

MATERIAL AND CONTACT PARAMETER ESTIMATION OF GREEN IRON ORE PELLETS FOR SIMULATION USING THE DISCRETE ELEMENT METHOD

**SILVA, B.B.^{1,2}, CARVALHO, R.M.², CUNHA, E.R.², CAVALCANTI, P.P.²,
TAVARES, L.M.M.²**

¹Vale S/A, Nova Lima – MG, Brasil. e-mail: benito.silva@vale.com.br

²Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Departamento de Engenharia de Metalurgia e de Materiais, Laboratório de Tecnologia Mineral. e-mail: tavares@metalmat.ufrj.br

RESUMO

A aglomeração é reconhecida como o processo mais imprevisível na rota de pelotização de minério de ferro. Sua compreensão é limitada porque a sua resposta é inerentemente instável. Além disso, a automatização deste processo ainda apresenta limitações (medições pouco precisas do teor de umidade e limitadas do tamanho das pelotas). Outro fator complicador é a dificuldade em se realizar amostragens durante a operação, sendo estas pouco representativas. Isto se deve em função das características das pelotas verdes serem aglomerados úmidos de baixa resistência, que se apresentam ao mesmo tempo adesivos/coesivos, deformáveis e que perdem massa facilmente. O presente trabalho trata da medida de características físicas das pelotas verdes e da avaliação de como elas interagem entre si e com outras superfícies de contato envolvidas no seu transporte a fim de determinar o modelo de contato que mais se ajusta ao comportamento real das pelotas nas simulações com o método dos elementos discretos. Os resultados mostram que o modelo de contato JKR é aquele com melhor capacidade de representar o movimento de pelotas verdes.

PALAVRAS-CHAVE: Pelotas verdes, aglomeração, método de elementos discretos.

ABSTRACT

Balling is known as the most unpredictable process in the pelletizing route. Its understanding is very complex because its response is inherently unstable, thus process automation still presents limitations (low accuracy of measurements of moisture content and pellet size). In addition, sampling during operation is rarely representative because green pellets are low strength moist solids which present themselves both sticky, highly deformable and amenable to easily lose weight and have their shape changed. The present work deals with the measurement of physical characteristics of green pellets, as well as the assessment of how they interact among each other and with other contact surfaces involved in their transport in order to choose the appropriate contact model and its parameter set which fit material behaviour in simulations using discrete element method to its real counterpart. Results show that JKR contact model was able to appropriately represent green pellets motion.

KEYWORDS: Green pellets, balling, discrete element method.

1 INTRODUÇÃO

A simulação de sistemas particulados com o método dos elementos discretos requer informações não apenas do sistema a simular (geometrias do ambiente que o definem e velocidade de partes moveis que interagem com os sólidos etc) como também informações sobre as características intrínsecas das partículas, como forma, distribuição de tamanhos e rigidez. Além disso, é necessário incorporar um modelo de contato, que irá reger como os elementos individuais irão interagir entre si e com as interfaces do sistema. O modelo que tem sido usado em um grande número de aplicações na indústria mineral é o modelo de Hertz-Mindlin sem escorregamento (WEERASEKARA *et al.*, 2013).

A etapa mais importante para a modelagem de equipamentos ou processos é a caracterização dos parâmetros do modelo de contato que serão utilizados para representá-los e reproduzi-los. Os parâmetros utilizados como dados de entrada para este trabalho foram: distribuição granulométrica, densidade, forma, rigidez, coeficientes de restituição, bem como de atritos estático e dinâmico. Esses foram analisados e medidos e os métodos adotados na sua avaliação são descritos a seguir. No presente trabalho, diversos experimentos foram realizados com um lote de pelotas produzido em disco de laboratório, que representa a amostra industrial, de modo a permitir a caracterização do comportamento das pelotas verdes visando simulações do processo real de peneiramento em peneira de rolos (Figura 1) com o método dos elementos discretos.



Figura 1. Processo de classificação de pelotas em peneira de rolos (SILVA, 2017).

2 MATERIAL E MÉTODOS

As simulações com o método de elementos discretos foram realizadas com o software EDEM® desenvolvido pela *DEM Solutions* (DEM Solutions, 2016), e licenciado para o Laboratório de Tecnologia Mineral COPPE/UFRJ.

2.1 Preparação

A amostra de pelotas verdes foi produzida a partir de uma mistura (*pellet feed* prensado, antracito, calcário e aglomerante) de referência coletada em usina industrial localizada na região sudeste do Brasil. A aglomeração foi realizada em um misturador

de laboratório Eirich, modelo TR10, de um metro de diâmetro inclinado a 68°. A velocidade do misturador foi mantida constante em 16 rpm ou 37 % da velocidade crítica. Aspersão de água foi contínua e gradativamente feita para promover o crescimento das pelotas para que este produto apresentasse características semelhantes às pelotas produzidas em escala industrial.

Após sua produção de 50 kg de pelotas, a distribuição de tamanhos do produto foi medida por peneiramento utilizando peneiras de malha quadrada de aço de 6,3; 8,0; 10,0; 12,5; 16,0 e 19 mm. Este procedimento foi feito manualmente para evitar a degradação dos sólidos.

2.2 Densidade hidrostática

Um lote de 50 partículas contidas na faixa de tamanho de 12,5 mm x 9,0 mm foi utilizado para o ensaio de densidade hidrostática realizado com o auxílio de uma balança de precisão, que permitia a pesagem das pelotas como produzidas e imersas em água.

2.3 Resistência a compressão

A resistência à compressão de um lote de 80 pelotas verdes foi avaliada seguindo o procedimento da norma ISO 4700:2007. A velocidade de avanço do pistão da prensa foi ajustada a 10 mm/min. Uma prensa do modelo EMIC DL1000, equipada com célula de carga de 10 kN, registrou os dados (Figura 2).



Figura 2. Teste de compressão.

2.4 Ensaios para determinação dos parâmetros de contato

Foram realizados três ensaios dinâmicos para estimativa dos parâmetros de contato utilizados no modelo de Hertz-Mindlin no DEM: ensaio de ângulo de repouso estático, ângulo de repouso dinâmico (tamboramento) e testes de manuseio em bancada. No teste de ângulo de repouso, um cilindro de PVC com 195 mm de diâmetro foi preenchido com 10 kg de pelotas verdes (Figura 3). Em seguida, o cilindro é movimentado verticalmente, permitindo a movimentação das pelotas em seu interior sobre uma placa de borracha, formando uma pilha cônica. Da pilha são realizadas pelo menos três medições do ângulo formado entre o topo e sua base. O procedimento foi realizado em triplicata.



Figura 3. Teste do ângulo de repouso (a) remoção do cilindro (b) perfil final da pilha.

No teste de tamboramento (Figura 4), 2 kg de pelotas foram introduzidas em um moinho de aço de 30,5 cm de diâmetro x 30,5 cm de comprimento com revestimento interno liso. Tal quantidade corresponde a um grau de enchimento aparente de 10 % em volume. O moinho é fechado com uma tampa acrílica permitindo a visualização do movimento dos sólidos durante a operação do moinho. Foram executados ensaios em duas velocidades de rotação: 40 e 54 rpm.



Figura 4. Imagens do teste de tombamento.

Testes de queda livre foram realizados para aferição do coeficiente de restituição. Neste caso, utilizou-se uma câmara de alta velocidade para registrar o momento do impacto da pelota sobre uma base. As pelotas individuais foram abandonadas a partir de uma altura de 1 m sobre uma camada 10 mm de espessura feita com mistura compactada do mesmo material das pelotas, sobre uma placa de aço de 5 mm e também sobre uma peça de borracha de 10 mm (da correia transportadora) (Figura 5). O coeficiente de restituição pode ser estimado pela Equação 1 e representa a quantidade de energia não absorvida ou consumida no contato de sólidos, seja como colisão, deformação, som ou propagação de fissuras, por exemplo, e permanece nos sólidos após o choque:

$$e = \sqrt{\frac{K_L}{K_U}} \quad (1)$$

O coeficiente de restituição pode ser determinado pela razão entre a altura atingida pela pelota após a colisão (K_L) na base e a altura inicial em que foi lançada (K_U), no caso 1 m.

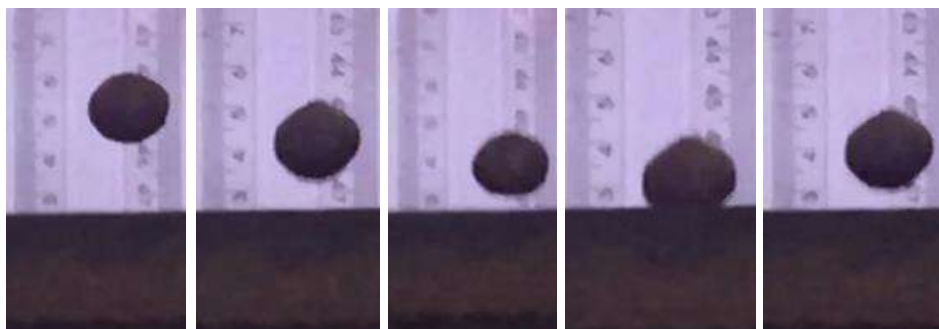


Figura 5. Ensaio de queda para pelotas verdes sobre borracha.

O teste de escoamento/manuseio foi realizado em um aparelho idealizado pelo grupo “*Rock Processing Group da Chalmers University of Technology*”, da Suécia (QUIST, 2017), e adaptado para dimensões que permitem ensaiar partículas com tamanhos maiores que 10 mm. Uma amostra de 10 kg foi alimentada no compartimento superior. O alçapão localizado na parte inferior do compartimento foi então aberto e as pelotas caíram por gravidade sobre um anteparo que as direciona para uma das laterais do equipamento (Figura 6). Tal como no teste do tamboramento, a tampa em acrílico translúcido, além de enclausurar o dispositivo, permite a observação e avaliação do fluxo.



Figura 6. Imagem em CAD do dispositivo de bancada para o teste de manuseio (esquerda) e imagem do teste (direita).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Características físicas da amostra

A distribuição de tamanhos de pelotas medida por peneiramento é apresentada na Tabela 1. Os resultados obtidos foram muito próximos aos que são normalmente observados em pelletizadores de discos em escala industrial (SILVA, 2017).

Tabela 1. Distribuição granulométrica para as pelotas verdes

Abertura (mm)	19	16	14	12,5	9,5	8	6,3	Fundo
Retido (%)	0	1,6	5,1	18,6	59,6	11,9	2	1,2

Os resultados dos testes de compressão individual de pelotas mostram que a variação da rigidez de pelotas é bastante considerável (Figura 7).

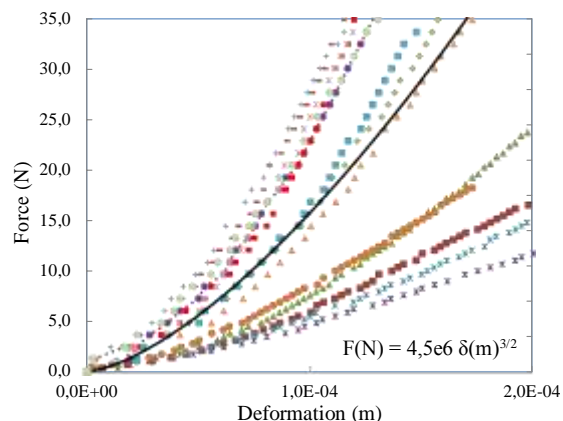


Figura 7. Perfis força versus deslocamento para as pelotas verdes testadas (símbolos) e ajustada (linha).

Esta dispersão é esperada, uma vez que pelotas são aglomerados de partículas muito distintas que se arranjam de múltiplas maneiras, mesmo se produzidas em ambiente controlado e procedimentos rigorosos como os testados (FORSMO *et al.*, 2006). A relação entre a força aplicada pelo êmbolo da prensa e a deformação do corpo ensaiado determina a rigidez no regime elástico enunciado pela teoria de contato de Hertz (TAVARES *et al.*, 1998) para esferas: $E=3F/d^{1/2}\alpha^{3/2}$. O módulo de cisalhamento pode ser calculado por meio da equação $G=E/2(1+\nu)$ e, pelos resultados ilustrados na Figura 9, pode-se calcular o módulo de cisalhamento, no caso: 1,8 MPa. Este valor médio encontrado é ligeiramente mais baixo que os utilizados por WANG *et al.* (2015), cuja base de resultados foi aquela apresentada por FORSMO *et al.* (2006). O valor considerado para a razão de Poisson foi 0,25.

3.2. Estimação de parâmetros de contato

O ajuste de parâmetros de contato para as pelotas verdes partiu do uso de um conjunto de parâmetros iniciais previamente calibrados para pelotas queimadas conforme descrito em BARRIOS *et al.* (2011) para o modelo de contato de Hertz-Mindlin e partículas esféricas.

A partir desse conjunto inicial, simulou-se o ensaio de ângulo de repouso, que por sua vez tem resultado pouco afetado pelo coeficiente de restituição, de forma a reproduzir o ângulo da pilha de 27° resultante do experimento real. Por tentativa e erro, encontrou-se os coeficientes de atrito que resultaram em ângulo próximo a esse resultado.

Nos testes de tamboramento a 40 rpm foi verificado que as pelotas verdes se encontravam rolando umas sobre as outras com um ângulo de aproximadamente 330° (Figura 8). Quando a velocidade de rotação foi aumentada para 54 rpm, o leito de pelotas alcançou um ângulo próximo de 0° (Figura 9) com ocorrência de movimentos isolados em catarata para alguns indivíduos. As simulações foram capazes de reproduzir ambos os casos com verossimilhança. As Figuras 8 e 9 mostram a validação do movimento.

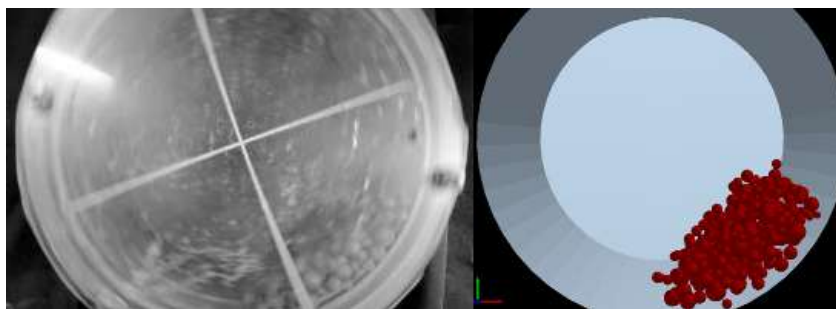


Figura 8. Validação do movimento de pelotas verdes em moinho de rolagem a uma velocidade de rotação de 40 rpm.

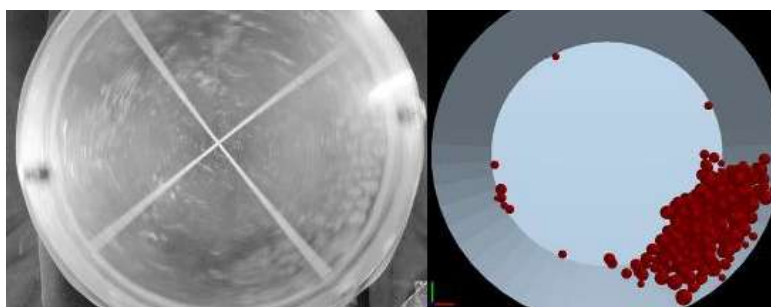


Figura 9. Validação do movimento de pelotas verdes em moinho giratório a velocidade de rotação de 54 rpm.

Os parâmetros de contato utilizados são apresentados na Tabela 2 como também dados dos materiais medidos anteriormente e outros obtidos na literatura.

Tabela 2. Resumo dos parâmetros de contato

Parâmetro de entrada	Pelota	Aço	Borracha
Coefficiente de Poisson	0,25	0,25	0,25
Densidade (kg/m ³)	3150	7800	860
	Interação		
	Pelota-Pelota	Pelota-aço	Pelota-Borracha
Coefficiente de atrito estático	0,30	0,35	0,71
Coefficiente de atrito de rolamento	0,10	0,25	0,05
Coefficiente de restituição	0,05	0,08	0,05

3.1 Comparação dos modelos de contato

As pelotas têm por característica uma superfície adesiva devido à camada viscosa da fase líquida aglomerante e têm comportamento de deformação plástico-elástico o devido à sua composição e alto teor de umidade. Para reproduzir essas propriedades no processo de peneiramento, foram comparados dois modelos disponíveis no EDEM®: o modelo Hysteretic-Spring e o Hertz-Mindlin com JKR. No primeiro modelo, a deformação elasto-plástica é simulada pela sobreposição dos sólidos e geometrias no evento de colisão. O segundo modelo confere aos sólidos uma determinada energia superficial específica que representa a adesão ou coesão entre as pelotas e as demais geometrias que compõem o sistema. Na Figura 10 são comparados os movimentos das pelotas escoando no dispositivo de manuseio com seus equivalentes simulados após 4 segundos da abertura do alçapão. Pode-se observar um padrão de escoamento bastante semelhante para os casos simulados, e também que ambos representam bem o comportamento observado no experimento real.

O resultado final do experimento mostra uma quantidade de pelotas retidas na rampa inclinada a um certo ângulo repouso com a mesma forma de distribuição observada nas simulações em DEM (Figura 11).

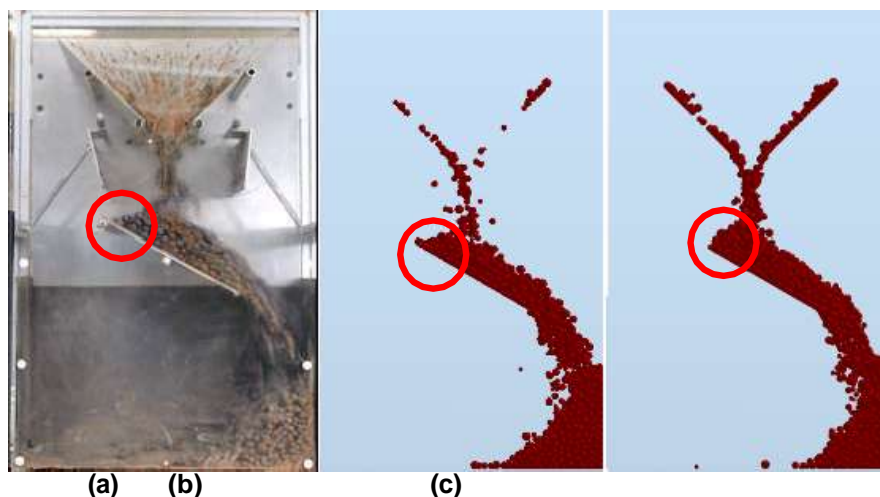


Figura 10. Resultado de teste de manuseio: (a) teste de bancada depois de 4 segundos (início), (b) Modelo de contato: Hertz-Mindlin com JKR - pelota:pelota $1,5 \text{ J/m}^2$, pelota:borracha $0,5 \text{ J/m}^2$ e pelota:aço $0,5 \text{ J/m}^2$ (c) modelo de contato: Hysteretic Spring - fator de amortecimento: 0,2 e fator de rigidez: 0,7.

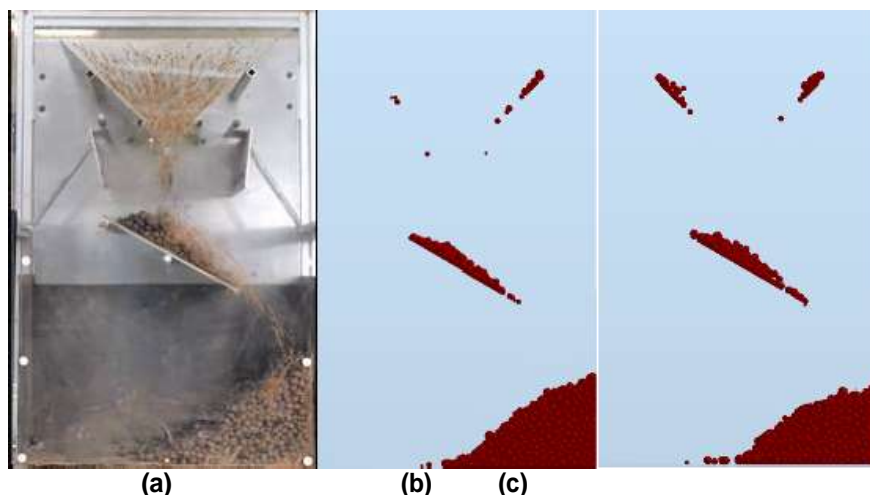


Figure 11. Resultado de teste de manuseio: (a) teste de bancada ao final, (b) Modelo de contato: Hertz-Mindlin com JKR - pelota:pelota $1,5 \text{ J/m}^2$, pelota:borracha $0,5 \text{ J/m}^2$ e pelota:aço $0,5 \text{ J/m}^2$, (c) modelo de conta to: Hysteretic Spring - fator de amortecimento: 0,2 e fator de rigidez: 0,7.

4. CONCLUSÕES

Os dados calibrados permitiram reproduzir com exatidão o complexo comportamento coesivo e o movimento das pelotas verdes dentro de um sistema de manuseio. As propriedades de característica intrínsecas do sólido tais como a restituição (0,05 para pelota-aço; 0,03 para pelota-pelota e pelota-borracha) e resistência mecânica, módulo de rigidez (4,5Mpa) e cisalhamento (1,8Mpa), foram determinadas pelos ensaios de queda e compressão. Por análises e comparação do ângulo produzido pelas pelotas na borda do plano inclinado do ensaio de bancada, a forma e ângulo de repouso da pilha sobre o fundo ao término deste teste e o ângulo de rolagem no ensaio de tamboramento em cada velocidade de rotação, permitiu-se a estimativa dos

parâmetros de contato do modelo Hertz-Mindlin: atrito estático (pelota-pelota, 0,30; pelota aço, 0,35; pelota-borracha, 0,71) e atrito de rolamento (pelota-pelota, 0,10; pelota aço, 0,25; pelota-borracha, 0,05). Dentre os modelos testados e disponíveis na plataforma do EDEM®, o modelo de contato Hertz-Mindlin com JKR (energia pelota-aço, 0,5 J/m²; e, pelota-pelota, 1,5 J/m²) se mostrou o mais indicado para simulações e reprodução via DEM das pelotas verdes.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradem à Vale pelo financiamento da pesquisa e em apoiar um dos autores (B.B. Silva) na realização do seu treinamento a nível de mestrado. Os demais autores agradecem às agências de fomento CNPq, CAPES e FAPERJ pelo apoio à pesquisa por meio das bolsas concedidas.

6. REFERÊNCIAS

- Barrios, G.K.P; Carvalho, R.M; Kwade, A; Tavares, L.M. Contact Parameter Estimation for DEM Simulation of Iron Ore Pellet Handling. *Powder Technology*, 248, pp. 84-93, 2013.
- Forsmo, S.P.E; Apelqvist, A.J; Björkman, B.M.T; Samskog, P.-O. Binding Mechanisms in Wet Iron Ore Green Pellets with Bentonite Binder. *Powder Technology*, 169, pp. 147-158, 2006.
- ISO 4700:2007
- Quist, J.C.E. DEM Modelling and Simulation of Cone Crushers and High Pressure Grinding Rolls, Tese de doutorado, Chalmers Institute of Technology, Gothenburg, 2017.
- Silva, B.B. Modelling and Optimization of Green Pellets Classification on Roller Screens Using The Discrete Element Method. Tese de Dissertação. COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.
- Tavares, L.M; King, R.P. Single-Particle Fracture under Impact Load. *International Journal of Mineral Processing*, 54, pp. 1-28, 1998.
- Wang, D; Servin, M; Berglund, T; Mickelsson, K.-O; Ronnback, S. Parametrization and Validation of a Nonsmooth Discrete Element Method for Simulating Flows of Iron Ore Green Pellets. *Powder Technology*, 283, pp. 475-487, 2015.
- Weerasekara, N.S; Powell, M.S; Cleary, P.W; Tavares, L.M; Evertsson, M; Morrison, R.D; Quist, J. Carvalho, R.M. The contribution of DEM to the science of comminution. *Powder Technology*, 248, pp. 3-24, 2013.