

## INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS DE PROJETO NOS REGIMES DE ESCOAMENTO DE TAMBORES ROTATIVOS

CARLOS A. F. FILHO<sup>1\*</sup>, LUIZ EDUARDO A. OLIVEIRA<sup>1</sup>, THAIS L. C. GOMES<sup>1</sup>, RODOLFO J. BRANDÃO<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Alagoas, Centro de Tecnologia  
\*e-mail: carlos.filho@ctec.ufal.br

**RESUMO** - Os tambores rotatórios são dispositivos amplamente aplicados em processos industriais por possuir uma geometria relativamente simples, sendo compostos por uma estrutura cilíndrica horizontal que gira em torno do seu próprio eixo. Entretanto, existem diversos fatores que podem ser cruciais para a determinação do comportamento das partículas no interior deste equipamento, tais como: diâmetro, esfericidade e densidade das partículas, e velocidade de rotação do tambor, coeficientes de interação como atrito estático e de rolamento além do grau de preenchimento. Essas variações de comportamento das partículas são definidoras dos regimes de escoamento no interior do tambor, podendo apresentar movimentações mais brandas do material particulado, como no regime de avalanche, ou movimentos mais intensos, como no regime de centrifugação. Desse modo, o objetivo do presente trabalho é identificar os regimes de escoamentos formados mediante as variações dos parâmetros de projeto e analisar o quanto cada variável interfere nessa mudança de comportamento das partículas.

### INTRODUÇÃO

Os regimes de escoamento em um tambor rotatório podem ser reflexo de fatores como o diâmetro do tambor, das propriedades do material particulado inserido, da fração de preenchimento de material, do revestimento

interno e da velocidade de rotação do tambor, dentre outros (SCATENA, 2014). Os comportamentos das partículas mais comumente identificados são apresentados na Figura 1.

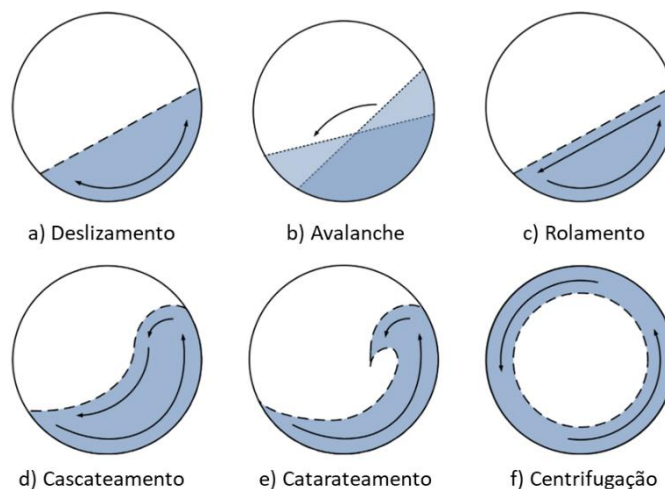


Figura 1: Os regimes de escoamento: (a) deslizamento, (b) avalanche, (c) rolamento, (d) cascadeamento, (e) catarateamento e (f) centrifugação.

## 1. Regimes de Escoamento

### I) Regime de Deslizamento

O regime de deslizamento é caracterizado por apresentar o leito de material estático, deslizando-se sobre a parede interna do tambor, não apresentando desta maneira uma mistura efetiva das partículas ali inseridas, justificando assim sua baixa aplicabilidade industrial. Tal regime ocorre devido a fatores como: baixas velocidades de rotação, baixa carga de material particulado e baixa rugosidade da parede do cilindro (FERREIRA et al., 2014).

### II) Regime de Avalanche

No regime de Avalanche, a velocidade de rotação do equipamento apresenta um incremento quando comparado ao regime de deslizamento. Este aumento promove uma movimentação mais acentuada das partículas situadas na superfície livre do leito granular, proporcionando um deslizamento na parte superficial em formato de avalanche, além de uma instabilidade no ângulo de repouso dinâmico, alternando entre ângulo de repouso inferior e superior. Este padrão de movimentação é comumente aplicado à processos como: granuladores, resfriadores, misturadores e secadores, nos quais é imprescindível a redução do atrito entre partículas com o intuito de inibir o fenômeno de cominuição (SCATENA, 2014).

### III) Regime de Rolamento

Com o contínuo aumento de velocidade de rotação, o leito granular inicia uma movimentação ainda mais acentuada, estabilizando o ângulo de repouso dinâmico, caracterizando o regime de rolamento. Nele, duas regiões podem ser identificadas: a região ativa, na qual ocorre a mistura e as partículas se movimentam para baixo com elevada velocidade, e a região passiva, na qual as partículas são levadas para cima pela parede do tambor rotatório. Esse tipo de regime é o mais utilizado em misturas nos tambores rotatórios, o que é fruto do alto grau de uniformidade do comportamento desse sistema (BHATTACHARYA, 2021).

### IV) Regime de Cascadeamento

Ao elevar a velocidade o regime de cascadeamento é alcançado, sendo este caracterizado por um leito granular em forma de “S” (MELLMANN, 2001).

### V) Regime de Catarateamento

Já no regime de catarateamento, as partículas começam a alcançar maiores alturas no tambor em virtude do aumento de velocidade de rotação e/ou da rugosidade da superfície interna do equipamento. A mudança entre os regimes de cascadeamento e catarateamento dar-se pela ultrapassagem do centro de geometria do tambor pelas partículas do sistema (SCATENA, 2014). Neste regime, devido ao impacto de maior intensidade existente entre partículas e/ou partículas e superfície interna do equipamento o fenômeno de cominuição apresenta-se de forma mais pronunciada, sendo este o regime mais comumente aplicado ao processo de moagem.

### VI) Regime de Centrifugação

O regime de centrifugação é marcado pela aderência das partículas na superfície lateral do tambor rotatório, não havendo decaimento destas da parte superior do leito (FERREIRA et al., 2014). Este padrão de movimentação granular não apresenta aplicabilidade industrial pelo fato de não promover a mistura de partículas nem em impacto entre elas, dado que as partículas circulam constantemente em sintonia sob elevada velocidade. A velocidade crítica de centrifugação ( $\omega_c$ ) pode ser obtida pela equação do Froude Unitário, o qual é descrito conforme a Equação 1.

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

O uso de simulações numéricas surge com propósito de entender o comportamento de escoamentos granulares e avaliar estratégias para predição destes ao longo da operação.

Desta maneira torna-se necessário o estudo da dinâmica de partículas no interior de tambores rotatórios, além da identificação e quantificação de variáveis que influenciam na transição dos regimes de escoamento, como características do equipamento com a rugosidade superficial, diâmetro e de operação como o grau de preenchimento.

## 2. Método dos Elementos Discretos

O método dos elementos discretos (DEM) é frequentemente utilizado para descrever o comportamento de fluxos granulares. Este instrumento numérico efetua um balanço de forças sobre cada partícula e utiliza a segunda lei de Newton e a lei do deslocamento para prever o movimento das partículas considerando as interações partícula-partícula e partícula-parede. O método utiliza a segunda lei de Newton (Equação 2 e 3) para contabilizar o resultado das forças atuantes sobre a partícula, enquanto que a lei do deslocamento é utilizada para determinar as forças de contato responsáveis pelo deslocamento granular (SANTOS *et al.*, 2016).

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = \sum_j (F_n^{ij} + F_t^{ij}) + m_i g \quad (2)$$

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum_j (R_i \times F_t^{ij}) + \tau_{rij} \quad (3)$$

Sendo  $m_i$ ,  $v_i$ ,  $I_i$ ,  $\omega_i$  e  $R_i$  a massa, velocidade linear, momento de inercia, velocidade angular e o raio da partícula  $i$  respectivamente, enquanto  $F_n^{ij}$ ,  $F_t^{ij}$  e  $\tau_{rij}$  são as forças normais e tangenciais e o torque entre as partículas  $i$  e  $j$ .

Os modelos DEM podem ser classificados em duas categorias: modelos de esfera macia e modelos de esfera rígida. A abordagem de esfera rígida é válida para sistemas de baixa concentração granular, pois as colisões são consideradas binárias e instantâneas. Já os modelos de esferas macias, também chamados de modelo não-linear de Hertz-Mindlin, são modelos adequados para sistemas com alta concentração granular e longos períodos de contato entre as partículas (KLOSS *et al.*, 2016). O trabalho de Hertz (1882) foi utilizado para o cálculo da força

normal e do de Mindlin e Deresiewicz (1953), para a força tangencial.

## METODOLOGIA

A fim de se avaliar a influência das características do equipamento como a rugosidade superficial, diâmetro e de operação como o grau de preenchimento foi realizado um planejamento composto central, conforme disposto na Tabela 1. O comprimento tambor foi fixado em 0,1 m. A investigação da dinâmica de partículas foi avaliada em um intervalo de velocidades de rotação variando de 1 rad/s a 57 rad/s. Utilizando técnicas de regressão múltipla, em um nível de significância de 95%, foram investigadas, quantitativamente, as implicações sobre a velocidade crítica de centrifugação em função das variáveis independentes.

Tabela 1: Planejamento composto central das variáveis: fator de preenchimento (f), diâmetro do tambor (D), coeficiente de atrito estático partícula-parede ( $\mu_{spw}$ ) e coeficiente de atrito de rolamento partícula-parede ( $\mu_{rpw}$ ).

Simulação	f (%)	D (m)	$\mu_{spw}$ (-)	$\mu_{rpw}$ (-)
1	20,0 (-1)	0,10 (-1)	0,30 (-1)	0,02 (-1)
2	20,0 (-1)	0,10 (-1)	0,30 (-1)	0,06 (+1)
3	20,0 (-1)	0,10 (-1)	1,00 (+1)	0,02 (-1)
4	20,0 (-1)	0,10 (-1)	1,00 (+1)	0,06 (+1)
5	20,0 (-1)	0,20 (+1)	0,30 (-1)	0,02 (-1)
6	20,0 (-1)	0,20 (+1)	0,30 (-1)	0,06 (+1)
7	20,0 (-1)	0,20 (+1)	1,00 (+1)	0,02 (-1)
8	20,0 (-1)	0,20 (+1)	1,00 (+1)	0,06 (+1)
9	40,0 (+1)	0,10 (-1)	0,30 (-1)	0,02 (-1)
10	40,0 (+1)	0,10 (-1)	0,30 (-1)	0,06 (+1)
11	40,0 (+1)	0,10 (-1)	1,00 (+1)	0,02 (-1)
12	40,0 (+1)	0,10 (-1)	1,00 (+1)	0,06 (+1)
13	40,0 (+1)	0,20 (+1)	0,30 (-1)	0,02 (-1)
14	40,0 (+1)	0,20 (+1)	0,30 (-1)	0,06 (+1)
15	40,0 (+1)	0,20 (+1)	1,00 (+1)	0,02 (-1)
16	40,0 (+1)	0,20 (+1)	1,00 (+1)	0,06 (+1)
17	15,2 (- $\alpha$ )	0,15 (0)	0,65 (0)	0,04 (0)
18	44,8 (+ $\alpha$ )	0,15 (0)	0,65 (0)	0,04 (0)
19	30,0 (0)	0,08 (- $\alpha$ )	0,65 (0)	0,04 (0)
20	30,0 (0)	0,22 (+ $\alpha$ )	0,65 (0)	0,04 (0)
21	30,0 (0)	0,15 (0)	0,13 (- $\alpha$ )	0,04 (0)
22	30,0 (0)	0,15 (0)	1,17 (+ $\alpha$ )	0,04 (0)
23	30,0 (0)	0,15 (0)	0,65 (0)	0,01 (- $\alpha$ )
24	30,0 (0)	0,15 (0)	0,65 (0)	0,07 (+ $\alpha$ )
25	30,0 (0)	0,15 (0)	0,65 (0)	0,04 (0)

Após a definição do planejamento, realizou-se as simulações propostas no LIGGGHTS, versão 3.8.0, sendo estas avaliadas posteriormente via programação Python e através do software de pós-processamento Paraview versão 5.10.1.

Utilizou-se, em todas as simulações elaboradas, materiais particulados constituídos de vidro com diâmetros de 6,49 mm, além de tambores rotativos cilíndricos com 1,00 m de comprimento.

Os parâmetros avaliados na modelagem DEM para realização do estudo numérico se encontram dispostos na Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros DEM.

Parâmetro	Valor
$\sigma_p$ [-]	0,22
$G$ [Pa]	$1 \times 10^6$
$e_{pp}$ [-]	0,81
$e_{pw}$ [-]	0,90
$\mu_{spp}$ [-]	0,659
$\mu_{spw}$ [-]	0,382
$\mu_{rpp}$ [-]	0,040
$\mu_{rpw}$ [-]	0,055
$\rho_p$ [g.cm <sup>-3</sup> ]	1,175
$d_p$ [mm]	6,49

Destaca-se que, ao realizar as simulações, incrementos de velocidades de rotação foram realizados, permitindo extrair um perfil detalhado da influência da velocidade de rotação sobre a dinâmica de partículas em cada uma das condições avaliadas. O tambor rotatório operava em cada velocidade durante 5 s, tempo suficiente para que um novo regime estacionário fosse alcançado.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Análise do perfil de velocidade das partículas

Na Figura 2 é apresentada uma avaliação qualitativa do comportamento de material granular no interior de tambores rotatórios com o aumento da velocidade de rotação do equipamento, utilizando o método dos elementos discretos como técnica computacional.

É possível identificar na Figura 2 que todos os regimes puderam ser identificados satisfatoriamente, com exceção do regime de deslizamento, mostrando que a ferramenta computacional aplicada consegue representar qualitativamente a dinâmica de partículas no interior de tambores rotatórios, sendo assim

adequada à predição na transição dos regimes de escoamento.

Na Figura 2a é identificado o regime de avalanche, na qual o leito granular apresentava oscilação do ângulo de repouso dinâmico. Já na Figura 2b o leito apresentava um comportamento mais estável, além de apresentar regiões bem definidas, como a região ativa (vermelho) e a região passiva (azul). Com o aumento de velocidade, o leito granular começou a apresentar um formato mais arqueado, caracterizando o regime de cascadeamento (Figura 2c).

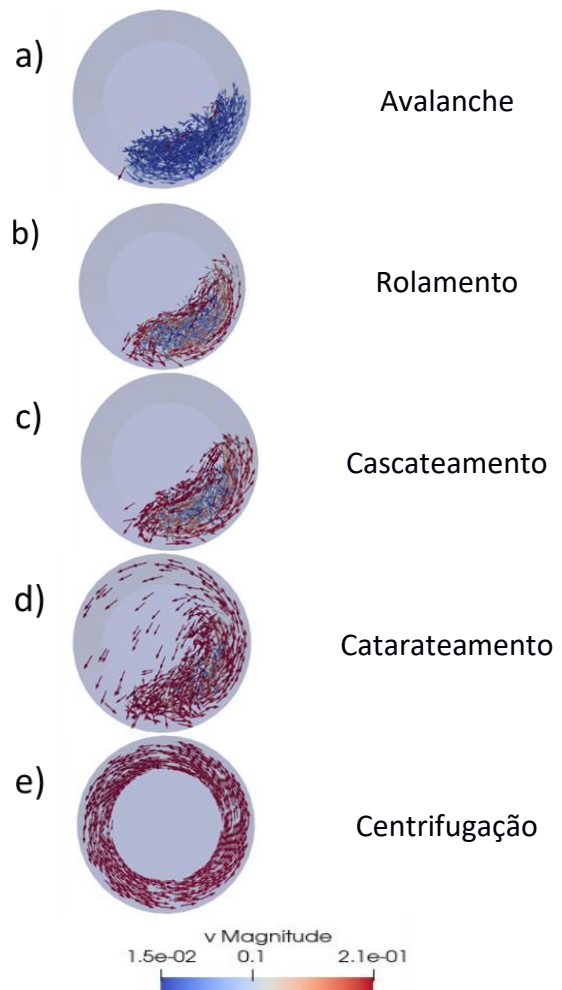


Figura 2: Regimes de escoamento identificados na simulação 1 mediante a mudança de velocidade de rotação do tambor.

Após o regime de cascadeamento, observa-se que as partículas da superfície livre do leito granular começam a ser lançadas no interior do equipamento, caracterizando o regime de catarateamento (Figura 2d). Com o contínuo aumento de velocidade, atinge-se a velocidade crítica de centrifugação na qual a

força centrípeta passa a ter magnitude superior a força peso, fazendo com que as partículas fiquem aderidas na superfície interna do equipamento (Figura 2e). As velocidades de rotação para cada regime encontrado na simulação 1 é apresentado na Tabela 2.

Tabela 2: Regime de escoamento para cada velocidade de rotação ( $\omega$ ) do tambor rotatório da simulação 1.

Regime	$\omega$ (rad/s)
Avalanche	$1 < \omega < 19$
Rolamento	$19 < \omega < 25$
Cascadeamento	$25 < \omega < 45$
Catarateamento	$45 < \omega < 46$
Centrifugação	$46 < \omega$

Além das observações qualitativas acerca da identificação dos regimes de escoamento, foi também realizada uma análise quantitativa dos dados obtidos através das simulações, permitindo assim identificar a influência da velocidade de rotação do equipamento sobre a velocidade média das partículas (Figura 3). Essa média de velocidade do material particulado foi obtida a partir da média aritmética dos módulos das velocidades de todas as partículas no leito granular.

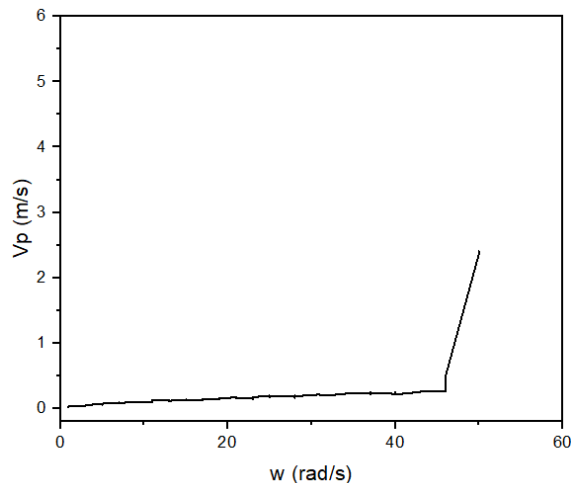


Figura 3: Comportamento da velocidade das partículas ( $V_p$ ) com o decorrer das velocidades de rotação do tambor ( $w$ ).

A partir da análise da Figura 3, nota-se que além das observações qualitativas, foi possível avaliar a transição do regime de catarateamento para a centrifugação através da identificação de uma descontinuidade gráfica. Sendo este resultado um potencial método para

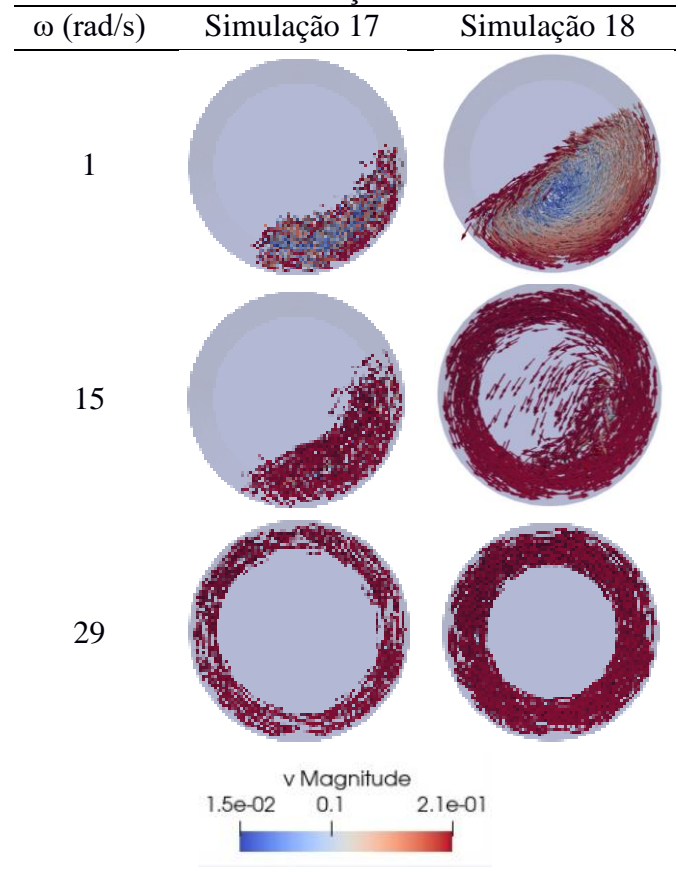
melhor descrever as transições entre os regimes de escoamento granular no interior de tambores rotatórios.

É importante ressaltar que as velocidades de centrifugação foram determinadas a partir do momento em que a primeira camada de partículas encontrava-se aderida na superfície lateral do tambor.

### Análise da influência do grau de preenchimento

Na Tabela 3 é apresentada uma avaliação qualitativa da influência do grau de preenchimento do tambor rotatório sobre a transição dos regimes de escoamento.

Tabela 3: Regimes de escoamento identificados nas simulações 17 e 18 para as velocidades de rotação estudadas.



A partir da análise da Tabela 3 é possível identificar que ao elevar o grau de preenchimento de partículas no interior do tambor rotatório a velocidade crítica de centrifugação sofre uma antecipação, ou seja, menores velocidades de rotação são necessárias para que a centrifugação seja atingida.

De modo a avaliar quantitativamente esta influência, as simulações 17 e 18 foram

selecionadas (Figura 4), uma vez que apenas o grau de preenchimento foi alterado nestas condições.

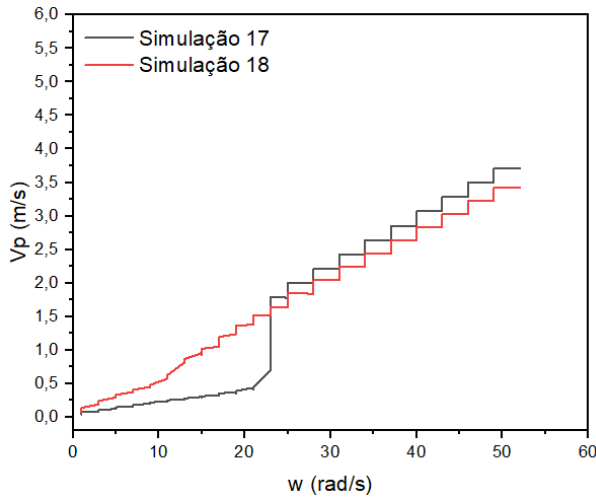


Figura 4: Comportamento da velocidade das partículas ( $V_p$ ) com o decorrer das velocidades de rotação do tambor ( $\omega$ ).

A partir da análise da Figura 4, observou-se que, ao elevar o grau de preenchimento de 15,87 para 44,82%, a velocidade de rotação do equipamento, necessária para atingir a centrifugação, diminuiu de 21,00 para 11,00 rad/s. Maiores valores de preenchimentos promovem a antecipação da centrifugação do material granular. Watanabe (1999) concluiu em seu estudo que tanto experimentalmente quanto através de simulações Lagrangeanas, a velocidade crítica de centrifugação é reduzida com a elevação do grau de preenchimento, apresentando um comportamento linear até valores próximos a 50% de preenchimento.

### Análise da variação do diâmetro do tambor

Similarmente ao que foi realizado para a avaliação da influência do grau de preenchimento de partículas no interior do tambor rotatório, também foi discutido neste trabalho o efeito promovido pela alteração do diâmetro do equipamento. Para tanto, analisou-se as simulações 19 e 20 a fim de se observar o comportamento abordado (Tabela 4).

De acordo com o que foi observado na Tabela 4, constatou-se que, ao aumentar o diâmetro do tambor rotatório, a velocidade crítica de centrifugação é antecipada, isto é, menores velocidades de rotação são necessárias para que o regime de centrifugação seja

atingido. Tal comportamento está de acordo com a literatura, dado que a velocidade de centrifugação e o raio do tambor são grandezas inversamente proporcionais vide a Equação 1 (HEILBUTH *et al.*, 2022; BRANDÃO *et al.*, 2020).

Tabela 4: Regimes de escoamento identificados nas simulações 19 e 20 para as velocidades de rotação estudadas.

$\omega$ (rad/s)	Simulação 19	Simulação 20
1		
15		
29		

v Magnitude  
1.5e-02 0.1 2.1e-01

Tendo em vista as velocidades médias das partículas e as velocidades de rotação do tambor rotativo (Figura 5), observou-se que as velocidades críticas de centrifugação para as simulações 19 e 20 estão em torno de 24 rad/s e 18 rad/s, respectivamente. Esse fato é identificado pela descontinuidade no gráfico que relaciona a velocidade média das partículas com a velocidade de rotação do equipamento.

A partir da observação da Figura 5, observou-se que, ao aumentar o diâmetro do tambor de 0,08 para 0,22 m, a velocidade necessária para atingir a centrifugação diminuiu de 21,00 para 11,00 rad/s. Maiores valores de diâmetro do equipamento promovem a antecipação da centrifugação do meio granular.

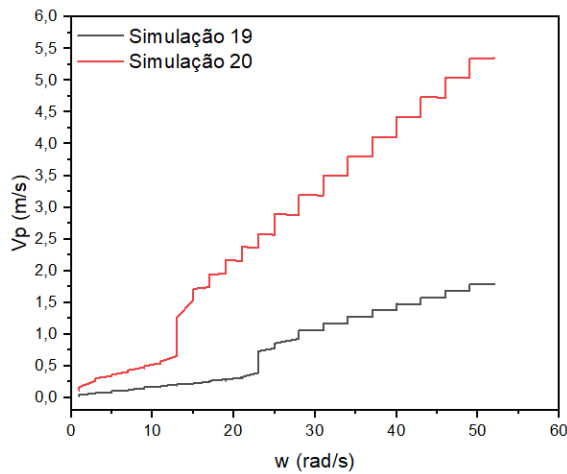


Figura 5: Comportamento da velocidade das partículas ( $V_p$ ) com o aumento das velocidades de rotação do tambor ( $\omega$ ).

### Análise da variação do fator de atrito estático

Com o objetivo de se estudar a influência da variação do fator de atrito estático do tambor rotatório no comportamento do material particulado, estudou-se as simulações 21 e 22 (Tabela 5).

Tabela 5: Regimes de escoamento identificados nas simulações 21 e 22 para as velocidades de rotação estudadas.

$w$ (rad/s)	Simulação 21	Simulação 22
1		
15		
29		

v Magnitude  
1.5e-02    0.1    2.1e-01

Diante do que foi analisado na Tabela 5, constatou-se que, ao aumentar o coeficiente de atrito estático das superfícies internas do tambor rotatório, a velocidade crítica de centrifugação é alcançada mais rapidamente.

Em contrapartida, observou-se que o comportamento das partículas na simulação 21 permanece-se inalterado mediante o aumento da velocidade de rotação do tambor, o que também pode ser analisado na Figura 6. Essa manutenção de comportamento deve-se ao fato das paredes internas do tambor apresentarem um atrito estático muito próximo à zero, o que torna baixa a transmissão de quantidade de movimento entre a parede do tambor e as partículas (BRANDÃO *et al.*, 2020; LIMA *et al.*, 2021). Pela Figura 6, também é constatado que a velocidade crítica de centrifugação na simulação 22 é aproximadamente 15,00 rad/s.

Desse modo, pode-se afirmar que o atrito estático nas paredes internas desse tipo de equipamento tem alto impacto na definição do regime de escoamento do material particulado.

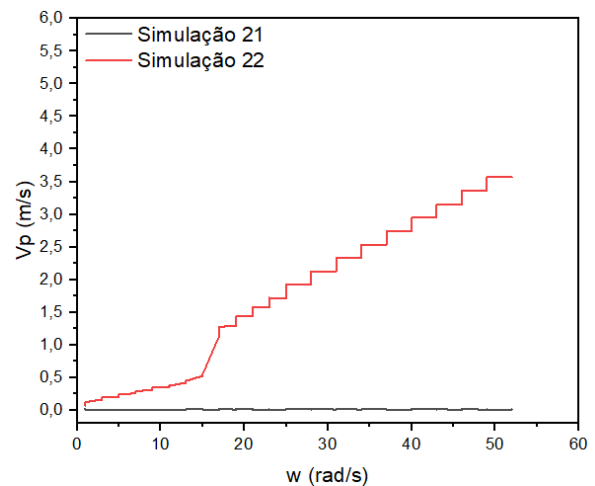


Figura 6: Comportamento da velocidade das partículas ( $V_p$ ) com o decorrer das velocidades de rotação do tambor ( $\omega$ ).

### Análise da variação do fator de atrito de rolamento

Para se analisar a influência do fator de atrito de rolamento do tambor no comportamento das partículas, foram estudadas as simulações 23 e 24 (Tabela 6).

Tabela 6: Regimes de escoamento identificados nas simulações 23 e 24 para as velocidades de rotação estudadas.

w (rad/s)	Simulação 23	Simulação 24
1		
15		
29		

v Magnitude  
1.5e-02    0.1    2.1e-01

A partir da análise da Tabela 6, identificou-se que, ao elevar o valor do coeficiente de atrito de rolamento do tambor rotatório, a velocidade crítica de centrifugação é levemente antecipada. Essa sutil mudança de comportamento das partículas também pode ser evidenciada na Figura 7, na qual o aumento do atrito de rolamento das superfícies internas do equipamento de 0,01 para 0,07 reduz a velocidade crítica de centrifugação de 17,00 para 15,00 rad/s.

A proximidade entre os perfis de velocidade demonstra, quantitativamente, que a variação no atrito de rolamento não acarretou em alterações significativas sobre a dinâmica das partículas no intervalo avaliado para este parâmetro.

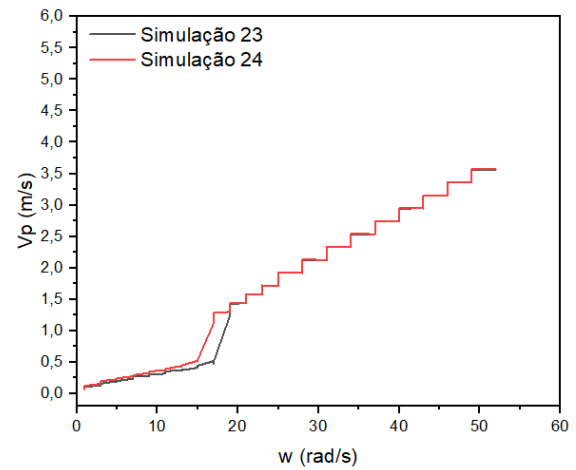


Figura 7: Comportamento da velocidade das partículas ( $V_p$ ) com o decorrer das velocidades de rotação do tambor ( $\omega$ ).

### Análise estatística

Diante da necessidade de uma observação mais cautelosa, foi realizado um planejamento composto central para avaliar os efeitos das variáveis: fator de preenchimento ( $f$ ), diâmetro do tambor ( $D$ ), coeficiente de atrito estático partícula-parede ( $\mu_{spw}$ ) e coeficiente de atrito de rolamento partícula-parede ( $\mu_{rpw}$ ), mantendo-se constantes os parâmetros,  $e_{pp}$ ,  $e_{pw}$ ,  $G$ ,  $d_p$ ,  $\rho_p$  e  $\sigma_p$  em todos os casos avaliados. Na Tabela 7 são apresentados os resultados da velocidade crítica de centrifugação para todos os casos avaliados.

A partir dos resultados do planejamento composto central, foi realizada uma regressão não linear, avaliando os resultados em nível de significância de 5%, com auxílio do software Statistica® 7. A Equação 4, cujo coeficiente de correlação quadrático é de 0,56, mostra que, conforme avaliado isoladamente, o grau de preenchimento e o atrito estático partícula-parede apresentaram influência significativa sobre a resposta. Todavia, o baixo valor de coeficiente de correlação quadrático traz um importante resultado a ser melhor avaliado.

Apesar de apresentar influência a partir da análise qualitativa e quantitativa de forma individual, o efeito da variação de diâmetro do equipamento não conseguiu ser interpretada pelo modelo proposto, indicando que outras variáveis também podem estar influenciando no fenômeno como por exemplo parâmetros de interação entre as partículas.



Tabela 7: Planejamento composto central velocidade crítica de centrifugação.

Simulação	f (%)	D (m)	$\mu_{spw}$ (-)	$\mu_{rpw}$ (-)	$\omega_c$ (rad/s)
1	20,00	0,10	0,30	0,02	46
2	20,00	0,10	0,30	0,06	98
3	20,00	0,10	1,00	0,02	23
4	20,00	0,10	1,00	0,06	21
5	20,00	0,20	0,30	0,02	31
6	20,00	0,20	0,30	0,06	37
7	20,00	0,20	1,00	0,02	15
8	20,00	0,20	1,00	0,06	15
9	40,00	0,10	0,30	0,02	17
10	40,00	0,10	0,30	0,06	15
11	40,00	0,10	1,00	0,02	13
12	40,00	0,10	1,00	0,06	13
13	40,00	0,20	0,30	0,02	11
14	40,00	0,20	0,30	0,06	11
15	40,00	0,20	1,00	0,02	9
16	40,00	0,20	1,00	0,06	11
17	15,17	0,15	0,65	0,04	21
18	44,82	0,15	0,65	0,04	11
19	30,00	0,08	0,65	0,04	21
20	30,00	0,22	0,65	0,04	11
21	30,00	0,15	0,13	0,04	96
22	30,00	0,15	1,17	0,04	17
23	30,00	0,15	0,65	0,01	15
24	30,00	0,15	0,65	0,07	15
25	30,00	0,15	0,65	0,04	15

$$wc = 12,43 - 9,94x_1 - 13,43x_3 + 15,09x_3^2 + 8,25 \cdot x_1 \cdot x_3 \quad (4)$$

$$x_1 = \frac{f - 30}{10} \quad (5)$$

$$x_2 = \frac{D - 0,15}{0,05} \quad (6)$$

$$x_3 = \frac{\mu_{spw} - 0,65}{0,35} \quad (7)$$

$$x_4 = \frac{\mu_{rpw} - 0,04}{0,02} \quad (8)$$

sendo  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  e  $x_4$  e  $x_5$  a codificação das variáveis grau de preenchimento, diâmetro do tambor, coeficiente de atrito estático partícula-parede e coeficiente de atrito de rolamento partícula-parede, respectivamente.

## CONCLUSÃO

Em virtude dos fatos mencionados, é notório que as variações dos parâmetros abordados neste estudo são impactantes na determinação dos regimes de escoamento do material particulado contido no interior dos tambores rotatórios. O aumento dos valores dessas variáveis de projeto acarreta em menores velocidades críticas de centrifugação no meio. Já a redução desses parâmetros torna necessária a implementação de maiores velocidades de rotação do equipamento para que seja atingido o regime de centrifugação. Desse modo, uma projeção eficiente dessas variáveis é fundamental para adequar os tambores rotativos de acordo com a necessidade de implementação desses equipamentos, seja como secadores, misturadores, granuladores, resfriadores etc.

## NOMENCLATURA

$\mu_{sp}$	coeficiente de atrito estático partícula partícula	$M^0L^{-0}T^0$
$\mu_{spw}$	coeficiente de atrito estático partícula parede	$M^0L^{-0}T^0$
$\mu_{rp}$	coeficiente de rolamento partícula partícula	$M^0L^{-0}T^0$
$\mu_{rpw}$	coeficiente de rolamento partícula parede	$M^0L^{-0}T^0$
$\rho_i$	densidade da partícula	$M^1L^{-3}T^0$
$\tau_{ij}$	torque entre a partícula i e j	$M^1L^2T^{-2}$
dp	diâmetro da partícula	$M^0L^1T^0$
D	diâmetro do tambor rotativo	$M^0L^1T^0$
f (%)	fator de preenchimento do tambor rotativo	$M^0L^{-0}T^0$
$F_n^{ij}$	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	$M^0L^1T^{-2}$
G	modulo de cisalhamento	$M^1L^{-1}T^{-2}$
$I_i$	momento de inercia da partícula i	$M^1L^2T^0$
m	massa	$M^1L^{-0}T^0$
mi	massa da partícula i	$M^1L^0T^0$
Ri	raio da partícula i	$M^0L^1T^0$
t	tempo	$M^0L^0T^1$
$v_i$	velocidade da partícula i	$M^0L^1T^{-1}$
$V_p$	velocidade das partículas	$M^0L^1T^{-1}$
$\omega_c$	velocidade crítica de centrifugação	$M^0L^0T^{-1}$

## AGRADECIMENTOS

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

## REFERÊNCIAS

- BHATTACHARYA, T. Controlling mixing and segregation in time periodic granular flows. Tese de Doutorado – Swanson School of Engineering, 2011.
- BRANDÃO, R. J., LIMA, R. M., SANTOS, R. L., DUARTE, C. R., BARROZO, M. A. S. Experimental study and DEM analysis of granular segregation in a rotating drum, *Powder Technology*, Volume 364, 2020. Pages 1-12. ISSN 0032-5910. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.01.036>.
- CFDEM. Dedicated to open source high performance scientific computing in fluid mechanics and particle Science. Disponível em: <https://www.cfdem.com/>. Acesso em 09 de agosto de 2022.
- FERREIRA, L. C., SCATENA, R., DUARTE, C. R. Estudo dos Diferentes Regimes de Escoamento Presentes em um Tambor Rotatório. XIX Jornada em Engenharia Química. Universidade Federal de Uberlândia, 2014.
- HEILBUTH, R. R., SOUZA, G. M., SANTOS, D. A., BRANDÃO, R. J., BARROZO, M. A. S., DUARTE, C. R. Numerical evaluation of the granular mixing behavior in a flighted rotary drum through the Discrete Element Method, *Powder Technology*, Volume 400, 2022. ISSN 0032-5910. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117251>.
- KLOSS, C.; GONIVA, C.; HAGER, A.; AMBERGER, S.; PIRKER, S. (2016), “Models, algorithms and validation for opensource DEM and CFD-DEM”, *Progress in Computational Fluid Dynamics, An International Journal*, Vol 12, n. 2/3, p. 140.
- LIMA, R.M., BRANDÃO, R.J., SANTOS, R.L., DUARTE, C. R., BARROZO, M. A. S. Analysis of methodologies for determination of DEM input parameters. *Braz. J. Chem. Eng.* 38, 287–296 (2021). <https://doi.org/10.1007/s43153-02100107-4>
- 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. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(00\)00402-2](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(00)00402-2)
- PARAVIEW. Disponível em <https://www.paraview.org/>. Acesso em 14 de janeiro de 2022.
- SANTOS, D. A.; BARROZO, M. A. S.; DUARTE, C. R.; WEIGLER, F.;

MELLMANN, J. (2016), “Investigation of particle dynamics in a rotary drum by means of experiments and numerical simulations using DEM”, *Advanced Powder Technology*, Vol 27, n. 2, p. 692–703.

SCATENA, R., FERREIRA, L.C., SANTOS, D.A., DUARTE, C.R., BARROZO, M. A. S. Caracterização dos Diferentes Regimes de Escoamento Presentes em um Tambor Rotatório. XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química – COBEQ, 2014.

YANG, R.Y. YU, A.B. MCELROY, L. BAO, J. Numerical Simulation of Particle Dynamics in Different Flowregimes in a Rotating Drum. *Powder Technology*, v. 188, p. 170-177, 2008.