

INFLUÊNCIA DO TAMANHO DE PARTÍCULAS PARA SIMULAÇÃO PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS DISCRETOS EM AVALIAÇÃO DE UM MISTURADOR HORIZONTAL *

*Fernando de Oliveira Boechat¹
Rodrigo Magalhães de Carvalho²*

Resumo

Dentre as etapas de pelletização de minério de ferro, a fase de mistura tem grande importância devido ser responsável por dar homogeneidade a aos insumos e minério que serão processados nas etapas seguintes. Desta forma ela ajuda a garantir a boa formação das pelotas verdes e seu posterior endurecimento na etapa de queima. No desenvolvimento de misturadores, o auxílio de ferramentas de simulação são úteis para o correto dimensionamento destes equipamentos. Nos últimos anos a utilização do método dos elementos discretos (DEM) tem sido implementada para este fim e por isto vários cuidados têm sido tomados para ter-se resultados compatíveis com o comportamento real das partículas. Entre os fatores que podem inviabilizar o uso do método dos elementos discretos, o tempo e capacidade de processamento computacional tem sido um dos mais impactantes. Assim, este trabalho foi desenvolvido de forma a avaliar a influência do tamanho das partículas no resultado de capacidade de mistura de um misturador horizontal. Para isto, foi feito o escalonamento do modelo de um misturador e testado dois tamanhos de partícula avaliando o comportamento da mistura ao longo do tempo e o seu índice de mistura Lacey. Como resultado, pode-se verificar que o tamanho da partícula tem influência direta no resultado da simulação e que cuidados devem ser tomados no escalonamento destas para que haja compatibilidade entre as simulações e o comportamento real do sistema.

Palavras-chave: DEM; Misturador Horizontal; Tamanho de partícula.

INFLUENCE OF PARTICLE SIZE IN SIMULATION BY THE DISCRETE ELEMENT METHOD TO EVALUATION OF A MIXER HORIZONTAL

Abstract

Among the steps of iron ore pelletizing, mixture phase has great importance due to being responsible for providing homogeneity to intakes and iron ore to be processed in the following steps. In this way it helps to ensure proper training of green pellets and its subsequent hardening in the firing step. In The development of mixers, the aid of simulation tools are useful for correct sizing of this equipment. In recent years, the use of discrete elements method (DEM) has been implemented for this purpose and that several precautions have been taken to have findings consistent with the actual behavior of the particles. Among the factors that may hinder the use of the discrete elements method, the time and computer processing power has been one of the most impactful. This work was developed in order to evaluate the influence of particle size on the result of mixing capacity of a horizontal mixer. For this, the analysis of mixer model was made and tested two particle sizes evaluating the behavior of the mixture over time and its index Lacey mixture. As a result, it can be seen that the particle size has a direct influence on the result of the simulation and that care should be taken in staggering for compatibility between the simulations and the real system behavior.

Keywords: DEM; Mixer Horizontal; Particle Sizer.

¹ Engenheiro de Produção, M.Sc., Professor, Faculdade Católica Salesiana do Espírito Santo, ES, Brasil,

² Engenheiro Químico, M.Sc., D.Sc., Professor Adjunto, Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

As pelotas de minério de ferro têm uma grande importância na produção de aço devido ter vantagens de contribuírem para melhorar a estabilidade operacional dos reatores de redução e de possibilitarem ganhos de produtividade e/ou metalização nos fornos, tornando-o uma carga mais atrativa para os produtores de ferro esponja. Para que isto seja alcançado é necessário que as pelotas sejam bem formadas durante sua produção. Dentre as etapas de produção das pelotas, a mistura dos insumos com o minério de ferro é de grande importância para garantir a boa formação das pelotas verdes e seu posterior endurecimento na etapa de queima. Desta forma, torna-se importante fazer o correto dimensionamento dos equipamentos que promoverão esta mistura para que não haja problemas na homogeneidade da mistura.

Em usinas de pelletização, normalmente, são utilizados misturadores verticais ou misturadores horizontais. Nos misturadores horizontais, foco deste trabalho, o minério de ferro e seus insumos são continuamente alimentados em umas das extremidades do tanque de mistura e descarregados pela outra extremidade pelo movimento do eixo que contém elementos que promoverão a mistura. Para auxiliar no dimensionamento destes equipamentos, pode-se lançar mão de simulações visando economizar tempo e esforços. Vários trabalhos já foram realizados utilizando técnicas de método dos elementos discretos (DEM) para o entendimento de equipamentos industriais. A utilização do método dos elementos discretos é uma poderosa ferramenta para o entendimento do comportamento de fluxos de partículas individuais com muitas aplicações já comprovadas na literatura [1]. Modelos baseados em DEM têm mostrado ser confiáveis e eficientes no entendimento de partículas e suas interações, prevendo o processo de mistura para a investigação de misturas sólidas [2,3]. Uma revisão detalhada com foco em obras relacionadas com a modelagem matemática e simulação numérica para misturadores usando o método dos elementos discretos e dada por Bridgwater [4]. Entretanto, Marigo [5] cita diversos fatores que limitam a utilização do DEM devido ao seu tempo e capacidade de processamento computacional:

- Número de partículas no sistema: Quanto maior o número de partículas, maior será a quantidade de pontos de contato a serem calculados;
- Formato da partícula: geralmente formas complexas são descritas por junção de partículas que causam um aumento no número de partículas dentro do sistema e, portanto, de tempo;
- Tamanho das partículas: para partículas menores usa-se *timestep* (iteração) menores;
- Escolha da propriedade do material: as propriedades do material influenciam diretamente o *timestep*;
- Total de tempo simulado desejado.

Como pode-se ver, estes fatores devem ser otimizados visando ser possível realizar as simulações de forma a racionalizar o processamento computacional. Assim, o presente trabalho procurou analisar como o tamanho de partícula influencia no processamento computacional e nos resultados para avaliação da capacidade de mistura de um misturador horizontal de pelletização com utilização do método dos elementos discretos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização das simulações da região dos quebradores foi utilizado o software EDEM® [6] para simular o fluxo de partículas em um sistema escalonado com a mesma geometria equivalente à de um misturador horizontal industrial. A construção do modelo utilizado foi feita como descrito a seguir.

a. Características do misturador horizontal simulado

Neste trabalho foi escolhido o Misturador Contínuo Intensivo Horizontal (Figura 1) baseado em informações passadas por um fabricante. Este misturador foi escalonado na razão de 1/5 ficando com as dimensões de 1 metro de comprimento com diâmetro de 44 cm. As dimensões foram escolhidas de forma a diminuir o número de partículas no sistema para adequar o tempo de processamento computacional. O equipamento foi modelado com 14 elementos de mistura.

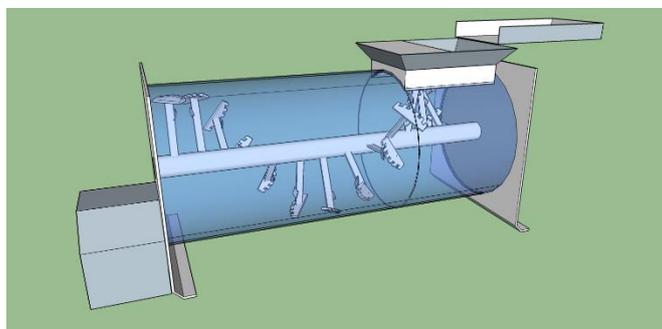


Figura 1 - Modelo 3D do Misturador Contínuo Intensivo Horizontal

Este equipamento foi projetado para operar com taxa de alimentação de aproximadamente 1500 t/hora com um grau de enchimento de 20% do volume útil. A velocidade do eixo que prende os elementos de mistura é de 90 rpm, proporcionando um tempo de residência da mistura de 50 segundos. O modelo 3D foi convertido para o EDEM® conforme mostrado na Figura 2.

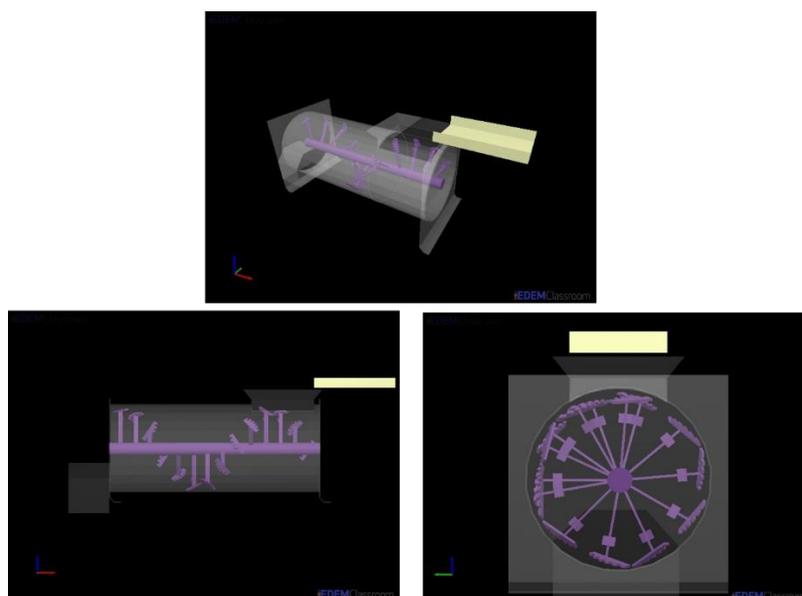


Figura 2 - Visão do Misturador Contínuo Intensivo Horizontal no EDEM®

b. Características da mistura simulada

A mistura a ser pelletada de minério de ferro é composta, além do pellet feed (minério de ferro), de aditivos (fundentes e combustíveis sólidos) e aglomerantes. Os fundentes utilizados são fontes de CaO como a cal hidratada, o calcário calcítico e o dolomítico. Os combustíveis sólidos são o carvão ou coque de petróleo. Destacam-se como aglomerantes mais usuais a bentonita e os aglomerantes orgânicos [7]. Os tamanhos das partículas de pellet feed, carvão e calcário são em sua maioria inferiores a 44 μm . De forma a diminuir o número de partículas e diminuir o tempo de simulação foram consideradas partículas de tamanho único e igual de pellet feed, calcário e carvão e foram desconsideradas as partículas de aglomerante.

Neste ponto encontra-se um dos problemas para a otimização do tempo de simulação e redução do esforço computacional, a determinação do número e tamanho das partículas no sistema. Mesmo com o escalonamento do equipamento, com o tamanho real das partículas a quantidade destas seria superior a 1 milhão. Isto resultaria em simulação com tempo de realização altos, o que não foi alvo desta pesquisa. Desta forma escalonou a partículas em 200 e 400 o tamanho original de forma a avaliar o impacto na simulação sem que o sentido físico do comportamento do fluxo destas fosse perdido. Desta forma as partículas ficaram com tamanhos de 8,8 milímetros e 17,6 milímetros de diâmetro, para avaliação da mistura resultante. Outro fator que foi mantido constante foi o formato da partícula. Todas as partículas foram consideradas como esferas (Figura 3). A proporção de carvão e calcário foram de 1,5 e 1,7% da mistura.

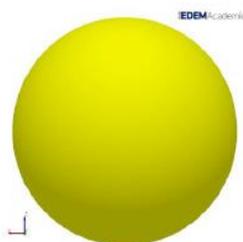


Figura 3 - Modelo 3D das partículas utilizadas

c. Parâmetros utilizados nas simulações

Para que a simulação em DEM tenha sucesso é necessário que os parâmetros sejam escolhidos de forma criteriosa visando a reprodução do comportamento físico. O software EDEM® oferece diferentes modelos de contatos que descrevem o comportamento das partículas e/ou geometrias quando entram em contato. Para este trabalho foram utilizados o modelo de Hertz-Mindlin with JKR Built-in [8, 9] para descrever o contato partícula-partículas. Para descrever os contatos partículas-geometria foram utilizados os modelos Hertz-Mindlin (no slip) e Moving Plane contidos no EDEM® [8]. O modelo modificado de Hertz-Mindlin é o modelo padrão e considera um componente de amortecimento na força normal e tangencial que tem a relação entre o coeficiente de amortecimento e o coeficiente de restituição descritos por TSUJI et al. [10]. A força de atrito tangencial segue a lei de Coulomb como exemplo em CUNDALL e STRACK [11]. Considerando o modelo de contato *Hertz-Mindlin* empregado no EDEM®, se apenas a gravidade é considerada como força externa, as

demais características e parâmetros de contato das partículas a serem implementados são:

- Formato da partícula;
- Tamanho da partícula;
- Densidade da partícula;
- Modulo de Cisalhamento (G) e coeficiente de Poisson (ν);
- Coeficiente de atrito: estático e de rolamento, entre partícula-partícula e partícula-geometria;
- Material da partícula;
- Coeficiente de restituição: partícula-partícula e partícula-geometria do material.

Além destes, para o modelo Hertz-Mindlin with JKR Built-in é necessário a energia de superfície em joule por metro quadrado. Devido ao caráter exploratório desta pesquisa os parâmetros dos diversos materiais foram determinados conforme uma revisão da literatura. Foram levantados os valores do minério [12], carvão [13,14,15,16], calcário [17,18], borracha e aço [19] obtidos por meios experimentais obtidos por diferentes autores. Os parâmetros utilizados para as simulações estão descritos na Tabela 01 a 03. Os demais parâmetros de contato foram mantidos com os valores padrão do EDEM®.

Tabela 1: Parâmetros de contato dos materiais

| Parâmetros | Minério | Carvão | Calcário | Aço | Borracha |
|--------------------------------|---------|--------|----------|------|----------|
| Coeficiente de Poisson | 0,25 | 0,22 | 0,25 | 0,3 | 0,5 |
| Modulo de cisalhamento (MPa) | 2500 | 2200 | 100 | 7000 | 7,1 |
| Densidade (kg/m ³) | 2650 | 1430 | 2594 | 7800 | 860 |

Tabela 2: Parâmetros de contato entre as partículas

| Contato | Minério-Minério | Carvão-Carvão | Calcário-Calcário | Aço-Aço |
|------------------------------------|-----------------|---------------|-------------------|---------|
| Coeficiente de restituição | 0,51 | 0,9 | 0,85 | 0,8 |
| Coeficiente de Atrito estático | 0,2 | 0,17 | 0,3 | 0,5 |
| Coeficiente de Atrito de rolamento | 0,35 | 0,15 | 0,4 | 0,1 |

Tabela 3: Parâmetros - energia de superfície

| | Minério-Minério | Minério-Carvão | Minério-Calcário |
|---|-----------------|----------------|------------------|
| Energia de Superfície (J/m ²) | 10 | 5 | 5 |

d. Critérios de avaliação das simulações

Para avaliação da influência do tamanho das partículas nos resultados foram realizadas duas simulações, um contendo tamanho de partícula com 17,6 mm de diâmetro e outra com 8,8 mm de diâmetro. Ambas as simulações foram realizadas até o momento em que o equipamento atingisse o regime estacionário e foi avaliado o índice de mistura. O estado da mistura em um misturador é analisado pelo cálculo do índice de mistura M. Existem diversos índices que podem ser utilizados como indicador da segregação do material na mistura [20], porém para este trabalho foi adotado o índice de LACEY [21] já utilizado em outros trabalhos de simulação em DEM [22,23]. A abordagem de Lacey baseia-se numa alteração da mistura de variância para a maior mudança de mistura de variância de uma mistura binária; o valor do índice de mistura varia de 0 a 1, em que 0 representa um estado segregado e o 1 representa um estado perfeitamente misturado. Este cálculo é feito para

sistemas binários, logo será feita uma avaliação da mistura minério carvão e da mistura calcário-carvão. O cálculo do índice M é dado pelas equações:

$$M = \frac{\sigma_0^2 - \sigma^2}{\sigma_0^2 - \sigma_r^2},$$

onde σ^2 é a variação da mistura calculada por amostras com distribuição de partículas n vezes,

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y^i - \bar{y})^2,$$

σ_0^2 é a variância segregada dadas por N_A e N_B são o número de partículas do tipo A e tipo B, respectivamente,

$$\sigma_0^2 = \frac{N_A N_B}{(N_A + N_B)^2},$$

σ_r^2 é a variância aleatória, com N_{rand} igual o número de partículas na amostra,

$$\sigma_r^2 = \frac{\sigma_0^2}{N_{rand}},$$

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram realizadas as simulações com as partículas com tamanho de 17,6 e 8,8 mm de diâmetro. Para o primeiro tamanho de partícula (Figura 4) foi simulado o processo de mistura durante 180 segundos com um total de mais 3500 partículas presentes no sistema de mistura. O sistema atingiu o estágio estacionário após 50 segundos de simulação. Na simulação com partículas de 8,8 mm de diâmetro (Figura 5) o tempo de simulado foi de 60 segundos em virtude do maior número de partículas no sistema, maior que 35000 partículas. O sistema atingiu o estágio estacionário após 30 segundos de simulação. Pela observação das simulações percebeu-se uma maior fluidez das partículas de tamanho menor, o que já era esperado, mais próximo do comportamento real.

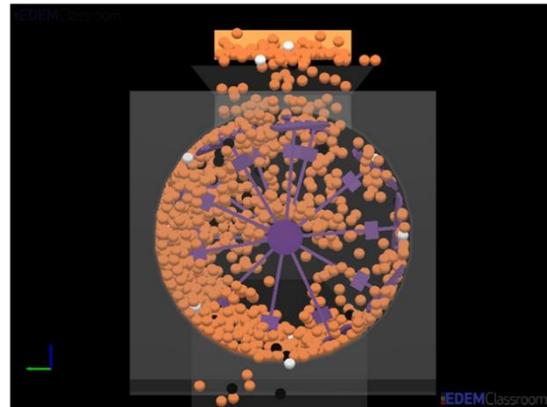
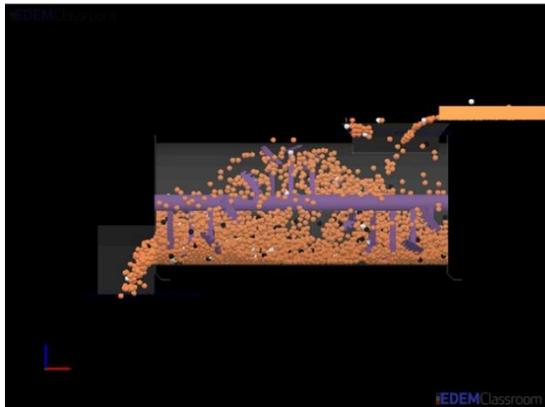
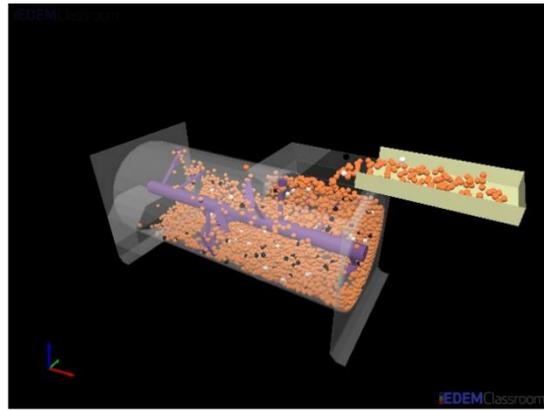


Figura 4 - Modelo simulado com partículas de 17,6 mm de diâmetro

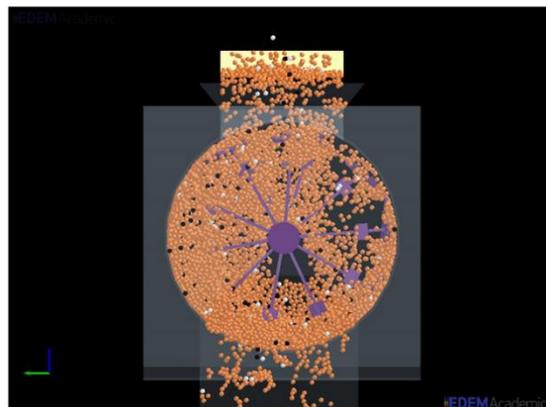
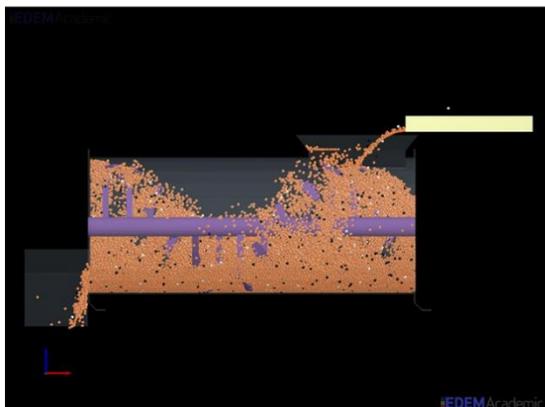
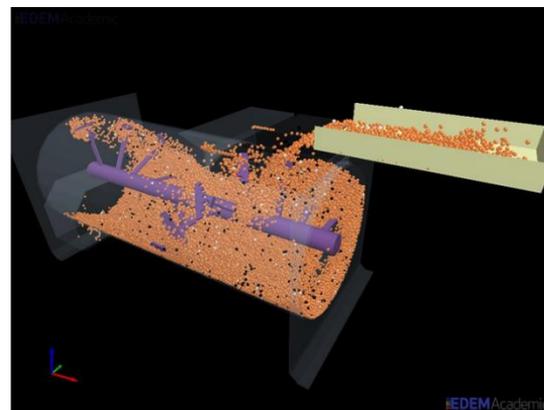


Figura 5 - Modelo simulado com partículas de 17,6 mm de diâmetro

Para avaliar o comportamento da mistura foram contabilizados a massa de cada elemento (minério, carvão e calcário) com intervalos de 25 segundos para o tamanho maior (Figura 6) e com intervalos de 5 segundos para o tamanho menor (Figura 7).

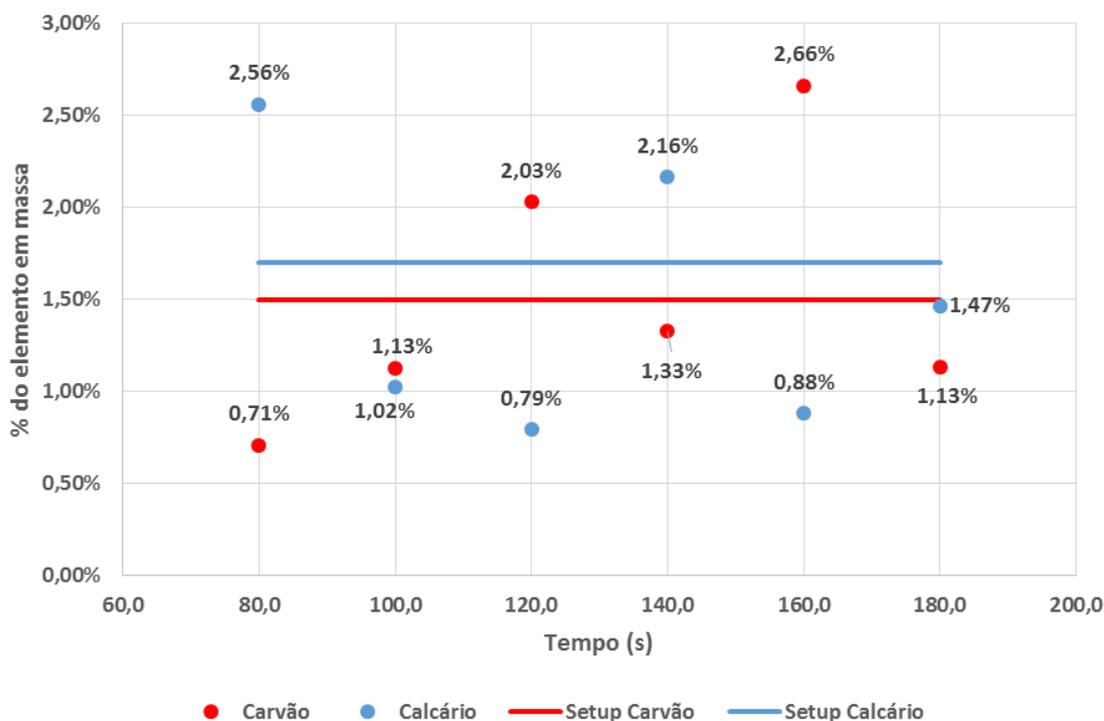


Figura 6 - Avaliação da mistura com partículas de 17,6 mm de diâmetro

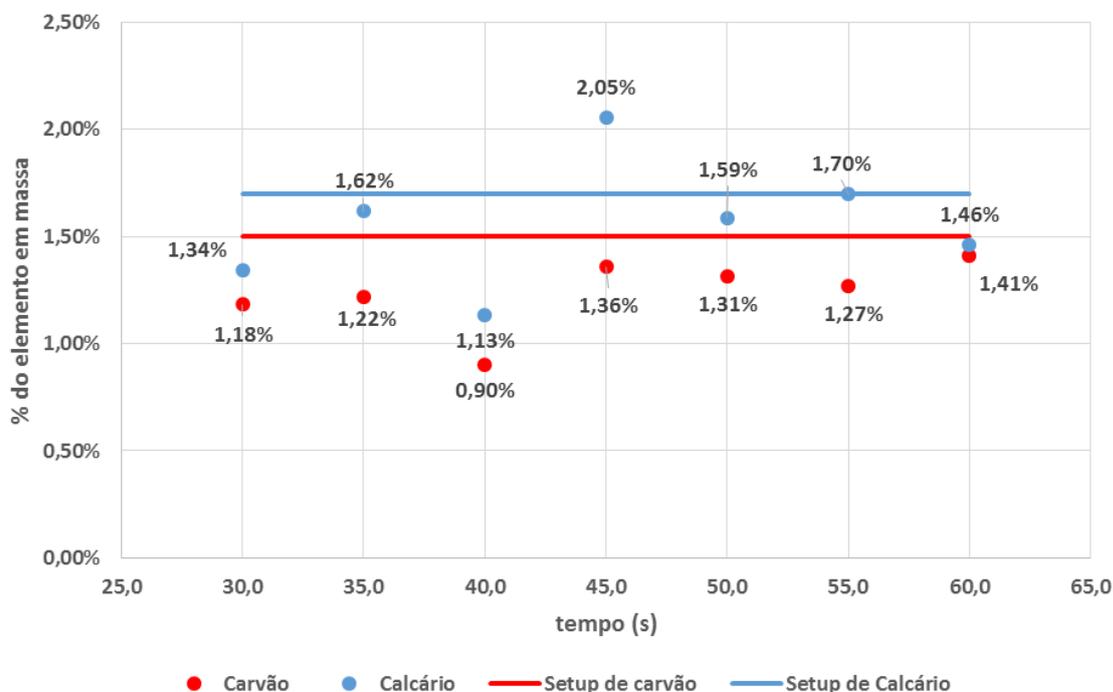


Figura 7 - Avaliação da mistura com partículas de 8,8 mm de diâmetro

Considerando o “setup” de cada um dos elementos, carvão como 1,5% e calcário como 1,7% em massa em relação a massa de minério, pode-se verificar comparando as Figuras 6 e 7 que há diferença entre as simulações realizadas com partículas de

tamanho diferente. Nas partículas maiores os valores são mais aleatórios e não é respeitada a maior proporção de calcário em relação ao carvão. Já na simulação com partículas menores percebe-se uma maior homogeneidade ao longo do tempo sendo respeitado a maior proporção de calcário em relação ao carvão. Como o tamanho de partícula é um fator que influencia fortemente na mistura, tal resultado era esperado e vem a comprovar que o tamanho tem influência direta na capacidade de mistura.

Avaliando o índice de mistura de LACEY após o tempo de simulação (Tabela 4), pode-se perceber que existe uma influência direta do tamanho de partícula na capacidade de mistura do sistema estudado e que quanto menor este tamanho, melhor será a condição da mistura. Como é esperado deste tipo de misturador valores de índice de LACEY superiores a 0,75, não é aconselhado que o escalonamento das partículas seja superior a 200 vezes o tamanho real. É importante ressaltar que a escolha do escalonamento deve, também, levar em conta a capacidade de processamento computacional que estará disponível para a realização das simulações. Uma maior capacidade de processamento proporcionará a possibilidade de escalonar a partícula para tamanhos mais próximos do real, o que tornará a simulação mais fiel a condições reais.

Tabela 4: Índice de mistura de Lacey

| Tamanho de Partícula \varnothing (mm) | Índice de LACEY | |
|---|-----------------|----------|
| | Carvão | Calcário |
| 17,6 | 0,52 | 0,56 |
| 8,8 | 0,85 | 0,81 |

4 CONCLUSÕES

A partir dos resultados das simulações com o software EDEM® da capacidade de mistura do Misturador Contínuo Intensivo Horizontal pode-se verificar que o tamanho da partícula tem influência na eficiência da mistura. Além disto, o escalonamento errado das partículas pode gerar informações que não serão condicentes com o comportamento físico real das partículas. Assim, com o auxílio de simulações utilizando o software EDEM® foi possível demonstrar a aplicação do método dos elementos discretos ao processo de mistura e sua aplicabilidade para avaliação do mesmo.

Sugere-se para trabalhos futuros:

- a determinação do escalonamento do tamanho de partícula que não influencie nos resultados
- avaliar a influência dos parâmetros operacionais;
- avaliar a influencia da umidade na capacidade de mistura

REFERÊNCIAS

- 1 CLEARY, Paul W. Industrial particle flow modelling using discrete element method. *Engineering Computations*, v. 26, n. 6, p. 698–743, 2009.
- 2 CLEARY, Paul W.; SINNOTT, Matthew D. Assessing mixing characteristics of particle-mixing and granulation devices. *Particuology*, v. 6, n. 6, p. 419–444, 2008.
- 3 JOVANOVIĆ, Aca *et al.* DEM/CFD analysis of granular flow in static mixers. *Powder Technology*, v. 266, p. 240–248, 2014.
- 4 BRIDGWATER, John. Mixing of powders and granular materials by mechanical means—A perspective. *Particuology*, v. 10, n. 4, p. 397–427, 2012.

- 5 MARIGO, M. Discrete Element Method Modelling of Complex Granular Motion in Mixing Vessels: Evaluation and Validation. Tese de doutorado, University of Birmingham, 2012.
- 6 EDEM 2.5 User Guide, DEM Solutions, Edinburgh, 141 p. 2013
- 7 MEYER, Kurt. PELLETIZING OF IRON ORE. Berlin ; New York: Springer-Verlag, 1980.
- 8 EDEM 2.4 Theory reference guide, DEM Solutions, Edinburgh, 19 p. 2011
- 9 Johnson, K. L., K. Kendal, and A. D. Roberts. "Surface energy and the contact of elastic solids." Proc. R. Soc. Lond. A 324 (1971): 301-313.
- 10 TSUJI, Y.; TANAKA, T.; ISHIDA, T. Lagrangian numerical simulation of plug flow of cohesionless particles in a horizontal pipe. Powder Technology, v. 71, n. 3, p. 239–250, 1992.
- 11 CUNDALL, P.; STRACK, O. A discrete numerical model for granular assemblies. Geotechnique, 1979.
- 12 ghfdasghfdasfdgasfashf
- 13 CHEN, Liangyong et al. CFD simulation of coal-water slurry flowing in horizontal pipelines. Korean Journal of Chemical Engineering, v. 26, n. 4, p. 1144–1154, 2009.
- 14 GRIMA, A.P. P.; WYPYCH, P.W. W. Development and validation of calibration methods for discrete element modelling. Granular Matter, v. 13, n. 2, p. 127–132, 2010
- 15 YU, Yaowei; SAXE, Henrik. Flow of Pellet and Coke Particles in and from a Fixed Chute. 2012.
- 16 SUN, Liyan et al. Numerical Simulation of Particle Segregation in Vibration Fluidized Beds. Chemical Engineering & Technology, v. 37, n. 12, p. 2109–2115, 2014.
- 17 SARIİŞIK, G. et al. Classification of Parameters Affecting Impact Resistance of Natural Stones. Journal of Testing and Evaluation, v. 44, n. 4, p. 12, 2016.
- 18 AZZONI, a.; DE FREITAS, M. H. Experimentally gained parameters, decisive for rock fall analysis. Rock Mechanics and Rock Engineering, v. 28, n. 2, p. 111–124, 1995.
- 19 Barrios, G.K.P., Carvalho, R.M., Kwade, A.W., Tavares, L.M. Contact parameter estimation for dem simulation of iron ore pellet handling. Powder Technology, fev. 2013.
- 20 PALMA, Geraldo Luiz; JUNIOR, Augusto Ronchi. Indicadores da qualidade de mistura de sólidos particulados. 2010.
- 21 P.M.C. Lacey, Developments in the theory of particle mixing, Journal of Applied Chemistry, 4 , 257–268, 1954.
- 22 BASINSKAS, Gytis; SAKAI, Mikio. Numerical study of the mixing efficiency of a ribbon mixer using the discrete element method. Powder Technology, v. 287, p. 380–394, 2015.
- 23 SAKAI, Mikio *et al.* Discrete element simulation for the evaluation of solid mixing in an industrial blender. Chemical Engineering Journal, v. 279, p. 821–839, 2015.