



## INVESTIGAÇÃO NÚMERICA E EXPERIMENTAL DO FENÔMENO DE SEGREGAÇÃO EM UM DISCO ROTATÓRIO

GISELE M. SOUZA<sup>1\*</sup>, RONDINELLI M. LIMA<sup>2</sup>, MARIA F. L. CHICOTE<sup>1</sup>, CLAUDIO R. DUARTE<sup>1</sup>, MARCOS A. S. BARROZO<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Química

<sup>2</sup>Centro de Tecnologia Mineral - CETEM

\*e-mail: eng.giselesouza@gmail.com

**RESUMO** Entre os equipamentos utilizados para granulação, o disco rotatório se destaca por apresentar geometria relativamente simples e pronunciada ação segregadora por tamanho de material. Entretanto, não há compressão consolidada acerca da dinâmica das partículas no interior do equipamento. Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo estudar o fenômeno de segregação de partículas por tamanho de material em um disco rotatório por meio de técnicas numéricas e experimentais. Utilizando o Método dos Elementos Discretos (DEM), foi avaliada a influência das condições operacionais velocidade de rotação e grau de preenchimento na segregação. Ao comparar os resultados experimentais e numéricos, verificou-se que o modelo representou adequadamente a dinâmica de segregação no disco. Os resultados mostraram que a dinâmica da segregação, quantificada pela entropia de mistura, pode ser modelada como um sistema de segunda ordem. Uma análise mais aprofundada foi realizada em relação ao tempo requerido para se atingir o estado estacionário, para o qual se avaliou a influência das condições operacionais.

### INTRODUÇÃO

O processo de granulação de finos em partículas maiores é utilizado em diferentes aplicações industriais, como na produção de fertilizantes, medicamentos, alimentos, metalurgia do pó e pelletização do minério de ferro. O aumento do tamanho do grão modifica as propriedades reológicas do material e pode melhorar a fluidez, aumentar a permeabilidade de gás intersticial entre os grãos, reduzir a quantidade de pós em suspensão e permitir o controle da liberação de ativos.

Alguns equipamentos promovem a granulação por meio de agitação das partículas e colisões entre os grânulos. Entre estes equipamentos, destaca-se o disco rotatório, por sua geometria relativamente simples e sua pronunciada ação segregadora por tamanho de material (Capes, 1980; Litster e Ennis, 2004).

O comportamento do escoamento no disco faz com que as partículas maiores sejam descarregadas preferencialmente, permitindo que as partículas menores permaneçam no equipamento por mais tempo, possibilitando a

aglomeração e consequente aumento de tamanho. Assim, o produto tem uma distribuição estreita de tamanho.

Apesar dos granuladores em disco serem extensivamente estudados (Azrar *et al.*, 2016; Ball, 1959), apenas descrições qualitativas foram fornecidas, uma vez que o foco era a definição de melhores condições de granulação (Chadwick e Bridgwater, 1997). Há poucas informações quantitativas acerca do escoamento dos sólidos no interior do equipamento e a escassez é ainda maior quando se trata do fenômeno de segregação.

No caso de tambores rotatórios, há diversos estudos acerca da influência das propriedades granulares e das condições operacionais sobre a mistura e segregação (Brandão *et al.* 2020; Liao, 2019; He *et al.*, 2019;). Por causa das similaridades entre os equipamentos, as técnicas empregadas nesses estudos em tambores podem também ser aplicadas para o estudo de discos rotatórios.

O uso de simulações numéricas validadas com resultados experimentais surge como uma importante ferramenta para o entendimento do comportamento de

escoamentos granulares no interior de equipamentos. Nesse sentido, o Método dos Elementos Discreto (DEM) é uma técnica bem consolidada. Esse método aplica em cada partícula presente no sistema, um balanço de forças, levando em consideração as interações partícula-partícula e partícula-parede (Cundall e Strack, 1979; Tsuji *et al.*, 1992).

Esse estudo se dedica à análise da dinâmica de partículas no interior de um disco rotatório, bem como do fenômeno de segregação por tamanho de material, avaliando as condições de operação do equipamento, como inclinação, velocidade de rotação e grau de preenchimento.

## MÉTODO DOS ELEMENTOS DISCRETOS

O DEM calcula as trajetórias de um número finito de partículas modelando suas iterações com o leito granular e com as superfícies. Cada contato é avaliado e o movimento individual dessas partículas é atualizado a cada passo de tempo (“*time-stepping*”). Para tanto, a segunda lei de Newton é empregada, fornecendo o movimento da partícula como resultado das forças que atuam sobre ela. As forças de contato que promovem o deslocamento granular também são computadas. As equações para os movimentos de translação e rotação de uma partícula  $i$  com massa  $m_i$  e momento de inércia  $I_i$  podem ser escritas respectivamente pelas equações 1 e 2. (Cundall e Strack, 1979).

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

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

sendo  $v_i$ ,  $\omega_i$  e  $R_i$  a velocidade linear, a velocidade angular e o raio da partícula, respectivamente.  $F_n^{ij}$ ,  $F_t^{ij}$  e  $\tau_{rij}$  são as forças normais e tangenciais e o torque entre as partículas  $i$  e  $j$ .

O modelo de força-deslocamento mais comumente utilizado no DEM é uma combinação da teoria de Hertz (1882) para

descrever o contato elástico entre duas esferas na direção normal com a de Mindlin e Deresiewicz (1953), que modela a força tangencial. Informações mais detalhadas podem ser encontradas em Di Renzo e Di Maio (2004) e Tsuji *et al.* (1991).

## MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo experimental foi realizado em um disco rotatório construído em vidro para facilitar a visualização, representado na Figura 1, com diâmetro ( $D$ ) de 30cm, altura ( $L$ ) de 20cm e ângulo de inclinação ( $\theta$ ) variável, inferido por um inclinômetro digital. A velocidade angular de rotação ( $\omega$ ) era manipulada por um inversor de frequência. Para avaliar a segregação por tamanho no disco, foram utilizadas esferas de vidro de dois diâmetros diferentes ( $d_1$  e  $d_2$ ), resultando em duas combinações, que estão apresentadas na Tabela 1.

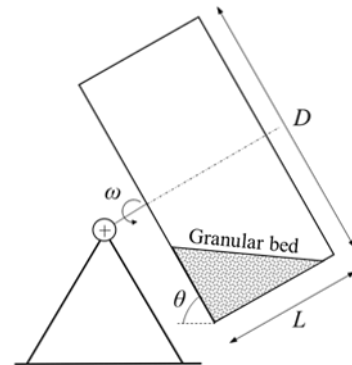


Figura 1: Esquema do disco rotatório

Tabela 1: Configurações de partículas no estudo de segregação no disco rotatório

Configuração	Material I	Material II	Efeito analisado
Monodispersa -M1	Partículas pretas $d_1 = 6,35 \text{ mm}$	Partículas brancas $d_2 = 6,35 \text{ mm}$	Equipamento (condições operacionais)
Bidispersa - M2	Partículas pretas $d_1 = 6,35 \text{ mm}$	Partículas brancas $d_2 = 3,60 \text{ mm}$	Tamanho

Foi fixado o ângulo de inclinação do disco em  $40^\circ$  e foram avaliadas a velocidade de rotação e o grau de preenchimento, nos níveis apresentados na Tabela 2, para ambas as configurações.

Tabela 2: Condições operacionais do disco rotatório

Grau de Inclinação	40°
Velocidades de rotação (rpm)	10, 15 e 20
Graus de preenchimento (%)	2,5; 5 e 7,5
Tempo (s)	60

A Figura 2 exibe a disposição espacial inicial em que os materiais granulares foram dispostos no interior do disco.

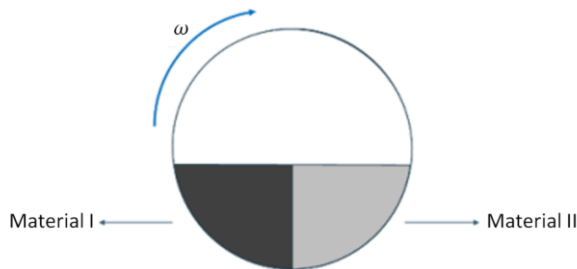


Figura 2: Disposição espacial inicial do material granular no interior do disco (vista frontal).

Todas as simulações foram conduzidas no código numérico livre LIGGGHTS, utilizando o modelo de contato de Hertz-Mindlin. As condições de simulação são apresentadas na Tabela 3. O tempo real simulado foi de 60s, que é um tempo suficiente para alcançar o estado estacionário.

Tabela 3: Propriedades do material vidro (esferas e disco rotatório) e parâmetros de simulação aplicadas no *software* LIGGGHTS

Modelo	Hertz-Mindlin
Passo no tempo (s)	$5 \times 10^{-6}$
Coefficiente de restituição (-)	0,8
Coefficiente de atrito estático partícula-partícula (-)	0,82
Coefficiente de atrito estático partícula-parede (-)	0,30
Coefficiente de atrito de rolamento partícula-partícula (-)	0,014
Coefficiente de atrito de rolamento partícula-parede (-)	0,014

Razão de Poisson (-)	0,22
Módulo de Young (Pa)	$5 \times 10^8$
Densidade ( $\text{kg/m}^3$ )	2455

### Medida do índice de segregação

Para determinação do índice de mistura superficial e averiguar a validade do modelo numérico, foi empregada metodologia baseada no trabalho de Santos *et al.* (2016), conforme apresentado na Figura 3.

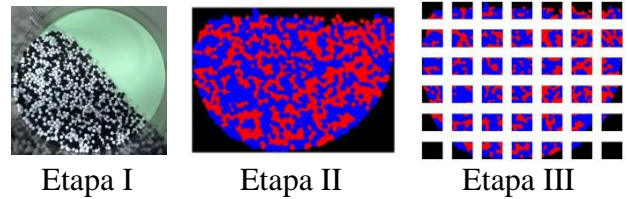


Figura 3: Metodologia de tratamento de imagem

Etapa I: Imagens experimentais e numéricas do leito granular foram extraídas, em tempos predeterminados, para análise da cinética de segregação. Foram consideradas imagens frontais do disco.

Etapa II: Por meio de um código *Matlab*, as imagens extraídas foram então rotacionadas, até que o leito se encontrasse na posição horizontal, e posteriormente convertida para o formato RGB.

Etapa III: As imagens foram divididas em um número determinado de células, de modo que a dimensão de cada lado das células seja de 4 vezes o diâmetro da partícula, conforme discutido por Arntz *et al.*, (2008) e Remy *et al.*, (2011). As concentrações dos pixels vermelhos e azuis em todas as células foram então calculadas e a entropia de mistura local  $s_i$  em cada amostra  $i$  foi calculada usando a expressão de Boltzmann (Shannon, 1948):

$$s_i = x_a \ln x_a + x_b \ln x_b \quad (3)$$

Onde  $x_x$  é fração de partículas do tipo  $x$  em cada amostra  $i$ . Para o cálculo da entropia global no tempo  $t$ , as entropias locais são ponderadas pelo número de pixels  $n_i$  em cada uma das amostras:

$$S(t) = \sum_{i=1}^N s_i(t) n_i(t) \quad (4)$$

A entropia global é normalizada em relação à entropia global do sistema perfeitamente misturado  $S_m$ . Apresentando assim dois extremos: valor zero para uma mistura totalmente segregada e uma unidade no caso de completa homogeneidade.

$$\phi = \frac{S(t)}{S_m} \quad (5)$$

Para determinação da cinética do leito granular completo, os dados de posição das partículas foram extraídos das simulações numéricas e foi realizado o mesmo cálculo da entropia de mistura. Nesse caso, no lugar do número de pixels, foi mensurada a quantidade de partículas de cada tipo em cada uma das células volumétricas.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### Validação do modelo numérico

Resultados qualitativos das simulações numéricas e dos experimentos no tempo de 60s são mostrados na Figura 4 e 5. Eles correspondem às configurações mono e bidispersa, respectivamente, com velocidade de 10rpm e grau de preenchimento de 2,5%. Nas Figuras 6 e 7, têm-se as entropias de mistura ao longo de 60s para as mesmas configurações e mesmas condições operacionais. As imagens experimentais para cálculo da entropia de mistura foram extraídas a cada 5s, ao passo que as numéricas foram obtidas a cada 1s.

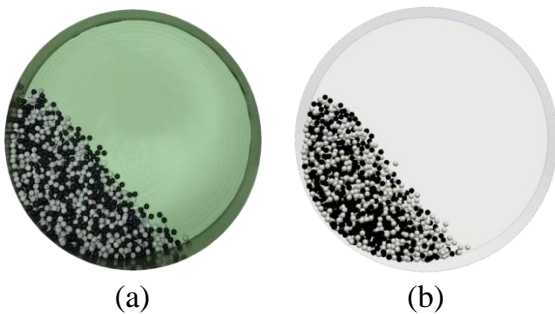


Figura 4: Vista frontal da distribuição das partículas no disco para a configuração monodispersa: experimental (a) e numérico (b)

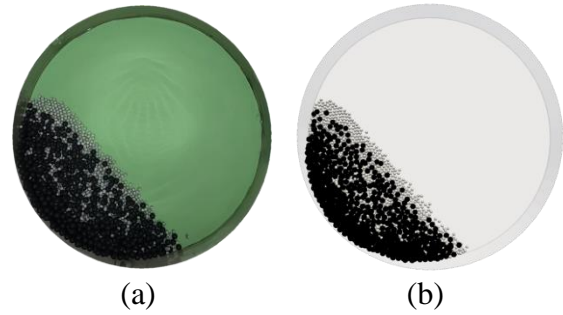


Figura 5: Vista frontal da distribuição das partículas no disco para a configuração bidispersa: experimental (a) e numérico (b)

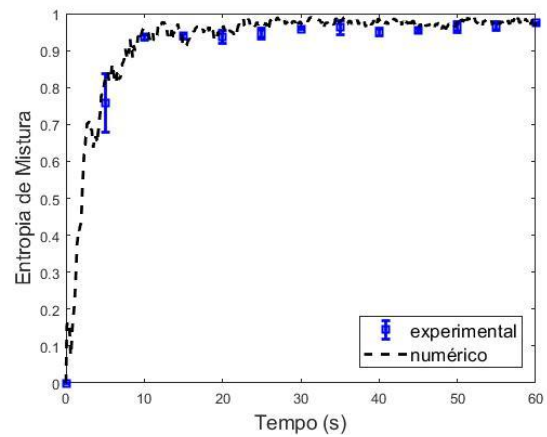


Figura 6: Entropia de Mistura superficial como função do tempo para a configuração monodispersa (Vista Frontal)

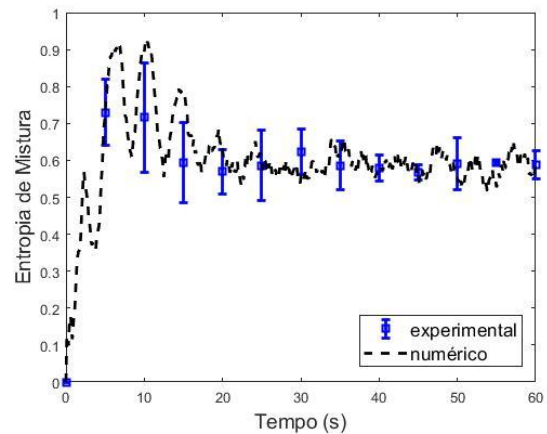


Figura 7: Entropia de Mistura como função do tempo para a configuração bidispersa (Vista Frontal)

Observa-se que o modelo matemático representou adequadamente o fenômeno da dinâmica de partículas no disco rotatório. Portanto, o modelo é adequado para a investigação acerca do fenômeno de segregação nesse equipamento.

### Entropia de mistura no disco rotatório

A fim de comparar os efeitos da diferença de diâmetro das partículas na mistura, as entropias de mistura ao longo do tempo foram determinadas a partir dos dados de posição das partículas em todo o leito para as diferentes condições operacionais estudadas (Figura 8). A fim de se determinar o tempo

requerido para atingir o estado estacionário ( $t_s$ ), foi realizado um ajuste de curva aproximando a dinâmica da entropia de mistura a um sistema de segunda ordem submetido a um degrau unitário. Os dados são apresentados na Tabela 4.

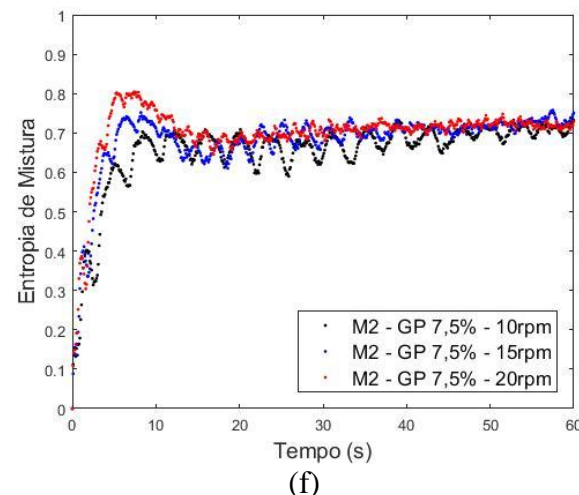
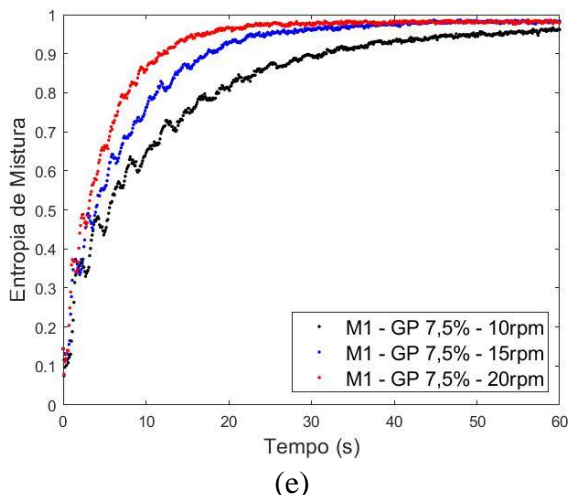
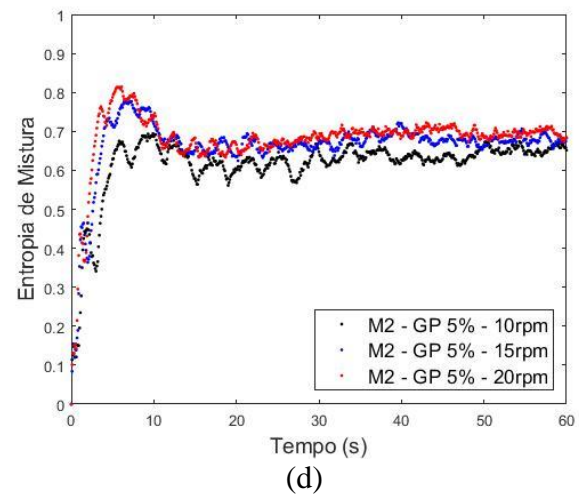
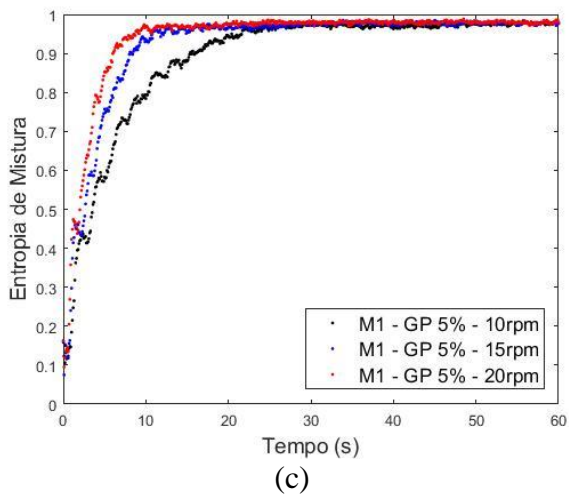
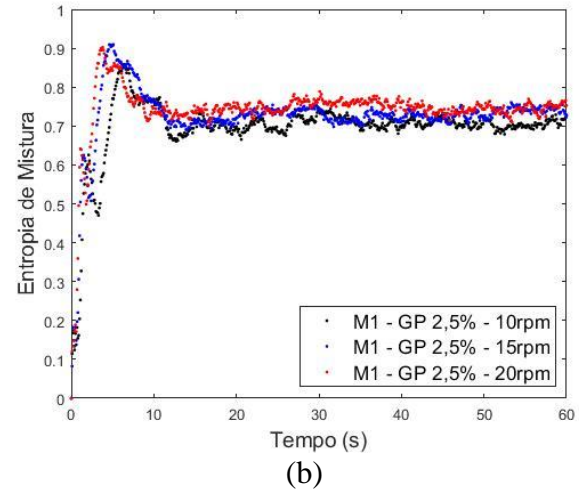
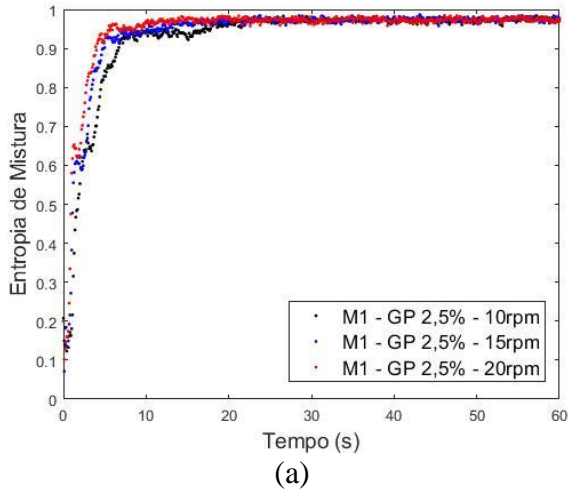


Figura 7: Entropia de Mistura em função do tempo



Os valores da entropia de mistura da configuração M1 após atingir o estado estacionário ( $S_{\infty}$ ) são próximos de 1 para a maioria das velocidades e graus de preenchimento, indicando completa homogeneidade. Esse é um resultado esperado, uma vez que as partículas em estudo não apresentam diferentes propriedades físicas. Para os casos das configurações M2, os valores das entropias se mostram inferiores a M1. Apenas para o caso com grau de preenchimento de 7,5% e velocidade de 10 rpm não atingiu-se o estado estacionário, indicando que, para esta condição, é necessário um tempo maior do que 60s. Para ambas as configurações, M1 e M2, verifica-se que a velocidade de rotação e o grau de preenchimento tem pouca influência no grau de mistura, resultado semelhante ao encontrado por Xiao *et al.*, (2015) para tambores rotatórios.

Tabela 4: Efeito das propriedades físicas do material granular, da velocidade de rotação e grau de preenchimento sobre a dinâmica de segregação.

Configuração	GP	Velocidade	$t_s$	$S_{\infty}$
M1	2,5%	10rpm	9,8	0,97
		15rpm	7,7	0,98
		20rpm	6,0	0,98
M1	5%	10rpm	23,6	0,98
		15rpm	14,9	0,98
		20rpm	10,1	0,98
M1	7,5%	10rpm	45,5	0,96
		15rpm	28,4	0,98
		20rpm	18,8	0,98
M2	2,5%	10rpm	17,0	0,68
		15rpm	16,7	0,70
		20rpm	11,6	0,72
M2	5%	10rpm	15,8	0,60
		15rpm	18,1	0,65
		20rpm	16,5	0,66
M2	7,5%	10rpm	-	-
		15rpm	11,5	0,73
		20rpm	17,1	0,68

O critério utilizado para determinar  $t_s$  foi definido como o tempo necessário para se atingir 98% da resposta final,  $S_{\infty}$ . Para a configuração M1, o incremento na velocidade

de rotação do disco ou a diminuição no grau de preenchimento sempre resultam na diminuição do tempo  $t_s$ . O aumento da energia cinética das partículas intensifica a aleatoriedade do leito, contribuindo com a dispersão do material granular. Quanto à configuração M2, observa-se que o aumento da velocidade não significa necessariamente redução de  $t_s$  quando se tem maior quantidade de partículas no leito.

A sobre-elevação da entropia de mistura é verificada em todos os casos da configuração M2 e até mesmo na entropia de mistura superficial calculada na vista frontal para validação do modelo numérico (Figuras 7 (b), 7 (d) e 7 (f)). Esse resultado sugere que a rotação do disco promove inicialmente um grau de aleatoriedade máxima das partículas, caracterizado pelos picos das curvas. Esse pico é tanto mais alto quanto maior a velocidade. Depois desse máximo, o mecanismo de percolação predomina e o grau de segregação tende a se estabilizar. Quando se tem maior quantidade de partículas (graus de preenchimento de 5 e 7,5%), o tempo para estabilização é maior.

### Segregação axial no disco rotatório

Para análise do fenômeno de segregação axial por diferença de tamanhos no interior do disco, a fração volumétrica das partículas do material 1, para a configuração das partículas bidispersas (M2), foi mensurada em função da posição z, eixo de rotação do disco, no tempo  $t = 60s$  (Figuras 8, 9, 10 e 11).

De maneira geral, pode-se observar que o disco rotatório promove pronunciada segregação axial por tamanho. Esse é um resultado esperado dada a inclinação do equipamento. A ação da gravidade favorece o mecanismo de percolação. Assim, as partículas menores são direcionadas para o fundo, permanecendo por mais tempo no equipamento, ao passo que as partículas maiores, próximas à borda, são descarregadas preferencialmente.

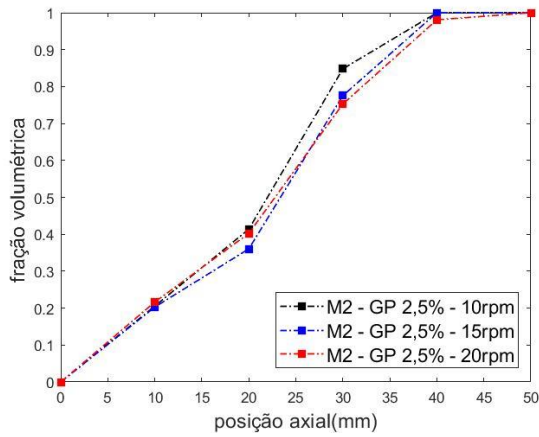


Figura 8: Fração volumétrica em função da posição axial para o grau de preenchimento de 2,5%

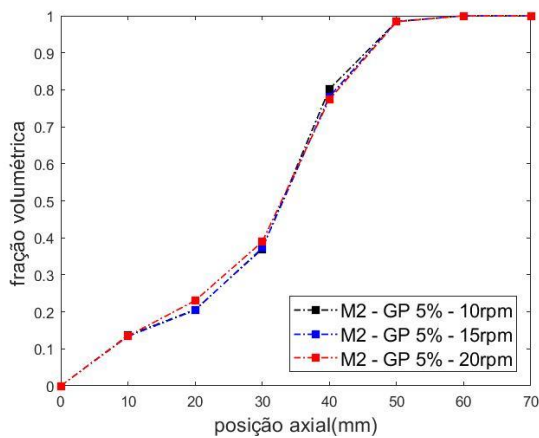


Figura 9: Fração volumétrica em função da posição axial para o grau de preenchimento de 5%

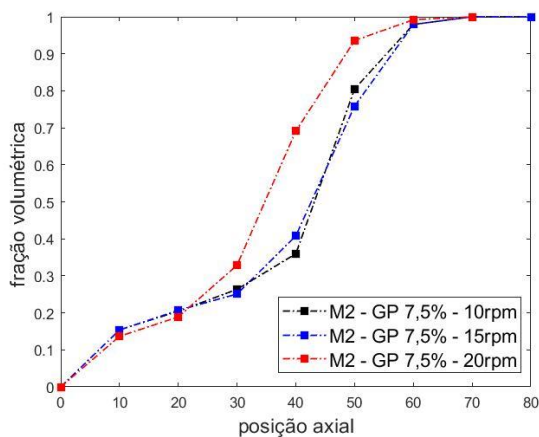


Figura 10: Fração volumétrica em função da posição axial para o grau de preenchimento de 7,5%

Ao avaliar o efeito das velocidades de rotação na segregação axial no disco, verifica-se que não há influência significativa desta variável, resultados semelhantes foram observados por Brandão *et al.* (2019) e Kuo *et*

*al.* (2005) em estudos sobre formação de bandas axiais em tambores rotativos. Para o caso com grau de preenchimento de 7,5%, em particular, a Figura 10 sugere que a velocidade tem influência na segregação axial, uma vez que o caso com velocidade de 20 rpm apresentou valores de frações volumétricas maiores para uma mesma posição. No entanto, ao verificar a espessura do leito, observa-se que o caso com velocidade de rotação de 20 rpm tem leito mais estreito (aproximadamente 70mm) do que os demais (aproximadamente 80mm), possivelmente por causa do aumento da fricção das partículas com a parede do disco. Portanto, os valores das frações volumétricas apenas estão deslocados em relação à posição axial.

Na Figura 11, pode ser analisada a influência do grau de preenchimento sobre a segregação axial. Como os leitos de partículas apresentam diferenças acentuadas em espessura, a posição axial foi normalizada. Ao elevar o grau de preenchimento, a intensidade da segregação axial diminui ligeiramente. Este fenômeno foi verificado para todas as velocidades de rotação.

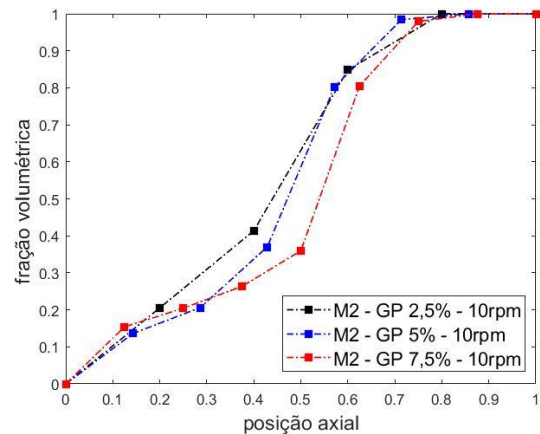


Figura 11: Fração volumétrica em função da posição axial para diferentes graus de preenchimento

## CONCLUSÃO

- ✓ A técnica de análise de imagem foi empregada de maneira satisfatória para determinação dos índices de segregação das imagens experimentais e as obtidas nas simulações numéricas e consequente validação do modelo numérico.

- ✓ A entropia de mistura previu adequadamente a intensidade da aleatoriedade das partículas para ambas as configurações, M1 e M2.
- ✓ A dinâmica da entropia de mistura pode ser modelada como um sistema de segunda ordem submetido a um degrau unitário.
- ✓ A velocidade de rotação e o grau de preenchimento tem pouca influência na intensidade de mistura.
- ✓ Para a configuração M1, o incremento na velocidade de rotação do disco ou a diminuição no grau de preenchimento sempre resultam na diminuição do tempo para se atingir o estado estacionário. Não se pode afirmar o mesmo para a configuração M2.
- ✓ No estado estacionário, a segregação axial se mostrou independente da velocidade de rotação, mas dependente do grau de preenchimento.

### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais).

### NOMENCLATURA

$m_i$	Massa da partícula $i$	$M^1L^0T^0$
$I_i$	Momento de inercia da partícula $i$	$M^1L^2T^0$
$v_i$	Velocidade translacional da partícula $i$	$M^0L^1T^{-1}$
$t$	Tempo	$M^0L^0T^1$
$F_n^{ij}$	Força normal entre as partículas $i$ e $j$	$M^1L^1T^{-2}$
$F_t^{ij}$	Força tangencial entre as partículas $i$ e $j$	$M^1L^1T^{-2}$
$\omega_i$	Velocidade angular da partícula $i$	$M^0L^1T^{-1}$
$\tau_{rij}$	Torque entre as partículas $i$ e $j$	$M^1L^2T^{-2}$
$R_i$	Raio da partícula $i$	$M^1L^0T^0$
$GP$	Grau de preenchimento	$M^0L^0T^0$
$x_x$	Fração de partículas	$M^0L^0T^0$

$d$	Diâmetro das partículas	$M^0L^1T^0$
$\omega$	Velocidade angular de rotação do disco	$M^0L^0T^{-1}$
$D$	Diâmetro do disco	$M^0L^1T^0$
$L$	Altura do disco	$M^0L^1T^0$
$\theta$	Inclinação do disco	$M^0L^0T^0$

### REFERÊNCIAS

- CAPES, C. E. (1980), Particle Size Enlargement. Elsevier, v. 1, n. C, p. 83-96.
- LITSTER, J.; ENNIS, B. (2004), The Science and Engineering of Granulation Processes. Dordrecht: Springer Netherlands, v. 15.
- AZRAR, H., ZENTAR, R., & ABRIAK, N. E. (2016). The Effect of Granulation Time of the Pan Granulation on the Characteristics of the Aggregates Containing Dunkirk Sediments. *Procedia Engineering*, 143(Ictg).
- BALL, F.D. (1959). Pelletizing before sintering: some experiments with a disc. *J. Iron. Steel Inst.* 43.
- BRANDAO, R. J., LIMA, R. M., SANTOS, R. L., DUARTE, C. R., & BARROZO, M. A. S. (2020). Experimental study and DEM analysis of granular segregation in a rotating drum. *Powder Technology*, 364, 1–12.
- 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.
- CHADWICK, P. C., & BRIDGWATER, J. (1997). Solids flow in dish granulators. *Chemical Engineering Science*, 52(15), 2497–2509.
- HE, S. Y., GAN, J. Q., PINSON, D., YU, A. B., & ZHOU, Z. Y. (2019). Radial segregation of binary-sized ellipsoids in a rotating drum. *Powder Technology*, 357, 322–330.
- LIAO C. C. (2019). Effect of dynamic properties on density-driven granular segregation in a rotating drum. *Powder Technology*, 345, 151–158.
- CUNDALL, P. A.; STRACK, O. D. L. (1979), A discrete numerical model for granular



- assemblies. *Géotechnique*, v. 29, n. 1, p. 47-65.
- 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.
- 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.
- ARNTZ, M. M. H. D. (2008). Granular Mixing and Segregation in a Horizontal Rotating Drum: A Simulation Study on the Impact of Rotational Speed and Fill Level. 54(12), 3133–3146.
- REMY, B., KHINAST, J. G., & GLASSER, B. J. (2011). Polydisperse granular flows in a bladed mixer: Experiments and simulations of cohesionless spheres. *Chemical Engineering Science*, 66(9), 1811–1824.
- SHANNON, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, 27(3), 379–423.
- KUO, H.P., HSU, R.C., HSIAO, Y.C., (2005), Investigation of axial segregation in a rotating drum, *Powder Technol.* 153 196 203.