



## **ANÁLISE DA SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS DEM E DAS CONDIÇÕES OPERACIONAIS NO NÚMERO DE CONTATO ENTRE AS PARTÍCULAS EM UM DISCO ROTATÓRIO**

RONDINELLI M. LIMA<sup>1\*</sup>, FERNANDA POTENZA<sup>2</sup>, GISELE M. SOUZA<sup>2</sup>, JENIFFER C. SILVEIRA<sup>2</sup>, CLAUDIO R. DUARTE<sup>2</sup>, MARCOS A. S. BARROZO<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Centro de Tecnologia Mineral - CETEM

<sup>2</sup>Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Química

\*e-mail: Rondinelli\_ml@hotmail.com

**RESUMO** - O processo de granulação depende diretamente de como as partículas ou grãos movimentam-se no interior do disco rotatório, sendo este comportamento bastante complexo e ainda pouco compreendido. O conhecimento sobre a dinâmica das partículas é essencial para otimização e escalonamento dos projetos envolvendo o disco rotatório e também para uma melhor eficiência do processo de granulação. O Método dos Elementos Discretos (DEM) tem sido utilizado para auxiliar na compreensão do fluxo granular. Para o uso correto desta técnica é necessário o conhecimento sobre os parâmetros de entrada do modelo. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo estudar, por meio de planejamento composto central (PCC), a influência dos parâmetros DEM e das condições operacionais sobre no número de contato de partículas em um do disco rotatório. Observou-se que todos os parâmetros DEM influenciaram significativamente na resposta analisada, entretanto o coeficiente de atrito estático partícula-parede foi o que apresentou maior efeito, demonstrando ser o parâmetro de maior importância no processo de calibração do modelo numérico. Já para as condições operacionais o número de contato partícula-partícula foi mais afetado pelas mudanças do grau de preenchimento e da velocidade de rotação.

### **INTRODUÇÃO**

O processo de granulação desempenha um papel importante na eficiência de diversos setores industriais. Esse processo permite o controle das propriedades físicas dos materiais granulares formados, resultando em um produto final mais uniforme, resistente e de melhor qualidade.

Dentre os vários tipos de granuladores industriais, o disco rotatório se destaca devido a sua capacidade de classificar o material particulado por tamanho e devido também a sua geometria relativamente simples, que consiste em um prato inclinado que gira em torno do próprio eixo (Capes, 1980; Litster e Ennis, 2004).

A compreensão da dinâmica das partículas é um fator essencial para a otimização e desenvolvimento de projetos envolvendo o disco rotatório, visto que, o processo de granulação está diretamente relacionado com o movimento granular. Entretanto, poucos trabalhos têm se empenhado em estudar o comportamento dinâmico da fase particulada no disco rotatório.

O movimento do leito de partículas pode apresentar até seis regimes de escoamento que são classificados em: deslizamento, avalanche, rolamento, cascadeamento, catarateamento e centrifugação. A transição entre esses regimes é influenciada pelo grau de preenchimento, pelas características da partícula, pelas propriedades friccionais e da velocidade de rotação (Heinen *et al.*, 1983; Mellamnn, 2001).

O regime de deslizamento é caracterizado por um leito granular praticamente estático, não havendo nenhuma aplicação industrial. Quando se aumenta a velocidade de rotação e/ou o coeficiente de atrito estático partícula-parede, o leito granular começa a apresentar dois ângulos de repouso, um superior e outro inferior, alcançando assim o regime de deslizamento.

À medida que a velocidade de rotação do prato aumenta, o ângulo de repouso se estabiliza em um fluxo uniforme, o que caracteriza o regime de rolamento. Neste regime, o material do leito pode ser dividido em duas regiões distintas: passiva e ativa. Na camada passiva, as partículas são transportadas para cima pela parede do disco como um corpo rígido, enquanto na camada ativa, as partículas fluem para baixo na superfície inclinada do leito superior. A mistura de partículas ocorre preferencialmente na camada ativa. Após o regime de rolamento, tem-se o cascadeamento, o leito granular começa a apresentar um formato de curvo, semelhante a um “S”. Esse formato fica em maior evidência conforme aumenta a velocidade de rotação do equipamento (Mellmann, 2001; Santos *et al.* 2013). Os regimes de rolamento e cascadeamento são amplamente aplicados nos processos de granulação, pois proporcionam maior número de contatos entre as partículas, aumentando assim a eficiência do processo (Capes, 1980).

Quando se aumenta ainda mais a velocidade de rotação, as partículas começam a se desprender do leito granular, sendo arremessadas para o espaço vazio do disco rotatório, representando assim o regime de catarateamento. Segundo Capes (1980), no processo de granulação deve-se ter cuidado ao se trabalhar neste regime, pois as partículas adquirem uma elevada dinâmica e a colisão com a parede do equipamento pode fazer com que ocorra a degradação dos aglomerados formados.

Por fim, o último dos regimes de escoamento é a centrifugação, quando as partículas se aderem a parede do cilindro.

Para auxiliar nos estudos experimentais os métodos numéricos surgem como uma ferramenta complementar. Eles conseguem superar as limitações impostas por questões de segurança e possibilitam adquirir um maior

nível de detalhamento da movimentação das partículas, uma vez que as simulações possibilitam a obtenção de informações a qualquer ponto do processo. Além disso, as simulações numéricas permitem avaliar diferentes configurações de equipamentos, reduzindo custos e tempo na elaboração de novos protótipos.

Em problemas envolvendo sistemas particulados o Método dos Elementos Discreto (DEM) é uma técnica bem consolidada. Esse método aplica em cada partícula no sistema um balanço de forças, levando em consideração as interações partícula-partícula e partícula-parede (Cundall e Strack, 1979; Tsuji *et al.*, 1992). Desse modo, é possível obter uma melhor compreensão acerca do escoamento granular no interior do disco rotatório.

Apesar dos benefícios da utilização do DEM, este método possui certas limitações. A primeira é que o custo computacional está diretamente relacionado com o número de partículas presente no sistema, o que acaba restringindo simulações numéricas em escala industrial e até mesmo em escala piloto. A segunda limitação está relacionada com a necessidade da especificação dos parâmetros de entrada no modelo (coeficiente de restituição, coeficiente de atrito estático e coeficiente de atrito de rolamento).

Atualmente, os parâmetros numéricos são obtidos por medidas experimentais ou por um processo de calibração. No primeiro procedimento, apesar de preservar o significado físico dos parâmetros DEM, não existe nenhuma metodologia padronizada para se determinar os valores e também, não existe a garantia que esses valores serão representativos no conjunto populacional de partículas (Coetzee, 2017). No procedimento de calibração, os parâmetros da modelagem são utilizados como parâmetros de ajustes, adotando a combinação que melhor se adequa ao seu sistema e, por causa disso, mais de uma combinação de valores podem apresentar resultados condizentes e não necessariamente representar o real significado físico do parâmetro (Marigo e Stitt, 2015).

Para auxiliar na compreensão da influência dos parâmetros DEM e, conseqüente, no processo de calibração, alguns autores tem recorrido a técnicas estatísticas. Silvério *et al.*

(2014) e Cunha *et al.* (2016) utilizaram de um Planejamento Composto Central (PCC) para realização a calibração dos parâmetros numéricos.

Nesse sentido, por meio de um PCC, este trabalho teve como objetivo realizar uma análise da sensibilidade dos parâmetros DEM e das condições operacionais sobre o processo de granulação em um disco rotatório.

## MÉTODO DOS ELEMENTOS DISCRETOS

Esse método faz uso de um algoritmo *time-stepping* em que a mesma modelagem se repete a cada etapa do tempo. As partículas são acompanhadas individualmente, contato por contato e os seus movimentos são atualizados com base nos resultados do passo de tempo anterior (Sullivan, 2011).

Os cálculos realizados pelo DEM alternam entre a utilização da segunda lei de Newton (aplicada às partículas) e a lei da Força-Deslocamento (aplicada nos contatos entre as partículas). Conforme demonstrado pelas Equações 1 e 2, a segunda lei de Newton determina as acelerações de translação e rotação das partículas.

$$m_i \frac{d\vec{v}_i}{dt} = \sum_j \vec{F}_{ij} \quad (1)$$

$$I_i \frac{d\vec{\omega}_i}{dt} = \sum_j \vec{\tau}_{ij} \quad (2)$$

sendo:  $t$  o tempo,  $m_i$  a massa da partícula  $i$ ,  $I_i$  momento de inércia da partícula  $i$ ,  $\vec{v}_i$  e  $\vec{\omega}_i$  a velocidade translacional e angular da partícula  $i$ , respectivamente e  $\vec{F}_{ij}$  e  $\vec{\tau}_{ij}$  são a força e o torque entre as partículas  $i$  e  $j$ , respectivamente.

O modelo de força-deslocamento mais comumente utilizado no DEM é o modelo não linear de Hertz-Mindlin. Maiores informações estão disponíveis nos trabalhos de Di Renzo e Di Maio (2004) e Tsuji *et al.* (1991).

## METODOLOGIA NUMÉRICA

Foi simulado um disco rotatório com 0,35 m de diâmetro e 0,20 m de borda lateral e o material utilizado foram esferas de vidro.

Todas as simulações foram conduzidas no *software* EDEM® 3.0 e foi utilizado o modelo de contato de Hertz-Mindlin. As condições de simulação são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Condições de simulação aplicadas no *software* EDEM® 3.0.

Modelo	Hertz-Mindlin
Passo no tempo (s)	$4 \times 10^{-5}$
Razão de Poisson (-)	
Vidro	0,22
Aço	0,30
Módulo de cisalhamento (Pa)	
Vidro	$1 \times 10^6$
Aço	$7 \times 10^{10}$

Com intuito de verificar a influência dos parâmetros DEM (coeficiente de restituição, coeficiente de atrito estático e coeficiente de atrito de rolamento) no disco rotatório, utilizou-se o Planejamento Composto Central (PCC) fracionado com  $2^{6-1}$ ,  $2 \times 6$  pontos axiais e uma réplica no ponto central, resultando em 45 simulações. Os níveis do planejamento estão apresentados na Tabela 2. Os valores foram escolhidos para englobar o valor máximo e o mínimo dos parâmetros.

Tabela 2: Planejamento composto central utilizado na análise de sensibilidade dos parâmetros numéricos DEM em um disco rotatório.

Variável Codificada	$e_{pp}, e_{pw}, \mu_{Spp}, \mu_{Spw}$	$\mu_{Rpp}, \mu_{Rpw}$
$-\alpha$ (-1,78)	0,054	0,005
-1	0,250	0,025
0	0,500	0,050
1	0,750	0,075
$+\alpha$ (+1,78)	0,946	0,095

sendo:  $e_{pp}$ ,  $e_{pw}$ ,  $\mu_{Spp}$ ,  $\mu_{Spw}$ ,  $\mu_{Rpp}$ ,  $\mu_{Rpw}$  OS coeficiente de restituição, atrito estático e atrito de rolamento, respectivamente. Os subscritos  $pp$  e  $pw$  indicam as interações partícula-partícula e partícula-parede, respectivamente.

O PCC foi aplicado para os graus de preenchimento de 2, 5 e 8%, com o disco rotatório operando no ângulo de inclinação de 40°. O mesmo PCC foi novamente aplicado e, neste caso, variou-se o ângulo de inclinação em 40, 50 e 60°, para o grau de preenchimento de 2%. A resposta analisada foi o número de contatos entre as partículas, uma vez que esta é uma importante variável na eficiência do processo de granulação. É importante ressaltar que, para possibilitar a comparação dos resultados, o número de contatos partícula-partícula foi dividido pelo número de partículas presente no sistema.

Um novo PCC foi aplicado para analisar a influência das condições operacionais do disco rotatório (grau de preenchimento, ângulo de inclinação e velocidade de rotação) no número de contatos entre as partículas. O PCC consistiu em um  $2^3$ , com 2x3 pontos axiais e 5 repetições no ponto central, resultando em 19 simulações. O objetivo foi verificar quais dessas condições operacionais tendem a beneficiar ou prejudicar o contato entre as partículas. Os valores utilizados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Planejamento composto central utilizado na análise da influência das condições operacionais no número de contato entre as partículas.

Variável Codificada	GP (%)	AI (°)	VR (RPM)
-α (-1,47)	0,59	35,29	5,29
-1	2,00	40,00	10,00
0	5,00	50,00	20,00
+1	8,00	60,00	30,00
+α (+1,47)	9,41	64,71	34,71

sendo:  $GP$ ,  $AI$  e  $VR$  o grau de preenchimento, o ângulo de inclinação e a velocidade de rotação, respectivamente.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para uma melhor compreensão da influência dos parâmetros DEM no número de contatos entre as partículas ( $N_{c_{pp}}$ ) foi realizado uma análise de sensibilidade.

Primeiramente, o PCC foi aplicado para três ângulos de inclinação diferentes (40, 50 e 60°) e o grau de preenchimento foi fixado em 2%. As Equações 3 a 5 foram obtidas utilizando técnicas de regressão múltipla e são referentes aos ângulos de inclinação 40, 50 e 60°, respectivamente.

$$\hat{\text{Ângulo de inclinação 40°:}} R^2 = 0,94 \quad (3)$$

$$N_{c_{pp}} = 1,17 - 0,05x_1 + 0,05x_1^2 + 0,05x_2^2 - 0,09x_3 - 0,36x_4 + 0,16x_4^2 + 0,06x_5^2 + 0,05x_6^2$$

$$\hat{\text{Ângulo de inclinação 50°:}} R^2 = 0,95 \quad (4)$$

$$N_{c_{pp}} = 1,18 - 0,05x_1 + 0,06x_1^2 + 0,06x_2^2 - 0,12x_3 + 0,06x_3^2 - 0,40x_4 + 0,17x_4^2 + 0,07x_5^2 + 0,06x_6^2 - 0,04x_1x_4$$

$$\hat{\text{Ângulo de inclinação 60°:}} R^2 = 0,95 \quad (5)$$

$$N_{c_{pp}} = 1,19 - 0,05x_1 + 0,06x_1^2 + 0,06x_2^2 - 0,13x_3 + 0,06x_3^2 - 0,41x_4 + 0,18x_4^2 + 0,07x_5^2 + 0,06x_6^2 - 0,03x_1x_4$$

Onde:

$$x_1 = \frac{e_{pp} - 0,50}{0,25}$$

$$x_2 = \frac{e_{pw} - 0,50}{0,25}$$

$$x_3 = \frac{\mu_{Spp} - 0,50}{0,25}$$

$$x_4 = \frac{\mu_{Spw} - 0,50}{0,25}$$

$$x_5 = \frac{\mu_{Rpp} - 0,050}{0,025}$$

$$x_6 = \frac{\mu_{Rpw} - 0,050}{0,025}$$

A partir da análise de regressão, observa-se que todos os parâmetros contribuíram de forma significativa no número de contato entre as partículas, para um nível de significância de 5%. O coeficiente de restituição partícula-parede e os coeficientes de atrito de rolamento apresentaram somente influência do termo quadrático.

Apesar de todos os parâmetros DEM apresentarem significância, o coeficiente de atrito estático partícula-parede ( $\mu_{Spw}$ ) se sobressai em relação aos demais. Realizando uma análise em cima dos valores dos efeitos, observa-se que os valores encontrados para  $\mu_{Spw}$  chegam a ser quase 4 vezes maior que o efeito

do segundo parâmetro mais relevante ( $\mu_{Spp}$ ) e 8 vezes maior que o  $e_{pp}$ . Isso demonstra que, dentre os parâmetros analisados, o coeficiente de atrito estático partícula-parede é o que apresenta maior impacto sobre o número de contatos entre partículas no disco rotatório.

Um outro fator importante a ser analisado é que o  $\mu_{Spw}$  possui um efeito negativo, prejudicando o contato entre as partículas. No que diz respeito à concepção de projetos e otimização de um disco rotatório, essa informação é crucial, pois a depender da interação entre material granular e a parede do equipamento, o processo de granulação pode não ocorrer de forma eficiente.

Comparando o efeito entre os mesmos parâmetros das Equações 3 a 5, observa-se que os valores são semelhantes, ou seja, aparentemente a mudança no ângulo de inclinação do disco rotatório não exerceu influência no número de contato entre as partículas.

O mesmo PCC foi aplicado, porém dessa vez fixou-se o ângulo de inclinação de 40° e variou-se o grau de preenchimento em 2, 5 e 8%. A técnica de regressão múltipla foi utilizada novamente e as Equações 6 a 8 foram obtidas.

Grau de Preenchimento 2%:  $R^2 = 0,94$  (6)

$$Nc_{pp} = 1,17 - 0,05x_1 + 0,05x_1^2 + 0,05x_2^2 - 0,09x_3 - 0,36x_4 + 0,16x_4^2 + 0,06x_5^2 + 0,05x_6^2$$

Grau de Preenchimento 5%:  $R^2 = 0,95$  (7)

$$Nc_{pp} = 1,40 - 0,05x_1 + 0,03x_1^2 - 0,08x_3 + 0,04x_3^2 - 0,24x_4 + 0,17x_4^2 + 0,04x_5 - 0,03x_3x_4 - 0,05x_4x_5$$

Grau de Preenchimento 8%:  $R^2 = 0,89$  (8)

$$Nc_{pp} = 1,57 - 0,05x_1 - 0,10x_3 - 0,14x_4 + 0,13x_4^2 + 0,04x_5 - 0,05x_4x_5$$

Onde:

$$\begin{aligned} x_1 &= \frac{e_{pp} - 0,50}{0,25} & x_2 &= \frac{e_{pw} - 0,50}{0,25} \\ x_3 &= \frac{\mu_{Spp} - 0,50}{0,25} & x_4 &= \frac{\mu_{Spw} - 0,50}{0,25} \\ x_5 &= \frac{\mu_{Rpp} - 0,050}{0,025} & x_6 &= \frac{\mu_{Rpw} - 0,050}{0,025} \end{aligned}$$

Nota-se que, para os graus de preenchimento de 5 e 8%, os parâmetros  $e_{pw}$  e o  $\mu_{Rpw}$  não foram significativos na resposta analisada, para um nível de significância de 5%.

Analisando as Equações 6 a 8, destaca-se novamente que o coeficiente de atrito estático partícula-parede ( $\mu_{Spw}$ ) apresentou efeito superior que os demais parâmetros. Entretanto, conforme aumentou-se o grau de preenchimento, a intensidade do efeito deste coeficiente diminuiu. Isso acontece porque, para 2% de preenchimento, a proporção de partículas em contato com a parede do equipamento é maior que em 8%.

Para se obter uma melhor análise do comportamento do ângulo de inclinação e do grau de preenchimento no número de contato partícula-partícula, foi elaborado um outro Planejamento Composto Central (Tabela 3), onde investigou-se a influência das condições operacionais nos resultados do número de contato partícula-partícula ( $Nc_{pp}$ ).

A Equação 9 foi obtida por meio da técnica de regressão múltipla, utilizando como base os resultados do planejamento apresentado na Tabela 3.

$$R^2 = 0,97 \quad (9)$$

$$Nc_{pp} = 1,27 + 0,19x_1 - 0,09x_1^2 + 0,03x_2 - 0,23x_3 + 0,06x_3^2$$

Onde:

$$x_1 = \frac{GP - 5}{3} \quad x_2 = \frac{AI - 50}{10} \quad x_3 = \frac{VR - 20}{10}$$

sendo:  $GP$  está em %,  $AI$  em °, e  $VR$  em rpm.

A Equação 9 apresenta aspectos muito importantes para a eficiência do processo de granulação em um disco rotatório. Primeiramente, nota-se que todas as condições operacionais analisadas apresentaram influência significativa sobre a resposta, quando avaliado em um nível de significância de 5%. Observa-se ainda que não houve ação combinada (interação) entre as condições operacionais analisadas, isso significa que, cada variável apresenta uma influência de forma individual no número de contato entre as partículas.

Percebe-se que o ângulo de inclinação ( $AI$ ), apesar de ser significativo, apresenta um efeito bem inferior ao do grau de preenchimento e da velocidade de rotação. A alteração da inclinação do disco rotatório não apresenta muita influência no contato entre as partículas. Este resultado também foi observado pelas Equações 3 a 5, onde notou-se que, mesmo alterando a inclinação do equipamento, os efeitos dos parâmetros DEM praticamente se mantiveram constantes.

O grau de preenchimento teve um efeito positivo, ou seja, quanto maior o número de partículas presente no sistema mais eficiente é o contato entre elas. Já para a velocidade de rotação, observa-se que ela apresenta um efeito negativo, prejudicando o  $Nc_{pp}$ . Normalmente, no processo de granulação, a velocidade de rotação é aumentada para se obter um maior tempo de residência do material e assim, controlar a taxa de crescimento do aglomerado. De acordo com Pietsch (1991), deve-se ter um controle fino da velocidade de rotação, para que o disco rotatório esteja sempre operando em regime de rolamento. Um aumento excessivo na velocidade pode ocasionar a transição para o regime catarateamento, o que, segundo o autor, deve ser evitado. Capes (1980) destaca que é necessário ter muito cuidado ao se trabalhar com elevadas velocidades de rotação e graus de preenchimento, pois pode resultar em um crescimento descontrolado do aglomerado, prejudicando sua qualidade final.

É evidente que, na granulação, outros fatores podem influenciar no processo e outras respostas devem ser analisadas. Entretanto, a Equação 9 apresenta um direcionamento muito importante na compreensão do processo de granulação, auxiliando nas questões de operação, projeto e otimização de um disco rotatório.

## CONCLUSÃO

A análise de sensibilidade dos parâmetros numéricos DEM demonstrou que, apesar de todos os coeficientes serem significativos, o coeficiente de atrito estático partícula-parede ( $\mu_{spw}$ ) possui um efeito muito superior em relação aos demais. Dessa forma, fica evidente que para um processo de calibração dos

parâmetros, recomenda-se uma maior atenção a este parâmetro, ao ponto de ser necessário variar somente os seus valores, mantendo os demais parâmetros fixos.

Foi verificado também pela análise de sensibilidade que quanto maior o valor de  $\mu_{spw}$  pior é o contato entre as partículas, o que prejudica a eficiência da granulação. Além desse resultado, o aumento do grau de preenchimento diminuiu o efeito de  $\mu_{spw}$ .

Em relação a análise numérica da influência das condições operacionais, verificou-se que o grau de preenchimento, ângulo de inclinação e a velocidade de rotação possuem influência significativa no número de contato partícula-partícula. O aumento do grau de preenchimento contribui positivamente para o contato entre as partículas, enquanto a velocidade de rotação possui o efeito oposto, ou seja, quando o número de material dentro do disco rotatório é maior a tendência a formar aglomerados se intensifica, enquanto quando a velocidade de rotação aumenta o processo de granulação é prejudicado.

## NOMENCLATURA

$m_i$	Massa da partícula $i$	$M^1L^0T^0$
$I_i$	Momento de inercia da partícula $i$	$M^1L^2T^0$
$\vec{v}_i$	Velocidade translacional da partícula $i$	$M^0L^1T^{-1}$
$t$	Tempo	$M^0L^0T^1$
$\vec{F}_{ij}$	Força entre as partículas $i$ e $j$	$M^1L^1T^{-2}$
$\vec{\omega}_i$	Velocidade angular da partícula $i$	$M^0L^1T^{-1}$
$\vec{\tau}_{ij}$	Torque entre as partículas $i$ e $j$	$M^1L^2T^{-2}$
$e_{pw}$	Coefficiente de restituição partícula-parede	$M^0L^0T^0$
$e_{pp}$	Coefficiente de restituição partícula-partícula	$M^0L^0T^0$
$\mu_{spp}$	Coefficiente de atrito estático partícula-partícula	$M^0L^0T^0$
$\mu_{spw}$	Coefficiente de atrito estático partícula-parede	$M^0L^0T^0$
$\mu_{Rpp}$	Coefficiente de atrito de rolamento partícula-partícula	$M^0L^0T^0$

$\mu_{Rpw}$	Coeficiente de atrito de rolamento partícula-parede	$M^0L^0T^0$
$N_{c_{pp}}$	Número de contatos partícula-partícula	$M^0L^0T^0$
$GP$	Grau de preenchimento	$M^0L^0T^0$
$AI$	Ângulo de inclinação	$M^0L^0T^0$
$VR$	Velocidade de rotação	$M^0L^1T^{-1}$

## REFERÊNCIAS

- CAPEL, C. E. (1980), Particle Size Enlargement. Elsevier, v. 1, n. C, p. 83-96.
- COETZEE, C. J. (2017), Review : calibration of the discrete element method review : calibration of the discrete element method the discrete element method (DEM) is used to model granular materials SC. Powder Technology.
- CUNDALL, P. A.; STRACK, O. D. L. (1979), A discrete numerical model for granular assemblies. *Géotechnique*, v. 29, n. 1, p. 47-65.
- CUNHA, R. N.; SANTOS, K. G.; LIMA, R. N.; DUARTE, C. R.; BARROZO, M. A. S. (2016), Repose angle of monoparticles and binary mixture: An experimental and simulation study. *Powder Technology*, v. 303, p. 203-211.
- DI RENZO, A., DI MAIO, F.P. (2004), "Comparison of contact-force models for the simulation of collisions in DEM-based granular flow codes", *Chemical Engineering Science*, Vol. 59, p. 525–541.
- HENEIN, H.; BRIMACOMBE, J. K.; WATKINSON, A. P. (1983), Experimental study of transverse bed motion in rotary kilns. *Metallurgical Transactions B*, v. 14, n. 2, p. 191-205.
- LITSTER, J.; ENNIS, B. (2004), *The Science and Engineering of Granulation Processes*. Dordrecht: Springer Netherlands, v. 15.
- MARIGO, M.; STITT, E. H. (2015), Discrete element method (DEM) for industrial applications: Comments on calibration and validation for the modelling of cylindrical pellets. *KONA Powder and Particle Journal*, v. 32, n. 32, p. 236-252.
- MELLMANN, J. (2001), The transverse motion of solids in rotating cylinders-forms of motion and transition behavior. *Powder Technology*, v. 118, n. 3, p. 251-270.
- PIETSCH, W. B. (1991), Size enlargement by agglomeration. In: Chichester, United Kingdom: John Wiley & Sons, p. 544.
- SANTOS, D. A.; PETRI, I. J.; DUARTE, C. R.; BARROZO, M. A. S. (2013), Experimental and CFD study of the hydrodynamic behavior in a rotating drum. *Powder Technology*, v. 250, p. 52-62.
- SILVÉRIO, B. C.; SANTOS, K. G.; DUARTE, C. R.; BARROZO, M. A. S. (2014), Effect of the friction, elastic, and restitution coefficients on the fluid dynamics behavior of a rotary dryer operating with fertilizer. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, v. 53, n. 21, p. 8920-8926.
- SULLIVAN, C. O. (2011), Particle-based discrete element modeling: geomechanics perspective. *International Journal of Geomechanics*, v. 11, p. 1-16.
- TSUJI, Y., TANAKA, T., ISHIDA, T. (1991), "Lagrangian numerical simulation of plug flow of cohesionless particles in a horizontal pipe", *Powder Technology*, Vol. 71, p. 239–250.