

# CARACTERIZAÇÃO DOS DIFERENTES REGIMES DE ESCOAMENTO PRESENTES EM UM TAMBOR ROTATÓRIO

R. SCATENA<sup>1</sup>, L.C. FERREIRA<sup>1</sup>, D.A. SANTOS<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: rafascatena@gmail.com

**RESUMO** – Foi realizada uma investigação experimental acerca das principais características do fenômeno de transição entre os diferentes regimes de escoamento presentes em tambores rotatórios. Observou-se, pela primeira vez na literatura, o fenômeno de histerese presente quando da transição entre os regimes de catarateamento-centrifugação. Foi proposta uma equação de velocidade crítica para a transição entre os regimes de catarateamento-centrifugação, a qual se mostrou função da fração de preenchimento e das propriedades físicas dos materiais.

## 1. INTRODUÇÃO

Dependendo de algumas características geométricas e operacionais, tais como, velocidade de rotação, fração de preenchimento, diâmetro do tambor e propriedades do material particulado, tambores rotatórios podem apresentar diferentes regimes de escoamento em seu interior: escorregamento, caimento, rolamento, cascadeamento, catarateamento e centrifugação. Os regimes de caimento, rolamento e cascadeamento, são os regimes de escoamento mais utilizados em processos industriais, como por exemplo, granulação, mistura, secagem e recobrimento, enquanto que o regime de catarateamento é, principalmente, empregado nos processos de moagem. Por outro lado, os regimes de escorregamento e centrifugação não são utilizados em nenhum processo industrial e devem ser evitados (Mellmann, 2001).

A maioria destes regimes tem sido investigados por diversos pesquisadores, principalmente o regime de rolamento (Boateng e Barr, 1997; Ding *et al.*, 2001; Santomaso *et al.*, 2003; Chou *et al.*, 2010; Demagh *et al.*, 2012; Santos *et al.*, 2013), embora a literatura apresente um restrito número de trabalhos dedicados ao fenômeno de transição entre os regimes (Watanabe, 1999; Mellmann, 2001; Juarez *et al.*, 2011).

Baixas velocidades de rotação combinadas com uma parede lisa do tambor induzem a ocorrência dos regimes de deslizamento e caimento. O regime de deslizamento é caracterizado por um leito de material estático deslizando sobre a parede do tambor sem nenhum grau de mistura entre as partículas. No regime de caimento, um certo grau de mistura é alcançado em virtude das constantes ‘avalanches’ que ocorrem no leito de material após atingir um ângulo de repouso crítico.

À medida que a velocidade de rotação do tambor aumenta, ocorre a transição para o regime de

rolamento. Este regime apresenta uma superfície de leito plana com uma inclinação constante, caracterizando o ângulo de repouso dinâmico do material. A superfície do leito começa a ‘arquear’, apresentando formato de “feijão”, com um maior aumento da velocidade de rotação, correspondendo ao regime de cascadeamento. Em altas velocidades de rotação, o regime de catarateamento é observado, onde as partículas começam a serem lançadas do leito de material para o espaço vazio do tambor (Mellmann, 2001; Juarez *et al.*, 2013).

De acordo com Watanabe (1999), a velocidade crítica necessária para atingir o regime de centrifugação pode ser definida de duas maneiras: a velocidade crítica é alcançada quando todas as partículas são lançadas de encontro à parede do tambor formando um único anel (Figure 1a); por outro lado, quando apenas a camada mais externa do leito de material forma um anel, a velocidade crítica é alcançada (Figura 1b).

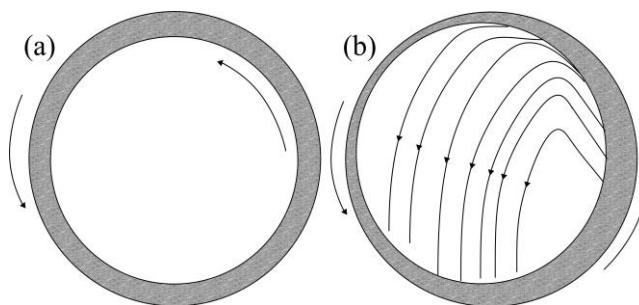


Figura 1 – Definições de transição para o regime de centrifugação: (a) quando todas as partículas formam um anel; (b) quando somente a camada mais externa do leito forma um anel.

Desta forma, existem diferentes expressões na literatura para a velocidade crítica em função da geometria do tambor e das propriedades do material particulado dependendo das definições mostradas anteriormente.

O número de Froude,  $Fr = \omega^2 R / g$ , é definido como sendo a razão entre as forças centrífuga e gravitacional, sendo  $\omega$ ,  $R$  e  $g$  a velocidade de rotação do tambor, o raio do tambor e a aceleração gravitacional, respectivamente. Desta forma, na mecânica clássica, o equilíbrio de forças é alcançado quando o número de Froude é igual a 1 e a velocidade de rotação correspondente é dita velocidade crítica para centrifugação ( $\omega_c$ ):

$$\omega_c = \sqrt{\frac{g}{R}} \quad (1)$$

A Equação 1 é função apenas da geometria do tambor e não leva em consideração nem as propriedades físicas das partículas nem outras condições operacionais, como por exemplo, a fração de preenchimento do tambor. Walton e Braun (1993) propuseram uma modificação da Equação 1 através da introdução do ângulo de repouso do material ( $\theta_s$ ):

$$\omega_c = \sqrt{\frac{g}{R \sin \theta_s}} \quad (2)$$

Como constatado por alguns autores (Watanabe, 1999; Mellmann, 2001), a velocidade crítica para a centrifugação depende significativamente da fração de preenchimento do tambor. A Equação 2 é estritamente válida somente quando a fração de preenchimento do tambor se aproxima de 1. Para o caso em que todas as partículas formam um anel (Figura 1a), a velocidade crítica como uma função da fração de preenchimento ( $f$ ), pode ser expressa como a seguir (Watanabe, 1999):

$$\omega_c = \sqrt{\frac{g}{R \sin \theta_s \sqrt{1-f}}} \quad (3)$$

Juarez *et al.* (2011) estudaram os efeitos do diâmetro de partículas, fração de preenchimento e fluido intersticial sobre a velocidade crítica para centrifugação em um tambor rotatório quase-bidimensional por meio de experimentos e simulações numéricas. Baseando-se em experimentos utilizando sistemas granulares em meio líquido, os autores propuseram a seguinte expressão para a velocidade crítica, sendo  $\rho_f$  e  $\rho_s$  as densidades das fases sólida e líquida, respectivamente:

$$\omega_c = \sqrt{\frac{g(1-\rho_f/\rho_s)}{R \sin \theta_s \sqrt{1-f}}} \quad (4)$$

Embora algumas expressões para a velocidade crítica tenham sido propostas, o fenômeno de transição entre os diferentes regimes ainda necessita ser investigado de forma sistemática. Desta forma, o presente trabalho tem por objetivo realizar um estudo experimental no intuito de um melhor entendimento acerca do fenômeno de transição entre os diferentes regimes presentes em um tambor rotatório, relacionando a velocidade crítica com as diferentes propriedades dos materiais, tais como, esfericidade, densidade, diâmetro e coeficiente de atrito.

## 2. MATERIAIS E METODOLOGIA

O tambor rotatório utilizado no presente trabalho foi construído em aço inox contendo 50 cm de comprimento e 21,5 cm de diâmetro interno. A parede frontal foi confeccionada em vidro transparente para possibilitar a visualização do escoamento granular em seu interior. Os seguintes regimes de escoamento granular foram investigados: rolamento, cascadeamento, catarateamento e centrifugação (Figura 1). Logo, para se evitar o deslizamento do material sobre a parede do tambor, o interior do mesmo foi revestido com uma lixa (P80).

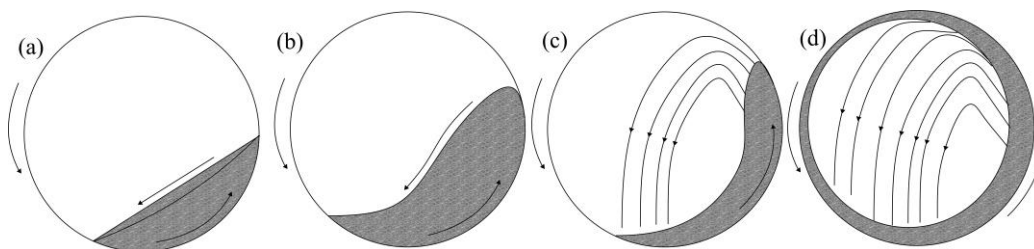


Figura 2 – Regimes de escoamento investigados no presente trabalho: (a) rolamento; (b) cascadeamento; (c) catarateamento; (d) centrifugação.

Vale ressaltar que, no presente trabalho, a velocidade crítica para centrifugação foi considerada como aquela na qual apenas a camada mais externa do leito de material forma um anel (Figura 2d).

No intuito de se investigar a dinâmica de partículas presentes no tambor rotatório, sete diferentes materiais particulados foram utilizados: arroz, soja, esfera de vidro, comprimido e milho. Para a medida da densidade ( $\rho_s$ ) dos diferentes materiais utilizou-se um picnômetro a gás hélio (*Micromeritics AccuPyc 1331*). A caracterização do tamanho das partículas foi feita utilizando-se o diâmetro característico ou volumétrico ( $D_V$ ) o qual corresponde ao diâmetro de uma esfera de igual volume que a partícula.

Uma análise dinâmica de imagens foi realizada com o objetivo de se medir a esfericidade das partículas. Para tanto, o sistema dinâmico de análise de imagens CAMSIZER<sup>®</sup> foi empregado. Este equipamento permite o armazenamento e processamento de um grande número de imagens projetadas de partículas individuais. A partir da análise das imagens foi possível medir a esfericidade ( $\phi$ ) das diferentes partículas utilizando a seguinte equação (Peçanha e Massarani, 1980), sendo  $d_{CI}$  e  $d_{CC}$ , os diâmetros de um círculo inscrito e circunscrito à partícula, respectivamente:

$$\phi = \frac{d_{CI}}{d_{CC}} \quad (5)$$

O coeficiente de atrito partícula-parede foi determinado através da elevação de um plano inclinado revestido com a mesma lixa com a qual foi revestido o interior do tambor. Quando a camada de partículas, sobre o plano inclinado, tendia ao deslizamento, o ângulo de inclinação ( $\beta$ ) correspondente era utilizado no cálculo do coeficiente de atrito partícula-parede ( $\mu_{p-w}$ ) (Equação 6):

$$\mu_{p-w} = \tan(\beta) \quad (6)$$

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As principais propriedades físicas, no que se refere à dinâmica das partículas, dos diferentes materiais investigados no presente trabalho foram medidas e estão dispostas na Tabela 1, sendo  $\rho_s$ ,  $D_V$ ,  $\phi$  e  $\mu_{p-w}$  a densidade, o diâmetro volumétrico, a esfericidade e o coeficiente de atrito partícula-parede, respectivamente.

Tabela 1 – Propriedades físicas dos diferentes materiais.

Materiais	$\rho_s$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$D_v$ [m]	$\phi$ [-]	$\mu_{p-w}$ [-]
comprimido	1517	0,00662	0,50	0,90
milho	1288	0,00788	0,66	0,76
arroz	1465	0,00277	0,35	0,73
soja	1164	0,00639	0,84	0,31
esfera de vidro A	2460	0,00113	0,91	0,48
esfera de vidro B	2460	0,00422	0,86	0,35

A Figura 3 a seguir mostra as curvas de transição entre os diferentes regimes de escoamento presentes em um tambor rotatório para os diferentes materiais.

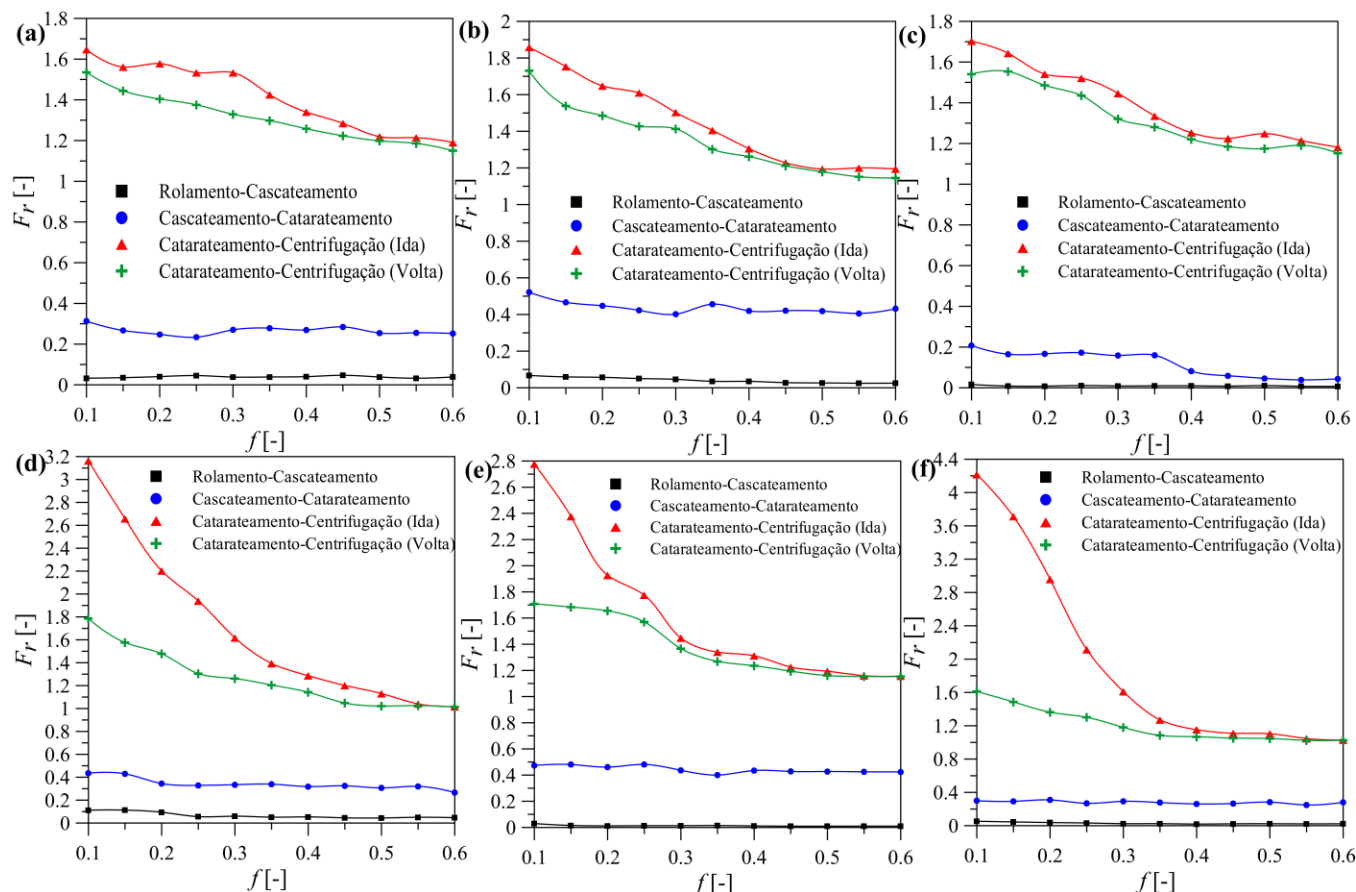


Figura 3 – Curvas de transição entre os diferentes regimes de escoamento: (a) comprimido; (b) milho; (c) arroz; (d) soja; (e) esfera de vidro A; (f) esfera de vidro B.

Todas as curvas foram obtidas a partir da observação da ocorrência da transição entre os regimes tanto por meio do aumento da velocidade de rotação (dita curva de ida) como através da

diminuição da velocidade de rotação do tambor (dita curva de volta). Apenas a transição entre os regimes de catarateamento-centrifugação mostrou diferença entre as curvas de ida e de volta, logo, as curvas de volta para a transição entre os outros regimes foram omitidas da Figura 4. Desta forma, pôde-se observar, pela primeira vez na literatura, o fenômeno de histerese quando da transição entre os regimes de catarateamento-centrifugação.

Nota-se que, para a transição entre todos os regimes de escoamento, houve a necessidade de um aumento na velocidade de rotação quando da diminuição da fração de preenchimento, sendo este aumento mais pronunciado na transição entre os regimes de catarateamento-centrifugação. É interessante notar também que, para a transição catarateamento-centrifugação, à medida que a fração de preenchimento aumenta,  $F_r \rightarrow 1$  para todos os diferentes materiais, ou seja, a Equação 1 torna-se válida.

Visto que a condição para a transição entre os regimes de catarateamento-centrifugação dada pela Equação 1 ( $F_r=1$ ) é válida somente quando a fração de preenchimento ( $f$ ) tende a 1, os autores do presente trabalho propõe a seguinte equação para o número de Froude crítico ( $F_{rc}$ ) (Equação 7):

$$F_{rc} = 1 + \lambda \exp(-\tau f) \quad (7)$$

Substituindo  $F_{rc} = \omega_c^2 R / g$  na Equação 7, tem-se a seguinte equação para a velocidade de rotação crítica do tambor (Equação 8):

$$\omega_c = \sqrt{\frac{g [1 + \lambda \exp(-\tau f)]}{R}} \quad (8)$$

O termo  $\lambda \exp(-\tau f)$  presente na Equação 8, anula-se quando a fração de preenchimento ( $f$ ) tende a um valor alto, condizendo, desta forma, com a Equação 1 ( $F_{rc}=1$ ). Nota-se que, quando  $f \rightarrow 0$ , a velocidade crítica ou o número de Froude crítico, tende a um valor máximo ( $F_{rc} > 1$ ). Logo, o parâmetro  $\lambda$  corresponde ao acréscimo dado à velocidade de rotação ou ao número de Froude necessário para se atingir o regime de centrifugação quando a fração de preenchimento tende a um valor nulo. Por outro lado, o parâmetro  $\tau$  corresponde à taxa de decaimento da velocidade crítica em função do aumento da fração de preenchimento.

Os valores dos parâmetros  $\lambda$  e  $\tau$ , tanto para a curva de centrifugação de ida ( $\lambda_I, \tau_I$ ) quanto para a curva de volta ( $\lambda_V, \tau_V$ ), para os diferentes materiais, foram determinados por meio de regressões não lineares e são dispostos na Tabela 2. Os coeficientes de determinação,  $R^2$ , relativo aos ajustes estatísticos das curvas mostradas na Figura 4 foram maiores do que 0,98 para todas as condições.

Observa-se, a partir da Tabela 2 que, os maiores valores do parâmetro  $\lambda$  foram observados para as partículas contendo os maiores valores de esfericidade ( $\phi$ ) e os menores valores de coeficiente de atrito partícula-parede ( $\mu_{p-w}$ ). Desta forma, altos valores de esfericidade levam a uma menor área de contato partícula-parede e, conseqüentemente, à baixos valores de coeficientes de atrito partícula-parede, necessitando, desta forma, de uma maior velocidade de rotação para atingirem o regime de



centrifugação, principalmente para baixos valores de fração de preenchimento, o que se mostra fisicamente coerente.

Tabela 2 – Parâmetros  $\lambda$  e  $\tau$  ajustados através da Equação 8.

<b>Materiais</b>	<b>Curva de Ida</b>		<b>Curva de Volta</b>	
	$\lambda_I$	$\tau_I$	$\lambda_V$	$\tau_V$
comprimido	0,88	2,34	0,66	2,37
milho	1,25	3,33	0,96	3,30
arroz	0,97	2,89	0,8	2,88
soja	4,4	6,66	1,49	6,18
Esfera de vidro A	3,24	6,00	1,15	3,64
Esfera de vidro B	8,38	8,35	1,23	6,44

Nota-se também que, o fenômeno da histerese foi mais acentuado para partículas com maiores valores de esfericidade ( $\phi$ ) e menores valores de coeficientes de atrito ( $\mu_{p-w}$ ) (Figura 4d, e e f), pelos mesmos motivos destacados anteriormente, o que pode ser comprovado quando subtraímos  $\lambda_V$  de  $\lambda_I$  para todos os materiais contidos na Tabela 2.

Dentro do grupo das partículas que possuem baixos valores de esfericidade (comprimido, milho e arroz), os valores de  $\lambda_I$  e  $\lambda_V$ ,  $\tau_I$  e  $\tau_V$  se mostraram próximos, independentemente dos valores de densidade e diâmetro das partículas. As esferas de vidro A e B possuem mesma densidade, porém diferentes diâmetros. O maior diâmetro da esfera de vidro B pode ter levado a uma acentuada histerese ( $\lambda_I - \lambda_V$ ) e a uma alta taxa de decaimento quando comparada com a esfera de vidro A.

Desta forma, pôde-se comprovar uma influência significativa das propriedades das partículas, além da fração de preenchimento, sobre o fenômeno de transição entre os diferentes regimes de escoamento. Estudos experimentais adicionais, englobando outros materiais particulados, devem ser realizados a fim de se validar a Equação 8 proposta no presente trabalho.

## 4. CONCLUSÃO

Com base no exposto nos capítulos precedentes, pode-se concluir que:

- Foi possível, através de um estudo experimental, investigar as principais características presentes no fenômeno de transição entre os diferentes regimes de escoamento em tambores rotatórios utilizando-se diferentes materiais particulados;
- Observou-se, pela primeira vez na literatura, o fenômeno de histerese presente quando da transição entre os regimes de catarateamento-centrifugação;
- Foi proposta uma equação de velocidade crítica para a transição entre os regimes de catarateamento-centrifugação que é função da fração de preenchimento e das propriedades físicas dos materiais.

## 5. AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelos recursos concedidos no Projeto de Participação Coletiva em Eventos Técnico-Científicos (PCE-00082-14). Os autores agradecem, também, à CAPES e ao CNPq pelo apoio financeiro concedido por meio de bolsas de pesquisa.

## 6. REFERÊNCIAS

- BOATENG, A.A.; BARR, P.V. Granular flow behaviour in the transverse plane of a partially filled rotating cylinder. *J. Fluid Mech.*, v. 330, p. 233-249, 1997.
- CARDOSO, C.R.; OLIVEIRA, T.J.P.; SANTANA JUNIOR, J.A.; ATAÍDE, C.H. Physical characterization of sweet sorghum bagasse, tobacco residue, soy hull and fiber sorghum bagasse particles: Density, particle size and shape distributions. *Powder Technol.*, v. 245, p. 105-114, 2013.
- CHOU, S.H.; LIAO, C.C.; HSIAU, S.S. An experimental study on the effect of liquid content and viscosity on particle segregation in a rotating drum. *Powder Technol.*, v. 201, p. 266-272, 2010.
- DEMAGH, Y.; MOUSSA, H.B.; LACHI, M.; NOUI, S.; BORDJA, L. Surface particle motions in rotating cylinders: Validation and similarity for an industrial scale kiln. *Powder Technol.*, v. 224, p. 260-272, 2012.
- 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. *Chem. Eng. Sci.*, v. 56, p. 1769-1780, 2001.
- JUAREZ, G.; CHEN, P.; LUEPTOW, R. M. Transition to centrifuging granular flow in rotating tumblers: a modified Froude number, *New Journal of Physics*, v. 13, p. 1-12, 2011.
- MELLMANN, J. The transverse motion of solids in rotating cylinders—forms of motion and transition behavior. *Powder Technol.*, v. 118, p. 251-270, 2001.
- PEÇANHA, R.P.; MASSARANI, G. Avaliação do desempenho de hidrociclones. *Revista Brasileira de Tecnologia*, Rio de Janeiro, v. 11, n.4, p. 289-299, 1980.
- RAJCHENBACH, J. Flow in Powders: From Discrete Avalanches to Continuous Regime. *Phys. Rev. Lett.*, v. 65, p. 2221-2224, 1990.
- SANTOMASO, A. C.; DING, Y. L.; LICKISS, J. R.; YORK, D. W. Investigation of the granular behaviour in a rotating drum operated over a wide range of rotational speed. *ICHEME*, v. 81, p. 936-945, 2003.
- SANTOS, D.A.; PETRI, I.J.; DUARTE, C.R.; BARROZO, M.A.S. Experimental and CFD study of the hydrodynamic behavior in a rotating drum. *Powder Technol.*, v. 250, p. 52-62, 2013.
- WALTON, O.R.; BRAUN R.L. Simulation of rotary-drum and repose tests for frictional spheres and rigid sphere clusters Proc. Joint DOE/NFS Workshop on Flow of Particulates and Fluids, p. 1-18, 1993.
- WATANABE, H. Critical rotation speed for ball-milling. *Powder Technol.*, v. 104, p. 95-99, 1999.