



AVALIAÇÃO NUMÉRICA DO FENÔMENO DE MISTURA EM TAMBORES ROTATÓRIOS

LUIZ. E. A. OLIVEIRA^{1*}, CARLOS. F. FILHO¹; THAIS L. C. GOMES², RODOLFO. J. BRANDÃO¹

¹Universidade Federal de Alagoas, Faculdade de Engenharia Química

²Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química

Faculdade de Engenharia Química

*e-mail: luizeduardo@gmail.com

RESUMO – A compreensão acerca do comportamento de escoamentos granulares e da dinâmica de partículas é de fundamental importância no que diz respeito à concepção de projetos e otimização de equipamentos industriais. Dentre eles, os tambores rotatórios têm ganhado destaque devido à sua geometria relativamente simples. Entretanto, a segregação de partículas tem se tornado um dos recorrentes problemas na utilização deste equipamento, podendo afetar negativamente a eficiência do processo de mistura. Tendo isso em vista, esse trabalho teve como objetivo estudar o fenômeno de mistura de partículas no interior de um tambor rotatório, avaliando diferentes tamanhos e densidades do material, utilizando o método dos elementos discretos (DEM). Para isto, um planejamento composto central a 2 fatores foi realizado, considerando como variáveis independentes a razão de tamanhos e a razão de densidades das partículas, e como variáveis resposta o índice de mistura no estado estacionário e a constante cinética de mistura. Os modelos gerados apresentaram coeficientes de correlação quadrático superiores a 0,9, permitindo a análise dos efeitos das variáveis independentes e a predição das respostas avaliadas.

INTRODUÇÃO

Os tambores rotatórios são largamente utilizados em diversos processos industriais devido à sua versatilidade, que permite a operação de materiais granulares com diferentes propriedades físicas. Além disso, estes equipamentos possibilitam elevadas taxas de transferência de calor, massa e quantidade de movimento, sendo aplicados em diversas operações, como na secagem, fermentação, calcinação, moagem, granulação, dentre outros (Brandão *et al.*, 2019; Santos *et al.*, 2016).

Um dos motivos da utilização de tambores rotatórios em operações industriais está associado à sua geometria relativamente simples, que consiste em uma estrutura

cilíndrica horizontal que gira em torno do seu próprio eixo. Apesar das amplas aplicações com materiais particulados na indústria, o conhecimento sobre a dinâmica e segregação de partículas sólidas no interior deste equipamento ainda se encontra como oportunidade de aprofundamento científico (Alchikh-Sulaiman *et al.*, 2016).

Todavia, apesar da sua ampla variedade de aplicações, o seu estudo ainda apresenta grandes complexidades associadas às interações partícula-partícula e partícula-parede (Santos *et al.*, 2016)

Diversos fatores podem influenciar a qualidade do produto final durante o processo de mistura em tambores rotatórios, dentre eles pode-se destacar as propriedades físicas do

material, como a densidade e o diâmetro das partículas, assim como as condições operacionais associadas à velocidade de rotação, grau de preenchimento e raio do tambor (Brandão *et al.*, 2019).

A compreensão a respeito do fluxo de material granular em tambores rotatórios é de grande interesse para aplicações industriais e tem sido estudado experimentalmente (Huang *et al.*, 2009; Ingram *et al.*, 2005; Watanabe, 1999; Wu *et al.*, 2003), bem como numericamente (Alchikh-Sulaiman *et al.*, 2016; Buchholtz *et al.*, 1995; Ding *et al.*, 2001; Yang, *et al.*, 2003).

De forma geral, seis regimes de fluxo são identificados para descrever o movimento de partículas em um tambor rotatório: deslizamento, avalanche, rolamento, cascadeamento, carateamento e centrifugação (Mellmann, 2001).

Pequenas variações nas propriedades dos processos tornam o sistema cada vez mais complexo, surgindo a segregação das partículas. A segregação de partículas tem se tornado um dos recorrentes problemas na utilização de tambores rotatórios, podendo afetar negativamente a eficiência do processo de mistura. Este fenômeno ocorre geralmente em sistemas com misturas binárias, nos quais, por exemplo, partículas menores entram em espaços vazios entre partículas maiores e criam uma aglomeração no centro do tambor, denominada segregação radial. Além da segregação radial, as partículas também podem se organizar na direção longitudinal formando uma segregação axial no sistema (Liao, 2019)

Existem duas abordagens para a modelagem do fluxo de partículas, a Euler-Euler e a Euler-Lagrangeana, representada comumente pelo Método dos Elementos Discretos (DEM). A primeira abordagem se baseia na dinâmica de fluxos contínuos, portanto, as fases envolvidas, independentemente de suas composições e características físicas, são tratadas como contínuas e interpenetrantes. Desta forma, a fase particulada pode ser considerada como um “pseudo-fluido” e a análise do seu movimento realizada por meio das equações governantes de transporte dos fluidos (Lourenço, 2019).

Já a abordagem Euler-Lagrange tem como princípio a análise individual de cada

partícula (Almeida, 2015). Dessa forma, o fluido é considerado um meio contínuo e as partículas com um meio discreto. A fase contínua é modelada pelas equações de conservação de massa e quantidade de movimento e o deslocamento de uma quantidade representativa de partículas da fase dispersa é calculado por meio do balanço de forças que agem sobre elas, levando em consideração as interações com as demais partículas e destas com os contornos sólidos, através de leis de contato (Nascimento, 2018).

Segundo Gao e Sun (2011) a principal desvantagem da abordagem de Euler-Euler é a ineficiência em capturar características essenciais das partículas de forma individual como o tamanho e forma, não podendo assim identificar a influência desses aspectos no resultado do processo.

Os modelos DEM são classificados em duas categorias: modelo de esfera macia e modelo de esfera rígida. No modelo de esfera macia são permitidas pequenas deformações e longos períodos de contato entre as partículas. Já no modelo de esferas rígidas, as colisões são binárias e instantâneas (Brandão *et al.*, 2019; Gao e Sun, 2011). Além disso, as partículas apresentam dois tipos de movimentos, o translacional (Equação 1) e o movimento rotacional (Equação 2) determinados pela segunda lei de Newton.

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = \sum_i (F_n^{ij} + F_t^{ij}) + m_i g \quad (1)$$

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum_i (R_i + F_t^{ij}) + \tau_{rij} \quad (2)$$

Sendo F_n^{ij} , F_t^{ij} , τ_{rij} as forças normais, tangenciais e torque, respectivamente, entre as partículas i e j , e m_i , v_i , I_i , ω_i e R_i a massa, velocidade linear, momento de inércia, velocidade angular e raio das partículas i .

A metodologia DEM é uma importante ferramenta para a previsão do movimento das partículas e análise do índice de segregação e mistura. Tendo isso em vista, esse trabalho teve como objetivo estudar o fenômeno de mistura de partículas no interior de um tambor rotatório, avaliando diferentes tamanhos e densidades do material, utilizando a abordagem numérica Lagrangeana através do método dos elementos discretos.

MATERIAIS E MÉTODOS

A fim de obter o índice de mistura das partículas, as simulações numéricas foram divididas em duas configurações, nas quais foram realizadas avaliações do efeito da razão de tamanho (RT) e da razão de densidade (RD) das partículas sobre o fenômeno estudado. As razões, assim como os raios e densidades das partículas simuladas podem ser vistos na Tabela 1.

O valor de RT foi definido como a razão entre o menor e o maior raio (Equação 3). Já o valor de RD foi definido como a razão entre a menor e a maior densidade (Equação 4).

$$RT = \frac{R_1}{R_2} \quad (3)$$

$$RD = \frac{\rho_1}{\rho_2} \quad (4)$$

Um planejamento composto central (PCC) a 2 fatores foi realizado, considerando como variáveis independentes a razão de tamanho e a razão de densidade das partículas, e como variáveis resposta o índice de mistura no estado estacionário (σ_∞) e a constante cinética de mistura (k). Dessa forma, o PCC foi composto por 4 pontos fatoriais, 4 pontos axiais e 2 pontos centrais, resultando em 10 simulações, utilizando um alfa de rotabilidade (α) de 1,4142, conforme mostrado na Tabela 1.

Para a obtenção de modelos que representassem os principais efeitos das variáveis e das interações entre elas sobre as respostas, foi realizada a regressão não linear dos dados experimentais, adotando-se um nível de significância de 5%, com auxílio do *software* Statistica® 7.

Tabela 1: Planejamento composto central para investigação de variáveis independentes sobre o comportamento granular em tambores rotatórios

Simulação	R1 (m)	R2 (m)	ρ_1 (kg/m ³)	ρ_2 (kg/m ³)	RT (-)	RD (-)
1	0,0009	0,0030	735	2450	0,30 (-1)	0,30 (-1)
2	0,0021	0,0030	735	2450	0,70 (+1)	0,30 (-1)
3	0,0009	0,0030	1715	2450	0,30 (-1)	0,70 (+1)
4	0,0021	0,0030	1715	2450	0,70 (+1)	0,70(+1)
5	0,0015	0,0030	532	2450	0,50 (0)	0,22 (- α)
6	0,0015	0,0030	1918	2450	0,50 (0)	0,78 (+ α)
7	0,0007	0,0030	1225	2450	0,22 (- α)	0,50 (0)
8	0,0023	0,0030	1225	2450	0,78 (+ α)	0,50 (0)
9	0,0015	0,0030	1225	2450	0,50 (0)	0,50 (0)
10	0,0015	0,0030	1225	2450	0,50 (0)	0,50 (0)

As densidades das partículas simuladas foram escolhidas tendo como base os materiais comumente utilizados na indústria. A lista de materiais e suas respectivas densidades estão dispostas na Tabela 2.

Tabela 2: Propriedades de materiais utilizados como referência para as simulações DEM.

ρ (kg/m ³)	Materiais
735	Plástico, carvalho, papel
1715	Magnésio, concreto, fuligem
532	Madeira, lítio
1917	<i>Cullett</i> , glass, marfim, giz
1225	Carvão / Óxido de alumínio / Carbonato de Cálcio
2450	Vidro

Configuração e Ambiente de Simulação

A simulação foi realizada utilizando um grau de preenchimento de 20%, em regime de rolamento e com velocidade de rotação de 1 rad/s. As partículas foram dispostas inicialmente lado a lado, de acordo com a Figura 1, sendo as partículas 1 coloridas em azul e as partículas 2 coloridas em vermelho. A quantidade de partículas utilizadas em cada simulação pode ser verificada na Tabela 3.

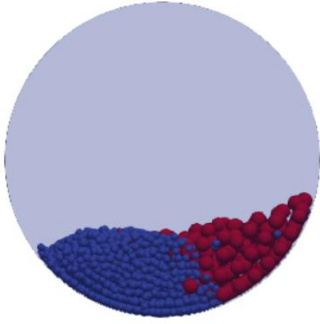


Figura 1: Disposição inicial do Leito

Tabela 3: Quantidade de partículas utilizadas nas simulações

Simulação	Q1	Q2	Total
1	16204	437	16641
2	1276	437	1713
3	16204	437	16641
4	1276	437	1713
5	3500	437	3937
6	3500	437	3937
7	42722	437	43159
8	912	437	1349
9	3500	437	3937
10	3500	437	3937

Todas as simulações foram conduzidas no resolvidor numérico livre LIGGGHTS, utilizando o modelo de contato de Hertz-Mindlin. O tempo simulado foi definido de tal forma a assegurar que o tambor operasse em estado estacionário, sendo estimado em 50 s, utilizando um passo de tempo de 10^{-5} s. As partículas foram consideradas esféricas e as fronteiras do tambor foram fixadas. A Tabela 5 apresenta de forma simplificada todas as condições utilizadas para a realização do estudo numérico.

Tabela 4: Condições utilizadas na simulação Lagrangeana.

Parâmetro	Valor
σ_p [-]	0,2 partículas 0,3 parede
G [Pa]	5×10^6
e_{pp} [-]	0,9
e_{pw} [-]	0,7
μ_{spp} [-]	0,5
μ_{spw} [-]	0,5
μ_{rpp} [-]	0,01
μ_{rpw} [-]	0,05

Visando garantir a estabilidade numérica da simulação, utilizou-se 20% do tempo de Rayleigh (Equação 5).

$$T_R = \frac{\pi r \sqrt{\frac{\rho_s}{G}}}{0,1613\sigma_p + 0,8766} \quad (5)$$

Sendo ρ_s , G , σ_p e r a densidade do material, módulo de cisalhamento, razão de Poisson da partícula e raio da partícula, respectivamente.

Análise do Grau de Mistura

Os resultados obtidos através das simulações realizadas no LIGGGHTS foram analisados no *software* de pós-processamento dos dados Paraview. Os dados obtidos foram exportados para serem analisados através da linguagem de programação Python.

As partículas presentes no tambor foram organizadas utilizando um gradeamento tridimensional de 0,02m, conforme a Figura 2. O código foi capaz de contabilizar as concentrações volumétricas em cada célula, analisando intervalos de tempo de 0,5 s.

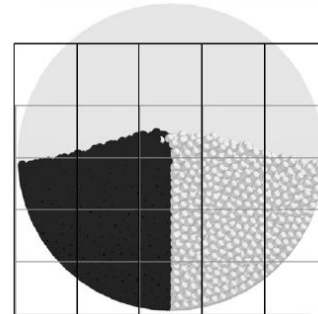


Figura 2: Gradeamento do tambor (Brandão, 2019).

Para a determinação do índice de mistura, utilizou-se do *software* Origin para a remoção de ruídos. Por fim, o *software* Statistica® foi utilizado para estimar os valores da constante cinética da mistura e o valor do índice de mistura em estado estacionário, conforme a Equação 6.

$$\sigma = (\sigma_0 - \sigma_\infty)e^{-kt} + \sigma_\infty \quad (6)$$

Sendo, σ_0 , σ_∞ , k e t o índice de mistura inicial, índice de mistura em estado estacionário,

constante cinética de mistura e o tempo, respectivamente.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O índice de mistura em estado estacionário e a constante cinética de mistura que foram estimados estatisticamente se encontram apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Resultados obtidos para o índice de mistura e constante cinética de mistura.

Simulação	RT (-)	RD (-)	σ_{∞} (-)	k (-)
1	0,30 (-1)	0,30 (-1)	0,2169	0,2667
2	0,70 (1)	0,30 (-1)	0,2151	0,3759
3	0,30 (-1)	0,70 (+1)	0,2593	0,5608
4	0,70 (1)	0,70(+1)	0,1613	0,3686
5	0,50 (0)	0,22 (- α)	0,2140	0,2971
6	0,50 (0)	0,78 (+ α)	0,2096	0,5992
7	0,22 (- α)	0,50 (0)	0,2273	0,3014
8	0,78 (+ α)	0,50 (0)	0,1870	0,4040
9	0,50 (0)	0,50 (0)	0,1879	0,3080
10	0,50 (0)	0,50 (0)	0,1879	0,3080

Efeito da Razão de Tamanho e Razão de Densidade

Para a avaliação da influência de RD sobre as respostas, pode-se comparar as simulações 5 e 6 (Tabela 5). Nota-se que a diminuição do valor de RD resultou na diminuição da constante cinética de mistura, ou seja, na redução da velocidade de migração das partículas para uma região preferencial do tambor. No entanto, o índice de mistura no estado estacionário, que reflete a qualidade da mistura do meio, não sofreu mudanças significativas, quando avaliado o efeito desta variável de forma isolada. Este fato pode ser constatado pelas curvas cinéticas de mistura presentes no gráfico da Figura 3.

O aumento da constante cinética de mistura se deu pela rápida migração das partículas com maior densidade para o núcleo radial, ficando estas circundadas pelas partículas mais leves, sendo esse fenômeno mais acentuado na simulação 6 devido, justamente, ao maior valor de RD. Esse fenômeno pode ser verificado pelo comportamento das curvas apresentadas na Figura 3, onde é possível identificar que a curva

associada ao RD de 0,78 se estabilizou mais rapidamente do que a curva com RD de 0,22.

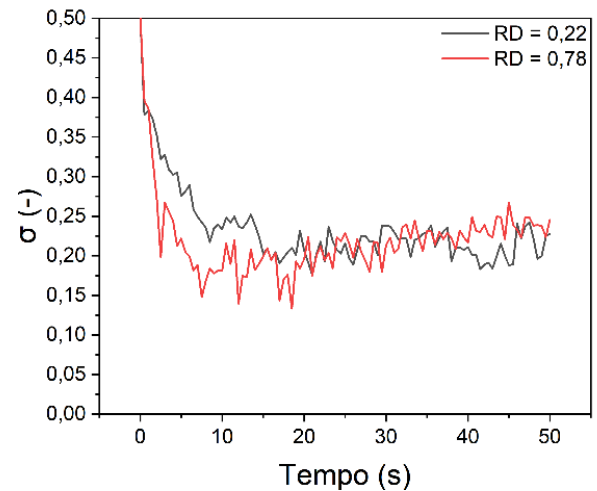


Figura 3: Cinética de mistura referentes às simulações 5 e 6.

Já a influência do tamanho de partículas sobre o processo de mistura, pode ser analisada comparando-se as simulações 7 e 8 (Tabela 3), cujo RD permanece constante. Observa-se que o índice de mistura no estado estacionário aumenta com a diminuição de RT, enquanto que a constante cinética da mistura diminui.

Nas simulações citadas, o aumento do índice de mistura em estado estacionário com a redução de RT, está associado ao fenômeno de percolação, no qual partículas menores migram para o núcleo radial devido aos espaços vazios existentes entre as partículas, aumentado, assim, o índice de mistura no estado estacionário. Este fenômeno também foi reportado no trabalho de Santos *et al.* (2016).

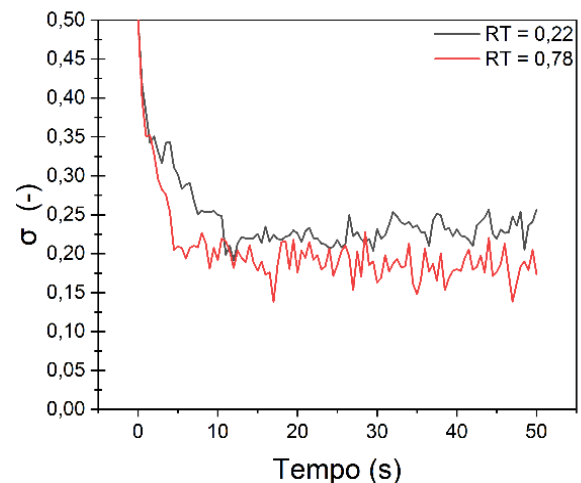


Figura 4: Cinética de mistura referentes às simulações 7 e 8.

Partículas com tamanhos próximos tendem a se estabilizar mais facilmente, isto é, apresentam uma maior velocidade para acomodação na região preferencial, implicando em uma maior constante cinética de mistura. Esse fenômeno pode ser observado nas curvas apresentadas no gráfico da Figura 4, associadas às simulações 7 e 8.

Efeito de Interação

Analisando as simulações 8 e 9, é possível notar que, apesar da mudança da variável RT, não houve mudanças significativas no índice de mistura em estado estacionário, esse fenômeno pode estar associado ao efeito de interação existente entre as variáveis RT e RD sobre a resposta.

Com a realização do planejamento composto central, foi possível verificar a influência das variáveis independentes RT e RD e o seu efeito de interação sobre o índice de mistura. O modelo reduzido obtido se encontra apresentado na Equação 7, cujo R^2 foi de 0,9517, e a superfície de resposta apresentada na Figura 5.

$$\sigma_{\infty} = 0,1879 - 0,0196x_1 + 0,0106x_1^2 + 0,0129x_2^2 - 0,0240x_1x_2 \quad (7)$$

$$x_1 = \frac{RT - 0,5}{0,2} \quad (8)$$

$$x_2 = \frac{RD - 0,5}{0,2} \quad (9)$$

sendo x_1 e x_2 a codificação das variáveis razão de tamanho (RT) e razão de densidade (RD), respectivamente.

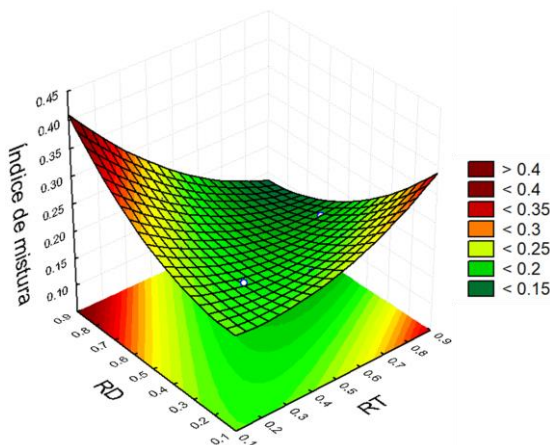


Figura 5: Superfície de resposta sobre a influência de RD e RT no índice de mistura.

Devido ao efeito de interação entre as variáveis independentes, apesar de não ser observado variações significativas nos valores do índice de mistura, os perfis de distribuição de partículas ao longo da seção transversal do tambor, apresentaram diferenças significativas, conforme apresentado na Figura 6.

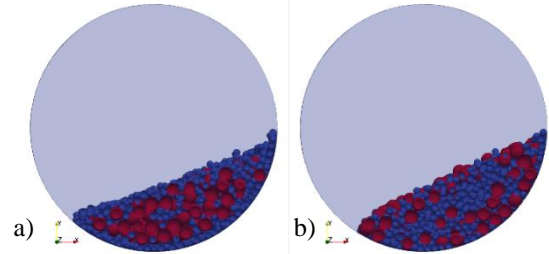


Figura 6: Perfil de distribuição de partículas na seção transversal do tambor.

É possível identificar na Figura 6 (a) que o efeito da razão de densidade foi predominante em relação à razão de tamanho, fazendo com que as partículas mais densas se concentrassem no centro do leito. Já na Figura 6 (b), a razão de tamanho possuiu uma maior influência e, dessa forma, as partículas de menores tamanhos acabaram migrando para o núcleo radial.

O modelo reduzido sobre a influência das variáveis RT e RD sobre a constante cinética de mistura se encontra apresentado na Equação 8, cujo R^2 foi de 0,9038, e a superfície de resposta apresentada na Figura 7.

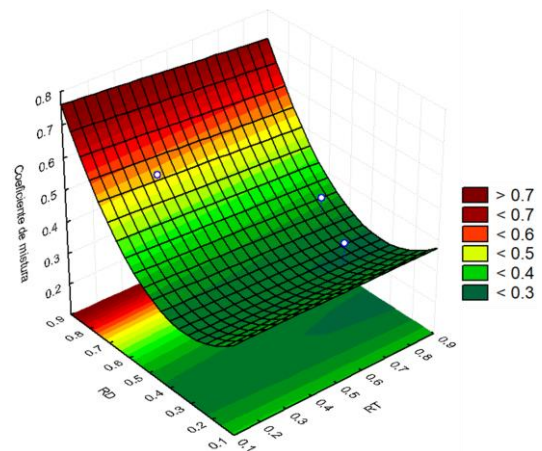


Figura 7: Superfície de resposta da influência de RD e RT no índice de mistura.

$$k = 0,3378 + 0,0892x_1 + 0,0551x_2^2 - 0,0753x_1x_2 \quad (8)$$

Percebe-se que o efeito de RD contribui positivamente para a velocidade de migração das partículas para uma região preferencial do tambor, tanto em sua forma linear quanto quadrática. Já o efeito de RT só pôde ser observado pelo efeito de interação com RD, o qual contribui para a diminuição da constante cinética.

CONCLUSÃO

Os resultados obtidos no presente trabalho permitiram concluir que:

- ✓ Ao avaliar a influência da razão de densidade sobre o índice de mistura de forma isolada, variações significativas na variável resposta não foram identificadas, entretanto esta variável mostrou-se significativa para análise da constante cinética de mistura.
- ✓ Na avaliação da razão de tamanho, foi identificado que tanto o índice de mistura em estado estacionário, quanto a constante cinética de mistura sofreram alterações significativas com a variação desta variável.
- ✓ Devido à complexidade dos dados obtidos e à influência da interação das variáveis, foi realizado um estudo de um planejamento composto central, permitindo identificar modelos com coeficiente de correlação quadrático superior a 0,9, para a predição do índice de mistura em estado estacionário e da constante cinética de mistura em função da razão de tamanho e densidade das partículas avaliadas.

NOMENCLATURA

μ_{spp}	coeficiente de atrito estático partícula partícula	$M^0L^{-0}T^0$
μ_{spw}	coeficiente de atrito estático partícula parede	$M^0L^{-0}T^0$
μ_{rpp}	coeficiente de rolamento partícula partícula	$M^0L^{-0}T^0$
μ_{rpw}	coeficiente de rolamento partícula parede	$M^0L^{-0}T^0$
ρ_i	Densidade da partícula	$M^1L^{-3}T^0$
σ	índice de mistura	$M^0L^0T^0$
σ_∞	índice de mistura em estado estacionário	$M^0L^0T^0$

τ_{ij}	torque entre a partícula i e j	$M^1L^2T^{-2}$
F_n^{ij}	força normal	$M^1L^1T^{-2}$
F_t^{ij}	força tangencial	$M^1L^1T^{-2}$
e_{pp}	coeficiente de restituição partícula partícula	$M^0L^{-0}T^0$
e_{pw}	coeficiente de restituição partícula parede	$M^0L^{-0}T^0$
g	gravidade	$M^0L^1T^{-2}$
I_i	momento de inercia da partícula i	$M^1L^2T^0$
k	constante cinética de mistura	$M^0L^0T^{-1}$
m	massa	$M^1L^{-0}T^0$
m_i	massa da partícula i	$M^1L^0T^0$
R_i	raio da partícula i	$M^0L^1T^0$
t	tempo	$M^0L^0T^1$
v_i	velocidade da partícula i	$M^0L^1T^{-1}$
RD	razão de densidade	$M^0L^0T^0$
RT	razão de tamanho	$M^0L^0T^0$
t	tempo	$M^0L^0T^1$

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao CNPQ, CAPES e FAPEAL pelos recursos financeiros concedidos para a execução desse trabalho.

REFERÊNCIAS

- ALCHIKH-SULAIMAN, B.; ALIAN, M.; EIN-MOZAFFARI, F.; LOHI, A.; UPRETI, S. R. Using the discrete element method to assess the mixing of polydisperse solid particles in a rotary drum. *Particuology*, v. 25, p. 133-142, 2016.
- ALMEIDA, N. P., TAVARES, F. P., & SANTOS, K. G. (2015). Dinâmica das partículas de soja em tambor rotativo de bancada empregando o método de elementos discretos. *Anais do XXXVII ENEMP 2015 - Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados*, São Carlos - SP.
- BRANDÃO, R. J., SILVA, P. F., LOPES, I. O. C., MACHADO, M. V. C., SILVEIRA, J. C., & BARROZO, M. A. S. (2019). Estudo Numérico Do Fenômeno De Mistura Em Tambores Rotatórios. *Anais do XXXIX ENEMP 2019 – Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados*, Belém - Pará.

- BUCHHOLTZ, V.; PÖSCHEL, T.; TILLEMANS, H. J. Simulation of rotating drum experiments using non-circular particles. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, v. 216, n. 3, p. 199-212, 1995.
- DING, Y. L.; SEVILLE, J. P. K.; FORSTER, R.; PARKER, D. J. Solids motion in rolling mode rotating drums operated at low to medium rotational speeds. *Chemical Engineering Science*, v. 56, n. 5, p. 1769-1780, 2001.
- GAO, D.; SUN, J. (2011). Using DEM in Particulate Flow Simulations, Hydrodynamics – Optimizing Methods and Tools.
- HUANG, A. N.; KAO, W. C.; KUO, H. P. Numerical studies of particle segregation in a rotating drum based on Eulerian continuum approach. *Advanced Powder Technology*, v. 24, n. 1, p. 364-372, 2013.
- INGRAM, A.; SEVILLE, J. P. K.; PARKER, D. J.; FAN, X.; FORSTER, R. G. Axial and radial dispersion in rolling mode rotating drums. *Powder Technology*, v. 158, n. 1-3, p. 76-91, 2005.
- LIAO, C. C. (2019). Effect of dynamic properties on density-driven granular segregation in a rotating drum. *Powder Technology*, 345, 151–158.
- LOURENÇO, G. A. (2019), Transporte pneumático horizontal de partículas de baixa densidade: proposta de um sistema de alimentação e estudos de fluidodinâmica. PPGEQ/UFU – Uberlândia – MG (tese de Doutorado).
- MELLMANN, J. (2001). The transverse motion of solids in rotating cylinders-forms of motion and transition behavior. In *Powder Technology* (Vol. 118).
- NASCIMENTO, S. M. (2018), Estudo da dinâmica de partículas em tambor rotatório com suspensores: análise experimental e numérica utilizando abordagens euleriana e lagrangeana. PPGEQ/UFU – Uberlândia – MG (tese de Doutorado).
- SANTOS, D. A., DUARTE, C. R., & BARROZO, M. A. S. (2016). Segregation phenomenon in a rotary drum: Experimental study and CFD simulation. *Powder Technology*, 294, 1–10.
- SANTOS, D. A.; BARROZO, M. A. S.; DUARTE, C. R.; WEIGLER, F.; MELLMANN, J. Investigation of particle dynamics in a rotary drum by means of experiments and numerical simulations using DEM. *Advanced Powder Technology*, v. 27, n. 2, p. 692-703, 2016.
- WATANABE, H. Critical rotation speed for ball-milling. *Powder Technology*, v. 104, n. 1, p. 95-99, 1999.
- WU, C. Y.; COCKS, A. C. F.; GILLIA, O. T.; THOMPSON, D. A. Experimental and numerical investigations of powder transfer. *Powder Technology*, v. 138, n. 2-3, p. 216-228, 2003.
- YANG, R. Y.; ZOU, R. P.; YU, A. B. Microdynamic analysis of particle flow in a horizontal rotating drum. *Powder Technology*, v. 130, n. 1-3, p. 138-146, 2003.