

# ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DA DINÂMICA DE PARTÍCULAS DE SOJA EM UM DISCO ROTATÓRIO

I.A. MORAIS<sup>1</sup>, POTENZA, F.<sup>1</sup>, R. M. LIMA<sup>1</sup>, C. R. DUARTE<sup>1</sup>, M.A.S.BARROZO<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Química  
E-mail para contato: igor\_almeidamoraes@hotmail.com

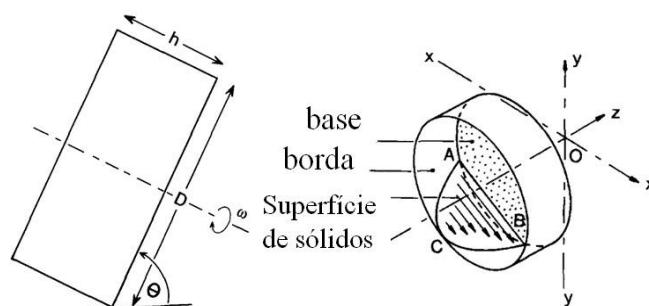
**RESUMO** – Devido à grande importância dos discos rotatórios em processos industriais envolvendo granulação e aos poucos dados presentes na literatura em relação ao equipamento, este trabalho tem como objetivo a compreensão da dinâmica de partículas no interior de um disco rotatório. Através de simulações numéricas e de dados experimentais, estudou-se a relação existente entre o grau de preenchimento, ângulo de inclinação e a velocidade de rotação, sendo possível ao final da análise encontrar uma equação para determinar a velocidade de centrifugação.

## 1. INTRODUÇÃO

Muito utilizada em processos industriais envolvendo fertilizantes, medicamentos e minérios (Chadwick *et al.*, 2005), a granulação tem como objetivo o aumento no tamanho das partículas a partir da aglomeração de outras menores. Esse processo pode ser feito por dois meios: a via seca, quando não é utilizada nenhum tipo de solução e a agregação do pó é feita sob pressão; e via úmida, quando uma solução é utilizada com a finalidade de aglomerar as partículas (Couto *et al.*, 2000).

Um dos equipamentos utilizados para a granulação por via úmida é o disco ou prato rotatório, caracterizado por um prato e uma borda lateral. Este conjunto executa um movimento rotação no seu próprio eixo, semelhante a um tambor rotatório e, além disso, pode ser inclinado de 0° a 90° em relação a horizontal, conforme apresentado na Figura 1. Em alguns casos o disco possui um raspador, com o intuito de evitar que o material se aglomere no fundo do equipamento.

Figura 1 – Detalhes do disco rotatório (Chadwick e Bridgwater, 1997).



Durante o funcionamento as partículas podem apresentar regimes de rolamento, cascadeamento, catarateamento e centrifugação (Chadwick *et al.*, 2005), sendo cada um deles dependentes da dimensão do equipamento, velocidade de rotação, da inclinação do disco, do grau de preenchimento, das propriedades físicas do material granular e do coeficiente de atrito (Mellmann, 2001).

Chadwick e Bridgwater (1997) estudaram, para diferentes materiais granulares, a influência de geometria e da inclinação do equipamento nos regimes de escoamento. Chadwick *et al.* (2005) analisaram a retenção volumétrica de sólidos e o tempo de residência para um sistema contínuo, utilizando uma alimentação com até dois tamanhos de partículas.

Para auxiliar a compreensão de alguns fenômenos físicos, o Método dos elementos discretos (DEM) tem se destacado em pesquisas envolvendo comportamento de materiais granulares. A utilização do DEM se destaca por proporcionar a visualização de cada partícula, uma vez que o balanço de força é aplicado individualmente, assim, é possível a obtenção de dados como: velocidade, trajetória e as forças das partículas (Cundall e Strack, 1979).

A literatura possui poucos dados relativos ao disco rotatório, principalmente envolvendo simulações numéricas. Assim, este trabalho teve como objetivo a utilização do Método dos Elementos Discretos para verificar a influência da variação do ângulo de inclinação e do grau de preenchimento na transição dos regimes de escoamento em um disco rotatório.

## 2. MÉTODO DOS ELEMENTOS DISCRETOS

O método dos elementos discretos se alterna entre a segunda lei de Newton e a lei da Força-Deslocamento. A lei da Força-Deslocamento é usada para encontrar as forças de contato de deslocamento, enquanto a segunda lei de Newton fornece o movimento da partícula como resultado das forças que atuam sobre ela.

A segunda lei de Newton pode ser descrita conforme as equações 1 e 2.

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = \sum_j F_{ij} \quad (1)$$

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum_j M_{ij} \quad (2)$$

sendo  $m_i$ ,  $v_i$ ,  $I_i$  e  $\omega_i$  a massa, a velocidade linear, o momento de inércia e velocidade angular da partícula  $i$ , respectivamente, enquanto  $F_{ij}$  e  $M_{ij}$  são a força e o torque entre as partículas  $i$  e  $j$ .

O modelo não linear mais comumente utilizado no DEM é uma combinação da teoria de Hertz (1882), em que é empregado o contato elástico entre duas partículas na direção normal, com a de Mindlin e Deresiewicz (1953), sem deslizamento, que descreve a força tangencial. Detalhes maiores sobre a modelagem podem ser encontrados no trabalho de Di Renzo e Di Maio (2004).

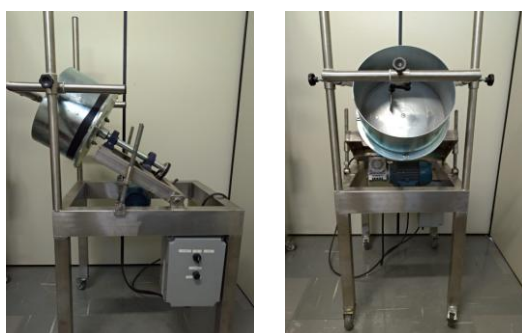
### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. Material granular e disco rotatório

Os testes experimentais foram avaliados utilizando partículas de soja de diâmetro  $6,39 \pm 0,04$  mm, com densidade de  $1190 \pm 6$  kg/m<sup>3</sup> e esfericidade 0,9.

O equipamento utilizado foi um disco rotatório com 0,35 m de diâmetro e 0,20 m de borda, fabricado em aço inox. O disco apresenta uma inclinação regulável variando de 0-75° conforme mostra Figura 2.

Figura 2 – Unidade Experimental



#### 3.2. Determinação da massa máxima

Devido a abertura do disco, existe um limite de massa que pode ser utilizado no equipamento. Para a determinação desse limite foi adicionado uma grande quantidade de soja nos ângulos de inclinação (A.I.) de 40, 45 e 50° e nas velocidades de rotação (V.R.) de 5, 10, 20, 30 e 50 rpm, com intuito de verificar a influência dessas variáveis na massa máxima de soja presente no disco rotatório. Todas as medidas foram realizadas em triplicata.

#### 3.3. Metodologia numérica

Uma vez efetuada as medições experimentais da massa máxima, realizou-se um planejamento 3<sup>k</sup>, variando assim em três níveis o ângulo de inclinação do equipamento e o grau de preenchimento (G. P.), resultando assim em 9 simulações, conforme apresentado na Tabela 1. O objetivo foi verificar quais dessas variáveis influenciam na transição dos regimes de escoamento do disco rotatório. O grau de preenchimento foi determinado com base na menor massa máxima encontrada para cada ângulo.

Tabela 1 – Matriz de planejamento 3<sup>k</sup> utilizada nas simulações numéricas

| Níveis     | -1 | 0   | 1  |
|------------|----|-----|----|
| Ângulo (°) | 40 | 45  | 50 |
| G. P. (%)  | 5  | 7.5 | 10 |

Todas as simulações foram conduzidas no *software* EDEM<sup>®</sup> 3.0 e foi utilizado o modelo de contato de Hertz-Mindlin. Para garantir a estabilidade numérica, utilizou-se um passo no tempo  $1 \times 10^{-5}$  s equivalente a 20% do passo de tempo de Rayleigh.

A Tabela 2 apresenta de forma simplificada todas as condições utilizadas para a realização dos experimentos numéricos.

Tabela 2 – Condições utilizadas para a simulação.

| Modelo                         |                        | Hertz-Mindlin ( <i>noslip</i> )        |      |
|--------------------------------|------------------------|--|------|
| Passo no Tempo (s)             |                        | $1 \times 10^{-5}$                     |      |
| Tamanho de Célula              |                        | $3 R_{\min}$                           |      |
| Densidade (kg/m <sup>3</sup> ) |                        | Coeficiente de Restituição [-]         |      |
| Partícula                      | 1190                   | Partícula                              | 0,70 |
| Parede                         | 7800                   | Parede                                 | 0,70 |
| Razão de Poisson [-]           |                        | Coeficiente de Atrito Estático [-]     |      |
| Partícula                      | 0,40                   | Partícula                              | 0,68 |
| Parede                         | 0,30                   | Parede                                 | 0,31 |
| Módulo de Cisalhamento (Pa)    |                        | Coeficiente de Atrito de Rolamento [-] |      |
| Partícula                      | $1,25 \times 10^{+8}$  | Partícula                              | 0,01 |
| Parede                         | $7,00 \times 10^{+10}$ | Parede                                 | 0,01 |

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 3 e a Figura 3 apresentam os resultados da massa máxima encontrado para cada combinação do ângulo de inclinação (A. I.) e velocidade de rotação (V. R.).

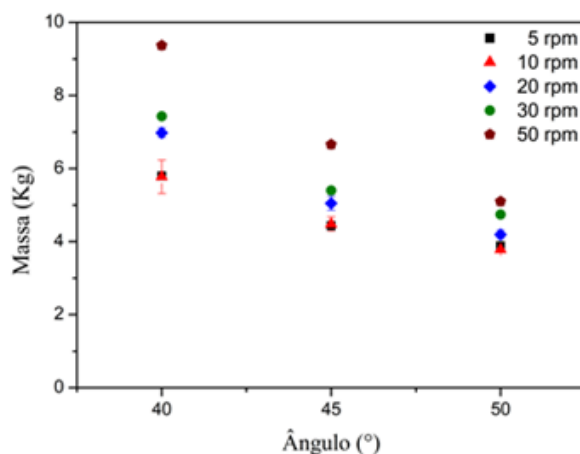
Tabela 3 - Massa máxima (Kg) possível em cada ângulo e velocidade de rotação.

| A.I. (°)/V.R.(rpm) | 5               | 10              | 20              | 30              | 50              |
|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 40                 | $5,79 \pm 0,05$ | $5,77 \pm 0,45$ | $6,97 \pm 0,13$ | $7,42 \pm 0,02$ | $9,37 \pm 0,05$ |
| 45                 | $4,43 \pm 0,02$ | $4,48 \pm 0,19$ | $5,05 \pm 0,19$ | $5,39 \pm 0,01$ | $6,65 \pm 0,06$ |
| 50                 | $3,88 \pm 0,02$ | $3,78 \pm 0,03$ | $4,19 \pm 0,11$ | $4,73 \pm 0,04$ | $5,09 \pm 0,03$ |

Pela Tabela 3 e a Figura 3 percebe-se que o ângulo de inclinação e a velocidade de rotação são inversamente proporcionais, o aumento do ângulo resultou em uma diminuição da retenção de massa no disco rotatório, enquanto o aumento da velocidade teve o comportamento contrário. Destaca-se que as velocidades de 5 e 10 rpm apresentaram resultados semelhantes, não havendo interferência da variável nesse caso.

Analisando a influência do ângulo de 40 para 50° nota-se que ocorreu uma redução de 33,00% e 45,61% de massa para a velocidade de 5 e 50 rpm, respectivamente. Realizando a mesma análise para a velocidade de rotação, a elevação de 5 para 50 rpm ocasionou um aumento de 61,65% no ângulo de 40°, já para o ângulo de 45° foi somente de 31,20%. Ângulos menores de inclinação possuem uma maior sensibilidade em relação a rotação do equipamento, esse fenômeno pode ser explicado porque quanto maior a quantidade de massa maior é a ação da força centrífuga pressionando as partículas na parede do disco rotatório e impedindo que as mesmas sejam expelidas.

Figura 3 – Comportamento da variação da massa máxima em função do ângulo de inclinação e da velocidade de rotação.



Com base na menor massa encontrada (5,774, 4,432 e 3,781 Kg) foram realizadas simulações numérica seguindo um planejamento  $3^k$ , variando o grau de preenchimento em 5, 7,5 e 10% e o ângulo de inclinação de 40, 45 e 50 rpm, conforme já apresentado na Tabela 1. Como resposta para o planejamento foi utilizada a velocidade de rotação necessária para que atingisse os regimes de escoamento de centrifugação (V. C.). A Tabela 4 apresenta o resultado do planejamento  $3^k$ .

Tabela 4 – Resultado do planejamento  $3^k$ .

| A. I.<br>(°) | G. P.<br>(%) | Vel. de Centrifugação<br>(rpm) |
|--------------|--------------|--------------------------------|
| 40           | 5,0          | 140,35                         |
| 45           | 5,0          | 290,31                         |
| 50           | 5,0          | 405,47                         |
| 40           | 7,5          | 99,09                          |
| 45           | 7,5          | 203,70                         |
| 50           | 7,5          | 337,11                         |
| 40           | 10,0         | 82,05                          |
| 45           | 10,0         | 149,80                         |
| 50           | 10,0         | 256,24                         |

A Tabela 5 apresenta efeitos significativos do planejamento  $3^k$ . Pode-se observar que ambas as variáveis estudadas (ângulo de inclinação e o grau de preenchimento) apresentaram influência significativa na velocidade de centrifugação.

Tabela 5 – Sumário dos efeitos do planejamento  $3^k$ .

|                | A. I.       | G. P.  | Média       |
|----------------|-------------|--------|-------------|
| Efeito         | 112,89      | -58,01 | 218,24      |
| p-level        | $< 10^{-3}$ | 0,005  | $< 10^{-3}$ |
| $R^2 = 97,3\%$ |             |        |             |

Realizando uma análise sobre efeitos das variáveis nota-se que elas possuem sinais opostos, ou seja, o aumento do ângulo de inclinação resulta em uma maior dificuldade da soja de atingirem a centrifugação, visto que foi necessária uma velocidade de rotação maior. Já o aumento do número de partículas antecipou a centrifugação. A Equação 3 apresenta o modelo normalizado proposto pelo planejamento, para um  $R^2$  de 97,3%.

$$V.C. = 112,89A.I. - 58,01G.P. + 218,24 \quad (3)$$

## 5. CONCLUSÃO

A quantidade de massa máxima possível a ser utilizada no disco rotatório diminui com o aumento do ângulo de inclinação do equipamento. A velocidade de rotação teve um comportamento oposto a do ângulo, visto que a elevação da rotação aumentou a força centrífuga e consequentemente aumentou a retenção de partículas no disco rotatório.

O planejamento  $3^k$  demonstrou que tanto o ângulo de inclinação quanto o grau de preenchimento apresentaram uma influência significativa sobre a velocidade de centrifugação. A análise do planejamento comprovou que devido ao aumento do ângulo maior foi a velocidade de rotação necessária para a centrifugação, enquanto o grau de preenchimento teve o comportamento contrário, antecipando a centrifugação.

## 6. REFERÊNCIAS

- CHADWICK, P. C.; BRIDGWATER, J. Solids flow in dish granulators. *Chemical Engineering Science*. v. 52, p. 2497-2509, 1997.
- CHADWICK, P. C.; ROUGH, S. L.; BRIDGWATER, J. Holdup and residence time distributions in inclined dishes. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. v. 44, p. 7529-7539, 2005.
- COUTO, A.G.; GONZÁLEZ ORTEGA, G.; PETROVICK, P.R. Granulação. *Caderno de Farmácia*. v.16, n. 1, p. 13-20, 2000.
- CUNDALL, P. A.; STRACK, O. D. L. A discrete numerical model for granular assemblies. *Géotechnique*. v. 29, n. 1, p. 47-65, 1979.
- MELLMANN, J. The transverse motion of solids in rotating cylinders-forms of motion and transition behavior. *Powder Technology*. v. 118, n. 3, p. 251-270, 2001.
- DI RENZO, A.; DI MAIO, F. P. Comparison of contact-force models for the simulation of collisions in DEM-based granular flow codes. *Chemical Engineering Science*, v. 59, n. 3, p. 525-541, 2004.