

APLICAÇÕES DO MÉTODO DOS ELEMENTOS DISCRETOS¹

*Luís Marcelo Marques Tavares²
Rodrigo Magalhães de Carvalho²*

Resumo

O método dos elementos discretos tem se mostrado como uma ferramenta muito poderosa na simulação de processos envolvidos em diversos estágios da extração, processamento, manuseio, transporte e até na transformação de minérios de ferro em ferro gusa. O trabalho mostra aplicações desse método, e como ele pode ser combinado com o modelo do balanço populacional na previsão de resultados de processos de britagem, moagem e no manuseio de granéis. Estudos de casos de diferentes aplicações são apresentados, com ênfase na simulação da moagem e na previsão de resultados da degradação de pelotas de minério de ferro.

Palavras-chave: simulação, método dos elementos discretos, manuseio

APPLICATIONS OF THE DISCRETE ELEMENT METHOD

Abstract

The discrete element method has demonstrated to be a very powerful tool in the simulation of processes involved in the different stages of ore extraction, processing, handling, transport and even the transformation of iron ore in pig iron. The paper shows applications of this method, and how it can be combined to the population balance model in the prediction of processes that include crushing, grinding and bulk solids handling. Case studies of different applications are presented, with emphasis on the simulation of grinding and the prediction of iron ore pellet degradation during handling.

Key words: Simulation; Discrete element method; Handling.

¹ Contribuição técnica ao 41º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 12º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 12 a 16 de setembro de 2011, Vila Velha, ES.

² Laboratório de Tecnologia Mineral, Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE/UFRJ, Centro de Tecnologia, Bloco F, Sala 210, CEP 21945-970, Rio de Janeiro (RJ), tavares@ufrj.br.

1 INTRODUÇÃO

A modelagem e a simulação de processos são ferramentas de grande utilidade para o engenheiro tanto na etapa de projeto de uma instalação de processamento e transformação mineral, quanto durante seu *ramp-up* e operação. Além de modelos e métodos puramente empíricos, que buscam descrever relações de causa e efeito entre algumas das principais variáveis do processo com o auxílio de equações ou regras práticas (*rules of thumb*), há mais de 50 anos a descrição de processos tem se beneficiado de ferramentas como o modelo do balanço populacional e equações de balanço de massas e quantidade de movimento dos fenômenos de transporte, incluindo a mecânica de fluidos computacional (CFD). Uma vez que se baseia na descrição do que ocorre nos processos utilizando equações do contínuo, essas ferramentas freqüentemente têm mostrado limitações quando são aplicadas para descrever processos nos quais pelo menos uma das fases presentes se encontra na forma particulada, que é, por definição, discreta.

Felizmente, há pouco mais de 30 anos⁽¹⁾ foi desenvolvida uma ferramenta, denominada “método dos elementos discretos” (ou distintos) (*Discrete Element Method – DEM*) que visa exatamente preencher essa lacuna. O DEM alcançou imensa popularidade ao final da década de 1980 e, tanto o seu desenvolvimento quanto as suas aplicações, têm crescido de forma ininterrupta desde então. No contexto da indústria minero-metalúrgica as primeiras aplicações datam do início da década de 1990, sendo exemplos a simulação do movimento (em 2D) da carga moedora de moinhos⁽²⁾ e a separação de partículas por jigagem,⁽³⁾ entre outras.

Mais recentemente, a ferramenta tem sido aplicada com sucesso em diversas outras aplicações no contexto da indústria mineral, incluindo a previsão da operação de escavadeiras do tipo *dragline*,⁽⁴⁾ de britadores cônicos⁽⁵⁾ e de impacto,⁽⁶⁾ bem como no manuseio de sólidos.⁽⁷⁾

No caso da siderurgia o DEM tem se mostrado uma ferramenta útil na previsão da distribuição do material (granulado, *sinter-feed* e pelotas de minério de ferro e coque) durante o carregamento de altos fornos usados na produção do ferro gusa.⁽⁸⁾ A segregação de diferentes materiais pode ocorrer no centro ou nas paredes do forno, formando *clusters* que prejudicam o escoamento dos gases responsáveis pela redução. Nesses casos a aplicação do DEM é útil, pois pode auxiliar na otimização da estratégia de carregamento visando tanto o aumento da uniformidade da distribuição da carga quanto a redução da degradação dos materiais posicionados em diferentes partes do alto forno.

Embora o DEM continue ampliando o seu horizonte de aplicações, talvez o maior foco da pesquisa atualmente na área é o seu acoplamento com outras ferramentas de modelagem. Um exemplo é o acoplamento com a mecânica de fluidos computacional (CFD), que, juntos têm sido utilizados com sucesso na descrição do transporte e descarga de moinhos tubulares,⁽⁹⁾ na operação de peneiras a úmido⁽¹⁰⁾ e na redução de minério em altos fornos.⁽¹¹⁾ Outro acoplamento importante tem sido com o método dos elementos finitos, que tem permitido a previsão dos esforços aplicados à carcaça de moinhos tubulares pelos corpos moedores,⁽¹²⁾ o que abre possibilidades de previsão da taxa de desgaste abrasivo dos revestimentos de moinhos. No caso de processos nos quais as partículas perdem a sua integridade, como é o caso dos processos de

cominuição e da degradação durante o manuseio, o acoplamento natural é com o modelo do balanço populacional (MBP).

O presente trabalho ilustra algumas das aplicações recentes do acoplamento do DEM ao modelo do balanço populacional que visam desenvolver ferramentas avançadas de previsão de processos de cominuição e degradação de partículas. Esse, inclusive, é o foco atual do Laboratório de Tecnologia Mineral da COPPE/UFRJ, que tem realizado pesquisas há mais de uma década na modelagem matemática da fragmentação de partículas e no desenvolvimento do modelo generalizado da cominuição (MGC).

2 DEM E MGC

O Método dos Elementos Discretos é um algoritmo de aplicação direta da segunda Lei de Newton, no qual, para cada partícula pertencente a um domínio, se aplicam as leis do movimento, calculando sua velocidade, posição e momento a cada instante de tempo. Da mesma forma, para cada contato entre duas partículas, um modelo determina qual será a intensidade do contato e dos esforços. Diferentes modelos de contato têm sido propostos e empregados,⁽¹³⁾ sendo o de Hertz-Mindlin o mais popular. No presente trabalho é usado o software EDEM[®] da DEM Solutions⁽¹⁴⁾ nas simulações, o qual permite simular, de forma conveniente, sistemas com geometria complexa e com superfícies estacionárias ou em movimento. Esse software permite acompanhar o movimento e a interação de vários milhões de partículas, acumulando informações detalhadas tanto de cada um dos contatos na escala microscópica, quanto do movimento macroscópico resultante.

O modelo de contato adotado no trabalho é o de Hertz-Mindlin, sem deslizamento. Uma vez escolhido o modelo de contato, o passo seguinte é a escolha de parâmetros adequados de contato. Diversos ensaios técnicos têm sido utilizados para calibrar os parâmetros de contato, tendo sido recentemente apresentados em outra publicação⁽¹⁵⁾ os procedimentos adotados no LTM/COPPE.

O modelo generalizado da cominuição (MGC) é uma ferramenta, desenvolvida no Laboratório de Tecnologia Mineral da COPPE/UFRJ, que combina informações do DEM sobre o ambiente mecânico do processo a resultados de ensaios de quebra de partículas sob a ação dos diferentes mecanismos encontrados nos processos industriais (Figura 1) usando o modelo do balanço populacional. Além de oferecer uma descrição mecanicista dos processos, o modelo permite a modelagem de diferentes processos de britagem, moagem e até de degradação durante o manuseio e transporte, pois as influências do material e do equipamento são desacopladas, de forma que a importância relativa dos diferentes mecanismos de fragmentação pode variar, dependendo do tipo e magnitude dos esforços aplicados no material no interior do equipamento. Detalhes do modelo podem ser encontrados em outras publicações.^(16,17)



Figura 1. Esquema representativo do Modelo Generalizado da Cominuição (MGC).

3 ESTUDOS DE CASOS

3.1 Manuseio de Granéis

Até recentemente o projeto de instalações de manuseio de sólidos, incluindo as especificações de transportadores de correia, chutes de transferência e silos, era realizado exclusivamente por meio de regras práticas e equações baseadas em experiência. Com o advento e a popularização do DEM essa atividade agora está sendo revolucionada, se tornando possível prever o comportamento do fluxo granular, resultando na otimização da operação no que diz respeito ao transporte e desgaste das superfícies.

No caso de minérios granulados e pelotas a questão da degradação durante o manuseio ocupa uma posição de grande importância, pois o manuseio dos sólidos pode ser responsável por alterações significativas na distribuição granulométrica do material, resultando na geração indesejada de finos, os quais possuem menor valor comercial. Um modelo matemático, baseado no modelo do balanço populacional, foi recentemente desenvolvido,^(18,19) que permite prever a degradação pela quebra superficial (abrasão) e volumétrica (estilhaçamento) de partículas quando sujeitas a impactos, descrevendo ainda a perda progressiva de resistência à medida que partículas são submetidas a impactos. A grande vantagem do modelo é permitir a previsão da influência da superfície de contato, da energia de impacto e das características do material particulado.

Exemplos de aplicação do DEM são apresentados na Figura 2, que ilustra um chute de transferência em um circuito de manuseio e o enchimento de um silo. Em ambos os casos o DEM permite registrar a energia transferida às partículas em cada colisão, sendo essa repassada ao MGC que, por sua vez, permite prever a distribuição granulométrica resultante da quebra das partículas. Dessa forma é possível buscar configurações de equipamentos e circuitos de manuseio que sejam capazes de minimizar a degradação sobre o material particulado.

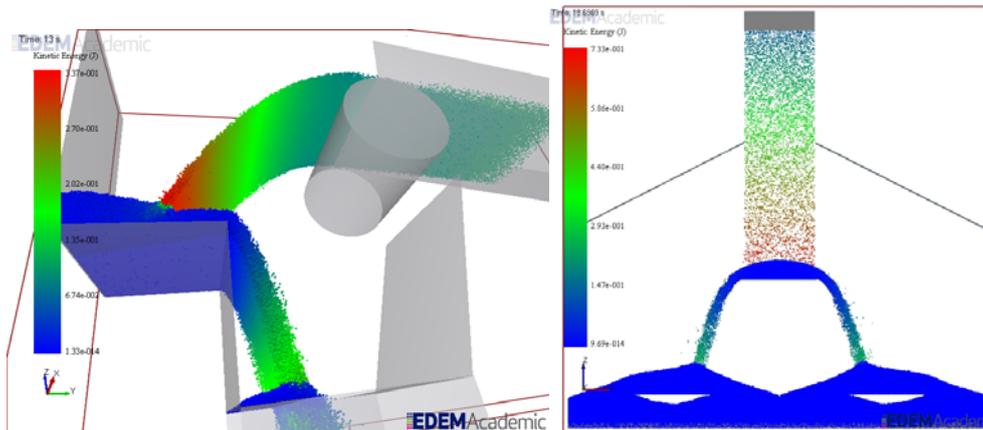


Figura 2. Simulação de transportador de correia (esquerda) e do carregamento de um silo (direita) usando o EDEM.

Uma verificação da metodologia proposta é apresentada nas Figuras 3 e 4, que corresponde à simulação em laboratório de quedas sucessivas de um lote de pelotas de minério de ferro. A Figura 3 apresenta o resultado da simulação do ensaio no qual 10 kg de material são soltos em queda livre de uma altura de 8 metros contra uma superfície de aço. As partículas estão lançadas de forma que sejam reproduzidas duas situações: o impacto das primeiras partículas que chegam à superfície de aço e aquelas que colidem contra aquelas já previamente depositadas (leito de partículas). O resultado da aplicação do modelo é mostrado na Figura 4, o qual sugere que o mesmo é capaz de prever, com um alto nível de fidelidade, a distribuição granulométrica resultante ao final de 5 e 20 impactos.

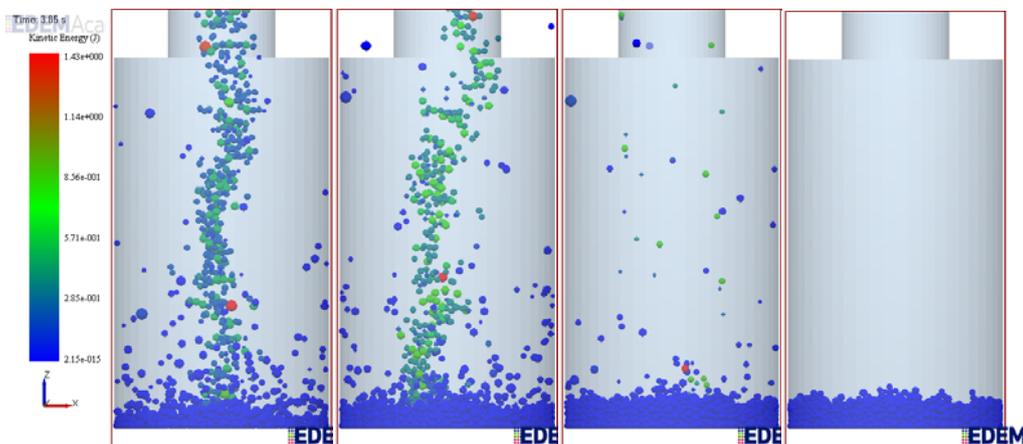


Figura 3. Ensaio de verificação dos parâmetros de quebra em um ensaio de queda livre (*drop test*) (8 m).

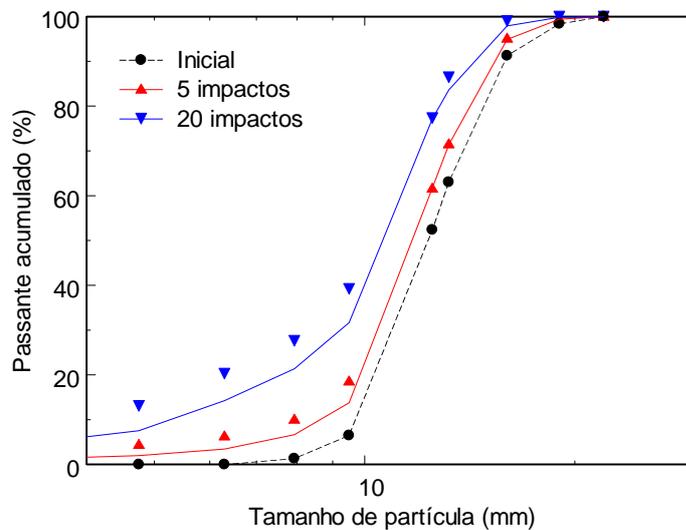


Figura 4. Comparação entre valores medidos (símbolos) e simulações (linhas sólidas) resultantes de ensaio de queda livre (8 m) de pelotas de minério de ferro (simulado por DEM na Figura 3).

3.2 Simulação de Britadores

Conforme revisado previamente, uma aplicação comparativamente recente do DEM no processamento mineral tem sido na previsão de resultados de britagem. Nesse caso, a técnica permite não somente estimar as energias envolvidas nas colisões, como também o fluxo de massa (transporte dos sólidos) no interior dos britadores.

Um britador utilizado ocasionalmente na preparação de minérios de ferro é o britador de impacto de eixo vertical, ou VSI (*vertical shaft impactor*). Nesse britador as partículas são lançadas a partir contra uma bigorna por um rotor que gira a elevadas frequências. Estudo em andamento no LTM/COPPE⁽²⁰⁾ visa simular o tanto fluxo de material através desses britadores, quanto a cominuição resultante. A Figura 5 apresenta simulações em DEM do movimento das partículas no interior de um britador VSI. A figura permite identificar regiões de maior intensidade energética (maiores velocidades), sendo que o espectro de energias de colisão será utilizado na previsão da distribuição granulométrica do projeto com o auxílio do MGC.

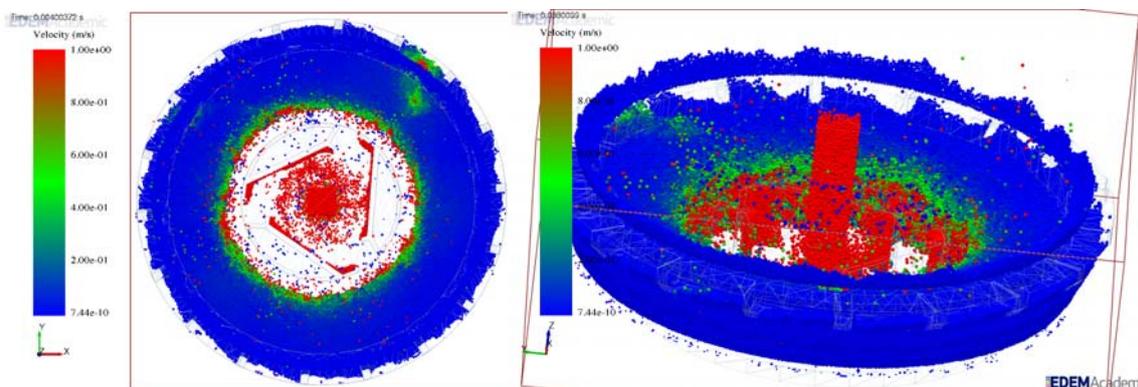


Figura 5. Simulação de um britador de impacto de eixo vertical (VSI): vista superior (esq.) e vista em perspectiva (dir.).

3.3 Moagem em Moinhos Tubulares Rotativos

Uma das primeiras e mais bem sucedidas aplicações do DEM em tecnologia mineral foi na descrição do movimento de corpos moedores em moinhos. A técnica tem sido utilizada para compreender o que ocorre em moinhos tubulares de bolas, ⁽²⁾ autógenos e semi-autógenos, ⁽²¹⁾ vibratórios e planetários.

No caso de moinhos tubulares rotativos esse método já é uma ferramenta de uso rotineiro na indústria na seleção de revestimentos de moinhos, avaliando como combinações de frequências de rotações e perfis de barras elevadoras podem causar a indesejável projeção excessiva da carga moedora, que poderia acarretar em destruição dos revestimentos. Essa sensibilidade do DEM ao perfil do revestimento é ilustrada na Figura 6 para moinhos de laboratório.

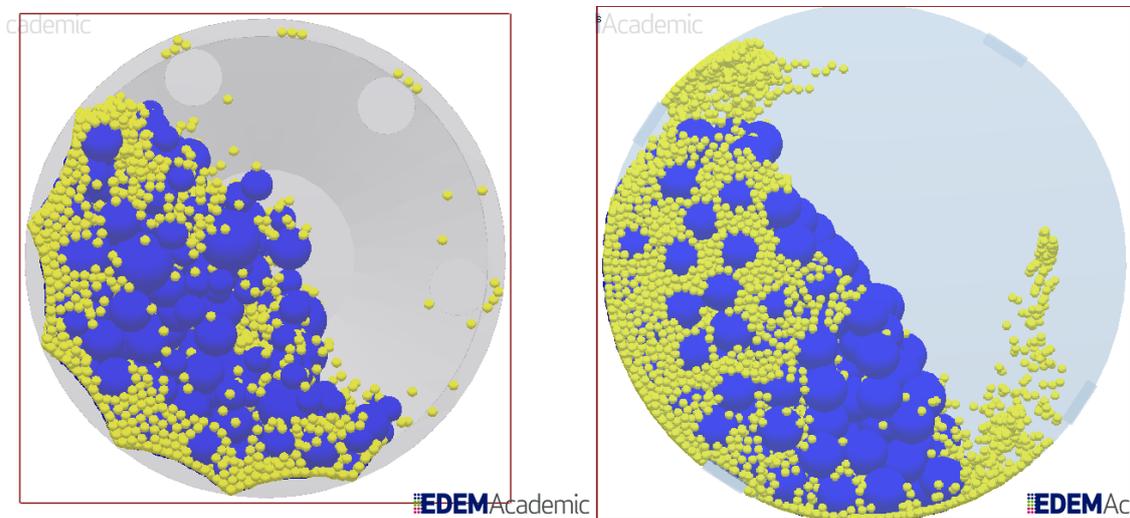


Figura 6. Simulação em DEM de moinhos de bolas de laboratório (30 cm de diâmetro) com diferentes perfis de revestimentos.

Para que o DEM ofereça resultados quantitativamente válidos é necessário que os parâmetros que descrevem os diferentes materiais e tipos de contato sejam adequadamente escolhidos. Entretanto, uma vez escolhidos os parâmetros adequados, a técnica é capaz de prever com um bom nível de confiança o movimento tanto de partículas minerais quanto corpos moedores, como mostra a Figura 7. ⁽¹⁵⁾

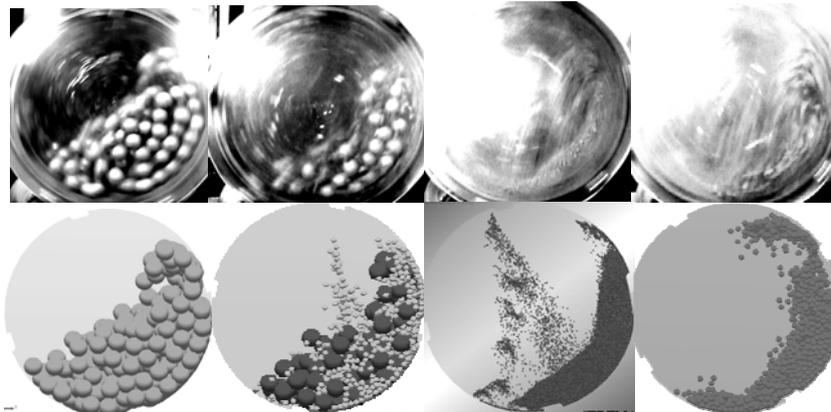


Figura 7. Comparação entre o movimento da carga no moinho de laboratório (linha superior) e as respectivas simulações em DEM utilizando os parâmetros de contato ótimos. Da esquerda para a direita: 29,8 kg de bolas de aço de 25 mm de diâmetro (54,5 rpm), 15 kg de bolas mais 1,6 kg de partículas de minério na faixa de 9,5-6,3 mm (54,5 rpm), 6 kg de minério na faixa 1,70–1,18 mm (66,7 rpm) e 5 kg de minério na faixa 9,5-6,3 mm (60 rpm).

Desde a década de 1990, tentativas têm sido realizadas com o objetivo de utilizar dados obtidos no DEM na previsão de resultados de moagem,^(22,23) pelo seu acoplamento ao modelo do balanço populacional. Entretanto, apenas recentemente^(16,17) foi desenvolvido um modelo suficientemente detalhado que permite levar em consideração os diferentes mecanismos através dos quais partículas quebram (fratura desintegrativa e superficial), bem como o enfraquecimento progressivo que partículas sofrem quando são submetidas a impactos sucessivos e não quebram. No caso do moinho de bolas, o DEM pode ser utilizado para descrever o ambiente mecânico do processo, ou seja, as magnitudes e freqüências de colisões entre os corpos moedores, deixando para o MGC a tarefa de prever o resultado da quebra de partículas.⁽¹⁷⁾ Resultados típicos desse acoplamento são mostrados na Figura 8, que mostra a previsão da influência do tamanho dos corpos moedores na taxa de quebra de um minério de cobre cominuído em um moinho de laboratório.

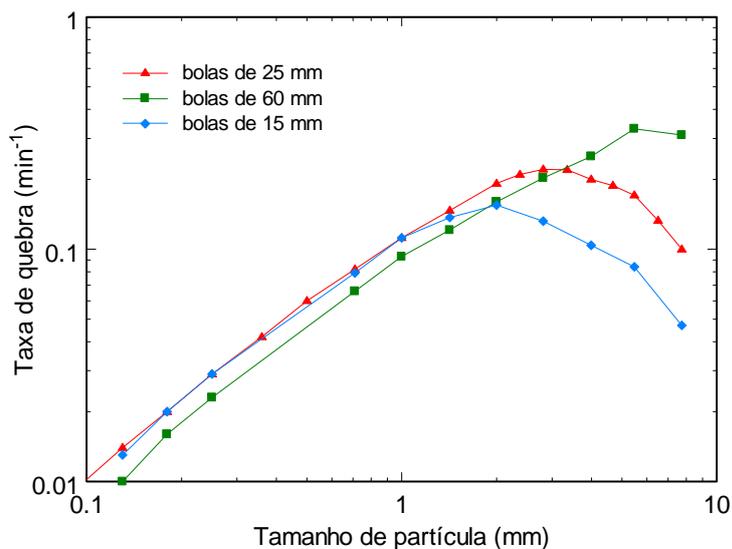


Figura 8. Previsão da taxa específica de quebra de um moinho de bolas operando em batelada (30 cm de diâmetro) para cargas moedoras contendo diferentes tamanhos de bolas.

A *priori*, a extensão desse modelo para outros tipos de moinhos é imediata. Entretanto, a modelagem matemática de moinhos autógenos e semi-autógenos apresenta desafios adicionais. Nesses equipamentos o minério não é só o objeto da aplicação dos esforços (como nos moinhos de bolas), como também os agentes nessa tarefa. Isso demanda que simulações em DEM sejam realizadas de toda a carga moedora no interior do moinho, a qual é composta em parte pelas partículas mais grossas do minério e bolas de aço, sendo essas últimas apenas presentes no caso de moinhos semi-autógenos. Essa sutil, essa diferença impõe desafios importantes, pois demanda o acoplamento entre o DEM e o MGC em duas vias, pois simulações em DEM fornecem resultados para a simulação usando o MGC que, por sua vez, influencia a distribuição de tamanhos de partículas que compõem a carga moedora, e assim sucessivamente até que a estabilidade seja atingida. Uma metodologia de acoplamento desses modelos foi recentemente desenvolvida,⁽²⁴⁾ a qual foi utilizada na simulação da moagem tanto em escala piloto quanto industrial em moinhos semi-autógenos (Figura 9).

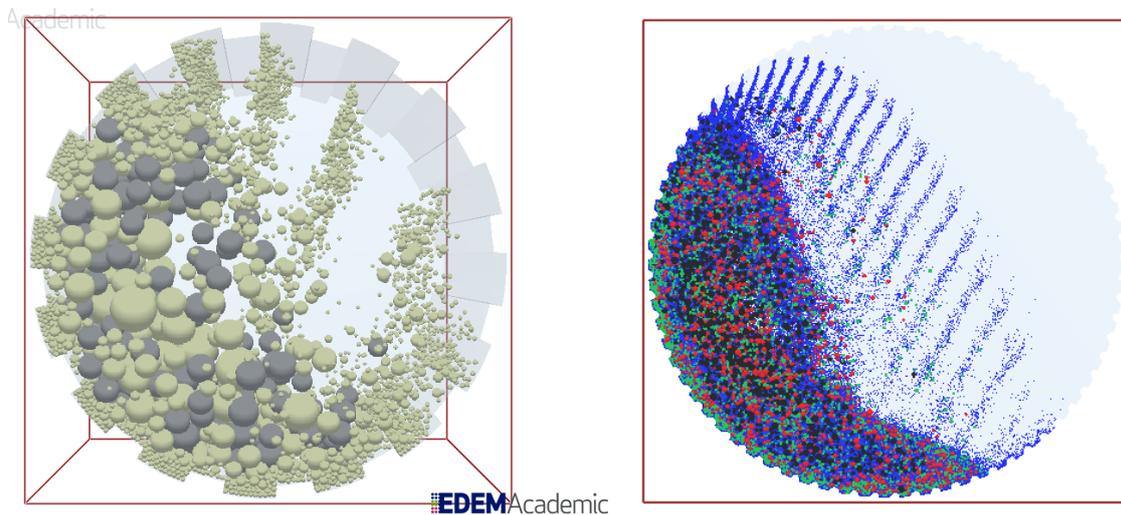


Figura 9. Simulações em DEM de moinho SAG em operação em escala piloto (1,8 m de diâmetro) (esq.) e industrial (8 m de diâmetro) (dir.).

4 CONCLUSÕES

De um uso inicial como técnica de pesquisa e auxiliar para o entendimento e descrição de processos envolvendo sistemas particulados, o DEM está atualmente rumando na direção de se tornar mais uma ferramenta de grande valor tanto no projeto quanto na otimização de processos que vão desde a extração até a transformação de minérios. O trabalho ilustrou como, após ser informado com parâmetros adequados dos contatos, o software EDEM foi capaz de simular com razoável rapidez sistemas de interesse na indústria mineral como chutes de transferência, silos, britadores de impacto e moinhos. Por fim, o trabalho mostrou que, após acoplado com o Modelo Generalizado da Cominuição, previsões da degradação em sistemas de manuseio e a cominuição em moinhos tubulares pode ser obtida. Após o devido desenvolvimento até a sua maturidade e a sua validação, essa modelagem permitirá o projeto mecânico de britadores quanto de moinhos. Além disso, ela permitirá o projeto de instalações

industriais que utilizam equipamentos de manuseio e cominuição com muito mais confiança do que é possível alcançar na atualidade.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq pelo apoio financeiro e à DEM Solutions, pelo fornecimento do software EDEM[®] dentro do programa de apoio acadêmico.

REFERÊNCIAS

- 1 Cundall, P.A., Strack, O.D.L. A discrete numerical model for granular assemblies, *Geotechnique*, v. 29, p. 47–65, 1979.
- 2 Mishra, B.K. e Rajamani, R.K. The discrete element method for the simulation of ball mills, *Appl. Math. Model.*, v. 12, p. 598-604, 1992.
- 3 Mishra B.K. e Mehrotra, S.P., Modelling of particle stratification in jigs by the discrete element method, *Miner. Eng.*, v. 11, n. 6, pp. 511-522, 1997.
- 4 Cleary, P.W. DEM simulation of industrial particle flows: case studies of dragline excavators, mixing in tumblers and centrifugal mills, *Powder Technology*, v. 109, n. 1-3, p. 83-104, Abril, 2000.
- 5 Lichter, J., Lim, D., Potapov, A. e Kaj D. New developments in cone crusher performance optimization. *Miner. Eng.*, v. 22, p. 613-617, 2009.
- 6 Djordjevic, N., Shi, F.N. e Morrison, R.D. Applying discrete element modelling to vertical and horizontal shaft impact crushers, *Miner. Eng.*, v. 16, n. 10, p. 983-991, 2009.
- 7 Franz, M., Design of belt conveyor transfer stations, *Bulk Solids Handl.*, n. 27, p. 168-173, 2007.
- 8 Defendi, G., Baltazar, A., Nogueira, P.F. e Nasato, D.S., Blast furnace load simulation using EDEM, *ESSS Users Conference*, Atibaia-SP, 2010.
- 9 Cleary, P.W., Sinnott, M. e Morrison, R.D., Prediction of slurry transport in SAG mills using SPH fluid flow in a dynamic DEM based porous media, *Miner. Eng.*, v. 19, n. 15, p. 1517-1527, 2006.
- 10 Fernandez, J.W., Cleary, P.W., Sinnott, M.D. e Morrison, R.D., Using SPH one-way coupled to DEM to model wet industrial banana screens, *Miner. Eng.*, v. 24, n. 8, p. 741-753, 2011.
- 11 Enqvist, Y., Modelling of the Blast Furnace Cohesive Zone using a Coupled DEM-C2D Approach, *Materials Innovation Institute Conference*, 2010.
- 12 Jonsén, P., Palsson, B.I., Tano, K., Berggren, A., Prediction of mill structure behaviour in a tumbling mill, *Miner. Eng.*, v.24, n. 3-4, p. 236-244, 2011.
- 13 Thornton, C., Cummins, S.J., Cleary, P.W., An investigation of the comparative behaviour of alternative contact force models during elastic collisions, *Powder Technol.*, v. 210, n. 3, p. 189-197, 2011.
- 14 EDEM[®], Dem Solutions, Edinburgh, Escócia.
- 15 Ramos, E.S., de Carvalho, R.M., Tavares, L.M., Simulação do movimento da carga em moinhos de bolas utilizando o método dos elementos discretos, *Anais do XXIV ENTMME*, Salvador, Bahia, 2011.
- 16 Carvalho, R.M., Tavares, L.M., Dynamic modeling of comminution using a general microscale breakage model, *Comp. Aided Chem. Eng.*, v. 27, p. 519-524, 2009.
- 17 Tavares, L.M., de Carvalho, R.M., Modeling breakage rates of coarse particles in ball mills, *Miner. Eng.*, v. 22, n. 7-8, p. 650-659, 2009.
- 18 Tavares, L.M., de Carvalho, R.M., Modeling iron ore degradation during handling, *Anais, 3rd International Meeting on Ironmaking and 2nd International Symposium on Iron Ore*, São Luís, MA, 2008.

- 19 Tavares, L.M., de Carvalho, R. M., Modeling ore degradation during handling using continuum damage mechanics, *Int. J. Miner. Process.*, 2011, no prelo.
- 20 Cunha, E.R., Modelagem e simulação do britador de impacto de eixo vertical, Exame de Qualificação de Doutorado, PEMM-COPPE-UFRJ, 2010.
- 21 Rajamani, R.K., Mishra, B.K., Dynamics of ball and rock charge in SAG mills, *Anais, International Autogenous and Semiautogenous Grinding Technology* (Eds. Mular A. L., Baratt, D. J., Knight, D. A.), v. 2, p. 700-712, 1996.
- 22 King, R.P., Bourgeois, F., A new conceptual model for ball milling, *Anais, 18th Int. Miner. Process. Congr.*, v. 1, p. 81-86, Sydney, Austrália, 1993.
- 23 Rajamani, R.K., Agrawala, S., Mishra, B.K., Mill scaleup: ball collision frequency and collision energy density in laboratory and plant scale mills, *Anais, 18th Int. Min. Proces. Congr.*, Sydney, Austrália, 1993.
- 24 Carvalho, R.M. e Tavares, L.M., Leaping forward in SAG and AG mill simulation using a mechanistic model framework, *Anais, SAG 2011*, Vancouver, Canadá.