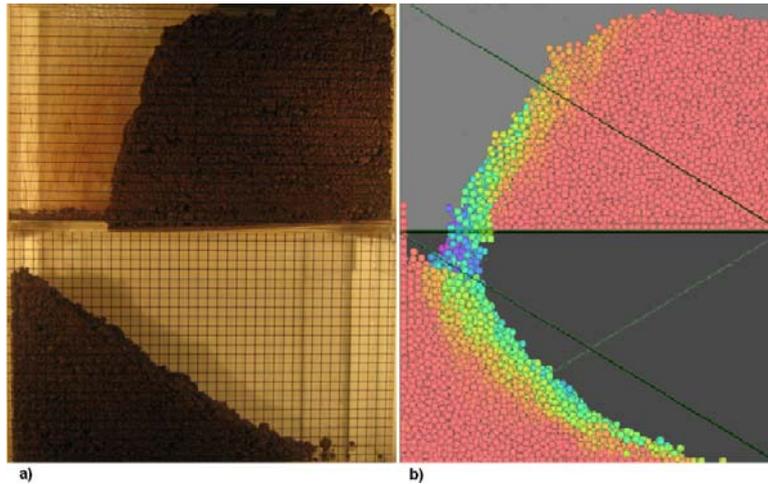
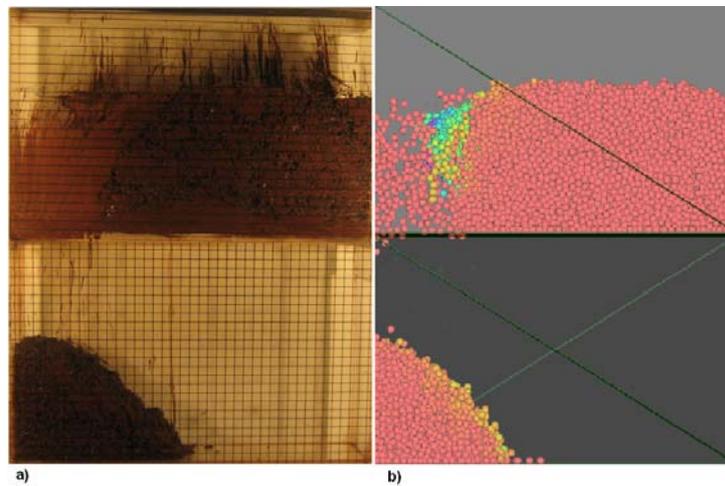


Figura 4. Granulometria e umidade típica do minério de ferro de Carajás (*sinter feed*).

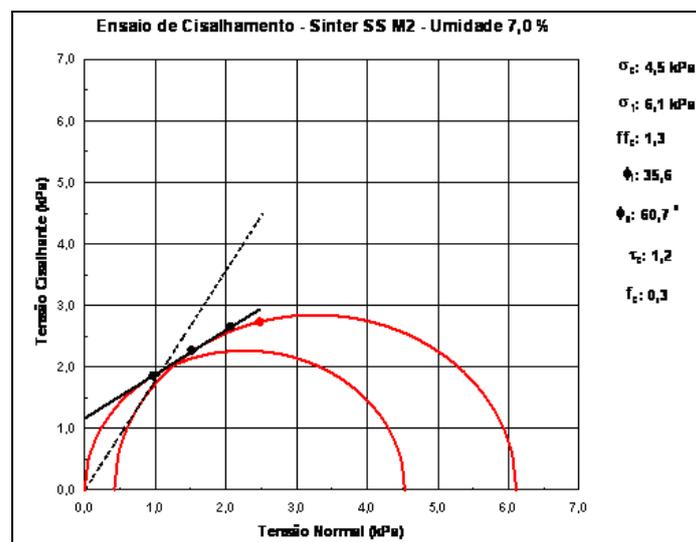
A Figuras 7 e 8 apresentam resultados de cisalhamento par as mesmas condições de umidade. Para baixa umidade o ângulo de atrito interno é 35,6° e para alta umidade este valor é 56,5°, o que mostra a forte correção entre o coeficiente de atrito interno e a umidade. A coesão para a baixa umidade é de 1,2 kPa e para alta umidade o valor de 1,7 kPa, mostrando também que a coesão, extraída do ensaio de cisalhamento com a umidade. Finalmente, a Figura 9 o resultado para a função de fluxo, mostrando a grande coesividade do minério de ferro. Para os ensaios de calibração foram realizados cerca de 50 simulações numéricas, 15 ensaios de visualização e 30 ensaios completos em célula de cisalhamento.



**Figura 5.** Ensaio de calibração – umidade 7%. a) ensaio de visualização; b) simulação numérica.



**Figura 6.** Ensaio de calibração – umidade 12%. a) ensaio de visualização; b) simulação numérica.



**Figura 7.** Ensaio de calibração – umidade 7%. Ensaio de cisalhamento.

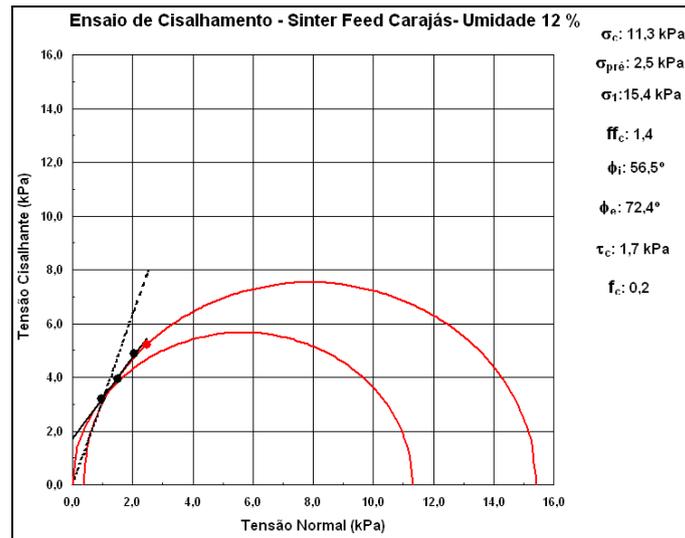


Figura 8. Ensaio de calibração – umidade 12%. Ensaio de cisalhamento.

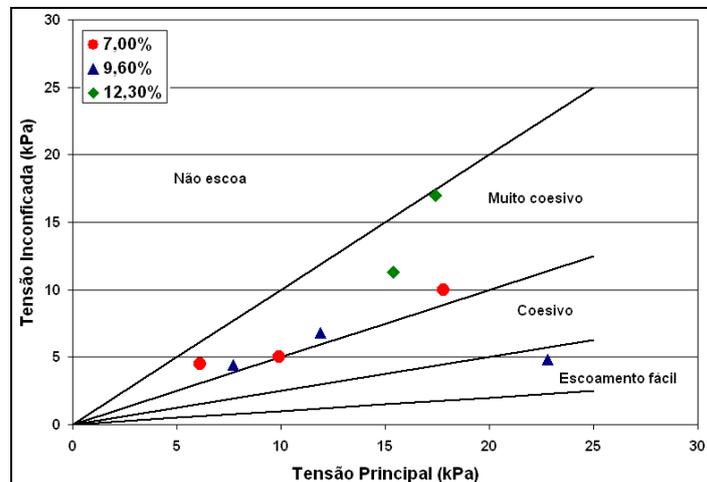


Figura 9. Função de fluxo para as amostras de *sinter feed* de Carajás.

### 3 RESULTADOS PARA SIMULAÇÃO DE CHUTES

#### 3.1 Projeto de Expansão do Porto de Madeira

As simulações nos chutes foram realizadas para evitar entupimentos, desalinhamentos e desgastes excessivos nos transportadores do Projeto de Expansão do Porto da Vale em São Luís. Esse projeto faz parte do Programa de Capacitação Logística Norte – CLN.

O Programa CLN capacitará as unidades da Logística no Sistema Norte a atender a produção de 230 Mtpa e considera o recebimento dos produtos das Minas de Carajás e S11D, com o transporte ferroviário até o carregamento dos navios, pelo Terminal Portuário de Ponta da Madeira - TPPM, em São Luís. Engloba a aquisição de material rodante, construção de um ramal ferroviário, duplicações de ferrovia ao longo da Estrada de Ferro Carajás, EFC, execução de pátios de manobra, ampliação do terminal ferroviário de São Luís além da ampliação do sistema de descarga, estocagem e recuperação para embarque no TPPM, sua transferência para embarque e o embarque propriamente dito através de um dos terminais portuários denominado Pier IV. O Programa contempla os projetos ilustrados na Figura 10.



**Figura 10.** Projeto CLN

### 3.2 Aplicação da Metodologia

Os parâmetros de calibração do modelo numérico, obtidos no procedimento descritos foram empregados para a simulação dos chutes, mantendo-se e a mesma relação de diâmetro de partícula e menor abertura típica do chute. A mesma relação foi utilizada para os finos. A Figura 11 apresenta os componentes típicos de um chute, onde observa-se as caixas de pedras que têm por finalidade diminuir a velocidade das partículas e melhor direcionar o escoamento no interior do chute. A Figura 12 apresenta uma a visão geral do resultado típico para os chutes analisados, mostrando o efeito do diâmetro da partícula. Tem-se que ter um compromisso entre o tempo de cálculo e o efeito da na velocidade, em função do diâmetro da partícula, considerando-se também os efeitos de escala da etapa de calibração. A partir de um determinado valor o tempo de cálculos aumenta muito sem aumentar consideravelmente a precisão dos resultados. Por exemplo, um modelo com partículas de raio de 25 mm apresentam tempo de cálculo superior a cinco vezes o tempo de cálculo para uma partícula com o dobro do diâmetro.

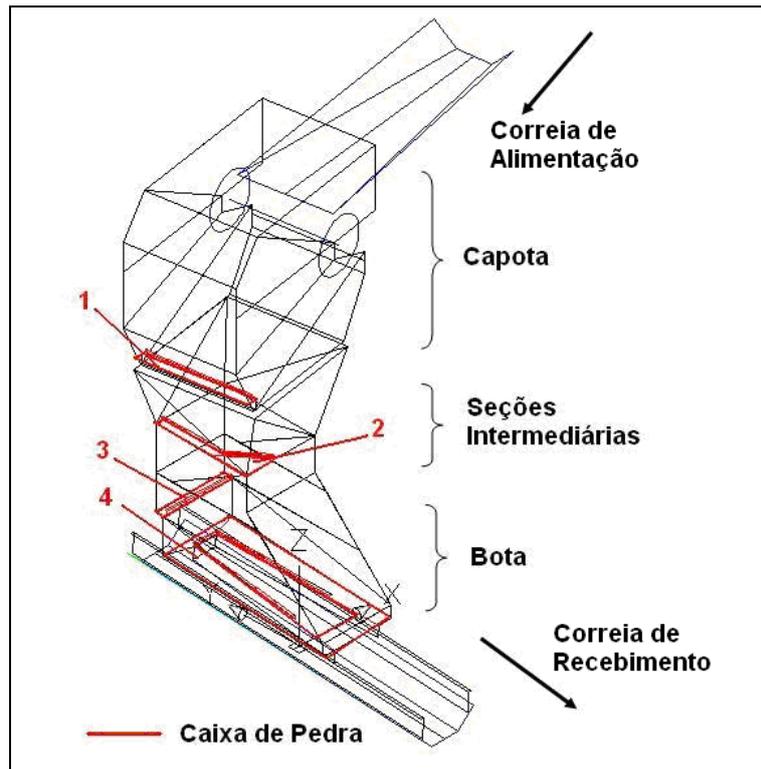


Figura 11. Componente típico de um chute de minério.

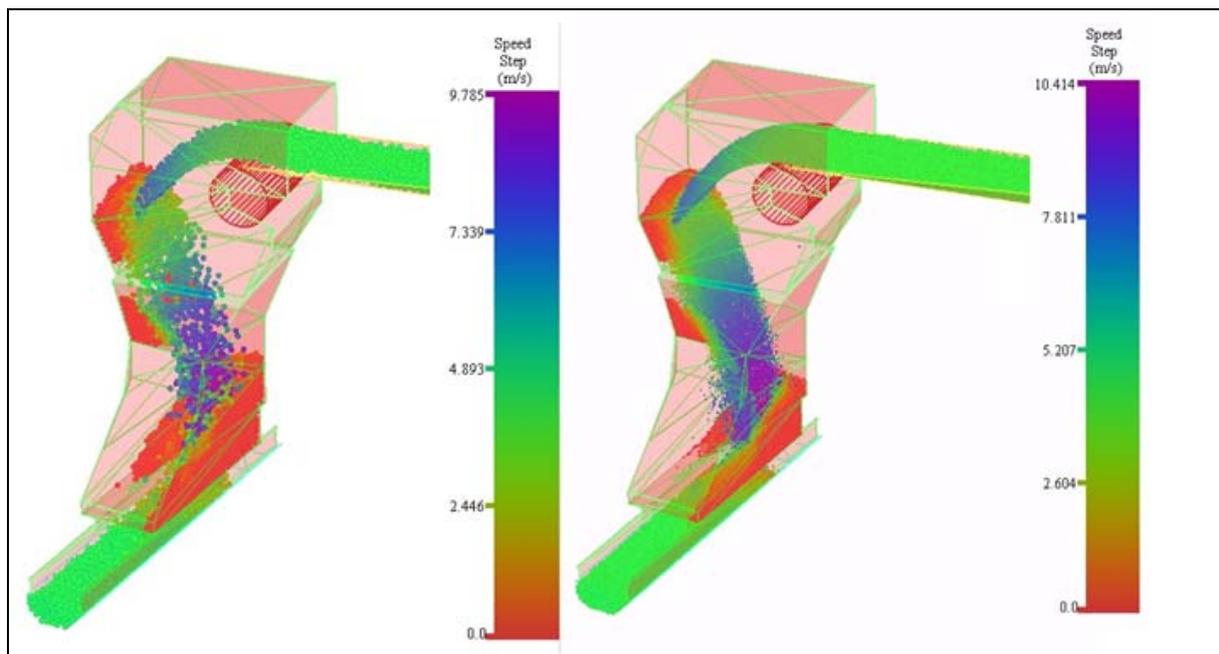
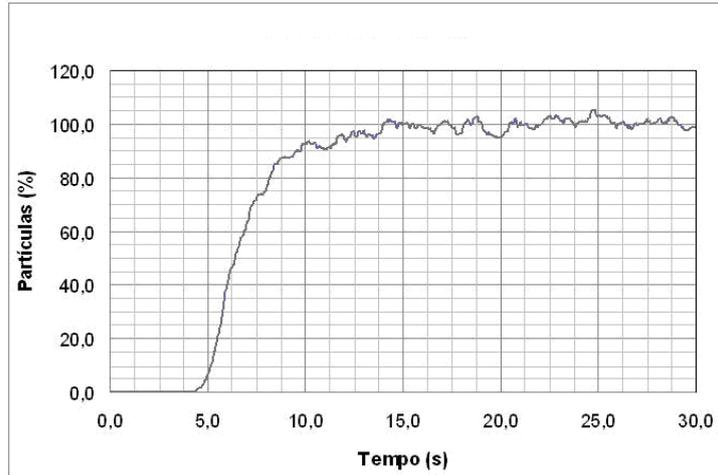


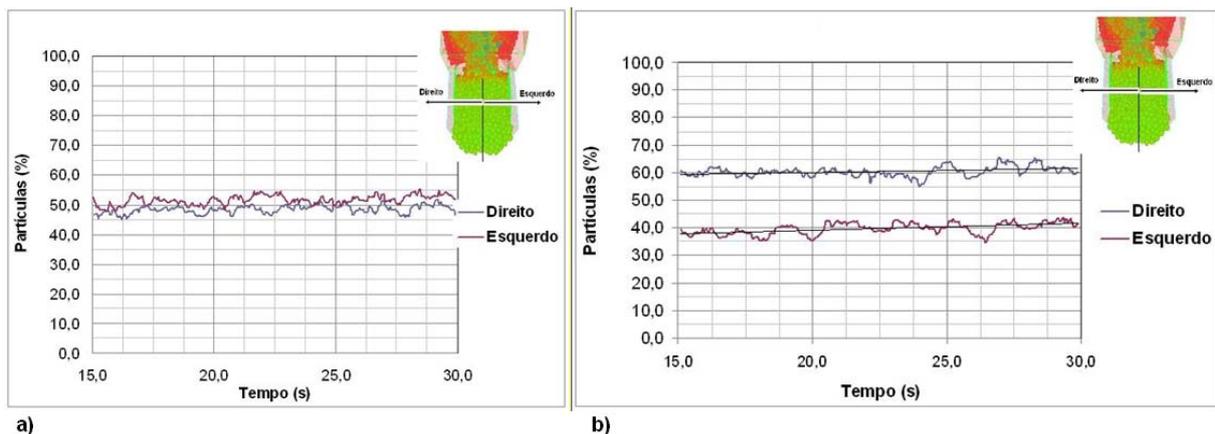
Figura 12 Resultado típico do escoamento em um chute de minério. Efeito do diâmetro da partícula.

Após esta análise, tem-se que se tem que verifica em que intervalo de tempo tem-se a condições de regime permanente e sem tendência de entupimento. Isso é obtido através da contagem de partículas na descarga de do chute em função do tempo. A Figura 13 apresenta um resultado típico para a determinação do regime permanente e a tendência ao entupimento. Observa-se que o intervalo de tempo típico é da ordem de 15 s.



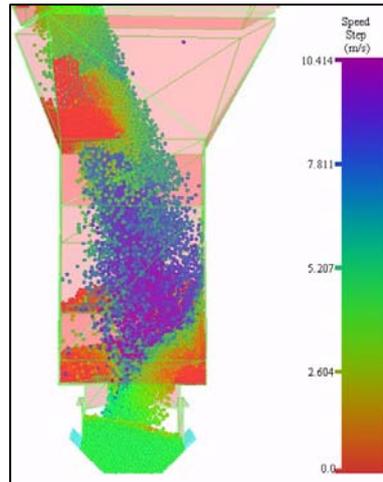
**Figura 13.** Resultado típico para a análise de chutes.

Em seguida, e uma das análises mais importante, é a verificação do desalinhamento da correia de recebimento. Isso é obtido dividindo-se a região de recebimento de material da correia de recebimento em duas regiões simétricas e efetivando a contagem de partículas em função do tempo. A Figura 14a mostra uma correia com um desalinhamento de 3% e a Figura 14b um desalinhamento de 20%. A Figura 15 mostra um exemplo típico de um chute com desalinhamento da correia receptora.



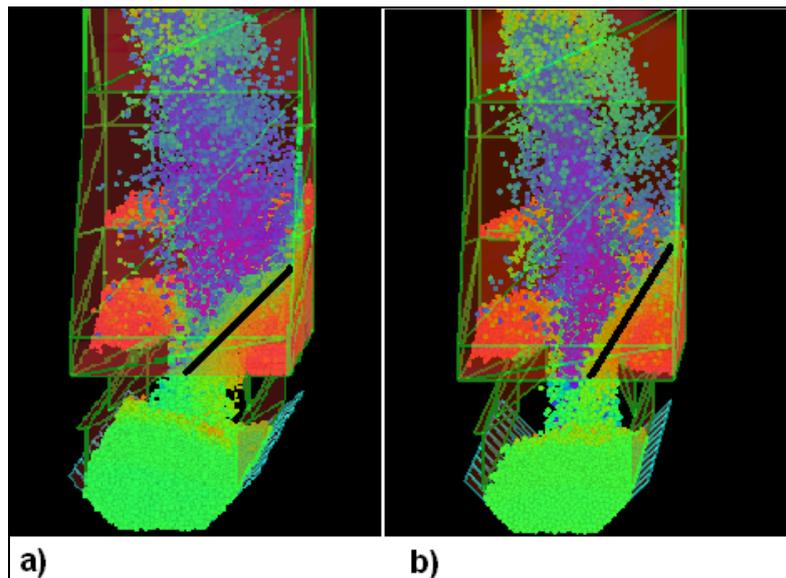
**Figura 14.** Resultado típico para desalinhamento de correia. a) 3%. b) 20%.

Outras verificações são sobre os valores das forças normais e cisalhante nas paredes do chute e na correia receptora, assim como na própria partícula, visando, por exemplo, no caso do chute de pelota evitar que a mesma se quebre. O valor da força cisalhante também é utilizado para calcular as regiões de maior desgaste nos chutes.



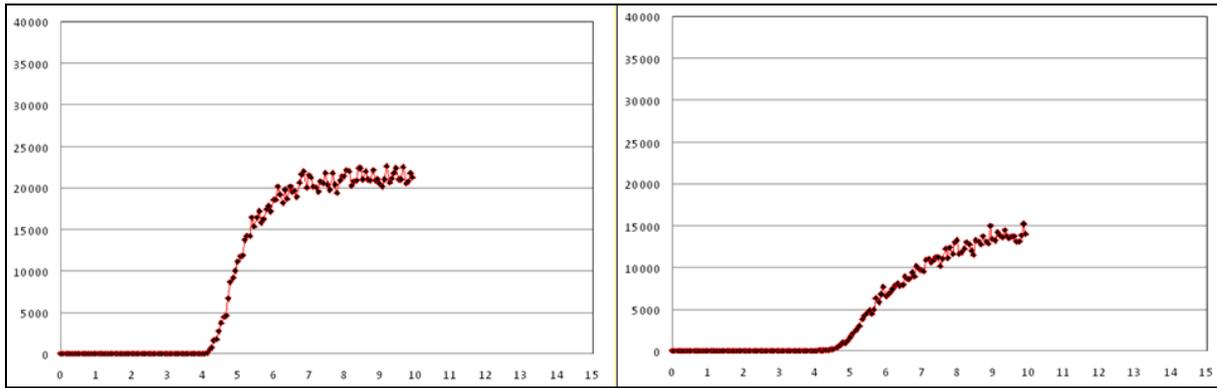
**Figura 15.** Resultado típico para desalinhamento de correia. Visualização.

Sobre a análise do efeito da umidade a Figura 15 apresenta um resultado típico, mostrando que com o aumento do ângulo de repouso com a umidade, a trajetória do escoamento é alterada. Outro efeito é a diminuição da força normal no chute, devido ao amortecimento da transmissão da força pela presença de água no minério. Esse efeito é mostrado na Figura 17.



**Figura 16.** Resultado típico a alteração de trajetória com a umidade. a) 7%; b) 12%.

Finalmente, faz-se notar a necessidade, visando melhorar ainda mais os resultados, de se obter os parâmetros de calibração em modelos de chutes de transferência, semelhante com é conduzido pela a equipe do Prof. Wypych.<sup>(9-11)</sup> Desta forma se evitaria as incertezas do fator de escala da calibração em escoamento do tipo caixa. Também de poderia ter uma correlação entre os modelos de chutes e os resultado do escoamento em caixa, que poderia servir para reduzir os custos para novas análises. Este tipo de análise já está sendo planejada pela Vale, com recursos já garantidos através de projeto de pesquisa a ser executado pela UFPA, com a cooperação da Solve.



**Figura 17.** Resultado para a transmissão de força normal em função da umidade. a) 7%; b) 12%.

## 4 CONCLUSÃO

Foi apresentada uma metodologia de calibração de um modelo numérico baseado no método dos elementos discretos, utilizando ensaios em pequenos modelos do tipo caixa (*box flow*). A metodologia conseguiu resultados consistentes para a análise de chutes de transferência de minério de ferro, contabilizando-se o efeito da umidade. Desta forma se se obteve uma ferramenta para a análise do escoamento em chutes de correias, contribuindo efetivamente para a melhoria do projeto de instalação de novos sistemas de manuseio. A metodologia pode ser melhora através de ensaios em modelos de chutes de transferência, utilizando-se correias transportadoras em escala.

## Agradecimentos

A Solve agradece a participação dos estagiários de engenharia Pedro Macias e Hugo Mesquita, do analista de processo da Vale José Antônio Rodrigues e do mestrando da UFPA Charles Aran.

## REFERÊNCIAS

- 1 KESSLER, F.; PRENNER, M. DEM – Simulation of conveyor transfer chutes. FME Transactions, v. 37, p. 185-192, 2009.
- 2 KIM, Y. Combined front end DEM analysis and empirical design process to minimize transfer chute blockages. Australian Bulk Handling Review, March/April, p 62-65, 2010.
- 3 LEVY, A.; OOI, J. Y. Discrete element simulation: challenges in application and model calibration, Granular Matter, 2011.
- 4 SCHULZE, D. Powder and bulk solids – behavior, characterization, storage and flow. Springer-Verlag, 2008
- 5 ASTM D 6128-97. Standard shear testing for bulk solids using Jenike shear cell, 1997
- 6 LI, Y.; XU, Y.; THORNTON, C. A comparison of discrete element simulation and experiments for sandpiles composed of spherical particles. Powder Technology, v. 260 p. 219-228, 2005.
- 7 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, v. 46:, p.15–26, 2009.
- 8 GRÖGER, T.; TÜZÜN, U.; HEYS, D. M. Modeling and measuring of cohesion in wet granular materials. Powder Technology, v. 133, p. 203–215, 2003.

- 9 GRIMA, A.; WYPYCH, P. Discrete element simulation of a conveyor impact-plate transfer: calibration, validation and scale-up. Australian Bulk Handling Review, p 64-72, May/June, 2010
- 10 GRIMA, A.; WYPYCH, P. On Improving the Calibration and Validation of Computer Simulations for Bulk Materials Handling Systems. Australian Bulk Handling Review: pp 84-91, 2010.
- 11 HASTIE, D, B; WYPYCH, P. Experimental validation of particle flow through conveyor transfer hoods via continuum and discrete element methods. Mechanics of Materials, v 42, p. 383–394, 2010.