

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA

ADIEL ALVES DA SILVA

**AVALIAÇÃO DA DINÂMICA GRANULAR NO INTERIOR DE TAMBORES
ROTATÓRIOS COM SUSPENSORES**

MACEIÓ – AL

2026

ADIEL ALVES DA SILVA

**AVALIAÇÃO DA DINÂMICA GRANULAR NO INTERIOR DE TAMBORES
ROTATÓRIOS COM SUSPENSORES**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Química da Universidade Federal de Alagoas, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Rodolfo Junqueira Brandão.

Coorientadora: Profa. Dra. Cleyla Janey Peixoto Calheiros.

MACEIÓ – AL

2026

Catálogo na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecário: Marcelino de Carvalho Freitas Neto – CRB-4 – 1767

- S586a Silva, Adiel Alves da.
 Avaliação da dinâmica granular no interior de tambores rotatórios com
 suspensores / Adiel Alves da Silva. – 2026.
 [147] f. il. : figs. ; tabs. color.
- Orientador: Rodolfo Junqueira Brandão.
 Coorientadora: Cleyla Janey Peixoto Calheiros.
 Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Química).
 Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2026.
- Bibliografia: f. 102-107.
 Apêndices: f. 108-[147].
1. Tambor rotatório - Região ativa. 2. Misturas (Química). 3. Suspensores.
 4. Partículas (Física, química, etc.). I. Título.

CDU: 66.047.69

ADIEL ALVES DA SILVA

**AVALIAÇÃO DA DINÂMICA GRANULAR NO INTERIOR DE TAMBORES
ROTATÓRIOS COM SUSPENSORES**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado
ao colegiado do curso de Engenharia Química
da Universidade Federal de Alagoas, como
requisito parcial para a obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Química.

Data da aprovação: 10/04/2026

Banca examinadora



Documento assinado digitalmente
RODOLFO JUNQUEIRA BRANDAO
Data: 14/04/2026 19:20:00-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Rodolfo Junqueira Brandão
Universidade Federal de Alagoas – UFAL
(Orientador)



Documento assinado digitalmente
CLEYLA JANEY PEIXOTO CALHEIROS
Data: 14/04/2026 19:07:24-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Cleyla Janey Peixoto Calheiros
Instituto Federal de Alagoas – IFAL
(Coorientadora)



Documento assinado digitalmente
JOAO BATISTA MAIA ROCHA NETO
Data: 14/04/2026 18:52:40-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. João Batista Maia Rocha Neto
Universidade Federal de Alagoas – UFAL
(Examinador)



Documento assinado digitalmente
THAIS LOGETTO CAETITE GOMES
Data: 14/04/2026 20:25:04-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Thais Logetto Caetité Gomes
Universidade Federal de Alagoas – UFAL
(Examinadora)

Dedico este à minha mãe, Givaneide Alves;
ao meu pai, Amaro José (*in memoriam*); à
minha avó, Josefa Henrique (*in memoriam*);
à minha tia e segunda mãe, Cleonice Maria;
e à minha irmã, Alana Alves. Tudo que
conquisto nesta vida carrega um pouco de
mim e muito de vocês.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela calma nos dias difíceis e pela força silenciosa que me sustentou quando parecia não haver mais energia. Sem Ele, nenhum passo deste caminho teria feito sentido. À Nossa Senhora, pela proteção constante, pelo acalento nas incertezas e pela paz que só quem sente sabe. Foi sob o Seu manto que encontrei coragem para continuar quando o caminho apertou.

À minha Mãe, que sempre se desdobrou para que nada me faltasse, oferecendo não apenas cuidado, mas também inspiração e incentivo. Foi você quem me ensinou que o amor também é sustento nos dias difíceis e coragem nos dias incertos. Você me deu asas para alcançar horizontes que um dia pareciam inalcançáveis, mas também me ensinou onde é o meu lugar de retorno. Se hoje chego até aqui, é porque carrego em mim tudo aquilo que você construiu, mesmo quando eu não percebia. Sem você, nada disso faria sentido (nem o caminho, nem a conquista e nem quem eu me tornei). Obrigado por acreditar tanto em mim.

À minha irmã, sua companhia, seu apoio e até mesmo nossos pequenos gestos do dia a dia foram fundamentais ao longo dessa caminhada. Com você, aprendi que não é preciso dizer muito para demonstrar cuidado, ele se revela nos detalhes, na presença e na forma como nunca soltamos a mão um do outro. Sou eternamente grato por ter você como minha irmã.

À minha família, que, mesmo diante da minha ausência, das distâncias e dos silêncios que o caminho impôs, nunca deixou de ser fundamento e refúgio. Agradeço às minhas tias: à tia Cleonice, por me proporcionar amor desde a partida do meu pai (você é incrível); à tia Luzia (e a Laurinha), pelos momentos, pelas brincadeiras e por tornar tudo mais leve. À minha avó (*in memoriam*), que dizia, com carinho, que eu era o “orgulho da vovó”. Levo comigo cada uma de suas palavras, que seguem sendo força, saudade e inspiração ao longo do meu caminho.

Aos amigos que a vida colocou perto de mim de forma inesperada, especialmente aqueles que estiveram presentes nos momentos de cansaço, silêncio e recomeço: Amanda Monteiro, Andressa Veríssimo, Eduarda Gomes, Elisson Nunes, Lucas Gabriel, Liliane Myrtes, Júlia Vitória, Kenia Maria, Matheus Henrique e Robert Nascimento. Vocês foram apoio, sanidade e riso quando eu mais precisei.

Às incríveis amigas que encontrei no curso e que caminharam comigo ao longo desta trajetória: Victória Hellen (e Bernardo Ferro), Sântia Freire, Eduarda Reis, Ian Gusmão,

Genilson Cavalcante e Max Levy. Entre rotinas, pressões e incertezas, a presença de vocês tornou o caminho mais leve (e mais possível). Muito obrigado por tudo.

À Evellyn Mayara e Eduarda Santos, por estarem sempre por perto, em tudo (nos dias comuns, nos difíceis e nos que ninguém vê). Com vocês, nunca foi só companhia. Foi constância, foi presença, foi ter com quem contar sem precisar explicar. Em meio a tudo o que esse caminho exigiu, vocês estiveram, e isso fez diferença de um jeito que não se mede, mas se sente. Deus foi bom comigo ao fazer o nosso encontro acontecer.

Às demais amigadas que não citei, mas que, sem dúvida, foram importantes e especiais ao longo deste ciclo da minha vida.

Às pessoas que compõem o LASSOP–FlowLab, pelas risadas, pelas comemorações, pelas conversas e pelo apoio.

Ao PET C&T, por ter sido casa ao longo desses anos. Aqui, pude aprender, crescer e conhecer pessoas incríveis, experiências que levarei para a vida. O C&T foi fundamental para a minha formação.

Ao PAESPE, por ter me proporcionado uma educação de qualidade enquanto fui aluno, em 2018/2019, o ingresso na universidade e o acolhimento ao longo desses anos na graduação. Neste espaço, aprendi para além da sala de aula e também tive a oportunidade de ensinar — de devolver aquilo que um dia recebi, em uma experiência que me marcou. Agradeço às amigadas que construí: Izaías Silva e Viviane Tavares, e à orientação e ao cuidado recebidos do Prof. Dr. Roberaldo Souza e da Profa. Ma. Geiza Correia. O PAESPE transformou a minha vida.

À Carine Victória, por ser uma das minhas melhores amigadas e por ter atravessado comigo momentos que marcaram a minha vida. Obrigado por estar por perto desde a infância. Foi você quem me apresentou o PAESPE e, a partir dali, muita coisa mudou. Muito do que conquisto (e ainda conquistarei) carrega um pouco de você.

Aos professores do curso de Engenharia Química, pela formação construída ao longo desses anos. Em especial, aos membros da banca, Profa. Dra. Thais Logetto e Prof. Dr. João Batista, pelas contribuições a este trabalho.

À Cleyla, minha coorientadora e amiga, que me proporcionou aprendizados importantes para a vida, agradeço pela presença, pelo apoio e pela forma como estive ao longo desta

trajetória. Palavras nunca serão suficientes para te agradecer. Muito obrigado, você é extraordinária!

Ao meu orientador, Professor Dr. Rodolfo Brandão, agradeço pela orientação, confiança e pelas cobranças. Ser seu aluno foi incrível, mas melhor ainda é poder ser seu amigo. Levo comigo muito mais do que este trabalho. Obrigado, você é incrível.

A todos que acreditaram em mim. Este TCC é mais do que uma conclusão; ele é a soma de todas as mãos, vozes e afetos que me sustentaram até aqui. Cada página existe porque *vocês* existiram no meu caminho.

"I Was Feeling Epic."

(The Vampire Diaries)

RESUMO

Tambores rotatórios são amplamente utilizados na indústria devido à sua simplicidade geométrica e versatilidade operacional, sendo aplicados em processos como mistura, secagem e granulação. No entanto, esses equipamentos apresentam limitações associadas à segregação de partículas, influenciada por propriedades como tamanho, densidade e forma. Nesse contexto, o uso de suspensores internos surge como alternativa para intensificar a interação entre partículas e promover maior homogeneização, principalmente na região ativa do tambor. Apesar disso, os efeitos da geometria dos suspensores sobre a dinâmica granular ainda não são totalmente compreendidos. Assim, este trabalho teve como objetivo avaliar experimentalmente e numericamente a influência dos ângulos (α_1 e α_2) e dos comprimentos (l_1 e l_2) dos suspensores no carregamento e na distribuição das partículas. Foi utilizado um Planejamento Composto Central (PCC), tendo como variáveis resposta o ângulo de última descarga (LUF), a massa retida nos suspensores (SH), a massa na fase ativa (MAP) e o coeficiente de variação da distribuição de partículas (DSH), obtido por análise de imagens. O índice de mistura (IM) foi avaliado a partir de simulações via Método dos Elementos Discretos (DEM). Os resultados mostraram que a geometria dos suspensores influencia diretamente o comportamento do sistema. O aumento de α_1 reduziu SH, enquanto α_2 apresentou tendência oposta. Os comprimentos dos segmentos afetaram a formação do véu granular e a homogeneidade da distribuição, refletida em MAP e DSH. O LUF apresentou menor sensibilidade às variações geométricas, ocorrendo em uma faixa angular característica. As propriedades físicas das partículas também influenciaram os resultados, afetando tanto o carregamento quanto a dispersão. A comparação entre os resultados experimentais e numéricos demonstrou boa concordância, evidenciando a capacidade do modelo DEM em representar o comportamento do sistema, funcionando como um *digital twin*. Além disso, a análise do índice de mistura mostrou que a presença de suspensores intensifica a homogeneização, promovendo maior interação entre as partículas e reduzindo efeitos de segregação. Dessa forma, o estudo contribui para o entendimento da dinâmica granular em tambores rotatórios com suspensores e para a otimização desses equipamentos em aplicações industriais.

Palavras-chave: tambor rotatório; mistura; região ativa; suspensores; partículas.

ABSTRACT

Rotary drums are widely used in industry due to their geometric simplicity and operational versatility, being applied in processes such as mixing, drying, and granulation. However, these systems present limitations associated with particle segregation, influenced by properties such as size, density, and shape. In this context, the use of internal flights emerges as an alternative to intensify particle interaction and promote greater homogenization, especially in the active region of the drum. Despite this, the effects of flight geometry on granular dynamics are not yet fully understood. Thus, this study aimed to experimentally and numerically evaluate the influence of the angles (α_1 and α_2) and segment lengths (l_1 and l_2) of the flights on particle loading and distribution. A Central Composite Design (CCD) was employed, considering as response variables the last unloading angle (LUF), solids holdup in the flights (SH), mass in the active phase (MAP), and the coefficient of variation of particle distribution (DSH), obtained through image analysis. The mixing index (IM) was evaluated based on simulations using the Discrete Element Method (DEM). The results showed that flight geometry directly influences system behavior. Increasing α_1 reduced SH, while α_2 showed an opposite trend. Segment lengths affected the formation of the particle curtain and the homogeneity of particle distribution, reflected in MAP and DSH. LUF showed lower sensitivity to geometric variations, occurring within a characteristic angular range. Particle physical properties also influenced the results, affecting both loading and dispersion. The comparison between experimental and numerical results showed good agreement, demonstrating the ability of the DEM model to represent the system behavior, acting as a digital twin. In addition, the mixing index analysis showed that the presence of flights enhances homogenization, promoting greater particle interaction and reducing segregation effects. Thus, this study contributes to the understanding of granular dynamics in rotary drums with flights and provides support for the optimization of these systems in industrial applications.

Keywords: rotary drum; mixing; active region; flights; particles.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tambor rotatório com suspensores (<i>flights</i>).....	22
Figura 2 - Representação das regiões ativa e passiva do leito granular em tambor rotatório com suspensores.	23
Figura 3 - Fluxograma representativo do DEM.	27
Figura 4 - Imagem de um clump simulando uma partícula de arroz.....	29
Figura 5 - MEV de uma partícula de arroz e sua representação pelo método multi-esferas (<i>clump</i>).....	30
Figura 6 - Perfis comuns de suspensores.....	34
Figura 7 - Suspensor de dois segmentos.....	35
Figura 8 - Regiões existentes no tambor rotatório com suspensores.....	36
Figura 9 - Massa de sólidos no suspensor em função da posição angular com três preenchimentos diferentes.	37
Figura 10 - Classificação das cargas nos suspensores: (a) subcarregado, (b) carregamento ideal e (c) sobrecarregado.....	38
Figura 11 - Posição do ângulo de repouso dinâmico.....	40
Figura 12 - Mensuração da posição angular do suspensor de última descarga.	41
Figura 13 - Esquema de suspensores de dois segmentos.	43
Figura 14 - Representação esquemática da técnica de análise de imagem utilizada para quantificar as variáveis DSH e MAP. (a) imagem da simulação; (b) delimitação da região ativa; (c) tratamento de cor da região ativa pelo software; (d) divisão da imagem em célula.	44
Figura 15 - Exemplo de segregação radial.	45
Figura 16 - Fluxograma da metodologia referente às etapas do andamento do trabalho.	46
Figura 17 - Unidade experimental do tambor rotatório com suspensores.....	47
Figura 18 – Etapas de desenvolvimento dos suspensores.	49
Figura 19 - Materiais granulares: (a) Feijão; (b) Arroz; (c) Milho; (d) Aço; (e) BBS; (f) Vidro 5 mm; (g) Vidro 2 mm.....	51
Figura 20 - Imagem original e imagem tratada pelo software ImageJ para cada tipo de material: (a) Esferas de vidro 2 mm; (b) Esferas de vidro 5 mm; (c) Esfera de BBS 6 mm; (d) Esfera de aço 6 mm; (e) Milho; (f) Arroz; (g) Feijão.	53
Figura 21 - Imagem do clump simulando uma partícula de arroz.....	55
Figura 22 - Geometria dos tambores (a) com suspensores e (b) sem suspensores.....	55

Figura 23 - Determinação do ângulo correspondente ao LUF por meio de medição angular em frame experimental.	59
Figura 24 - Representação do aparato experimental utilizado na calibração massa $\times$ área. (a) Face transparente do suspensor, utilizada para aquisição das imagens das partículas. (b) Face opaca revestida com papel cartão, utilizada para coleta da massa após o ensaio.	59
Figura 25 - Sequência de processamento de imagem no ImageJ®: (a) imagem original com calibração espacial; (b) imagem binarizada por limiarização; (c) definição da região de interesse (ROI) para cálculo da área das partículas.	60
Figura 26 – Sequência de processamento para cálculo do DSH, incluindo imagem original (a), delimitação da região ativa (b) e resultado da análise espacial da dispersão (c).	62
Figura 27 - Determinação do ângulo correspondente ao LUF por meio de medição angular no software ParaView.	63
Figura 28 - Delimitação das regiões de interesse e contagem de partículas para determinação do SH e MAP no modelo numérico.	63
Figura 29 – Gráficos do Tempo $\times$ Índice de mistura (Aço 6 mm + BBS 6 mm) – (a) tambor com suspensor e (b) tambor sem suspensor.	96
Figura 30 – Gráficos do Tempo $\times$ Índice de mistura (Vidro 2 mm + Vidro 5 mm) – (a) tambor com suspensor e (b) tambor sem suspensor.	97
Figura 31 – Gráficos do Tempo $\times$ Índice de mistura (Vidro 2 mm + Aço 6 mm) – (a) tambor com suspensor e (b) tambor sem suspensor.	98
Figura 32 – Gráfico do Tempo $\times$ Índice de mistura (Vidro 2 mm + BBS 6 mm) – (a) tambor com suspensor e (b) tambor sem suspensor.	99
Figura 33 - Curva de calibração massa $\times$ área para o Vidro 2 mm.	135
Figura 34 - Curva de calibração massa $\times$ área para o Vidro 5 mm.	136
Figura 35 - Curva de calibração massa $\times$ área para o BBS.	137
Figura 36 - Curva de calibração massa $\times$ área para o Aço.	138
Figura 37 - Curva de calibração massa $\times$ área para o Milho.	139
Figura 38 - Curva de calibração massa $\times$ área para o Arroz.	140
Figura 39 - Curva de calibração massa $\times$ área para o Feijão.	141

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - PCC representativo das variáveis de estudo da dinâmica do leito granular.....	50
Tabela 2 - PCC representativo dos pontos ortogonais.	50
Tabela 3 - Valores dos parâmetros de entrada DEM dos coeficientes de interação após calibração para cada amostra granular.	57
Tabela 4 - Propriedades físicas dos materiais granulares.	65
Tabela 5 - Massa e Número de Partículas correspondente ao preenchimento de 15%.....	66
Tabela 6 - Variação do número de flights (N) em relação ao ponto central.....	68
Tabela 7 - Erro absoluto (°) entre resultados do LUF experimentais e numéricos para as configurações avaliadas (variando N).	69
Tabela 8 – Massa de sólidos no suspensor (SH) e erro absoluto.	70
Tabela 9 – Massa de sólidos na região ativa (MAP) numérica.....	71
Tabela 10 – Coeficiente de Variação (CoV) em % e Erro absoluto.....	72
Tabela 11 - Variação do α_1 em relação ao ponto central.	74
Tabela 12 - Erro absoluto (°) entre resultados do LUF experimentais e numéricos para as configurações avaliadas (variando (α_1)).	75
Tabela 13 – Massa de sólidos no suspensor (SH) e erro absoluto.	75
Tabela 14 – Massa de sólidos na região ativa (MAP) numérica.....	76
Tabela 15 – Coeficiente de Variação (CoV) em % e erro absoluto.	77
Tabela 16 - Variação do α_2 em relação ao ponto central.....	78
Tabela 17 - Erro absoluto (°) entre resultados do LUF experimentais e numéricos para as configurações avaliadas (variando α_2).....	79
Tabela 18 – Massa de sólidos no suspensor (SH) e erro absoluto.	79
Tabela 19 – Massa de sólidos na região ativa (MAP) numérica.....	80
Tabela 20 – Coeficiente de Variação (CoV) em % e Erro absoluto.....	81
Tabela 21 - Variação do l_1 em relação ao ponto central.....	82
Tabela 22 - Erro absoluto (°) entre resultados do LUF experimentais e numéricos para as configurações avaliadas (variando l_1).....	83
Tabela 23 – Massa de sólidos no suspensor (SH) e erro absoluto.	84
Tabela 24 – Massa de sólidos na região ativa (MAP) numérica.....	85
Tabela 25 – Coeficiente de Variação (CoV) em % e Erro absoluto.....	86
Tabela 26 - Variação do l_2 em relação ao ponto central.....	87

Tabela 27 - Erro absoluto ($^{\circ}$) entre resultados do LUF experimentais e numéricos para as configurações avaliadas (variando l_2).....	88
Tabela 28 – Massa de sólidos no suspensor (SH) e erro absoluto.	88
Tabela 29 – Massa de sólidos na região ativa (MAP) numérica.....	89
Tabela 30 – Coeficiente de Variação (CoV) em % e Erro absoluto.....	90
Tabela 31 - Visualização experimental das composições de partículas.....	93
Tabela 32 - Posições inicial e final das partículas nas simulações do tambor com suspensor para diferentes composições (tamanho, densidade, associado e concorrente).	94
Tabela 33 - Posições inicial e final das partículas nas simulações do tambor sem suspensor para diferentes composições (tamanho, densidade, associado e concorrente).	95
Tabela 34 - Dados experimentais do Vidro 2 mm para calibração massa $\times$ área.....	135
Tabela 35 - Dados experimentais do Vidro 5 mm para calibração massa $\times$ área.....	136
Tabela 36 - Dados experimentais do BBS para calibração massa $\times$ área.	137
Tabela 37 - Dados experimentais do Aço para calibração massa $\times$ área.	138
Tabela 38 - Dados experimentais do Milho para calibração massa $\times$ área.	139
Tabela 39 - Dados experimentais do Arroz para calibração massa $\times$ área.....	140
Tabela 40 - Dados experimentais do Feijão para calibração massa $\times$ área.....	141

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM - *American Society for Testing and Materials*

BBS – Poliacetal (material polimérico)

CTEC – Centro de Tecnologia

DEM – *Discrete Element Method*

DSH – *Dispersion of Solids Heterogeneity*

FLOWLAB – Laboratório de Fluidodinâmica Computacional

FUF – *First Unloading Flight*

IM – Índice de Mistura

LASSOP – Laboratório de Sistemas de Separação e Otimização de Processos

LUF – *Last Unloading Flight*

MAP – *Mass in the Active Phase*

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

PCC – Planejamento Composto Central

RPM – Rotações por minuto

SH – *Solids Holdup*

UFAL – Universidade Federal de Alagoas

LISTA DE SÍMBOLOS

α_1	Ângulo entre o primeiro segmento do suspensor e a superfície interna do tambor	$M^0 L^0 T^0$
α_2	Ângulo entre os segmentos l_1 e l_2 do suspensor	$M^0 L^0 T^0$
d	Diâmetro da partícula	$M^0 L^1 T^0$
e_p	Coefficiente de restituição	$M^0 L^0 T^0$
F	Grau de preenchimento do tambor	$M^0 L^0 T^0$
$f_{projeto}$	Grau de enchimento de projeto	$M^0 L^0 T^0$
Fr	Número de Froude	$M^0 L^0 T^0$
g	Aceleração da gravidade	$M^0 L^1 T^{-2}$
G	Módulo de cisalhamento	$M^1 L^{-1} T^{-2}$
$HFUF$	<i>Holdup</i> de sólidos no suspensor de primeira descarga	$M^0 L^2 T^0$
H_i	<i>Holdup</i> de sólidos no suspensor (i)	$M^0 L^2 T^0$
$HTot$	<i>Holdup</i> total de sólidos no tambor	$M^0 L^2 T^0$
$HTot, Flights$	<i>Holdup</i> total de sólidos retidos nos suspensores	$M^0 L^2 T^0$
l_1	Comprimento do primeiro segmento do suspensor	$M^0 L^1 T^0$
l_2	Comprimento do segundo segmento do suspensor	$M^0 L^1 T^0$
l_2/l_1	Razão entre os comprimentos dos segmentos do suspensor	$M^0 L^0 T^0$
L	Comprimento do tambor	$M^0 L^1 T^0$
μ_r	Coefficiente de atrito de rolamento	$M^0 L^0 T^0$
μ_{rpp}	Coefficiente de atrito de rolamento partícula-partícula	$M^0 L^0 T^0$

μ_{rpw}	Coeficiente de atrito de rolamento partícula-parede	$M^0L^0T^0$
μ_s	Coeficiente de atrito estático	$M^0L^0T^0$
μ_{spp}	Coeficiente de atrito estático partícula-partícula	$M^0L^0T^0$
μ_{spw}	Coeficiente de atrito estático partícula-parede	$M^0L^0T^0$
N	Número de suspensores	$M^0L^0T^0$
n_F	Número de suspensores do tambor nos modelos de carregamento	$M^0L^0T^0$
N_p	Número de partículas	$M^0L^0T^0$
R	Raio interno do tambor	$M^0L^1T^0$
r_h ou r_H	Raio da trajetória/circunferência descrita pela partícula em queda	$M^0L^1T^0$
S	Razão entre sólido da região ativa e sólido da região passiva	$M^0L^0T^0$
t	Tempo	$M^0L^0T^1$
Δt	Passo de tempo	$M^0L^0T^1$
$V_{Tot,sólidos}$	Volume total de sólidos	$M^0L^3T^0$
V_{tambor}	Volume do tambor	$M^0L^3T^0$
x	Coordenada espacial	$M^0L^1T^0$
y	Coordenada espacial	$M^0L^1T^0$
z	Coordenada espacial	$M^0L^1T^0$
a, b e c	Coeficientes geométricos da equação <i>superquadric</i>	$M^0L^1T^0$
n_1	Expoente da equação superquadric	$M^0L^0T^0$
n_2	Expoente da equação superquadric	$M^0L^0T^0$

θ	Ângulo entre a ponta do suspensor e o centro do tambor / posição angular do suspensor	$M^0L^0T^0$
ω	Velocidade angular do tambor	$M^0L^0T^{-1}$
ρ	Densidade da partícula	$M^1L^{-3}T^0$
ν	Razão de Poisson	$M^0L^0T^0$
ϕ	Ângulo de repouso dinâmico	$M^0L^0T^0$
γ	Coefficiente de atrito dinâmico do material	$M^0L^0T^0$
CC	Circularidade	$M^0L^0T^0$
ROI	Região de interesse na análise de imagens	$M^0L^0T^0$
CoV	Coefficiente de variação	$M^0L^0T^0$
LUF	Ângulo de última descarga	$M^0L^0T^0$
FUF	Ângulo/posição de primeira descarga	$M^0L^0T^0$
SH	Massa de sólidos no suspensor	$M^1L^0T^0$
MAP	Massa de sólidos na fase ativa	$M^1L^0T^0$
DSH	<i>Dispersion of Solids Heterogeneity</i>	$M^0L^0T^0$
IM	Índice de mistura	$M^0L^0T^0$

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	22
2	OBJETIVOS	25
2.1	Objetivo Geral.....	25
2.2	Objetivos Específicos.....	25
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
3.1	Materiais Granulares - Parâmetros DEM.....	26
3.1.1	Propriedades Físicas dos Materiais Granulares	27
3.1.2	Propriedades de Interação Partícula-Partícula e Partícula-Parede.....	31
3.2	Dinâmica Granular em Tambores Rotatórios.....	32
3.2.1	Tambores Rotatórios com Suspensores	33
3.2.1.1	<i>Tipos de Suspensores</i>	<i>34</i>
3.2.1.2	<i>Holdup de sólidos (SH - Solids Holdup)</i>	<i>35</i>
3.2.1.3	<i>Carregamento dos Suspensores.....</i>	<i>37</i>
3.2.1.4	<i>Ângulo de Última Descarga – LUF (Last Unloading Flight)</i>	<i>41</i>
3.2.1.5	<i>Dispersão de sólidos – DSH (Dispersion of Solids Heterogeneity) e MAP</i>	<i>42</i>
3.3	Fenômeno de Mistura em Tambores Rotatórios.....	44
4	METODOLOGIA.....	46
4.1	Unidade Experimental	47
4.2	Geometria dos suspensores e Planejamento Composto Central	48
4.3	Caracterização Granular	51
4.4	Simulações numéricas (DEM)	53
4.4.1	Modelagem geométrica	55
4.4.2	Condições de simulação	56
4.4.3	Modelo de contato e parâmetros de interação	57
4.4.4	Pós-processamento e análise dos dados.....	57

4.5	Determinação das variáveis-resposta (LUF, SH, MAP e DSH) e IM	58
4.5.1.	Procedimento experimental	58
4.5.2.	Procedimento numérico	62
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	65
5.1	Caracterização granular	65
5.2	Massa correspondente ao grau de preenchimento e número de partículas	65
5.3	Análise das configurações dos suspensores e seus impactos na dinâmica granular na região ativa	67
5.3.1	Avaliação da influência de N (nº de <i>flights</i>)	67
5.3.2	Avaliação da influência de α_1 (ângulo entre o suspensor e a superfície interna do tambor)	73
5.3.3	Avaliação da influência de α_2 (ângulo entre os segmentos l_1 e l_2)	77
5.3.4	Avaliação da influência de l_1 (comprimento do segmento conectado à superfície interna do tambor)	81
5.3.5	Avaliação da influência de l_2 (comprimento do segmento conectado ao segmento l_1)	86
5.3.6	Avaliação da influência das propriedades físicas das partículas nas variáveis-resposta	90
5.4	Fenômeno de Mistura	92
5.4.1	Fenômeno de Mistura - Numérica	93
5.4.1.1	Análise da Densidade (Aço 6 mm + BBS 6 mm)	95
5.4.1.2	Análise do Tamanho (Vidro 2 mm + Vidro 5 mm)	96
5.4.1.3	Efeito Concorrente (Vidro 2 mm + Aço 6 mm)	97
5.4.1.4	Efeito Associado (Vidro 2 mm + BBS 6 mm)	98
6	CONCLUSÃO	100
	REFERÊNCIAS	102
	APÊNDICE A – PLANEJAMENTO COMPOSTO CENTRAL (N, α_1, α_2, l_1 e l_2)	108
	APÊNDICE B – CÓDIGO EM <i>PYTHON</i> PARA CÁLCULO DO DSH	109

APÊNDICE C – <i>SCRIPTS</i> UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES DEM.....	112
APÊNDICE D – FIGURAS EXPERIMENTAIS E NUMÉRICAS DA <i>DISPERSION</i> <i>HETEROGENEITY SOLIDS</i> (DSH)	122
APÊNDICE E – CURVAS DE CALIBRAÇÃO MASSA × ÁREA	135
APÊNDICE F – TRABALHOS DERIVADOS DESTA PESQUISA.....	142

1 INTRODUÇÃO

Os tambores rotatórios são amplamente empregados na indústria para diferentes operações, como, misturas, secagem, granulação, revestimento, moagem, reações e resfriamento. Essa ampla aplicação está associada à sua geometria simples e à versatilidade de operação, que permite sua utilização em diferentes escalas e setores industriais, o que os consolida como equipamentos versáteis para processos que envolvem materiais particulados (Elmisaoui *et al.*, 2021; Nascimento, 2018).

Embora amplamente utilizados devido a sua versatilidade e às vantagens operacionais, os tambores rotatórios ainda apresentam desafios associados ao comportamento dos materiais particulados. Partículas com diferentes propriedades físicas, quando processadas em conjunto, tendem a segregar devido a variações em parâmetros como forma, tamanho e densidade (Heilbuth, 2019). Esse fenômeno pode comprometer o desempenho de processos como mistura e granulação, exigindo estratégias para mitigar seus efeitos. Entre as abordagens mais utilizadas destaca-se o uso de suspensores, também conhecidos como *flights*, que são instalados no interior do tambor (Figura 1). Esses elementos são responsáveis por promover o levantamento e a redistribuição das partículas ao longo do equipamento.

Figura 1 - Tambor rotatório com suspensores (*flights*).



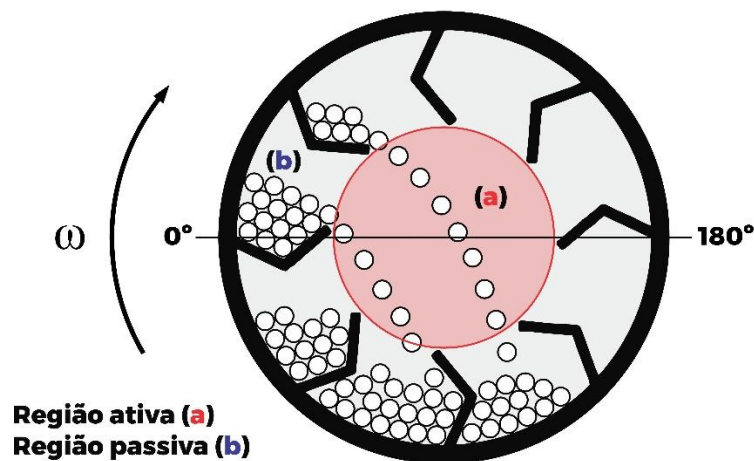
Fonte: Autor, 2026.

A compreensão do papel desses elementos internos está diretamente relacionada à própria configuração geométrica do equipamento. De modo geral, os tambores rotatórios consistem em um cilindro horizontal que gira em torno de seu eixo; entretanto, em sistemas que

operam de forma contínua, o tambor normalmente apresenta uma inclinação. Em tambores contínuos, o material é alimentado por uma extremidade e coletado pela outra, percorrendo o tambor sob a ação da gravidade e da rotação. Nesse contexto, a configuração interna, incluindo o número, o tamanho e o posicionamento dos suspensores, desempenha um papel crucial no comportamento do material granular, afetando diretamente a eficiência do processo (Barrozo *et al.*, 2024).

Esse comportamento está intimamente relacionado à dinâmica das partículas no interior do tambor, a qual pode ser descrita por duas fases principais: a ativa e a passiva (Figura 2). De acordo com Silveira (2022), a fase ativa refere-se à região onde as partículas são lançadas dos suspensores na região central do tambor, enquanto a fase passiva corresponde às partículas acumuladas na parte inferior do tambor e nos suspensores. O comportamento das partículas na fase ativa é diretamente influenciado por variáveis como o número de suspensores, os ângulos de inclinação entre os segmentos dos suspensores e o casco do tambor, o tamanho dos segmentos, bem como pela quantidade de material retido nos suspensores. Estudos como os de Zhou *et al.* (2016) demonstram que o uso de suspensores altera os campos de velocidade das partículas no tambor rotatório, interferindo na convecção e difusão na camada ativa.

Figura 2 - Representação das regiões ativa e passiva do leito granular em tambor rotatório com suspensores.



Fonte: Autor, 2026.

Apesar da relevância desses aspectos para o desempenho do equipamento, ainda existem lacunas na literatura quanto à influência das características geométricas dos suspensores no comportamento das partículas. Nesse contexto, alguns estudos têm buscado compreender como diferentes parâmetros operacionais e geométricos afetam os fenômenos que ocorrem no interior do tambor. Geng *et al.* (2013) realizaram um estudo investigativo sobre a mistura de partículas

nesse tipo de equipamento, utilizando simulações para avaliar os efeitos de diferentes parâmetros operacionais. Os resultados indicaram que o aumento no comprimento dos suspensores e na velocidade de rotação promove uma aceleração significativa no processo de mistura. No entanto, os autores ressaltam que tais conclusões ainda necessitam de validação experimental para garantir maior confiabilidade e aplicabilidade prática.

Assim, compreender o comportamento dos fluxos granulares e da dinâmica de partículas é fundamental para o desenvolvimento e aprimoramento do uso de tambores rotatórios. Deste modo, este trabalho tem como objetivo investigar, de forma experimental e numérica, a influência das características geométricas dos suspensores e seu posicionamento na casca cilíndrica do tambor. A análise sistemática desses parâmetros permitirá identificar configurações geométricas dos suspensores que favoreçam o fenômeno de mistura, a partir da observação de seus efeitos na dinâmica das partículas.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

- Estudar experimentalmente e numericamente a influência da geometria dos suspensores e seu posicionamento na casca cilíndrica em um tambor rotatório.

2.2 Objetivos Específicos

- Investigar as configurações geométricas dos suspensores de dois segmentos, através de um Planejamento Composto Central (PCC);
- Analisar o efeito do número de suspensores sobre a dinâmica granular;
- Analisar o efeito do ângulo nos segmentos dos suspensores sobre a dinâmica granular;
- Analisar o efeito do comprimento dos segmentos dos suspensores sobre a dinâmica granular;
- Investigar a relação entre geometria dos suspensores e as propriedades físicas tamanho, densidade e forma das partículas na dinâmica granular;
- Avaliar o fenômeno de mistura de partículas bidispersas no interior de tambores rotatórios, considerando a configuração correspondente ao ponto central do PCC.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Materiais Granulares - Parâmetros DEM

Os materiais granulares são constituídos por partículas sólidas que podem variar em tamanho, forma e densidade. Devido à sua natureza discreta e às suas propriedades físicas, o comportamento desses materiais difere significativamente daquele observado em sistemas contínuos, como líquidos ou sólidos compactos (Yang *et al.*, 2008; Rhodes, Seville, 2024).

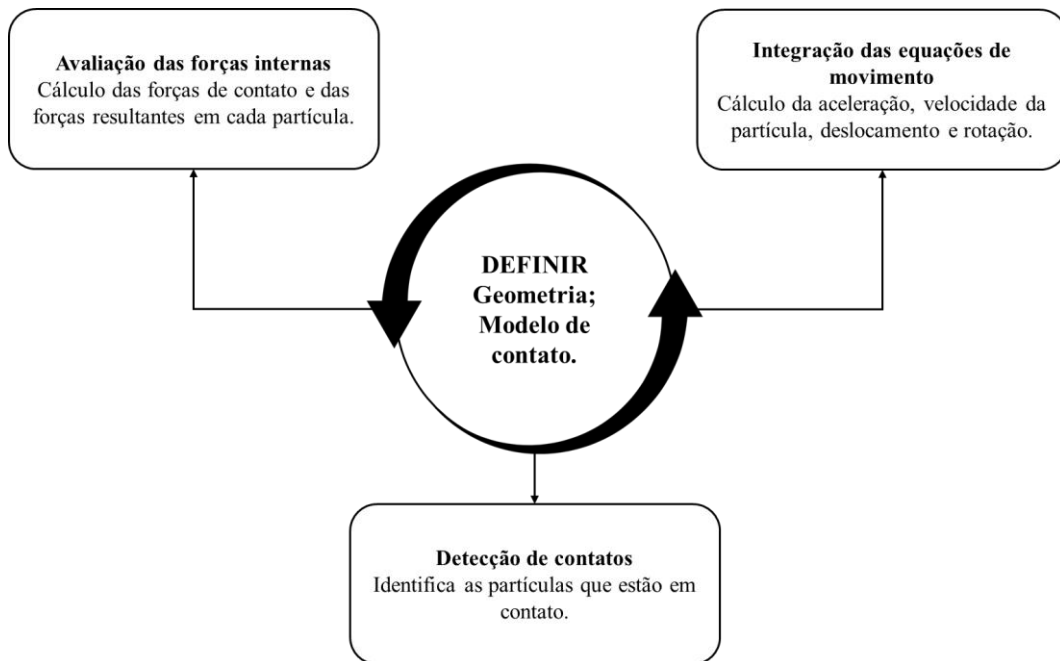
A dinâmica de materiais granulares, também denominada fluxo granular, envolve as interações entre partículas individuais em sistemas confinados, como tambores rotatórios. Essas interações são descritas, principalmente, por forças normais e de atrito, que governam o movimento das partículas no sistema (Mellmann, 2001; Scatena *et al.*, 2014). À medida que o número de partículas aumenta, a complexidade da modelagem também se eleva, demandando o uso de ferramentas computacionais, como o DEM, para a descrição mais precisa do comportamento do sistema (Cundall; Strack, 1979; Zhu *et al.*, 2008).

Em muitos casos, a aplicação de tambores rotatórios na indústria ainda se baseia em abordagens empíricas, especialmente no que se refere ao dimensionamento e à definição de variáveis operacionais. Nesse contexto, destaca-se a importância do desenvolvimento de modelos matemáticos capazes de prever, de forma mais confiável, as condições de operação ideal.

A abordagem numérica Lagrangeana, implementada por meio do DEM, constitui uma ferramenta relevante nesse tipo de análise, na qual partículas individuais ou grupos representativos são rastreados com base no equilíbrio de forças atuantes em suas posições (Chen *et al.*, 2016; Santos *et al.*, 2016). Essa abordagem possibilita uma compreensão mais detalhada do comportamento dinâmico das partículas no interior do tambor rotatório, contribuindo para a análise de fenômenos como a mistura (Brandão *et al.*, 2020).

O desenvolvimento do DEM foi originalmente proposto por Cundall e Strack (1979), baseando-se no princípio de que, em um intervalo de tempo finito, as perturbações não se propagam além das partículas vizinhas imediatas. Dessa forma, as forças atuantes em cada partícula são determinadas exclusivamente pelas interações com partículas em contato. O procedimento de análise envolve, de maneira geral, três etapas computacionais principais: avaliação das forças internas, integração das equações de movimento e detecção de contatos (Tavarez; Plesha, 2007), conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3 - Fluxograma representativo do DEM.



Fonte: Autor, 2026 - Adaptado de Nascimento (2018).

As forças de contato são determinadas a partir das interações internas entre partículas, sendo o processo tratado como dinâmico. Nesse contexto, aplica-se a Segunda Lei de Newton a cada partícula para determinar sua aceleração e, por meio de integrações sucessivas no tempo, sua posição e trajetória. Adicionalmente, consideram-se as forças de campo e a aplicação das leis de deslocamento (*displacement laws*) nos contatos partícula-partícula e partícula-parede, a fim de quantificar as forças de contato. A cada ciclo completo dessas etapas, obtém-se um incremento temporal, denominado *time-step* (Cundall; Strack, 1979; Nascimento, 2018; Tavares; Plesha, 2007).

Para que a modelagem por meio do DEM seja eficaz, é essencial a escolha adequada do modelo de contato e a correta definição dos parâmetros de entrada. Esses parâmetros, que representam as propriedades físicas e de interação das partículas, exercem papel fundamental na qualidade das simulações e serão discutidos nas seções seguintes.

3.1.1 Propriedades Físicas dos Materiais Granulares

As propriedades físicas dos materiais granulares têm influência direta no comportamento dinâmico e são fundamentais para a modelagem do processo em sistemas como

tambores rotatórios (Calheiros, 2026). As principais propriedades que impactam na dinâmica granular, incluem:

- **Diâmetro – d**

Segundo Altair Engineering (2021), o diâmetro da partícula é uma das propriedades fundamentais na modelagem via DEM, pois define a escala característica do problema e influencia diretamente a representação do sistema granular. O tamanho das partículas influencia diretamente a escolha do passo de tempo (*time step*), dado que o cálculo do tempo crítico (Rayleigh *time step*) está relacionado ao raio da partícula, conforme ilustrado na Equação 1.

$$T_R \propto \frac{R}{\sqrt{G/\rho}} \quad (1)$$

Partículas menores (com diâmetro inferior a 10 µm) exigem passos de tempo mais reduzidos, aumentando o custo computacional, devido à maior frequência de colisões e à relevância de forças coesivas (Luding, 2008; O’Sullivan, 2011), enquanto partículas maiores (com diâmetro superior a 1 mm) podem comprometer a fidelidade da representação física do sistema (Cleary, 1998; Tsuji, Tanaka e Ishida, 1992). Dessa forma, a escolha do diâmetro deve refletir as características reais do material e considerar o equilíbrio entre precisão numérica e viabilidade computacional, conforme discutido por Altair Engineering (2021).

- **Densidade – ρ**

A densidade da partícula (ρ) é uma propriedade fundamental na modelagem via DEM, pois está diretamente associada à massa e à resposta dinâmica do material granular. Esse parâmetro influencia o tempo crítico de integração numérica, uma vez que partículas mais densas tendem a reduzir o valor admissível do *time step*, exigindo passos de tempo menores para garantir estabilidade da simulação.

Além do aspecto numérico, a densidade afeta diretamente as forças gravitacionais e inerciais atuantes no sistema, desempenhando papel relevante no comportamento macroscópico do escoamento. Por esse motivo, recomenda-se a utilização da densidade real do material ou de valores ajustados durante a calibração, de forma a assegurar compatibilidade entre os resultados numéricos e experimentais, conforme discutido por Altair Engineering (2021).

- **Forma – Circularidade CC**

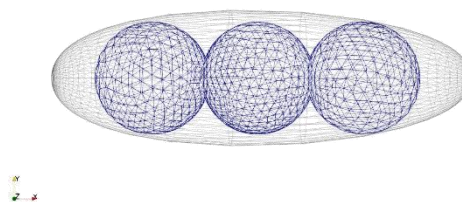
O formato das partículas é um fator essencial para representar com precisão o comportamento real do material granular. Conforme apontado por Altair Engineering (2021), diferentes métodos de representação da forma das partículas são empregados no DEM, incluindo esferas, poliedros, superquádricas e multi-esferas (*clumps*).

As esferas são as formas mais simples e eficientes para simulação, o que reduz o custo computacional e facilita a detecção de contatos. No entanto, elas não capturam os efeitos de intertravamento mecânico (*interlocking*) típicos de partículas irregulares.

Em alguns casos, é necessário modelar as irregularidades da partícula, já que elas afetam diretamente o comportamento do material granular, como no caso do intertravamento mecânico. Nesses casos, utilizam-se os seguintes métodos para representar essas partículas irregulares:

- As multi-esferas (ou *clumps spheres*) representam partículas irregulares formadas por um conjunto de esferas sobrepostas, proporcionando uma aproximação da forma irregular enquanto preservam as vantagens da esfera, equilibrando precisão e eficiência. No entanto, essas partículas precisam ser calibradas experimentalmente para garantir que o comportamento coletivo seja realista, como ilustrado na Figura 4.

Figura 4 - Imagem de um *clump* simulando uma partícula de arroz.



Fonte: Autor, 2026.

- As funções superquadráticas modelam formas contínuas mais complexas, mas, ao mesmo tempo, apresentam desafios, como o aumento do custo computacional e a falta de modelos de contato bem definidos. A equação tradicional para representar essas formas utiliza coeficientes (a , b e c) e expoentes (n_1 e n_2) para ajustar a modelagem das diferentes possibilidades geométricas (Equação 2).

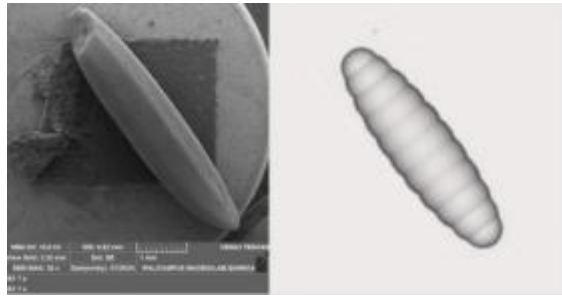
$$\left(\left| \frac{x}{a} \right|^{n2} + \left| \frac{y}{b} \right|^{n2} \right)^{n1/n2} + \left| \frac{z}{c} \right|^{n1} = 1 \quad (2)$$

- Rugosidade da Partícula

A rugosidade superficial influencia o comportamento coletivo de materiais granulares por afetar o contato, o atrito e o intertravamento entre partículas. No DEM, esse efeito pode ser representado indiretamente pelo método multi-esferas, no qual a superfície é aproximada pela sobreposição de esferas. Conforme Altair Engineering (2021), o aumento do número de esferas melhora o detalhamento geométrico, impactando o atrito efetivo, o ângulo de repouso e a dinâmica do leito, ao custo de maior demanda computacional.

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) permite a caracterização detalhada da superfície real das partículas e é frequentemente utilizada como suporte à validação de modelos DEM. A comparação entre imagens de MEV e partículas modeladas pelo método multi-esferas (*clump*) contribui para a verificação da coerência geométrica, especialmente em materiais granulares irregulares (Nouh *et al.*, 2024) (Figura 5).

Figura 5 - MEV de uma partícula de arroz e sua representação pelo método multi-esferas (*clump*).



Fonte: Autor, 2026 e Xia *et al.*, 2020.

- Razão de Poisson – ν

A razão de Poisson (ν) relaciona a deformação transversal à deformação longitudinal de um material submetido a carregamento mecânico. Esse parâmetro está associado ao comportamento elástico do material e é amplamente utilizado na descrição de sólidos isotrópicos.

No DEM, a razão de Poisson é empregada no cálculo dos módulos elásticos equivalentes do modelo de contato Hertz-Mindlin, influenciando a resposta normal e tangencial durante as

colisões. Apesar de sua influência limitada sobre variáveis macroscópicas do escoamento granular, a definição adequada de ν é necessária para assegurar coerência física e estabilidade numérica nas simulações (Altair Engineering, 2021).

- Módulo de Cisalhamento – G

O módulo de cisalhamento (G) representa a resistência do material a deformações tangenciais, estando diretamente relacionado à rigidez do contato entre partículas. Esse parâmetro caracteriza a resposta elástica ao cisalhamento e depende das propriedades intrínsecas do material.

No DEM, o módulo de cisalhamento participa diretamente do cálculo da rigidez tangencial e do tempo crítico de integração numérica. Valores elevados de G aumentam a rigidez do contato e reduzem o passo de tempo permitido, enquanto valores reduzidos podem comprometer a fidelidade da resposta mecânica. Assim, a escolha de G deve equilibrar realismo físico e eficiência computacional, sendo comum a adoção de valores experimentais ou ajustados durante a calibração do modelo (Altair Engineering, 2021).

3.1.2 Propriedades de Interação Partícula-Partícula e Partícula-Parede

- Coeficiente de Restituição – e_p

O coeficiente de restituição (e_p) é um parâmetro adimensional que quantifica a dissipação de energia durante colisões, sendo definido como a razão entre as velocidades normais após e antes do impacto, aplicável a colisões partícula-partícula e partícula-superfície rígida. Seus valores variam no intervalo $0 \leq e_p \leq 1$, em que $e_p = 1$ representa uma colisão perfeitamente elástica, sem perda de energia, e $e_p = 0$ caracteriza uma colisão perfeitamente inelástica, com dissipação total da energia cinética normal, conforme descrito por Wang *et al.* (2015) e Aryaei, Hashemnia e Jafarpur (2010).

No DEM, o coeficiente de restituição influencia principalmente o comportamento dinâmico das partículas durante colisões rápidas, afetando a perda de energia cinética do sistema. Em muitos escoamentos granulares, sua influência sobre variáveis macroscópicas é limitada quando comparada aos coeficientes de atrito, sendo comum a adoção de valores obtidos experimentalmente ou da literatura técnica, conforme indicado por Altair Engineering (2021).

- Coeficiente de Atrito Estático - μ_s

O coeficiente de atrito estático (μ_s) representa a resistência ao início do deslizamento relativo entre superfícies em contato, sendo definido como a razão entre a força tangencial máxima admissível no contato e a força normal atuante. Trata-se de um parâmetro adimensional e não negativo, cujos valores satisfazem $\mu_s \geq 0$. No contexto do DEM, o coeficiente de atrito estático exerce influência direta sobre o comportamento macroscópico do escoamento, afetando ângulos de repouso e transições entre regimes de escoamento em tambores rotatórios (Santos *et al.*, 2015; Brandão, 2019; Calheiros, 2026).

- Coeficiente de Atrito de Rolamento - μ_r

O coeficiente de atrito de rolamento (μ_r) está associado à resistência ao movimento rotacional das partículas em contato, sendo utilizado no DEM para representar efeitos relacionados à rugosidade superficial, não esfericidade das partículas e deformações locais na região de contato. Assim como o atrito estático, seus valores satisfazem $\mu_r \geq 0$, sendo valores mais elevados indicativos de maior resistência ao rolamento e menor mobilidade do leito granular. Esse parâmetro é frequentemente empregado como um termo corretivo em simulações com partículas esféricas, exercendo influência significativa sobre a estabilidade do escoamento e a transição entre regimes em tambores rotatórios (Nascimento, 2018; Brandão, 2019; Calheiros, 2026).

Esses parâmetros (e_p , μ_s e μ_r) descrevem as interações entre as partículas e entre as partículas e a parede do sistema, influenciando diretamente a simulação da dinâmica granular (Cundall; Strack, 1979; Zhu *et al.*, 2008).

3.2 Dinâmica Granular em Tambores Rotatórios

A análise da dinâmica de partículas é fundamental devido à ampla gama de aplicações industriais que dependem do correto entendimento do comportamento granular. Diversas operações exigem critérios bem definidos para evitar falhas no manuseio de equipamentos, uma vez que a ausência desse conhecimento pode comprometer tanto a eficiência quanto a segurança do processo. Nesse contexto, fenômenos como mistura, segregação, moagem, granulação e reações químicas destacam-se como processos industriais cujo desempenho está diretamente associado à compreensão prévia da dinâmica do leito particulado (Yang *et al.*, 2008).

No estudo da dinâmica de partículas em tambores rotatórios, diversos parâmetros geométricos e operacionais exercem influência significativa sobre o comportamento do sistema, entre os principais fatores destacam-se o grau de preenchimento, a velocidade de rotação, o diâmetro e o comprimento do tambor, a rugosidade da parede do equipamento, bem como a forma, o tamanho e a densidade das partículas. A variação desses parâmetros está diretamente relacionada à ocorrência dos diferentes regimes de escoamento granular: deslizamento, avalanche, rolamento, cascadeamento, catarateamento e centrifugação (Mellmann, 2001; Scatena *et al.*, 2014).

De acordo com Arntz *et al.* (2008), operações de mistura, um dos objetivos do presente trabalho, são predominantemente conduzidas nos regimes de rolamento e cascata, sendo o regime de catarata empregado em situações específicas. Ainda assim, esses processos enfrentam desafios associados à segregação de partículas, especialmente em função de diferenças de tamanho e densidade. Para mitigar esse efeito, é comum a utilização de suspensores, que promovem maior mobilidade do leito e intensificam a mistura (Barrozo *et al.*, 2024; Silveira *et al.*, 2020).

3.2.1 Tambores Rotatórios com Suspensores

Tambores rotatórios equipados com suspensores são amplamente empregados em diferentes setores industriais, como as indústrias alimentícia, metalúrgica, química e de processamento de minerais, sendo utilizados em operações de mistura, secagem, aquecimento e condução de reações químicas (Geng *et al.*, 2013; Barrozo *et al.*, 2024). A versatilidade desses equipamentos decorre da capacidade de promover contato eficiente entre sólidos e, em muitos casos, entre fases sólida e gasosa, favorecendo a transferência de calor e massa, em um processo de secagem por exemplo.

A inserção de suspensores no interior do tambor tem como principal finalidade intensificar o cascadeamento dos sólidos, segundo Mellmann (2001), o regime de cascadeamento é caracterizado pelo movimento das partículas que são elevadas pela rotação do tambor até atingirem uma determinada altura, passando então a escoar por gravidade ao longo da superfície do leito. Essa movimentação resulta na ampliação da área de contato e a renovação do leito particulado.

Em geral, os tambores rotatórios operam em baixas velocidades de rotação e com leve inclinação axial, permitindo o transporte das partículas ao longo do comprimento do tambor.

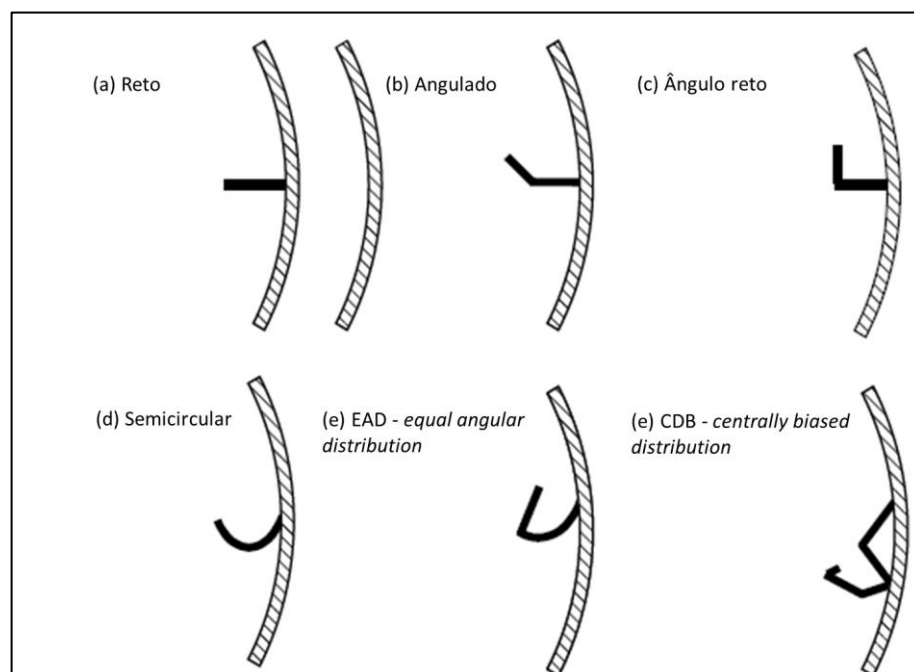
No entanto, esse mecanismo de transporte apresenta elevada complexidade, pois depende simultaneamente das propriedades das partículas (especialmente em sistemas polidispersos), da configuração geométrica dos suspensores, da velocidade de rotação e do grau de preenchimento do tambor (Geng *et al.*, 2009; Nascimento *et al.*, 2014). A compreensão integrada desses fatores é essencial para otimizar o desempenho operacional do equipamento e a qualidade do produto final (Zhang *et al.*, 2018).

Nesse contexto, a literatura tem se dedicado à investigação de parâmetros-chave para a descrição da dinâmica do material em tambores com suspensores, incluindo a quantidade de sólidos retidos nos suspensores, o tipo de carregamento, a fração de partículas presente na região ativa e a configuração geométrica dos elementos internos. Esses aspectos serão discutidos de forma detalhada nos tópicos subsequentes, a fim de fornecer subsídios para a análise do comportamento granular nesses sistemas.

3.2.1.1 Tipos de Suspensores

Segundo Mohaned Ahmed (2015), a eficácia do tambor rotatório com suspensores depende muito do contato gás-sólido e do tempo de residência do material no tambor, estes são dependentes do número, tamanho e formato dos suspensores. Krokida (2007), ilustra seis modelos de suspensores comumente encontrados (Figura 6).

Figura 6 - Perfis comuns de suspensores.

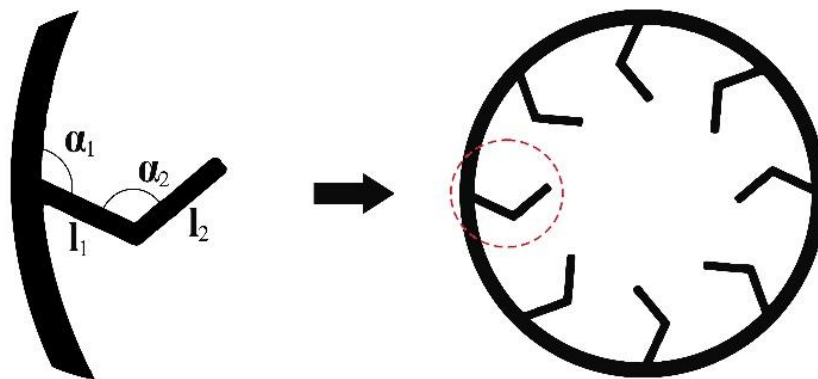


Fonte: Adaptado de Krokida *et al.*, (2007).

A seleção dos suspensores é largamente governada pelo comportamento do fluxo das partículas, os suspensores da Figura 6(a)-(d), são frequentemente usados em tambores rotatórios em cascata, os dois últimos são perfis mais complexos. O modelo (a) é um suspensor reto ou radial (apenas um segmento), geralmente utilizado com materiais muito coesos. Os modelos (b) e (c) são variações, o modelo (c) ângulo reto ou retangular (90° entre os segmentos) também aplicado para materiais coesivos, o modelo (b) angulado pode ter além de dois segmentos ($\neq 90^\circ$), três segmentos, este modelo promove boa distribuição na região ativa usados para materiais de fluxo livre (Barrozo; Santos; Duarte, 2024).

A Figura 7 apresenta a localização dos segmentos e ângulos existentes na geometria dos suspensores de dois segmentos. Variações no número de suspensores, número e tamanho dos segmentos e os ângulos dos segmentos, influenciam diretamente a descarga de sólidos.

Figura 7 - Suspensor de dois segmentos.



Fonte: Autor, 2026.

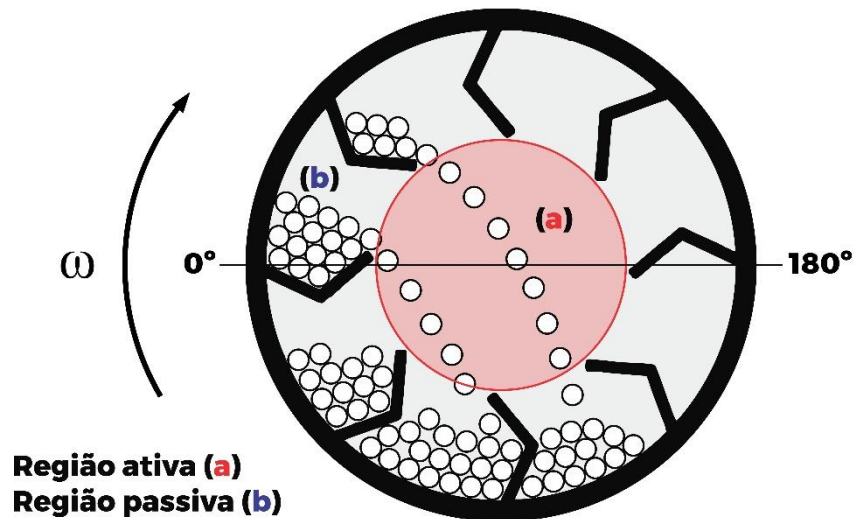
Em que, l_1 e l_2 são os segmentos que formam a geometria do suspensor, l_1 o primeiro segmento que fica encostado na parede do suspensor e l_2 o segmento na sequência de l_1 . Os ângulos α_1 e α_2 são responsáveis pelas angulações dos segmentos, α_1 o ângulo posicionado entre a parede do tambor e o l_1 , α_2 o ângulo de posição entre os segmentos l_1 e l_2 .

3.2.1.2 Holdup de sólidos (SH - *Solids Holdup*)

Antes de analisar SH, é importante compreender as regiões existentes em um tambor rotatório com suspensores. O material granular no interior do tambor rotatório distribui-se em duas regiões principais (Figura 8): a fase ativa e a fase passiva. Na fase ativa, o material

encontra-se em movimento de cascata na região livre do tambor; na fase passiva, os sólidos permanecem em repouso nos suspensores (Karali *et al.*, 2015; Silveira *et al.*, 2020).

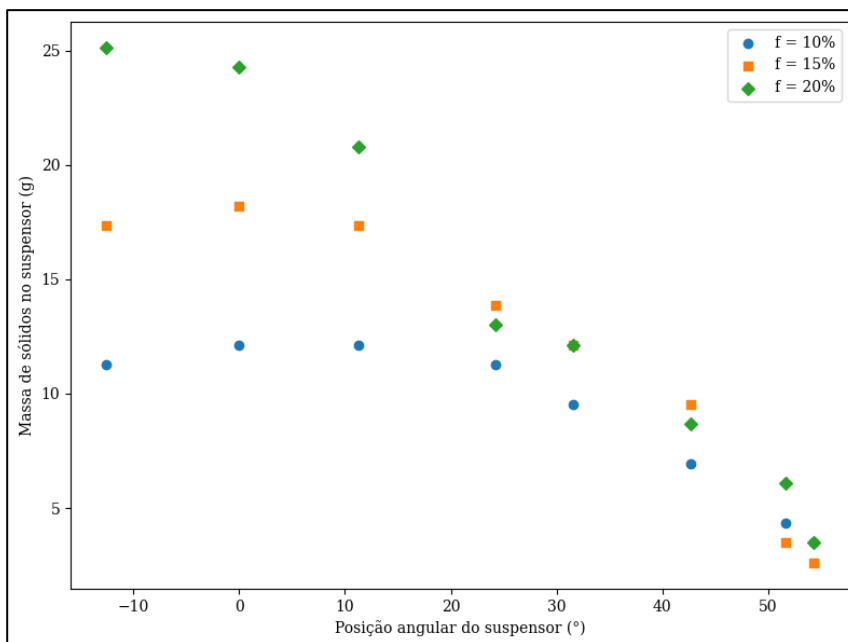
Figura 8 - Regiões existentes no tambor rotatório com suspensores.



Fonte: Autor, 2026.

O *holdup* de sólidos corresponde à quantidade de material sólido retido no suspensor. Por estar diretamente relacionado a esse elemento, sua análise é realizada em função da posição angular do suspensor, de acordo com sua configuração geométrica, permitindo a descrição do perfil de descarga das partículas (Lominé; Hellou; Roques, 2022). A Figura 9 apresenta o perfil de massa de sólidos no suspensor em função da posição angular, considerando três diferentes condições de preenchimento, conforme Barrozo *et al.* (2024).

Figura 9 - Massa de sólidos no suspensor em função da posição angular com três preenchimentos diferentes.



Fonte: Autor, 2026.

Observa-se que, na condição de subcarregamento, o *holdup* permanece constante até o ponto de saturação, quando se inicia a descarga do sólido. Na condição de carregamento ideal, a saturação ocorre na posição angular de 0° , enquanto, para o tambor sobrecarregado, terceiro modelo, a descarga do suspensor tem início antes dessa posição angular.

Segundo Barrozo *et al.*, (2024), a medição da massa de sólidos nos suspensores deve ser realizada em regime permanente e em função da área ocupada pelos sólidos, denominada *holdup* volumétrico. Em análises experimentais, deve-se evitar a parada brusca do tambor rotatório, uma vez que essa condição pode afetar o ângulo de repouso dinâmico. Nesse contexto, o uso de técnicas de imagens para a estimativa da massa de sólidos tem sido recomendado na literatura (Lominé; Hellou; Roques, 2022; Silveira, 2022).

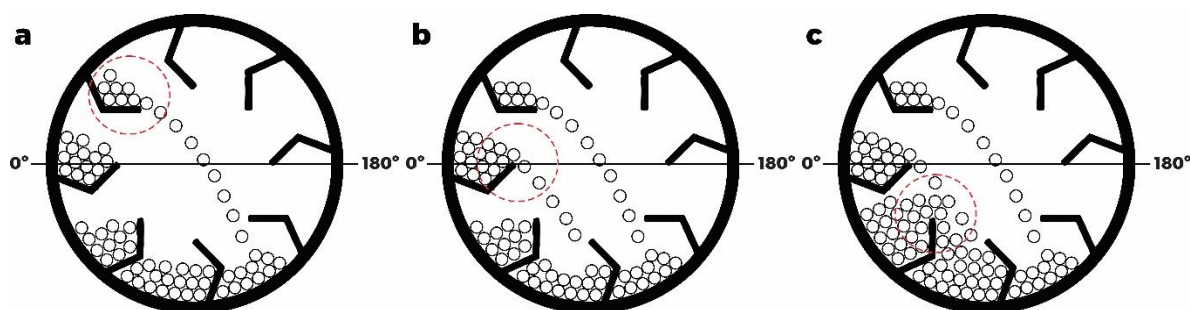
A quantidade de sólidos retidos nos suspensores constitui um parâmetro fundamental para garantir que o tambor rotatório opere próximo à condição ideal de carregamento, tópico a ser discutido a seguir.

3.2.1.3 Carregamento dos Suspensores

O grau de preenchimento de sólidos no tambor influencia a quantidade de material presente nas regiões ativa e passiva e, portanto, o tempo de residência no interior do

equipamento. Como resultado, esse parâmetro afeta diretamente os processos de transferência de troca de calor e de massa (Karali *et al.*, 2015). A carga nos suspensores pode ser classificada em três categorias: subcarregada, carregamento ideal (carga ótima) e sobrecarregada (Figura 10) (Silveira *et al.*, 2020).

Figura 10 - Classificação das cargas nos suspensores: (a) subcarregado, (b) carregamento ideal e (c) sobrecarregado.



Fonte: Autor, 2026.

A classificação do carregamento baseia-se na retenção de sólidos e no ângulo de primeira descarga do suspensor, denominado FUF (*First Unloading Flight*). O subcarregamento ocorre quando o FUF se encontra na metade superior do tambor (posição equivalente às 9 horas), condição em que o suspensor retém uma quantidade de sólidos inferior à sua capacidade, podendo resultar em maior consumo energético devido à operação ineficiente.

À medida que a carga nos suspensores aumenta, observa-se a redução do FUF. Quando a primeira descarga ocorre exatamente na posição das 9 horas, o tambor opera em condição de carregamento ideal (ou carga de projeto). Nessa situação, os suspensores atingem sua capacidade máxima de retenção, promovendo maior distribuição de partículas na região ativa e, consequentemente, intensificando os processos de transferência de calor e/ou massa.

Com o aumento adicional da alimentação, não há incremento significativo na carga efetivamente transportada pelos suspensores; em vez disso, ocorre o seu enchimento excessivo, fazendo com que a descarga se inicie logo após a saída do suspensor da região densa. Nessa condição, o tambor opera em regime sobrecarregado, com o FUF localizado na metade inferior. Como consequência, parte do material na região densa não é adequadamente transportada e descarregada na região ativa, comprometendo a eficiência do processo e a qualidade final do produto (Karali *et al.*, 2015; Mujumdar, 2006).

O Quadro 1 apresenta a síntese de quatro modelos para o cálculo do carregamento ideal. Esses modelos foram avaliados experimentalmente por Ajayi e Sheehan (2012), que utilizaram um tambor rotatório em escala piloto, com diâmetro de 0,75 m e comprimento de 1,15 m, equipado com suspensores angulares. Os autores relatam que, para descrever de forma mais precisa o comportamento das partículas, foi necessária a proposição de modificações no modelo de Baker (1988).

Quadro 1 - Modelos de carregamento de projeto.

Porter (1963)	$H_{Tot} = H_{FUF} \times \frac{n^F}{2}$	(3)
Kelly and O'Donnell (1977)	$H_{Tot} = H_{FUF} \times \left(\frac{n^{F+1}}{2} \right)$	(4)
Baker (1988)	$H_{Tot,Flights} = \left(2 \times \sum_{FUF}^{LUF} H_i \right) - H_{FUF}$	(5)
Aiayi and Sheehan (2012)	$H_{Tot} = \left(1,24 \times \left(2 \times \sum_{FUF}^{LUF} H_i \right) - H_{FUF} \right) (1 + S)$	(6)

Fonte: Adaptado de Ajayi e Sheehan (2012).

Em que, H_{Tot} é a carga total do tambor no carregamento ideal, tanto na região ativa quanto passiva. $H_{Tot,Flights}$ representa apenas a quantidade retida de sólidos no suspensor (região passiva), H_{FUF} é a retenção de sólidos dentro do suspensor de primeira descarga e H_i é a quantidade de sólidos em cada suspensor na condição de carregamento ideal iniciando do suspensor de primeira descarga (FUF) até o suspensor de última descarga (LUF - *Last Unloading Flight*). As unidades de H_{Tot} , $H_{Tot,Flights}$, H_{FUF} , H_i são representadas pela retenção volumétrica de sólidos por unidade de comprimento do tambor, ou seja, m^3/m . O n_F é o número de suspensores e S é a razão entre o sólido da região ativa e o sólido da região passiva.

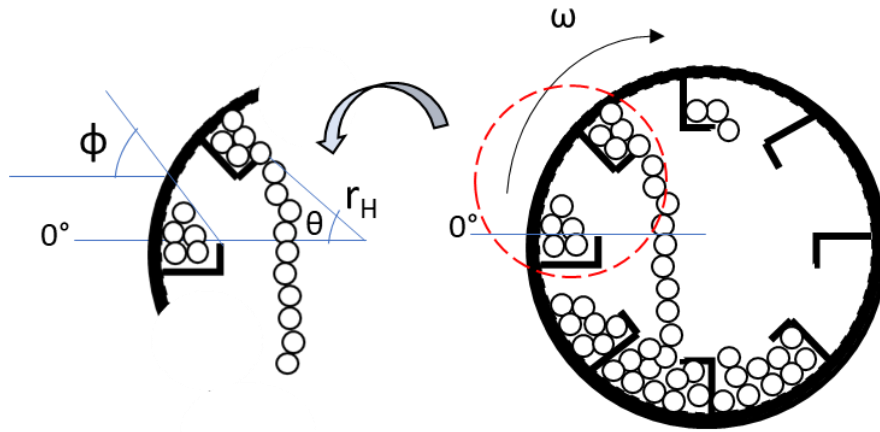
Parâmetros adimensionais são mais adequados quando se deseja ampliar os resultados experimentais, segundo Karali *et al.* (2015) e Mujumdar (2006), a Equação 7 fornece a relação entre o grau de enchimento do tambor e o volume total de sólidos a ser alimentado no tambor.

$$f_{projeto}(\%) = \frac{V_{Tot, solidos}}{V_{tambor}} = \frac{H_{Tot}L}{\pi R^2 L} \times 100 \quad (7)$$

Em que, R e L são, respectivamente, o raio e o comprimento do tambor.

O que determina se a partícula permanecerá no suspensor ou descarregará é o ângulo de repouso dinâmico – ϕ , que é o ângulo formado pela superfície do material no suspensor e o plano horizontal (Figura 11) (Mujumdar, 2006).

Figura 11 - Posição do ângulo de repouso dinâmico.



Fonte: Autor, 2026.

A Equação 8, de Schofield e Glikin (1962) apresenta um modelo para determinação do ângulo de repouso dinâmico através do equilíbrio entre forças gravitacionais, centrífugas e de atrito atuantes sobre uma partícula que está prestes a cair do suspensor.

$$\tan\phi = \frac{\gamma + Fr(\cos\theta - \gamma\sin\theta)}{1 - Fr(\sin\theta + \gamma\cos\theta)} \quad (8)$$

$$Fr = \frac{r_H \omega^2}{g} \quad (9)$$

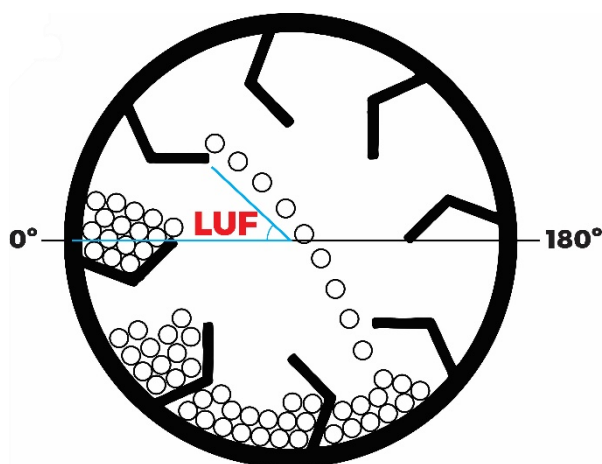
Onde, θ é o ângulo entre a ponta do suspensor e o centro do tambor, γ é o coeficiente de atrito dinâmico do material, Fr o número de Froude (razão entre a força centrífuga e gravitacional que atuam sobre a partícula) e r_H é o raio da circunferência descrita pela partícula em queda. A Equação 8 foi testada para material em fluxo livre com Fr operando em uma faixa de 0,0025 a 0,04, porém é válida para valores de Fr até 0,4.

3.2.1.4 Ângulo de Última Descarga – LUF (*Last Unloading Flight*)

O número de partículas na fase ativa (ou diluída) e a distribuição de partículas na seção transversal do tambor estão diretamente relacionadas ao desempenho do tambor, conhecer o comportamento das partículas através de parâmetros como LUF e massa de sólidos na região ativa – MAP (*Mass in the Active Phase*), ajudam a melhorar o desempenho do equipamento (Zhang *et al.*, 2020).

O LUF, é o ângulo onde a cortina de partículas termina no interior de tambores rotatórios, ou seja, é o ângulo formado a partir da queda da última partícula do suspensor (Figura 12). Em uma configuração ideal, quanto maior o LUF, mais distribuídos os sólidos estão na região ativa do tambor (Barrozo *et al.*, 2024).

Figura 12 - Mensuração da posição angular do suspensor de última descarga.



Fonte: Autor, 2026.

Algumas alterações na operação do tambor rotatório podem aumentar o valor do LUF, por exemplo:

- Aumento da velocidade de rotação do tambor, aumenta a força centrífuga das partículas, o que acarreta em uma maior retenção do sólido nos suspensores retardando o movimento de descarga;
- Aumento do ângulo de repouso estático apresenta maior resistência a descarga, com isso um aumento no LUF.

Nascimento *et al.*, (2018) apud Barrozo *et al.*, (2024) concluiu a partir de estudos numéricos e experimentais que a carga de sólidos no suspensor (SH) em relação a posição

angular de queda da última partícula, são independentes do número de suspensores e da carga de sólidos no tambor. Porém, dependentes da velocidade de rotação e do material no interior do equipamento.

3.2.1.5 Dispersão de sólidos – DSH (*Dispersion of Solids Heterogeneity*) e MAP

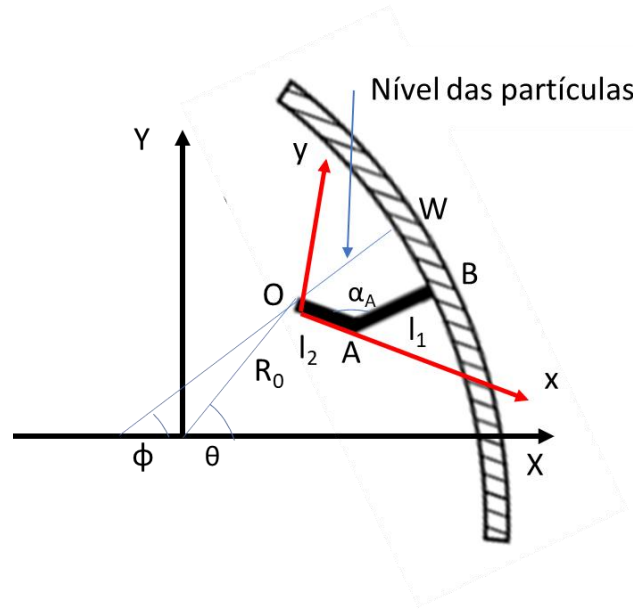
O estudo do movimento transversal do fluxo granular em tambores rotatórios com suspensores é fundamental para a determinação da área correspondente à região ativa do tambor, onde ocorre a formação da cortina de partículas (Koteswara *et al.*, 1984). Para a previsão desse parâmetro, é necessário estimar a altura de queda das partículas, sendo uma das abordagens descrita na literatura baseada em relações geométricas.

Nesse contexto, alguns aspectos devem ser considerados:

- O aumento da carga do tambor eleva a altura do leito das partículas, reduzindo, conseqüentemente, a altura de queda do material; além disso, a razão entre os comprimentos dos segmentos do suspensor (l_2/l_1) também influencia esse comportamento.
- O aumento do ponto de esvaziamento do suspensor resulta no aumento do tempo médio de queda e a altura média (Koteswara *et al.*, 1984).
- A altura de queda determina o tempo de permanência das partículas na fase ativa.

A Equação 10, proposta por Glikin (1978), define a altura de queda como a distância entre a extremidade do suspensor e o leito de partículas no fundo do tambor, considerando que as partículas realizam queda livre vertical (Figura 13).

Figura 13 - Esquema de suspensores de dois segmentos.



Fonte: Adaptado de (Lisboa *et al.*, 2007).

$$Y_d = \frac{Y_0 + \sqrt{R^2 - X_0^2}}{\cos \alpha} \quad (10)$$

$$Y_0 = R_0 \cos \theta \text{ e } X_0 = R_0 \sin \theta$$

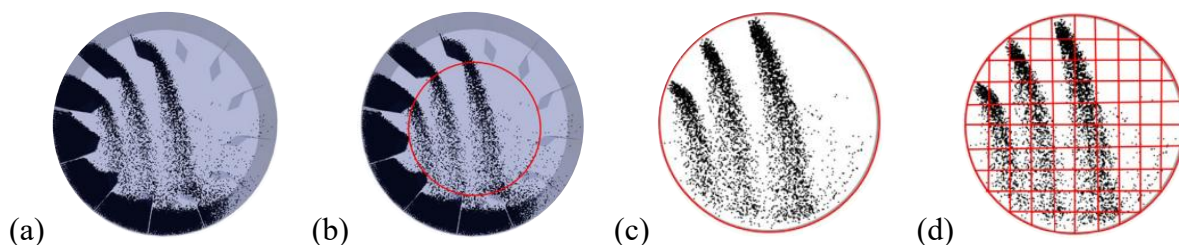
A forma como as partículas se dispersão na região ativa, tanto nas direções longitudinal quanto transversal, influencia diretamente o desempenho de tambores rotatórios. O formato dos suspensores e as propriedades do material particulado afetam esse comportamento, podendo resultar na formação de um véu de partículas homogêneo ou, alternativamente, na queda em trajetórias preferenciais.

Silveira *et al.*, (2022), propõem uma abordagem em duas etapas para a quantificação da dispersão das partículas, com base na área e no volume da região ativa. Essa metodologia permite avaliar a heterogeneidade da dispersão nas direções transversal e longitudinal por meio do parâmetro DSH na seção do tambor. Para a mensuração desse parâmetro, os autores utilizaram o desvio padrão das medições relacionadas à porcentagem das áreas ocupadas pelas partículas, denominado OAR (*Occupied Active Region*), em cada célula delimitada no estudo.

Outro parâmetro relevante para a análise da região ativa é a massa de sólidos contida nessa região, representada pelo MAP. De acordo com Silveira *et al.* (2020), esse parâmetro pode ser determinado por meio da delimitação da região ativa ao longo do tambor e da utilização de

técnicas de processamento de imagens para contabilizar o número de partículas e, consequentemente, estimar a massa média de sólidos na área analisada (Figura 14).

Figura 14 - Representação esquemática da técnica de análise de imagem utilizada para quantificar as variáveis DSH e MAP. (a) imagem da simulação; (b) delimitação da região ativa; (c) tratamento de cor da região ativa pelo *software*; (d) divisão da imagem em célula.



Fonte: Adaptado de Silveira *et al.*, 2020.

3.3 Fenômeno de Mistura em Tambores Rotatórios

O fenômeno de mistura em tambores rotatórios apresenta grande relevância industrial, uma vez que impacta diretamente a eficiência de processos como secagem, granulação, moagem e reações químicas. A mistura de partículas com diferentes propriedades físicas, como tamanho, densidade e forma, é particularmente complexa, visto que o movimento do leito granular no interior do tambor pode favorecer tanto a homogeneização quanto a segregação das partículas (Chen *et al.*, 2016; Brandao *et al.*, 2020; Ottino; Khakhar, 2000).

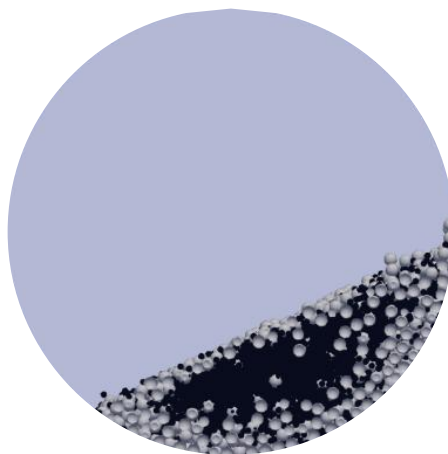
O processo de mistura ocorre a partir da combinação de diferentes mecanismos, como difusão, convecção e cisalhamento das partículas, especialmente na região ativa do tambor. A interação entre esses mecanismos é determinante para o grau de homogeneização do sistema e está diretamente relacionada às condições operacionais e às características do material particulado (Ottino; Khakhar, 2000; Yang *et al.*, 2008).

Dentre os principais fatores que influenciam o fenômeno de mistura, destacam-se a velocidade de rotação do tambor, o grau de preenchimento, a geometria dos suspensores e as propriedades físicas das partículas. A interação entre essas variáveis pode favorecer a homogeneização do sistema ou intensificar mecanismos de segregação (Chen *et al.*, 2016).

Nas segregações radiais (Figura 15), observa-se que partículas de menor diâmetro tendem a migrar para a região central do leito granular, enquanto partículas maiores se concentram predominantemente nas regiões periféricas, formando camadas distintas ao longo

da seção transversal do tambor (Brandao *et al.*, 2020). Esse comportamento evidencia a complexidade do processo e a necessidade de controle adequado das variáveis operacionais.

Figura 15 - Exemplo de segregação radial.



Fonte: Autor, 2026.

A presença de suspensores modifica significativamente a dinâmica de mistura, promovendo a elevação e posterior descarga das partículas, o que contribui para a formação da cortina de partículas e intensifica a interação entre diferentes regiões do leito granular (Rao *et al.*, 1984; Lisboa *et al.*, 2007). Dessa forma, a geometria dos suspensores desempenha papel fundamental na eficiência da mistura.

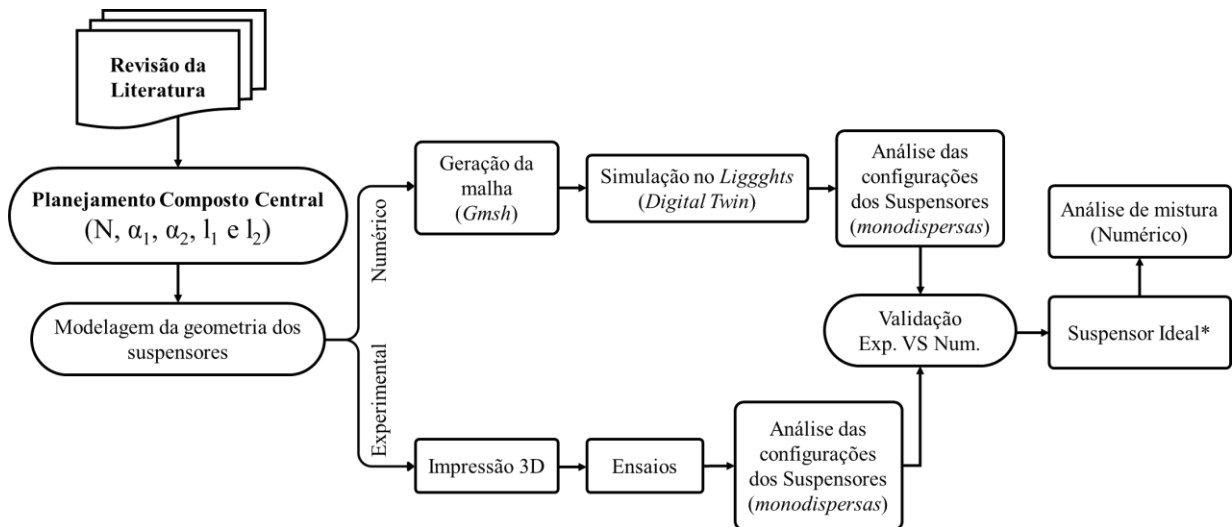
A eficiência do processo de mistura pode ser avaliada por meio de diferentes abordagens, incluindo índices quantitativos, como o índice de mistura, variância da concentração e coeficientes de segregação, além de técnicas baseadas em processamento de imagens, que permitem analisar a distribuição espacial das partículas ao longo do tambor (Ottino; Khakhar, 2000; Silveira *et al.*, 2022).

Apesar da importância desse fenômeno, sua compreensão ainda apresenta lacunas na literatura, especialmente no que se refere à interação entre variáveis operacionais e geométricas e seus efeitos na eficiência da mistura. Nesse contexto, estudos que integrem análise experimental e modelagem numérica tornam-se fundamentais para o avanço do conhecimento e para a otimização do desempenho de tambores rotatórios, particularmente em sistemas equipados com suspensores de múltiplos segmentos.

4 METODOLOGIA

A Figura 16 apresenta um fluxograma que resume de maneira concisa as etapas metodológicas necessárias para atingir os objetivos deste trabalho. Os experimentos e as simulações numéricas foram conduzidos no Laboratório de Sistema de Separação e Otimização de Processos (LASSOP) e Laboratório de Fluidodinâmica Computacional (FLOWLAB), localizados no Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas (CTEC/UFAL). A metodologia foi estruturada em abordagem experimental e numérica, visando a avaliação da dinâmica granular e do fenômeno de mistura em tambores rotatórios com e sem suspensores.

Figura 16 - Fluxograma da metodologia referente às etapas do andamento do trabalho.



*com base na análise das configurações dos Suspensores (monodispersas).

Fonte: Autor, 2026.

O estudo dos parâmetros de entrada para a técnica DEM teve início com a caracterização das partículas, considerando densidade, diâmetro e forma. Em seguida, foram definidos os parâmetros geométricos do tambor e os suspensores, seguidos pela realização dos experimentos para coletar dados experimentais. Com base nesses dados, as simulações foram configuradas e executadas, possibilitando a análise da dinâmica granular, através da construção de um *Digital Twin (DT)*, e do fenômeno de mistura. Por fim, os resultados experimentais e numéricos foram comparados, para assim validar a eficácia do modelo proposto.

4.1 Unidade Experimental

A unidade experimental é composta por um tambor rotatório cilíndrico fabricado em aço inoxidável, com diâmetro interno de 160 mm e comprimento de 100 mm (Figura 17). O tambor opera na posição horizontal, sem inclinação, em regime de batelada.

O sistema é apoiado sobre dois pares de roldanas e acionado por um motor trifásico WEG de 0,75 cv e 1.750 rpm, acoplado a um motoredutor. A rotação ocorre no sentido horário, com velocidade ajustável entre 0,5 e 3,0 rad/s. Para as análises da dinâmica granular, foi adotada velocidade de 1,94 rad/s, que é a velocidade central do motoredutor.

Figura 17 - Unidade experimental do tambor rotatório com suspensores.



Fonte: Autor, 2026.

Determinação da massa correspondente ao grau de preenchimento

A massa de partículas inserida no tambor rotatório foi determinada com base no grau de preenchimento volumétrico adotado e na fração sólida do leito granular.

O volume total do tambor foi calculado por:

$$V_T = \frac{\pi D^2}{4} L \quad (11)$$

em que D é o diâmetro interno do tambor e L o seu comprimento.

Considerando um grau de preenchimento volumétrico f , o volume útil ocupado pelo leito granular é dado por:

$$V_{\text{útil}} = f \cdot V_T \quad (12)$$

Entretanto, devido à presença de vazios no leito granular, apenas uma fração desse volume corresponde efetivamente ao volume sólido das partículas. Assim, o volume real ocupado pelas partículas é expresso por:

$$V_{\text{part}} = V_{\text{útil}} (1 - \varepsilon) \quad (13)$$

em que ε representa a porosidade do leito.

A massa correspondente ao grau de preenchimento adotado foi então calculada por:

$$m = \rho_p \cdot V_{\text{part}} \quad (14)$$

ou, de forma expandida,

$$m = \rho_p \cdot f \cdot V_T \cdot (1 - \varepsilon) \quad (15)$$

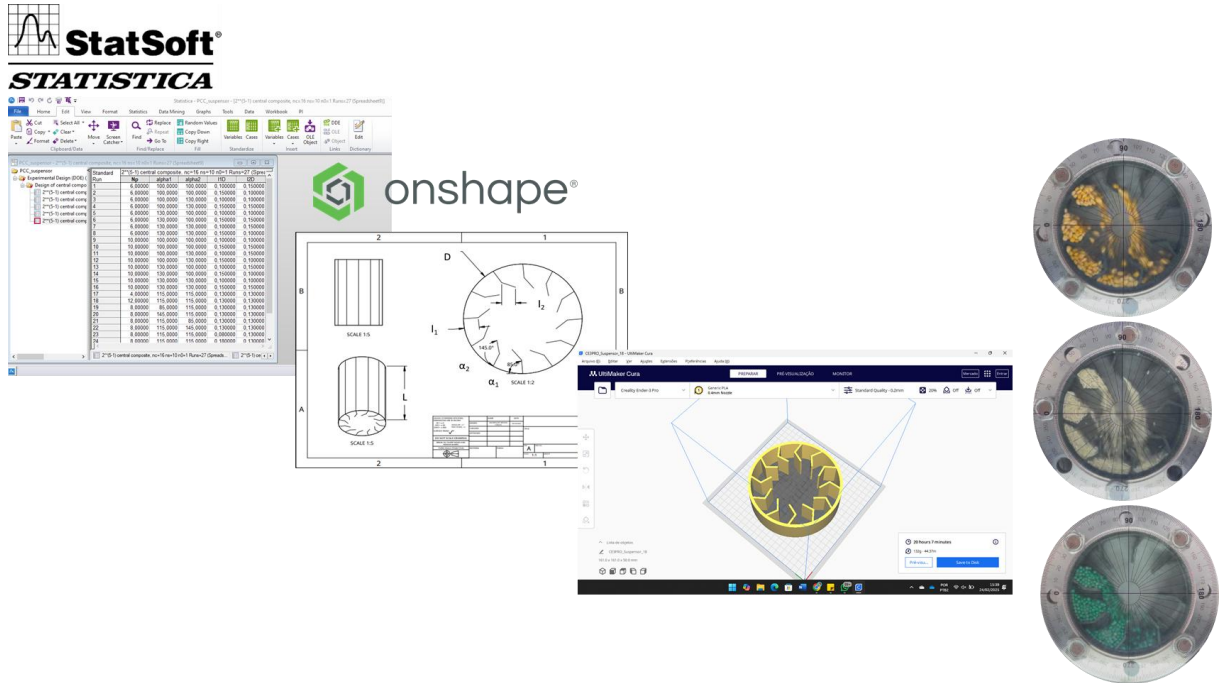
em que ρ_p é a densidade da partícula.

Essa expressão foi utilizada para determinar a massa experimental, adotando-se um grau de preenchimento de 15%. Segundo Perry & Green (1997) os tambores rotatórios com suspensores devem operar com 10 a 15% de seu volume preenchido com material.

4.2 Geometria dos suspensores e Planejamento Composto Central

Os suspensores foram projetados no *software* Onshape e posteriormente fabricados por manufatura aditiva, utilizando impressora 3D modelo Ender-3 Pro e filamento PLA (Figura 18).

Figura 18 – Etapas de desenvolvimento dos suspensores.



Fonte: Autor, 2026.

A definição das configurações geométricas foi realizada por meio de um Planejamento Composto Central (PCC), no qual foram consideradas como variáveis independentes:

- Número de suspensores (N);
- Ângulo α_1 , formado entre o primeiro segmento (l_1) e a parede interna do tambor;
- Ângulo α_2 , formado entre os segmentos l_1 e l_2 ;
- Comprimento adimensional do primeiro segmento (l_1/D);
- Comprimento adimensional do segundo segmento (l_2/D).

Os níveis codificados das variáveis e os pontos ortogonais avaliados estão apresentados nas Tabelas 1 e 2, respectivamente. O delineamento completo do PCC, contemplando todas as combinações das variáveis independentes avaliadas, encontra-se detalhado no APÊNDICE A.

Desenvolveu-se uma nomenclatura capaz de expressar de forma sucinta as características de cada susensor. Implementou-se a sigla F, comumente utilizada em inglês para designar suspensores em tambores rotatórios (*flights*), seguida do número de suspensores, ângulo α_1 e α_2 e os comprimentos dos segmentos l_1 e l_2 , respectivamente. Tomou-se o susensor

F8-115-115-0,13-0,13, que é a configuração com 8 suspensores, $\alpha_1=115^\circ$, $\alpha_2=115^\circ$, $l_1=0,13$ e $l_2=0,13$, por ponto central, a partir do qual foi promovida a variação dos parâmetros estudados.

Tabela 1 - PCC representativo das variáveis de estudo da dinâmica do leito granular.

Variável codificada	Níveis				
	$-\alpha$ (-1,5467)	-1	0	1	$+\alpha$ (+1,5467)
N (-)	4	6	8	10	12
α_1 (°)	85	100	115	130	145
α_2 (°)	85	100	115	130	145
l_1/D (-)	0,08	0,10	0,125	0,15	0,18
l_2/D (-)	0,08	0,10	0,125	0,15	0,18

Fonte: Autor, 2025.

Tabela 2 - PCC representativo dos pontos ortogonais.

Nº	Suspensor	Nº suspensores (flights) N (-)	α_1 (°)	α_2 (°)	l_1/D	l_2/D
17	F4-115-115-0,13-0,13	4	115	115	0,13	0,13
18	F12-115-115-0,13-0,13	12	115	115	0,13	0,13
19	F8-85-115-0,13-0,13	8	85	115	0,13	0,13
20	F8-145-115-0,13-0,13	8	145	115	0,13	0,13
21	F8-115-85-0,13-0,13	8	115	85	0,13	0,13
22	F8-115-145-0,13-0,13	8	115	145	0,13	0,13
23	F8-115-115-0,08-0,13	8	115	115	0,08	0,13
24	F8-115-115-0,18-0,13	8	115	115	0,18	0,13
25	F8-115-115-0,13-0,08	8	115	115	0,13	0,08
26	F8-115-115-0,13-0,18	8	115	115	0,13	0,18
27	*F8-115-115-0,13-0,13	8	115	115	0,13	0,13

*PC – ponto central

Fonte: Autor, 2025.

Variáveis-resposta avaliadas

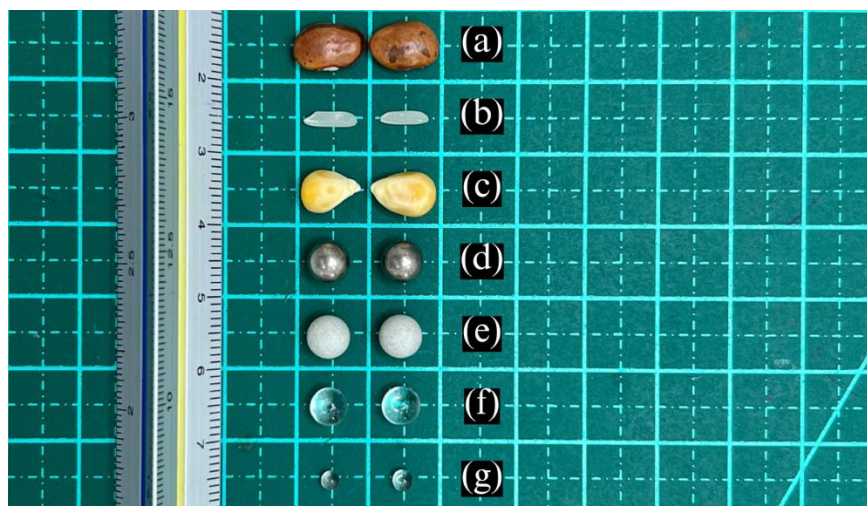
A avaliação da dinâmica granular foi conduzida com base nas seguintes variáveis-resposta:

- LUF – ângulo correspondente à última descarga de partículas do suspensor;
- SH – massa de sólidos retida no suspensor no instante em que ocorre o desprendimento da primeira partícula verificado pelo ângulo FUF;
- MAP – massa de partículas presente na região ativa, avaliada no ângulo correspondente ao LUF;
- DSH (*Dispersion of Solids Heterogeneity*) – parâmetro associado à dispersão das partículas na região ativa, calculado a partir do ângulo do LUF.

4.3 Caracterização Granular

Os materiais utilizados foram grãos agrícolas (feijão, arroz e milho) e partículas esféricas (aço, BBS e vidro com diâmetros nominais de 5 mm e 2 mm), conforme ilustrado na Figura 19.

Figura 19 - Materiais granulares: (a) Feijão; (b) Arroz; (c) Milho; (d) Aço; (e) BBS; (f) Vidro 5 mm; (g) Vidro 2 mm.



Fonte: Autor, 2026.

Para caracterização granular das amostras, foi utilizado o método de picnometria líquida, utilizando glicerina, para determinação da densidade. O raio da partícula foi estimado usando a densidade determinada experimentalmente. O método laboratorial da picnometria teve por referência a norma ASTM D2320-98 (2022). Os valores de densidade dos materiais e diâmetro dos grãos foram calculados através das Equações 16 e 17.

$$\rho = \rho_r \times W \quad (16)$$

$$\bar{D} = \sqrt[3]{\frac{6\left(\frac{m/\rho}{n^\circ \text{ de grãos}}\right)}{\pi}} \quad (17)$$

Em que: $\bar{D}$ é o diâmetro médio em metros, m é a massa da amostra em gramas (aproximadamente 50 g), ρ é a densidade e ρ_r é a densidade relativa em relação a água, ambas em quilograma por metro cúbico.

Em relação a forma, a morfologia das partículas foi determinada utilizando o *software* ImageJ, a partir da análise de imagens de 30 partículas para cada material. Como a determinação da esfericidade tridimensional exige técnicas experimentais mais específicas, optou-se pelo uso de parâmetros bidimensionais, como a circularidade, que representa o quão próximo o formato da partícula está de um círculo perfeito (Ribeiro; Bonetti, 2013) (Figura 20).

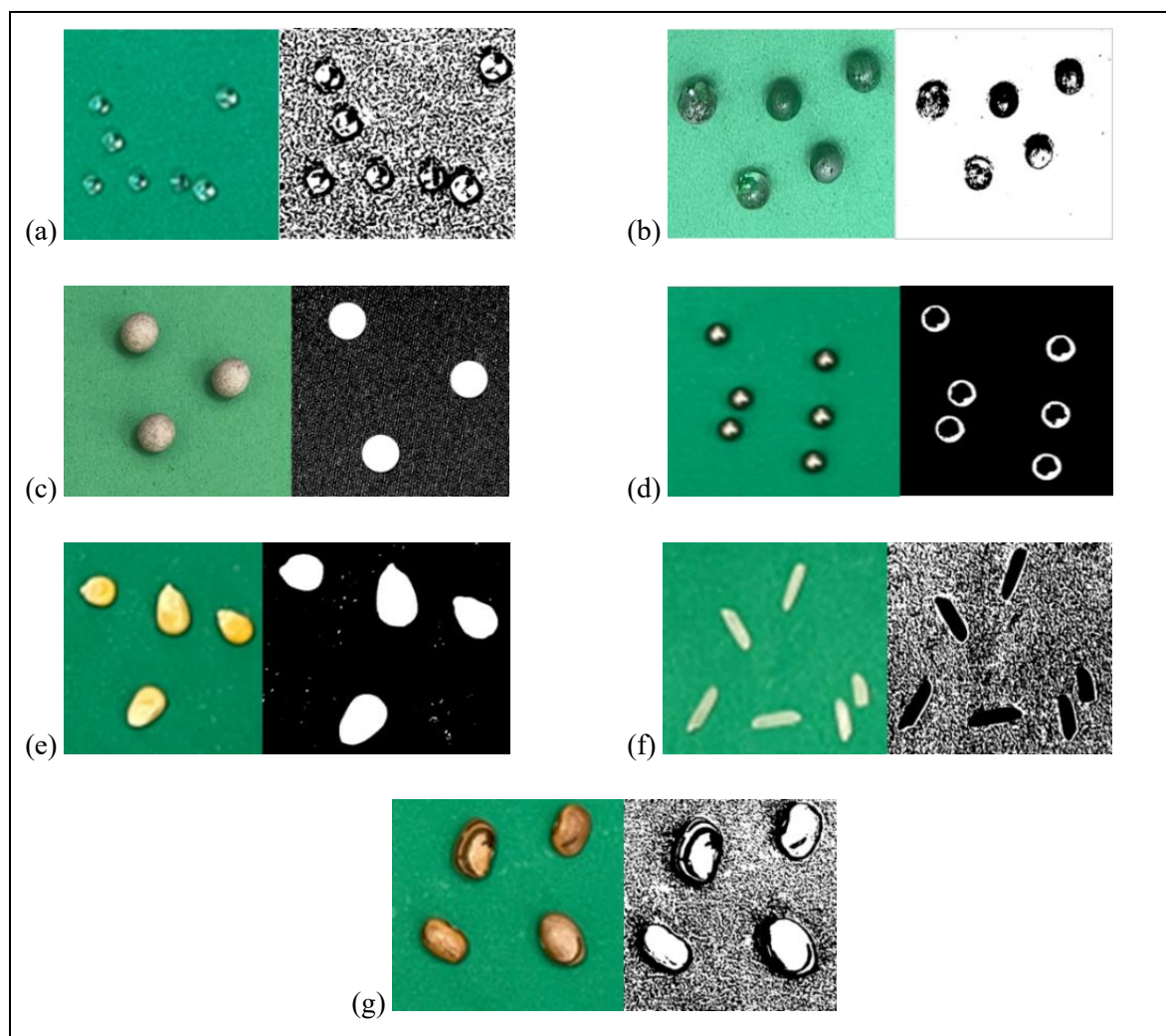
O processamento das imagens consistiu na seleção da área das partículas, permitindo o cálculo dos parâmetros morfológicos com base nas propriedades geométricas obtidas, sendo utilizadas as Equações 18 e 19 para a determinação da esfericidade (Φ) e da circularidade (CC), respectivamente (Ramos, 2022).

$$\Phi = \frac{1}{Al} \quad (18)$$

$$CC = \frac{4\pi A}{P^2} \quad (19)$$

Em que, Al é o alongamento que é igual a razão entre o eixo maior e o eixo menor da partícula, A área do objeto e P é o perímetro do objeto.

Figura 20 - Imagem original e imagem tratada pelo *software* ImageJ para cada tipo de material: (a) Esferas de vidro 2 mm; (b) Esferas de vidro 5 mm; (c) Esfera de BBS 6 mm; (d) Esfera de aço 6 mm; (e) Milho; (f) Arroz; (g) Feijão.



Fonte: Autor, 2026.

4.4 Simulações numéricas (DEM)

Para aprofundar a análise experimental e explorar com mais detalhes a dinâmica das partículas dentro do tambor rotatório, foram realizadas simulações numéricas utilizando o DEM no *software* de código aberto LIGGGHTS®. O modelo numérico desenvolvido pode ser considerado o *Digital Twin* do equipamento e do processo, permitindo uma simulação precisa do comportamento das partículas.

Foram considerados dois sistemas distintos:

- Tambor rotatório com suspensores, empregado na análise da dinâmica granular (*Digital Twin*) e do fenômeno de mistura;
- Tambor rotatório sem suspensores, utilizado exclusivamente para avaliação comparativa do fenômeno de mistura.

Essa abordagem permitiu isolar a influência geométrica dos suspensores sobre o comportamento do leito granular, mantendo constantes as condições operacionais e as propriedades físicas das partículas.

Para garantir a correspondência entre as condições experimentais e numéricas, o número de partículas (N_p) inseridas no modelo DEM foi determinado a partir do volume sólido equivalente ao grau de preenchimento experimental.

O volume individual de uma partícula esférica é dado por:

$$V_p = \frac{\pi}{6} D_p^3 \quad (20)$$

em que D_p é o diâmetro médio da partícula.

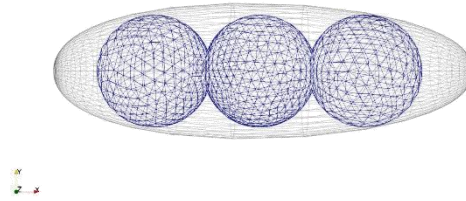
Assim, o número total de partículas inseridas por simulação, considerando $f = 15\%$, foi calculado por:

$$N_p = \frac{V_{\text{part}}}{V_p} = \frac{f \cdot V_T \cdot (1 - \varepsilon)}{\frac{\pi}{6} \cdot D_p^3} \quad (21)$$

Essa relação assegura que o volume sólido representado no modelo discreto seja equivalente ao volume sólido utilizado no experimento, mantendo a consistência entre as abordagens experimental e numérica.

Todas as amostras foram consideradas esféricas e assim aplicadas a simulação, exceto as partículas do arroz. Para a morfologia do arroz ser aplicada nas simulações se fez necessário o uso de *clump*, uma junção de partículas esféricas simulando o formato da partícula real. Neste caso, o *clump* foi construído com três esferas utilizando o *software* Onshape e a malha utilizando o *software* Gmsh (Figura 21).

Figura 21 - Imagem do *clump* simulando uma partícula de arroz.



Fonte: Autor, 2026.

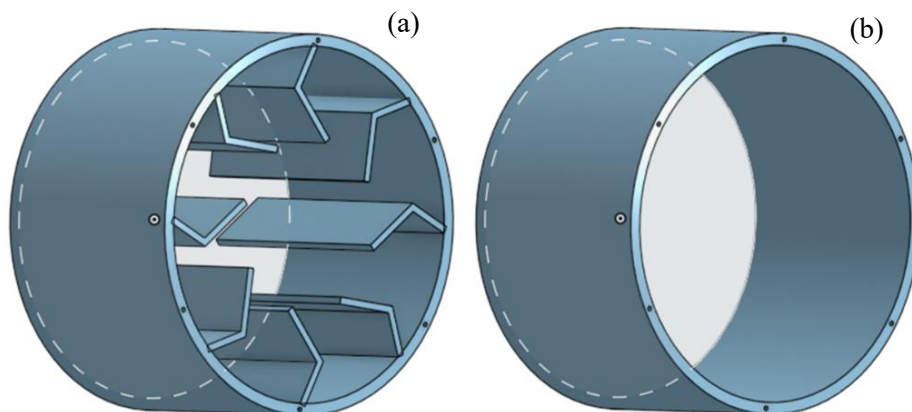
As dimensões do *clump* seguiu as da partícula, seu diâmetro e comprimento médio foram obtidos a partir de medições de uma quantidade de amostras utilizando paquímetro.

4.4.1 Modelagem geométrica

As geometrias dos tambores foram desenvolvidas no *software* Onshape, respeitando as dimensões do equipamento experimental, com e sem suspensores.

Para o tambor com suspensores, foram incorporadas as geometrias correspondentes às configurações definidas pelo PCC. Já o tambor sem suspensores foi mantida apenas a superfície cilíndrica interna, sendo empregado como sistema de referência na análise de mistura. As geometrias desenvolvidas estão ilustradas na Figura 22.

Figura 22 - Geometria dos tambores (a) com suspensores e (b) sem suspensores.



Fonte: Autor, 2026.

4.4.2 Condições de simulação

As condições geométricas e operacionais adotadas nas simulações estão apresentadas no Quadro 2.

Quadro 2 - Condições utilizadas para as simulações.

Condições geométricas do tambor	
Diâmetro do tambor d (m)	0,160
Comprimento L (m)	0,100
Parâmetros	
Módulo de Young - E (Pa)	$5 \cdot 10^6$
Razão de Poisson - ν ; partícula e parede	0,2 e 0,3
Tempo de simulação (s)	50
Número de células	1752
Grau de preenchimento - f (%)	15 e 30
Velocidade de rotação - ω (rad/s)	1,94
Modelo de contato	<i>Hertz-Mindlin</i>

Fonte: Autor, 2026.

Para a realização das simulações, foram empregados três scripts distintos (APÊNDICE C). O primeiro foi destinado à definição das variáveis e parâmetros físicos das partículas e do tambor; o segundo foi responsável pela inserção das partículas no interior do equipamento; e o terceiro foi utilizado para impor a rotação do tambor, incluindo as definições físicas previamente estabelecidas.

Ressalta-se que, para as simulações da dinâmica granular e do fenômeno de mistura, a estrutura dos scripts permaneceu a mesma, diferindo apenas quanto ao número de tipos de partículas inseridas e à geometria do tambor utilizada.

Para a análise da dinâmica granular (LUF, SH, MAP e DSH), foi utilizado grau de preenchimento de 15% e velocidade de rotação de 1,94 rad/s, reproduzindo as condições experimentais.

Para o estudo do fenômeno de mistura (Quadro 3), o grau de preenchimento foi de 30%, sendo 15% para cada tipo de partícula, mantendo-se a mesma velocidade de rotação. O tempo total de simulação foi de 50 s.

Quadro 3 - Combinações de partículas utilizadas na análise do fenômeno de mistura.

Análise do tamanho	Análise da densidade	Efeito concorrente	Efeito Associado
Vidro 2 mm + Vidro 5 mm	Aço 6 mm + BBS 6 mm	Vidro 2 mm + Aço 6 mm	Vidro 2 mm + BBS 6 mm

Fonte: Autor, 2026.

4.4.3 Modelo de contato e parâmetros de interação

A Tabela 3 apresenta os valores dos coeficientes de interação utilizados no modelo DEM, obtidos por Calheiros (2026) a partir de processo de calibração. Os coeficientes de restituição partícula-partícula (e_{pp}) e partícula-parede (e_{pw}) descrevem a fração de energia recuperada após colisões, caracterizando o grau de inelasticidade do material. Os coeficientes de atrito estático (μ_{spp} e μ_{spw}) representam a resistência inicial ao deslizamento, enquanto os coeficientes de atrito de rolamento (μ_{rpp} e μ_{rpw}) quantificam a resistência associada ao movimento rotacional relativo entre as superfícies. Esses parâmetros microscópicos são essenciais para a adequada reprodução do comportamento do leito granular.

Tabela 3 - Valores dos parâmetros de entrada DEM dos coeficientes de interação após calibração para cada amostra granular.

Variável	Valores Numéricos						
	Vidro 2	Vidro 5	ABS	Aço	Milho	Arroz	Feijão
e_{pp} (-)	0,51	0,52	0,54	0,52	0,53	0,52	0,52
e_{pw} (-)	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
μ_{spp} (-)	0,87	0,92	1,63	0,32	0,65	0,27	0,39
μ_{spw} (-)	1,16	0,58	0,89	1,44	1,03	1,64	1,08
μ_{rpp} (-)	0,07	0,05	0,03	0,05	0,07	0,06	0,09
μ_{rpw} (-)	0,06	0,02	0,07	0,02	0,06	0,08	0,04

Fonte: Calheiros, 2026.

4.4.4 Pós-processamento e análise dos dados

Após a execução das simulações no LIGGGHTS®, os resultados foram visualizados e tratados no *ParaView* e exportados em formato *.csv* para cada passo de tempo (para o *DT*).

O tratamento dos dados foi realizado por meio de *script* desenvolvido em *Python*, utilizando bibliotecas *NumPy*, *Pandas* e *Matplotlib* (para a análise de mistura). O pós-processamento permitiu:

- Análise das variáveis-resposta (PCC);
- Determinação do Índice de Mistura (IM).

4.5 Determinação das variáveis-resposta (LUF, SH, MAP e DSH) e IM

Para quantificar a concordância entre os resultados experimentais e numéricos, em relação às variáveis-resposta, foi calculado o erro absoluto, dado pela seguinte Equação 22:

$$\text{Erro} = |x_{exp} - x_{num}| \quad (22)$$

Em que, x_{exp} representa o valor obtido pelo equipamento e x_{num} o valor obtido pela simulação. Essa métrica permite avaliar o desvio entre os dados, facilitando a análise da precisão do modelo.

4.5.1. Procedimento experimental

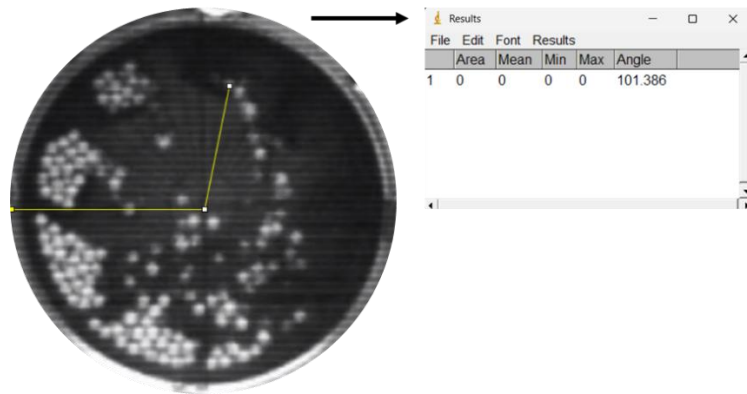
A determinação experimental do LUF, SH, MAP e DSH foi realizada por meio de análise de imagens obtidas a partir das filmagens com câmera de alta velocidade.

Os frames extraídos das filmagens foram analisados no *software* ImageJ, permitindo:

- I. Identificar o instante em que o suspensor se encontra completamente vazio (determinação do LUF);

A mensuração do ângulo foi realizada por meio da ferramenta *Angle Tool*, na qual os segmentos formadores do ângulo correspondente ao LUF foram selecionados manualmente, sendo o valor automaticamente registrado na aba *Results*, conforme ilustrado na Figura 23.

Figura 23 - Determinação do ângulo correspondente ao LUF por meio de medição angular em frame experimental.

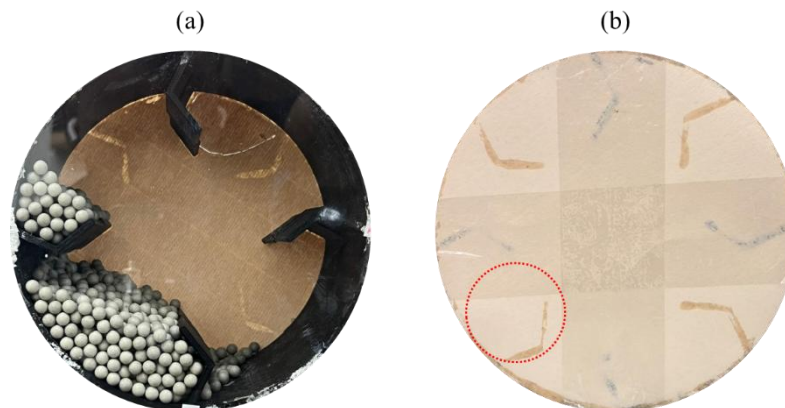


Fonte: Autor, 2026.

- II. Determinar o instante de desprendimento da primeira partícula, utilizado para cálculo da massa de sólidos retida no suspensor (SH);

Para a quantificação do SH, realizou-se uma calibração indireta entre a massa e a área projetada das partículas. Para isso, introduziu-se uma fração correspondente a 15% da massa total de partículas no interior do suspensor, o qual foi vedado em uma de suas faces com uma placa de vidro transparente, permitindo a visualização e o registro fotográfico. Na face oposta, fixou-se papel cartão, com a finalidade de viabilizar a coleta do material, conforme ilustrado na Figura 24.

Figura 24 - Representação do aparato experimental utilizado na calibração massa $\times$ área. (a) Face transparente do suspensor, utilizada para aquisição das imagens das partículas. (b) Face opaca revestida com papel cartão, utilizada para coleta da massa após o ensaio.



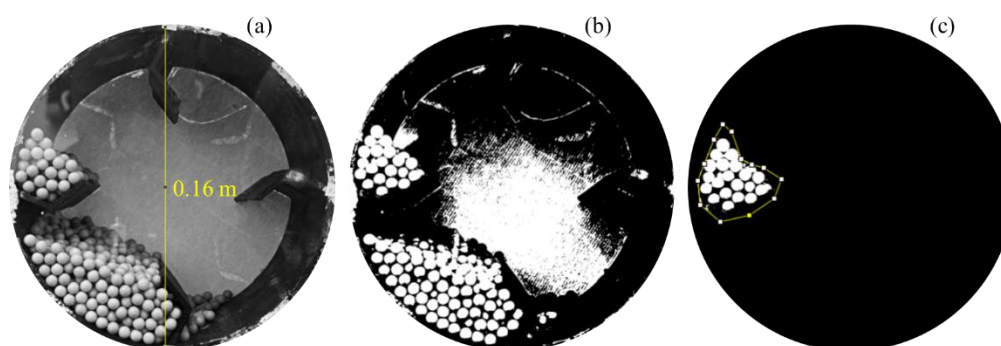
O destaque em vermelho indica a região de corte utilizada para auxiliar na coleta da massa de partículas aderidas à superfície.

Fonte: Autor, 2026.

Em seguida, o suspensor foi rotacionado até o instante de desprendimento da primeira partícula, momento em que foi capturada uma imagem da face transparente. Posteriormente, a massa remanescente foi coletada pela face contendo o papel cartão, com auxílio de um estilete, por meio de um corte controlado na superfície, garantindo a remoção completa do material. Todo o procedimento foi realizado em triplicata, a fim de assegurar a reprodutibilidade dos resultados. Ressalta-se que esse procedimento experimental foi repetido para os sete tipos de partículas avaliados neste estudo.

As imagens obtidas foram processadas no *software* ImageJ®, com o objetivo de determinar a área ocupada pelas partículas no interior do suspensor. Inicialmente, realizou-se a calibração espacial da imagem a partir de uma dimensão conhecida do sistema (diâmetro interno do suspensor de 0,16 m), permitindo a conversão de pixels em unidades métricas. Em seguida, as imagens foram convertidas para escala de cinza e submetidas à binarização por limiarização (*thresholding*), a fim de segmentar as partículas do fundo. Posteriormente, definiu-se a região de interesse (ROI) por meio da ferramenta de seleção poligonal, delimitando a área ocupada pelas partículas, conforme ilustrado na Figura 25, a partir da qual foi determinada a área ocupada pelas partículas.

Figura 25 - Sequência de processamento de imagem no ImageJ®: (a) imagem original com calibração espacial; (b) imagem binarizada por limiarização; (c) definição da região de interesse (ROI) para cálculo da área das partículas.



Fonte: Autor, 2026.

Com base nesses dados, foram construídos gráficos relacionando a área projetada com a massa correspondente, permitindo a obtenção da curva de calibração. Dessa forma, a equação linear obtida na etapa de calibração foi utilizada como modelo de predição, permitindo a determinação da massa de sólidos no suspensor a partir da área projetada ocupada pelas

partículas. As curvas de calibração obtidas para cada material, bem como os dados experimentais utilizados, estão apresentadas no APÊNDICE E .

- III. Avaliar a massa de partículas presente na região ativa (**MAP**) no ângulo correspondente ao LUF.

A massa de partículas presente na região ativa foi determinada a partir das curvas de calibração obtidas para o SH. Inicialmente, utilizando o *software* ImageJ®, foram delimitadas as áreas ocupadas pelas partículas em cada suspensor que continha material no instante correspondente ao ângulo de LUF, caracterizando a região passiva do tambor.

A partir dessas áreas, e utilizando a equação de calibração massa $\times$ área previamente estabelecida para um suspensor, foi possível estimar a massa de sólidos retida em cada suspensor individualmente. Em seguida, a massa total retida nos suspensores (SH_{total}) foi obtida pelo somatório das contribuições individuais, conforme:

$$SH_{total} = \sum_{i=1}^n SH_i \quad (23)$$

onde n corresponde ao número de suspensores contendo partículas.

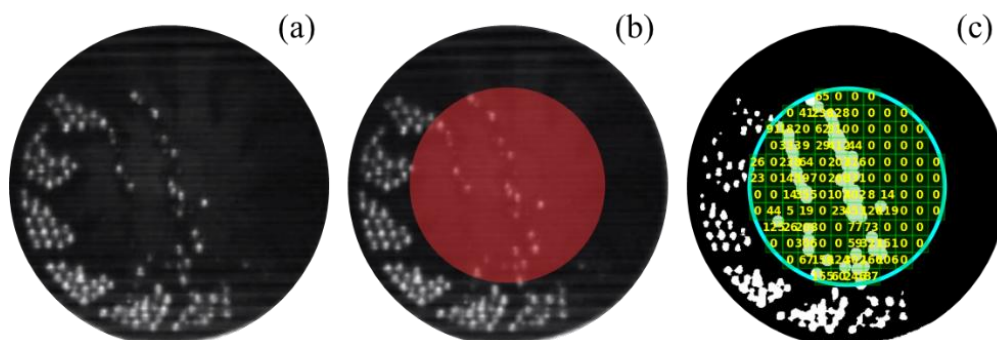
Por fim, conhecendo-se a massa total de partículas no tambor para cada condição experimental, a massa correspondente à região ativa foi determinada por diferença:

$$MAP = M_{total} - SH_{total} \quad (24)$$

- IV. Avaliar a dispersão de partículas na região ativa (DSH) no ângulo correspondente ao LUF.

Para o cálculo do DSH, os frames correspondentes ao ângulo do LUF (Figura 26 (a)) foram exportados e tratados, no qual foi delimitada a área da região ativa (Figura 26 (b)). Posteriormente, as imagens foram processadas por meio de código desenvolvido em *Python*, responsável pela quantificação da dispersão das partículas na região ativa (Figura 26 (c)). O *script* desenvolvido para o processamento das imagens e cálculo do DSH está disponibilizado no APÊNDICE B.

Figura 26 – Sequência de processamento para cálculo do DSH, incluindo imagem original (a), delimitação da região ativa (b) e resultado da análise espacial da dispersão (c).



Fonte: Autor, 2026.

V. Avaliar o índice de mistura (IM)

No presente estudo, o índice de mistura não foi determinado por via experimental, em razão das limitações associadas à técnica de aquisição de dados empregada. As filmagens realizadas durante os ensaios registram apenas uma única face do equipamento, o que restringe a visualização do escoamento e da distribuição espacial das partículas no interior do tambor.

Dessa forma, a ausência de informações volumétricas e da dinâmica interna do leito granular inviabiliza a quantificação adequada do grau de mistura, uma vez que a avaliação do índice de mistura requer a análise da distribuição espacial das partículas em todo o volume do sistema, o que não pode ser inferido de maneira representativa a partir de imagens bidimensionais de uma única face.

Assim, o índice de mistura foi avaliado exclusivamente por meio de abordagem numérica, utilizando o Método dos Elementos Discretos (DEM), que possibilita o acesso à informação tridimensional das partículas (Tópico a seguir).

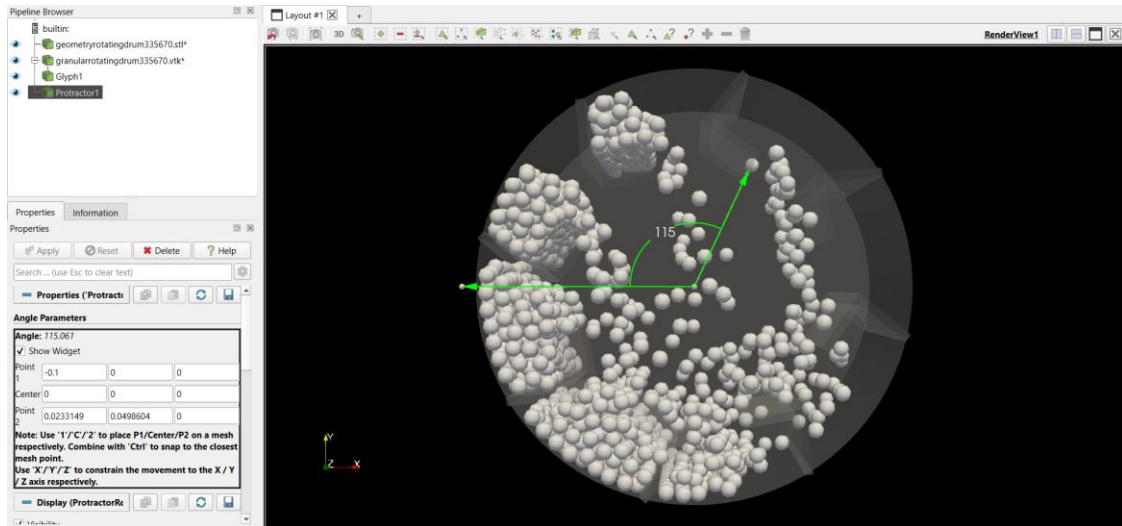
4.5.2. Procedimento numérico

No caso das simulações, as imagens foram obtidas no *software* ParaView 6.0.1. A partir dessas imagens:

- I. O LUF foi determinado por análise visual da última descarga;

A mensuração do ângulo foi realizada por meio da ferramenta *Protractor*. Os segmentos formadores do LUF foram ajustados manualmente, sendo o valor obtido registrado na aba *Properties*, em *Angle Parameters*, conforme ilustrado na Figura 27.

Figura 27 - Determinação do ângulo correspondente ao LUF por meio de medição angular no *software ParaView*.

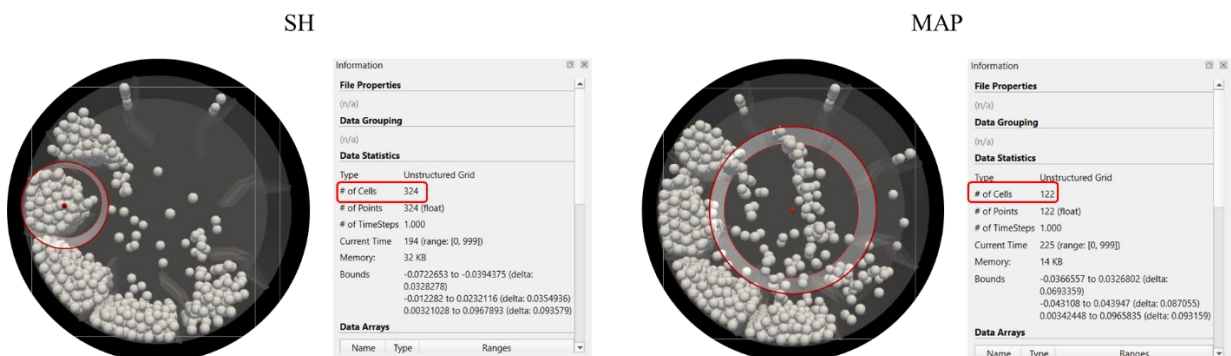


Fonte: Autor, 2026.

II. SH e MAP

Para a determinação do SH e do MAP por abordagem numérica, inicialmente foi delimitada a região contendo partículas nas imagens do sistema, a partir da qual foi obtido o número de partículas presentes em cada região de interesse, conforme ilustrado na Figura 28.

Figura 28 - Delimitação das regiões de interesse e contagem de partículas para determinação do SH e MAP no modelo numérico.



Fonte: Autor, 2026.

Com base no número de partículas identificado, a massa de sólidos foi calculada considerando a densidade do material e o volume individual das partículas. Assim, a massa total foi determinada pela Equação 25.

$$m = \rho_p \cdot V_p \cdot N_p \quad (25)$$

em que ρ_p é a densidade da partícula (kg/m^3), V_p é o volume de uma partícula (m^3) e N_p é o número de partículas.

III. DSH

As imagens exportadas foram processadas por meio do mesmo código desenvolvido em *Python* utilizado na análise experimental para a determinação do DSH, seguindo a mesma sequência metodológica ilustrada na Figura 26 (b) e (c).

IV. IM

Para a determinação do índice de mistura, foram inicialmente exportados, a partir do *software* ParaView, arquivos no formato *.csv* contendo as coordenadas espaciais de cada partícula ao longo do tempo de simulação.

Em seguida, esses dados foram processados por meio de um código desenvolvido em *Python*, responsável por quantificar o grau de mistura do sistema com base na distribuição espacial das partículas. O procedimento consistiu na análise da dispersão das diferentes espécies de partículas ao longo do domínio, permitindo a avaliação da evolução temporal da mistura.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização granular

A caracterização granular das amostras foi realizada para determinar as propriedades físicas das partículas utilizadas nos experimentos. O método de picnometria líquida foi utilizado para a determinação da densidade das partículas, enquanto o diâmetro foi estimado com base nos valores obtidos experimentalmente e na densidade relativa (ρ_r) calculada para cada tipo de material.

A Tabela 4 apresenta os valores de diâmetro médio e densidade das partículas utilizadas nas simulações e experimentos.

Tabela 4 - Propriedades físicas dos materiais granulares.

Material	Diâmetro (mm)	Densidade (kg/m³)	Circularidade
(a) Vidro 2mm	2,70±0,01	2.257,91±0,01	0,82 ± 0,03
(b) Vidro 5mm	4,76±0,01	2.250,46±0,01	0,84 ± 0,04
(c) ABS 6mm	6,10±0,01	2.099,38±0,01	0,99 ± 0,01
(d) Aço 6 mm	6,60±0,04	5.858,55±0,09	0,89 ± 0,05
(e) Milho	6,47±0,01	1.222,82±0,01	0,75 ± 0,14
(f) Arroz	2,88±0,01	1.323,90±0,01	0,36 ± 0,15
(g) Feijão	7,13±0,03	1.165,42±0,01	0,60 ± 0,07

Fonte: Autor, 2026.

5.2 Massa correspondente ao grau de preenchimento e número de partículas

Considerando o grau de preenchimento fixo de 15%, o volume sólido total ocupado pelas partículas foi de 0,000190 m³. A partir desse volume e da densidade de cada material granular, foi determinada a massa experimental inserida no tambor rotatório. De forma consistente, o número de partículas (N_p) adotado no modelo DEM foi calculado com base no mesmo volume sólido, garantindo a equivalência entre as condições experimental e numérica.

Os valores correspondentes de massa e número de partículas para cada material são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Massa e Número de Partículas correspondente ao preenchimento de 15%.

Material	Massa (kg)	Massa (g)	N_p (-)
(a) Vidro 2 mm	0,430	429,7	18387
(b) Vidro 5 mm	0,428	428,3	3375
(c) Aço	1,114	1114,0	1284
(d) BBS	0,400	399,5	1595
(e) Milho	0,233	251,9	1340
(f) Arroz	0,252	232,7	15093
(g) Feijão	0,222	221,7	1006

Fonte: Autor, 2026.

Observa-se que a massa inserida no tambor varia proporcionalmente à densidade do material granular, uma vez que o volume sólido foi mantido constante para todas as condições. Assim, materiais de maior densidade, como o aço, resultaram em maior massa total inserida, enquanto materiais orgânicos, como feijão, arroz e milho, apresentaram massas inferiores.

Essa diferença de massa, embora mantido o grau de preenchimento, pode influenciar a dinâmica granular devido às variações na inércia individual das partículas e, consequentemente, no momento linear associado ao seu movimento e na intensidade das colisões no interior do tambor (Duran, 2000; Taberlet *et al.*, 2006).

Observa-se também que, embora o volume de sólido tenha sido mantido constante, o número de partículas variou significativamente entre os materiais, sendo fortemente dependente do diâmetro médio das partículas, uma vez que o volume de uma partícula esférica é proporcional ao cubo do seu diâmetro, implicando que $N_p \propto D_p^{-3}$ (Rhodes & Seville, 2024). Assim, materiais com menor diâmetro resultaram em maior número de elementos discretos na simulação, enquanto partículas de maior diâmetro demandaram menor quantidade de partículas para representar o mesmo volume de sólido.

Essa variação impacta diretamente o custo computacional das simulações DEM, uma vez que o número total de contatos e interações cresce com o aumento do número de partículas (Zhu *et al.*, 2008).

5.3 Análise das configurações dos suspensores e seus impactos na dinâmica granular na região ativa

Este tópico explora os efeitos das variações nos parâmetros N , α_1 , α_2 , l_1 e l_2 sobre os sete tipos de partículas em relação ao ponto central (ver PCC).

Para os seguintes resultados dos ensaios experimentais e simulações numéricas, o grau de preenchimento do tambor (f) foi de 15% para cada partícula e a velocidade de rotação foi de 1,94 rad/s.

5.3.1 Avaliação da influência de N (nº de *flights*)

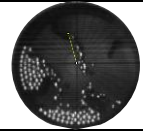
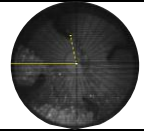
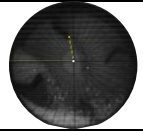
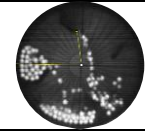
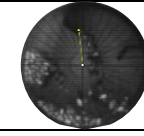
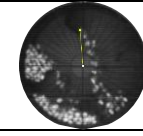
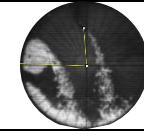
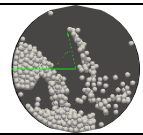
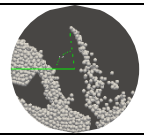
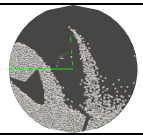
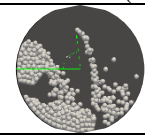
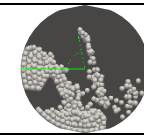
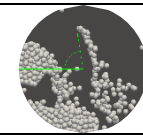
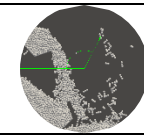
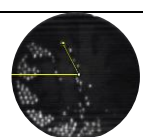
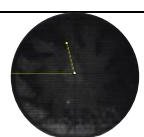
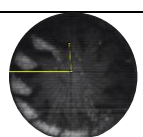
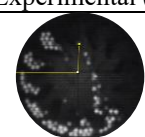
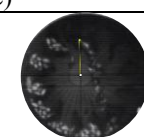
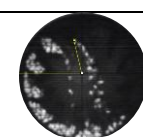
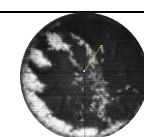
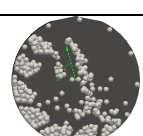
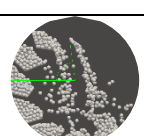
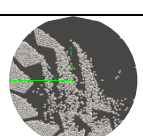
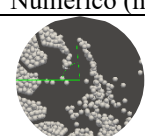
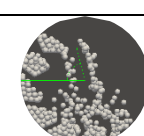
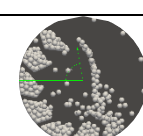
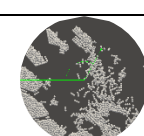
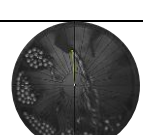
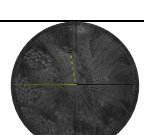
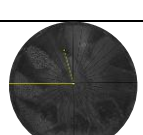
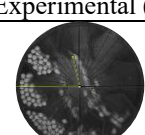
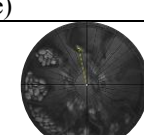
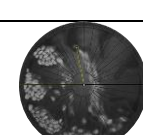
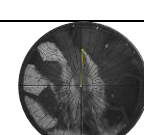
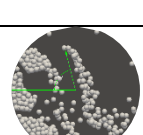
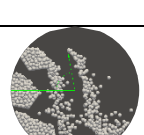
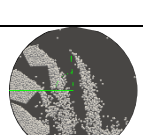
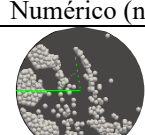
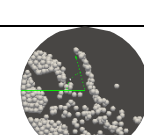
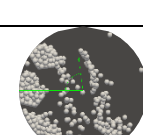
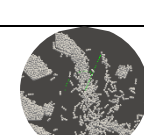
Last Unloading Flight

A influência da quantidade de suspensores na dinâmica de descarga e distribuição de sólidos pode ser observada na Tabela 6, na qual são apresentados os resultados experimentais e numéricos do ângulo de última descarga, juntamente com as imagens correspondentes a cada condição avaliada. A Tabela 7 apresenta os erros absolutos associados ao LUF.

Observa-se que o número de suspensores presentes na casca cilíndrica do tambor influencia diretamente o tipo de carregamento. Analisando o tipo de carregamento, observa-se que para essa carga de sólidos, a maioria das condições estão no carregamento ideal para 8 suspensores. Essa condição é caracterizada pelo início da descarga na posição horizontal do tambor, indicando que os suspensores operam com sua capacidade máxima de retenção, sem ocorrência de descarregamento prematuro. Nessas condições, há maior formação do véu granular e melhor distribuição de partículas na região ativa, favorecendo os processos de transferência de calor e/ou massa. Quando se opera com 4 suspensores, há um excesso de material e o tambor está sobrecarregado e com 12 suspensores esta carga de sólidos deixa o tambor subcarregado. Consequentemente, espera-se que com 8 suspensores haja uma maximização de quantidade de material particulado na região ativa do tambor.

A análise do erro absoluto (Tabela 7) mostra que a maioria dos materiais apresentou desvios inferiores a 10°, mostrando assim, boa representação numérica, com exceção do arroz, que apresentou erros acima de 30°.

Tabela 6 - Variação do número de *flights* (N) em relação ao ponto central.

N (-)	Suspensor N° 17 F4-115-115-0,13-0,13						
	Aço 6 mm	Vidro 5 mm	Vidro 2 mm	BBS 6 mm	Feijão	Milho	Arroz
4	Experimental (e)						
							
	Numérico (n)						
							
LUF _e =	81,0°	77,8°	79,5°	80,7°	83,7°	85,3°	83,1°
LUF _n =	77,0°	82,6°	85,5°	83,4°	78,5°	81,8°	117,0°
N (-)	Suspensor N° 18 - F12-115-115-0,13-0,13						
	Aço 6 mm	Vidro 5 mm	Vidro 2 mm	BBS 6 mm	Feijão	Milho	Arroz
12	Experimental (e)						
							
	Numérico (n)						
							
LUF _e =	66,8°	76,2°	86,2°	91,8°	87,7°	77,1°	96,9°
LUF _n =	74,6°	82,4°	86,3°	84,7°	75,8°	79,9°	118,4°
N (-)	Suspensor N° 27 *F8-115-115-0,13-0,13						
	Aço 6 mm	Vidro 5 mm	Vidro 2 mm	BBS 6 mm	Feijão	Milho	Arroz
8*	Experimental (e)						
							
	Numérico (n)						
							
LUF _e =	79,4°	72,6°	79,7°	84,6°	79,7°	90,0°	92,8°
LUF _n =	75,8°	79,4°	85,9°	81,3°	75,1°	82,4°	113,4°

*PC

Fonte: Autor, 2026.

Tabela 7 - Erro absoluto (°) entre resultados do LUF experimentais e numéricos para as configurações avaliadas (variando N).

Suspensor	Vidro 2 mm	Vidro 5 mm	Aço 6 mm	BBS 6 mm	Feijão	Milho	Arroz
Nº 17	6,00	4,80	4,00	2,70	5,20	3,50	33,90
Nº 18	0,10	6,20	7,80	7,10	11,90	2,80	21,50
Nº 27*	6,20	6,80	3,60	3,30	4,60	7,60	20,60

*PC

Fonte: Autor, 2026.

De modo geral, observa-se que o ângulo de última descarga permanece dentro de uma faixa angular característica do sistema, apresentando variações entre as diferentes condições operacionais. Esse comportamento indica que, embora o número de suspensores influencie a dinâmica de escoamento, o descarregamento completo ocorre em intervalos angulares próximos, e não em um valor único fixo. Nascimento *et al.* (2015) observou que a descarga de sólidos ocorre quando a massa de sólidos para uma determinada posição angular é saturada. Essa saturação relaciona-se com o formato do suspensor, velocidade do tambor e os coeficientes de atrito do material. Nesse sentido, embora o número de suspensores influencie a dinâmica de escoamento e a distribuição de sólidos, o descarregamento tende a ocorrer dentro de uma faixa angular semelhante, especialmente quando mantidas constantes as características geométricas do suspensor e as condições operacionais.

A dinâmica de descarga observada por meio do LUF está diretamente relacionada à quantidade de sólidos retida nos suspensores ao longo da rotação, sendo essa retenção avaliada por meio do parâmetro SH.

Solids Holdup

Os valores de SH são apresentados na Tabela 8. Para a configuração com 4 suspensores, todos os resultados experimentais foram classificados como indeterminados, devido à condição de sobrecarregamento dos sistemas, no qual a elevada quantidade de sólidos por suspensor inviabilizou a determinação da massa retida. Nessa condição, a formação de um leito contínuo e a sobreposição de partículas comprometem a definição do momento em que ocorre o

desprendimento da primeira partícula, inviabilizando a aplicação do critério adotado para a determinação da massa retida.

Tabela 8 – Massa de sólidos no suspensor (SH) e erro absoluto.

Material	Suspensor N° 17			Suspensor N° 18			Suspensor N° 27		
	F4-115-115-0,13-0,13			F12-115-115-0,13-0,13			*F8-115-115-0,13-0,13		
	e (g)	n (g)	erro (g)	e (g)	n (g)	erro (g)	e (g)	n (g)	erro (g)
Vidro 2 mm	<i>i</i>	<i>i</i>	-	46,72	28,65	18,07	71,34	49,38	21,96
Vidro 5 mm	<i>i</i>	<i>i</i>	-	80,16	78,09	02,07	109,45	140,36	30,91
Aço 6 mm	<i>i</i>	<i>i</i>	-	265,08	253,07	12,01	263,4	259,29	04,11
BBS 6 mm	<i>i</i>	<i>i</i>	-	45,1	47,17	02,07	88,9	97,38	08,48
Feijão	<i>i</i>	<i>i</i>	-	39,41	40,66	01,25	57,29	55,33	01,96
Milho	<i>i</i>	<i>i</i>	-	26,71	37,36	10,65	40,39	48,44	08,05
Arroz	<i>i</i>	<i>i</i>	-	24,22	20,55	03,67	33,63	23,77	09,86
Experimental (e) Numérico (n) Indeterminado (i) *PC									

Fonte: Autor, 2026.

Com o aumento do número de suspensores, observa-se redução da massa transportada por suspensor, indicando redistribuição da carga ao longo do tambor. Esse comportamento ocorre porque a mesma quantidade total de sólidos passa a ser dividida entre um maior número de suspensores, reduzindo a quantidade de material acumulado em cada um. Como consequência, há menor volume de sólidos retido por suspensor e menor massa transportada.

A massa de sólidos retida nos suspensores influencia diretamente a quantidade de material que é lançada na região ativa, bem como a forma como essas partículas se distribuem após a descarga, sendo esses efeitos avaliados por meio da massa na fase ativa (MAP) e da dispersão das partículas (DSH).

Mass in the Active Phase e Dispersion Heterogeneity Solids

Os valores de MAP são apresentados na Tabela 9, sendo obtidos exclusivamente por simulação numérica.

Tabela 9 – Massa de sólidos na região ativa (MAP) numérica.

	Suspensor N° 17	Suspensor N° 18	Suspensor N° 27*
Material	F4-115-115-0,13-0,13	F12-115-115-0,13-0,13	*F8-115-115-0,13-0,13
	(g)	(g)	(g)
Vidro 2 mm	11,64	10,12	11,71
Vidro 5 mm	44,53	31,94	34,69
Aço 6 mm	126,09	76,37	86,13
BBS 6 mm	40,07	23,08	24,60
Feijão	23,92	11,80	17,86
Milho	19,64	15,21	12,85
Arroz	6,34	6,24	4,19
*PC			

Fonte: Autor, 2026.

A maior massa de partículas na região ativa (MAP) observada para menores valores de N está associada ao aumento da carga transportada por suspensor, o que resulta em descargas mais intensas e maior quantidade de material na região ativa. À medida que o número de suspensores aumenta, essa carga é dividida entre mais unidades, reduzindo a massa descarregada individualmente e, conseqüentemente, os valores de MAP.

Em relação ao tamanho das partículas, o vidro 5 mm apresentou maiores valores de MAP devido ao maior volume individual das partículas, o que favorece o transporte de maior massa por evento. Para materiais com mesmo diâmetro, o aço apresentou valores superiores aos do BBS em função de sua maior densidade, resultando em maior massa transportada. Já entre os materiais irregulares, o feijão apresentou maiores valores de MAP, enquanto o arroz apresentou os menores, comportamento associado à geometria das partículas (circularidade), que influencia diretamente a mobilidade e a forma como o material é lançado na região ativa.

A dispersão das partículas na região ativa (DSH) foi avaliada por meio do coeficiente de variação (CoV), o qual permite quantificar o grau de heterogeneidade na distribuição espacial das partículas. Valores mais elevados de CoV indicam maior variabilidade na distribuição, enquanto valores menores estão associados a uma distribuição mais homogênea. Dessa forma, o DSH foi utilizado como parâmetro para analisar a uniformidade da dispersão das partículas na região ativa do tambor.

Os valores de CoV são apresentados na Tabela 10. Para os materiais de vidro, os resultados experimentais foram classificados como indeterminados, uma vez que a qualidade

das imagens não permitiu a identificação adequada da região ativa, impossibilitando a quantificação do CoV.

Tabela 10 – Coeficiente de Variação (CoV) em % e Erro absoluto.

Material	Suspensor N° 17			Suspensor N° 18			Suspensor N° 27		
	F4-115-115-0,13-0,13			F12-115-115-0,13-0,13			*F8-115-115-0,13-0,13		
	e	n	erro	e	n	erro	e	n	erro
Vidro 2 mm	<i>i</i>	127,7	-	<i>i</i>	65,6	-	<i>i</i>	76,7	-
Vidro 5 mm	<i>i</i>	119,9	-	<i>i</i>	106,2	-	<i>i</i>	87,3	-
Aço 6 mm	118,4	114,6	3,80	109,2	101,1	8,10	116,7	112,9	3,80
BBS 6 mm	119,1	119,3	0,2	112,4	113,4	1	103,6	108,4	4,8
Feijão	137,1	133,8	3,3	117,2	116,1	1,1	112,3	116,4	4,1
Milho	113,7	114,4	0,7	116,1	111,1	5	106,5	108,6	2,1
Arroz	124,1	122,9	1,2	124	107,9	16,1	89,3	88,3	1

Experimental (e) | Numérico (n) | Indeterminado (i) |*PC

Fonte: Autor, 2026.

Para os demais materiais, observa-se que os valores de CoV se mantiveram em uma faixa próxima entre as diferentes configurações, indicando que a variação do número de suspensores não promove alterações significativas na dispersão das partículas. Esse comportamento ocorre porque, embora o aumento de N altere a quantidade de material transportado por suspensor, ele não modifica de forma relevante o mecanismo de lançamento das partículas na região ativa. Com mais suspensores, há maior frequência de descarga (ou seja, maior formação de cortinas e distribuição de partículas no leito granular), porém com menor massa por evento; com menos suspensores, ocorre o oposto. Esse efeito compensatório faz com que o padrão de distribuição espacial das partículas permaneça semelhante, resultando em valores de CoV próximos.

Se o leito estivesse sobrecarregado em todas as condições, quanto maior o número de suspensores, maior seria a massa de sólidos distribuída na região ativa, pois mais cortinas seriam formadas (como observado para 4 e 8 suspensores). Mas, a condição de subcarregamento fez com que houvesse uma diminuição na quantidade de sólidos na região ativa, uma vez que as cortinas só serão formadas em posições angulares mais altas.

5.3.2 Avaliação da influência de α_1 (ângulo entre o suspensor e a superfície interna do tambor)

Last Unloading Flight

A influência do ângulo α_1 na dinâmica de descarga e distribuição de sólidos pode ser observada na Tabela 11, na qual são apresentados os resultados experimentais e numéricos do ângulo de última descarga, juntamente com as imagens correspondentes a cada condição avaliada. A Tabela 12 apresenta os erros absolutos associados ao LUF.

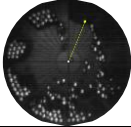
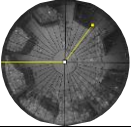
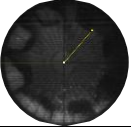
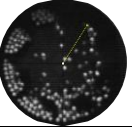
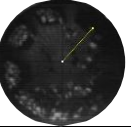
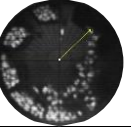
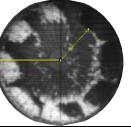
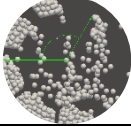
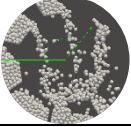
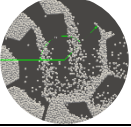
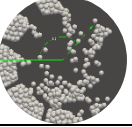
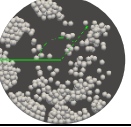
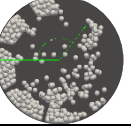
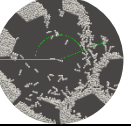
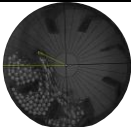
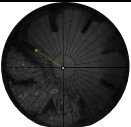
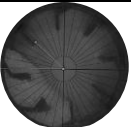
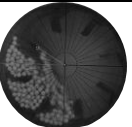
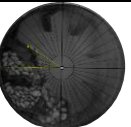
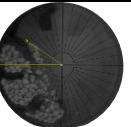
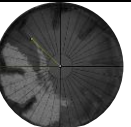
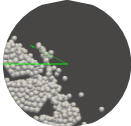
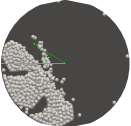
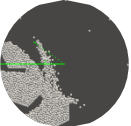
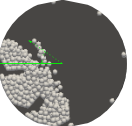
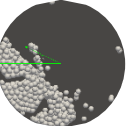
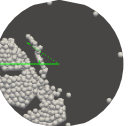
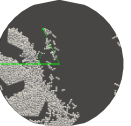
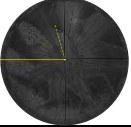
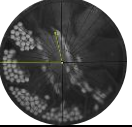
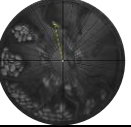
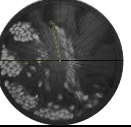
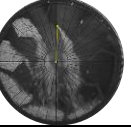
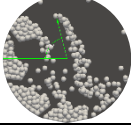
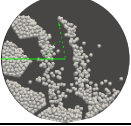
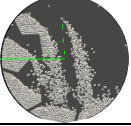
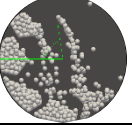
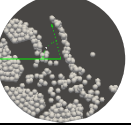
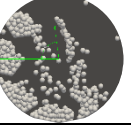
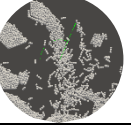
Observa-se que a variação de α_1 influencia diretamente a retenção de sólidos no suspensor e, conseqüentemente, o momento em que ocorre o descarregamento completo.

Para menores valores de α_1 , o suspensor apresenta uma geometria mais fechada, favorecendo o acúmulo de material e dificultando o escoamento, resultando em maiores valores de LUF e ocasionando o subcarregamento do equipamento. À medida que α_1 aumenta, ocorre uma ampliação da abertura geométrica do suspensor, resultando em menor confinamento das partículas. Como consequência, há redução da retenção de sólidos e antecipação da descarga, caracterizando uma condição de sobrecarregamento. Isto acontece porque maiores valores de α_1 diminuem a capacidade de carregamento dos suspensores. Resultados também observados por Lominé *et al.*, 2022.

Quando o ângulo α_1 é menor, a superfície de contato entre o suspensor e o material granular é maior, permitindo que o suspensor transporte mais partículas para a região superior do tambor, resultando em um maior potencial de aproveitamento da região ativa. À medida que o ângulo aumenta, a área de contato diminui, e o suspensor torna-se menos eficiente no transporte do material. Como consequência, ocorre o sobrecarregamento, pois o suspensor não consegue carregar todo o material granular até a região ativa e começa a descarregar as partículas antes do ângulo de 0° , o que pode comprometer a eficiência de um processo de mistura, por exemplo.

Com o aumento do ângulo α_1 , observa-se uma redução significativa no LUF dos suspensores, uma vez que o descarregamento é facilitado. Para o ângulo de 85° observou-se que o material é distribuído de maneira mais uniforme entre 0 e 110° . Para o ângulo de 145° a descarga completa ocorre em posições angulares muito baixas, com pouco aproveitamento da região ativa.

Tabela 11 - Variação do α_1 em relação ao ponto central.

α_1 (°)	Suspensor N° 19 F8-85-115-0,13-0,13						
	Aço 6 mm	Vidro 5 mm	Vidro 2 mm	BBS 6 mm	Feijão	Milho	Arroz
85	Experimental (e)						
							
	Numérico (n)						
							
LUF _e =	112,3°	126,7°	128,3°	122,3°	131,5°	134,1°	129,2°
LUF _n =	120,0°	128,9°	134,2°	131,6°	128,0°	128,0°	159,2°
α_1 (°)	Suspensor N° 20 F8-145-115-0,13-0,13						
	Aço 6 mm	Vidro 5 mm	Vidro 2 mm	BBS 6 mm	Feijão	Milho	Arroz
145	Experimental (e)						
							
	Numérico (n)						
							
LUF _e =	22,1°	18,1°	29,8°	33,6°	30,8°	33,7°	40,9°
LUF _n =	26,7°	32,2°	35,4°	34,1°	25,2°	33,4°	64,7°
α_1 (°)	Suspensor N° 27 *F8-115-115-0,13-0,13						
	Aço 6 mm	Vidro 5 mm	Vidro 2 mm	BBS 6 mm	Feijão	Milho	Arroz
115*	Experimental (e)						
							
	Numérico (n)						
							
LUF _e =	79,4°	72,6°	79,7°	84,6°	79,7°	90,0°	92,8°
LUF _n =	75,8°	79,4°	85,9°	81,3°	75,1°	82,4°	113,4°

*PC

Fonte: Autor, 2026.

Tabela 12 - Erro absoluto ($^{\circ}$) entre resultados do LUF experimentais e numéricos para as configurações avaliadas (variando (α_1)).

Suspensor	Vidro 2 mm	Vidro 5 mm	Aço 6 mm	BBS 6 mm	Feijão	Milho	Arroz
Nº 19	7,7	2,2	5,9	9,3	3,5	6,1	30
Nº 20	4,6	14,1	5,6	0,5	5,6	0,3	23,8
Nº 27*	3,60	6,80	6,20	3,30	4,60	7,60	20,60

*PC

Fonte: Autor, 2026.

De modo geral, observa-se boa concordância entre os resultados experimentais e numéricos, indicando que o modelo foi capaz de representar adequadamente a dinâmica de descarga. Esse comportamento de retenção e descarregamento das partículas também se reflete diretamente na quantidade de sólidos retida nos suspensores, conforme discutido a seguir.

Solids Holdup

Os valores de SH são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 – Massa de sólidos no suspensor (SH) e erro absoluto.

Material	Suspensor Nº 19			Suspensor Nº 20			Suspensor Nº 27		
	F8-85-115-0,13-0,13			F8-145-115-0,13-0,13			*F8-115-115-0,13-0,13		
	e (g)	n (g)	erro (g)	e (g)	n (g)	erro (g)	e (g)	n (g)	erro (g)
Vidro 2 mm	55,70	41,23	14,46	<i>i</i>	<i>i</i>	-	71,34	49,38	21,96
Vidro 5 mm	112,02	111,64	0,38	<i>i</i>	<i>i</i>	-	109,45	140,36	30,91
Aço 6 mm	245,99	231,76	14,23	<i>i</i>	<i>i</i>	-	263,4	259,29	04,11
BBS 6 mm	75,03	93,07	18,04	<i>i</i>	<i>i</i>	-	88,9	97,38	08,48
Feijão	40,95	43,21	2,26	<i>i</i>	<i>i</i>	-	57,29	55,33	01,96
Milho	26,58	40,46	13,89	<i>i</i>	<i>i</i>	-	40,39	48,44	08,05
Arroz	23,66	13,51	10,15	<i>i</i>	<i>i</i>	-	33,63	23,77	09,86

Experimental (e) | Numérico (n) | Indeterminado (i) |*PC

Fonte: Autor, 2026.

Em consonância com o comportamento observado para o LUF, verifica-se que o ângulo α_1 também influencia diretamente a massa de sólidos retida no suspensor. Para menores valores de α_1 , há maior acúmulo de material, uma vez que a geometria do suspensor dificulta o

escoamento e favorece a retenção. À medida que α_1 aumenta, ocorre redução da massa retida, pois o material passa a ser descarregado de forma mais antecipada ao longo da rotação.

Esse comportamento evidencia que α_1 atua como um parâmetro geométrico de controle da capacidade de carregamento do suspensor, influenciando diretamente a quantidade de material transportado.

Mass in the Active Phase e Dispersion Heterogeneity Solids

Os valores de MAP são apresentados na Tabela 14, sendo obtidos exclusivamente por simulação numérica, enquanto a dispersão das partículas na região ativa (DSH) foi avaliada por meio do coeficiente de variação (CoV), conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 14 – Massa de sólidos na região ativa (MAP) numérica.

	Suspensor N° 19	Suspensor N° 20	Suspensor N° 27
Material	F8-85-115-0,13-0,13	F8-145-115-0,13-0,13	*F8-115-115-0,13-0,13
	(g)	(g)	(g)
Vidro 2 mm	31,04	10,13	11,71
Vidro 5 mm	94,54	48,72	34,69
Aço 6 mm	182,92	103,89	86,13
BBS 6 mm	81,66	41,84	24,60
Feijão	37,47	21,52	17,86
Milho	36,62	22,59	12,85
Arroz	18,92	8,07	4,19

*PC

Fonte: Autor, 2026.

Observa-se que a variação de α_1 influencia diretamente a quantidade de material lançado na região ativa. Para menores valores de α_1 , há maior acúmulo de material no suspensor, resultando em descargas mais intensas e maiores valores de MAP. À medida que α_1 aumenta, a descarga ocorre de forma mais distribuída ao longo da rotação, reduzindo a quantidade de material descarregado por evento e, conseqüentemente, os valores de MAP.

Em relação à dispersão, observa-se que os valores de CoV se mantiveram em uma faixa próxima entre as diferentes condições, indicando que a variação de α_1 não promove alterações significativas no padrão global de distribuição das partículas na região ativa. No entanto, para

menores valores de α_1 , observa-se uma leve redução do CoV, indicando uma distribuição mais homogênea. Esse comportamento está associado ao maior acúmulo de material no suspensor, resultando em descargas mais intensas e concentradas, o que favorece a formação de uma cortina de partículas mais uniforme.

Tabela 15 – Coeficiente de Variação (CoV) em % e erro absoluto.

Material	Suspensor N° 19			Suspensor N° 20			Suspensor N° 27		
	F8-85-115-0,13-0,13			F8-145-115-0,13-0,13			*F8-115-115-0,13-0,13		
	e	n	erro	e	n	erro	e	n	erro
Vidro 2 mm	<i>i</i>	93,6	-	<i>i</i>	153,7	-	<i>i</i>	76,7	-
Vidro 5 mm	<i>i</i>	104	-	<i>i</i>	164,1	-	<i>i</i>	87,3	-
Aço 6 mm	117,2	120,2	3,00	155,9	164,5	8,60	116,7	112,9	3,80
BBS 6 mm	102	105,6	3,6	150,4	151,1	0,7	103,6	108,4	4,8
Feijão	135,4	140,4	5	170	174,5	4,5	112,3	116,4	4,1
Milho	122,5	122,2	0,3	157,9	161,7	3,8	106,5	108,6	2,1
Arroz	147,8	150	2,2	133,7	136,6	2,9	89,3	88,3	1
Experimental (e) Numérico (n) Indeterminado (i) *PC									

Fonte: Autor, 2026.

5.3.3 Avaliação da influência de α_2 (ângulo entre os segmentos l_1 e l_2)

Last Unloading Flight

A influência do ângulo α_2 na dinâmica de descarga pode ser observada na Tabela 16, na qual são apresentados os resultados experimentais e numéricos do LUF, juntamente com as imagens correspondentes. A Tabela 17 apresenta os erros absolutos.

Observa-se que o aumento de α_2 promove a redução do LUF, indicando descarregamento em ângulos menores. Esse comportamento está associado à geometria do suspensor, que se torna mais inclinado, reduzindo a capacidade de retenção de sólidos e favorecendo o escoamento antecipado das partículas.

Para valores mais elevados, como $\alpha_2 = 145^\circ$, esse efeito é intensificado, caracterizando uma condição de sobrecarregamento, na qual o material é liberado precocemente, reduzindo a quantidade efetiva de sólidos lançada na região ativa.

Tabela 16 - Variação do α_2 em relação ao ponto central.

α_2 (°)	Suspensor N° 21 F8-115-85-0,13-0,13						
	Aço 6 mm	Vidro 5 mm	Vidro 2 mm	BBS 6 mm	Feijão	Milho	Arroz
85	Experimental (e)						
	Numérico (n)						
LUFe =	104,7°	112,1°	112,7°	106,4°	115,1°	112,8°	121,6°
LUFn =	109°	112,4°	118,7°	113,0°	112,0°	115,0°	153,9°
α_2 (°)	Suspensor N° 22 F8-115-145-0,13-0,13						
	Aço 6 mm	Vidro 5 mm	Vidro 2 mm	BBS 6 mm	Feijão	Milho	Arroz
145	Experimental (e)						
	Numérico (n)						
LUFe =	34,1°	41,2°	40,6°	39,6	43,7	44,6	45,8°
LUFn =	37,6°	43,7°	48,1°	42,3°	33,0°	40,3°	70,8°
α_2 (°)	Suspensor N° 27 *F8-115-115-0,13-0,13						
	Aço 6 mm	Vidro 5 mm	Vidro 2 mm	BBS 6 mm	Feijão	Milho	Arroz
115*	Experimental (e)						
	Numérico (n)						
LUFe =	79,4°	72,6°	79,7°	84,6°	79,7°	90,0°	92,8°
LUFn =	75,8°	79,4°	85,9°	81,3°	75,1°	82,4°	113,4°

*PC

Fonte: Autor, 2026.

Tabela 17 - Erro absoluto ($^{\circ}$) entre resultados do LUF experimentais e numéricos para as configurações avaliadas (variando α_2).

Suspensor	Vidro 2 mm	Vidro 5 mm	Aço 6 mm	BBS 6 mm	Feijão	Milho	Arroz
Nº 21	6,00	0,30	4,30	6,60	3,10	2,20	32,30
Nº 22	7,50	2,50	3,50	2,70	10,70	4,30	25,00
Nº 27*	6,20	6,80	3,60	3,30	4,60	7,60	20,60
*PC							

Fonte: Autor, 2026.

Por outro lado, menores valores de α_2 (85° e 115°) favorecem o carregamento ideal, permitindo maior acúmulo de material e promovendo descargas mais eficientes, com maior formação de cortinas de partículas.

A alteração na dinâmica de descarga implica diretamente em modificações na retenção de sólidos no interior dos suspensores.

Solids Holdup

Os valores de SH são apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 – Massa de sólidos no suspensor (SH) e erro absoluto.

Material	Suspensor Nº 21			Suspensor Nº 22			Suspensor Nº 27		
	F8-115-85-0,13-0,13			F8-115-145-0,13-0,13			*F8-115-115-0,13-0,13		
	e (g)	n (g)	erro (g)	e (g)	n (g)	erro (g)	e (g)	n (g)	erro (g)
Vidro 2 mm	68,37	50,73	17,65	<i>i</i>	<i>i</i>	-	71,34	49,38	21,96
Vidro 5 mm	127,03	135,52	-8,49	<i>i</i>	<i>i</i>	-	109,45	140,36	30,91
Aço 6 mm	280,25	277,05	3,20	<i>i</i>	<i>i</i>	-	263,4	259,29	04,11
BBS 6 mm	92,12	104,99	-12,87	<i>i</i>	<i>i</i>	-	88,9	97,38	08,48
Feijão	38,50	48,31	-9,81	<i>i</i>	<i>i</i>	-	57,29	55,33	01,96
Milho	41,45	50,36	-8,90	<i>i</i>	<i>i</i>	-	40,39	48,44	08,05
Arroz	29,96	18,47	11,48	<i>i</i>	<i>i</i>	-	33,63	23,77	09,86

Experimental (e) | Numérico (n) | Indeterminado (*i*) | *PC

Fonte: Autor, 2026.

Observa-se que menores valores de α_2 favorecem maior retenção de sólidos nos suspensores, uma vez que a geometria permite maior acúmulo antes do descarregamento. À medida que α_2 aumenta, ocorre redução da massa retida, pois o material é descarregado de forma antecipada ao longo da rotação.

Para $\alpha_2 = 145^\circ$, os valores experimentais foram classificados como indeterminados, comportamento associado ao escoamento precoce e à dificuldade de definição do momento de desprendimento da primeira partícula.

Essa retenção condiciona tanto o fluxo de material transportado quanto a maneira como as partículas se organizam após o lançamento.

Mass in the Active Phase e Dispersion Heterogeneity Solids

Os valores de MAP são apresentados na Tabela 19, enquanto os valores de CoV (DSH) estão apresentados na Tabela 20.

Tabela 19 – Massa de sólidos na região ativa (MAP) numérica.

	Suspensor N° 21	Suspensor N° 22	Suspensor N° 27
Material	F8-115-85-0,13-0,13	F8-115-145-0,13-0,13	*F8-115-115-0,13-0,13
	(g)	(g)	(g)
Vidro 2 mm	13,95	19,29	11,71
Vidro 5 mm	55,01	56,47	34,69
Aço 6 mm	123,43	110,11	86,13
BBS 6 mm	50,47	46,66	24,60
Feijão	23,60	24,08	17,86
Milho	21,86	22,59	12,85
Arroz	8,72	12,13	4,19
*PC			

Fonte: Autor, 2026.

Observa-se que menores valores de α_2 resultam em maiores valores de MAP, devido ao maior acúmulo de material nos suspensores e à ocorrência de descargas mais intensas. À medida que α_2 aumenta, ocorre redução da MAP, uma vez que o material é liberado de forma antecipada e com menor intensidade.

Tabela 20 – Coeficiente de Variação (CoV) em % e Erro absoluto.

Material	Suspensor N° 21 F8-115-85-0,13-0,13			Suspensor N° 22 F8-115-145-0,13-0,13			Suspensor N° 27 *F8-115-115-0,13-0,13		
	e	n	erro	e	n	erro	e	n	erro
Vidro 2 mm	<i>i</i>	84,8	-	<i>i</i>	119,7	-	<i>i</i>	76,7	-
Vidro 5 mm	<i>i</i>	95,9	-	<i>i</i>	114,2	-	<i>i</i>	87,3	-
Aço 6 mm	116	108,6	7,40	122,3	121,8	0,50	116,7	112,9	3,80
BBS 6 mm	111	108,2	2,8	110,6	114,9	4,3	103,6	108,4	4,8
Feijão	93,1	92,6	0,5	135,3	127,5	7,8	112,3	116,4	4,1
Milho	81,9	87,6	5,7	131,2	133,4	2,2	106,5	108,6	2,1
Arroz	142,3	145,5	3,2	102	100,6	1,4	89,3	88,3	1

Experimental (e) | Numérico (n) | Indeterminado (i) | *PC

Fonte: Autor, 2026.

Em relação à dispersão, observa-se que os valores de CoV variaram entre as condições, indicando influência de α_2 na distribuição das partículas. Menores valores de α_2 tendem a resultar em menores valores de CoV, indicando maior homogeneidade, associada à formação de cortinas mais consistentes. Já maiores valores de α_2 resultam em maiores valores de CoV, indicando maior heterogeneidade, devido à descarga menos uniforme.

As propriedades físicas também influenciam a dispersão. Partículas menores tendem a apresentar menor CoV devido à maior capacidade de rearranjo. Para materiais de mesma dimensão, partículas menos densas apresentam maior homogeneidade, enquanto partículas mais densas tendem a apresentar maior CoV devido à maior inércia. Para materiais irregulares, observa-se maior variabilidade, sendo o arroz mais sensível às condições operacionais devido ao seu formato alongado (0,36).

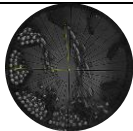
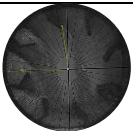
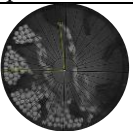
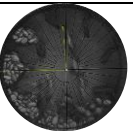
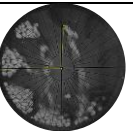
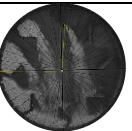
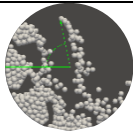
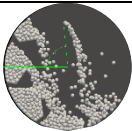
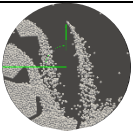
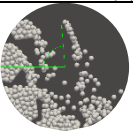
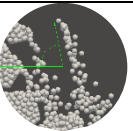
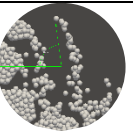
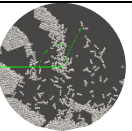
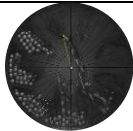
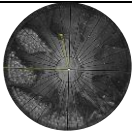
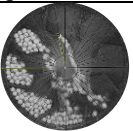
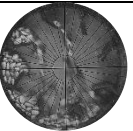
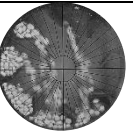
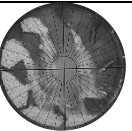
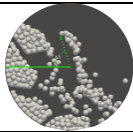
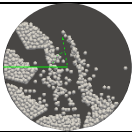
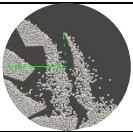
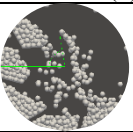
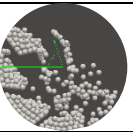
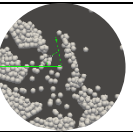
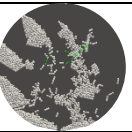
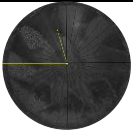
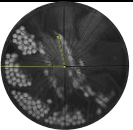
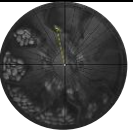
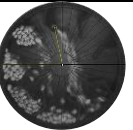
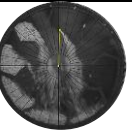
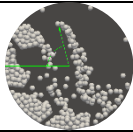
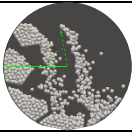
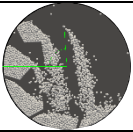
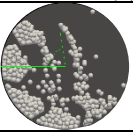
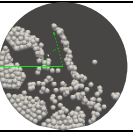
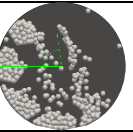
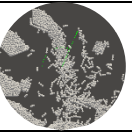
De modo geral, menores valores de α_2 favorecem maior massa na região ativa e maior homogeneidade na distribuição das partículas, indicando melhor aproveitamento do véu granular.

5.3.4 Avaliação da influência de l_1 (comprimento do segmento conectado à superfície interna do tambor)

Last Unloading Flight

Na Tabela 21, é avaliada a influência do comprimento l_1 dos suspensores, quando mantidas as demais variáveis constantes.

Tabela 21 - Variação do l_1 em relação ao ponto central.

l_1 (mm)	Suspensor N° 23 F8-115-115-0,08-0,13						
	Aço 6 mm	Vidro 5 mm	Vidro 2 mm	BBS 6 mm	Feijão	Milho	Arroz
0,08	Experimental (e)						
							
	Numérico (n)						
							
	LUF _e =	74,7°	85,4°	81,8°	80,2°	87,1°	86,3°
	LUF _n =	78,1°	84,1°	89,2°	85,2°	79,1°	82,3°
l_1 (mm)	Suspensor N° 24 F8-115-115-0,18-0,13						
	Aço 6 mm	Vidro 5 mm	Vidro 2 mm	BBS 6 mm	Feijão	Milho	Arroz
0,18	Experimental (e)						
							
	Numérico (n)						
							
	LUF _e =	72,2°	74,0°	63,2°	75,6°	73,9°	80,1°
	LUF _n =	72,5°	80,3°	84,1°	80,3°	71,4°	79,1°
l_1 (mm)	Suspensor N° 27 *F8-115-115-0,13-0,13						
	Aço 6 mm	Vidro 5 mm	Vidro 2 mm	BBS 6 mm	Feijão	Milho	Arroz
0,13*	Experimental (e)						
							
	Numérico (n)						
							
	LUF _e =	79,4°	72,6°	79,7°	84,6°	79,7°	90,0°
	LUF _n =	75,8°	79,4°	85,9°	81,3°	75,1°	82,4°

*PC

Fonte: Autor, 2026.

Tabela 22 - Erro absoluto ($^{\circ}$) entre resultados do LUF experimentais e numéricos para as configurações avaliadas (variando l_1).

Suspensor	Aço 6 mm	Vidro 5 mm	Vidro 2 mm	BBS 6 mm	Feijão	Milho	Arroz
Nº 23	3,40	1,30	7,40	5,00	8,00	4,00	25,10
Nº 24	0,30	6,30	20,90	4,70	2,50	1,00	64,30
Nº 27*	3,60	6,80	6,20	3,30	4,60	7,60	20,60

*PC

Fonte: Autor, 2026.

Quando $l_1 = 0,08$, a descarga das partículas ocorre majoritariamente na região com maior comprimento de queda, próxima ao centro do tambor rotatório. Já para $l_1 = 0,18$, observa-se uma diminuição do LUF, indicando que o descarregamento ocorre em posições angulares mais baixas, além da formação de um véu de partículas mais homogêneo na região ativa.

Esse comportamento está associado ao aumento do comprimento do suspensor, que altera a geometria de transporte das partículas, favorecendo o escoamento antecipado.

Cabe salientar também que maiores comprimentos dos suspensores, para uma mesma fração de enchimento, levam ao subcarregamento. Isso ocorre porque uma maior quantidade de sólidos passa a ser transportada pelos suspensores, reduzindo a formação de cortinas em posições angulares mais baixas. Como consequência, há diminuição da distribuição de sólidos na região ativa nessas posições, como observado para $l_1 = 0,18$.

Observa-se, de modo geral, boa concordância entre os resultados experimentais e numéricos, conforme apresentado na Tabela 22, indicando que o modelo foi capaz de reproduzir adequadamente a dinâmica de descarga para as diferentes configurações de l_1 .

No entanto, maiores desvios são observados para alguns materiais, como o arroz, o que pode estar associado à maior influência da forma e da orientação das partículas, aspectos que não são completamente capturados pelo modelo numérico.

O comportamento de descarga observado ao longo da rotação está diretamente ligado à quantidade de material que permanece retida nos suspensores.

Solids Holdup

Os valores de SH são apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 – Massa de sólidos no suspensor (SH) e erro absoluto.

Material	Suspensor N° 23			Suspensor N° 24			Suspensor N° 27		
	F8-115-115-0,08-0,13			F8-115-115-0,18-0,13			*F8-115-115-0,13-0,13		
	e (g)	n (g)	erro (g)	e (g)	n (g)	erro (g)	e (g)	n (g)	erro (g)
Vidro 2 mm	<i>i</i>	<i>i</i>	-	57,92	43,90	14,02	71,34	49,38	21,96
Vidro 5 mm	<i>i</i>	<i>i</i>	-	131,96	129,07	2,89	109,45	140,36	30,91
Aço 6 mm	<i>i</i>	<i>i</i>	-	287,55	272,61	14,94	263,4	259,29	04,11
BBS 6 mm	<i>i</i>	<i>i</i>	-	90,13	96,11	-5,98	88,9	97,38	08,48
Feijão	<i>i</i>	<i>i</i>	-	33,99	49,59	-15,60	57,29	55,33	01,96
Milho	<i>i</i>	<i>i</i>	-	40,88	46,66	-5,78	40,39	48,44	08,05
Arroz	<i>i</i>	<i>i</i>	-	29,44	19,01	10,43	33,63	23,77	09,86
Experimental (e) Numérico (n) Indeterminado (i) *PC									

Fonte: Autor, 2026.

Observa-se que, para $l_1 = 0,08$, os valores experimentais foram classificados como indeterminados, comportamento associado à condição de sobrecarregamento, na qual a elevada quantidade de sólidos no suspensor inviabiliza a identificação do momento de desprendimento da primeira partícula.

Para $l_1 = 0,18$, observa-se redução da massa retida, comportamento coerente com o subcarregamento identificado anteriormente. Nessa condição, embora o suspensor possua maior comprimento, o material é distribuído ao longo de sua extensão, reduzindo a concentração local de sólidos e, consequentemente, a massa efetivamente retida.

Esse resultado indica que o aumento de l_1 não implica necessariamente em maior retenção de sólidos, estando diretamente relacionado ao regime de carregamento do sistema.

Em relação aos resultados numéricos, observa-se que o modelo foi capaz de capturar a tendência de variação da massa retida para as diferentes condições. No entanto, desvios entre os valores experimentais e numéricos podem ser observados, especialmente em situações próximas ao sobrecarregamento, nas quais a definição do momento de desprendimento da primeira partícula se torna mais sensível.

Essa retenção define não apenas o volume transportado, mas também a forma como o material é lançado e distribuído na região ativa.

Mass in the Active Phase e Dispersion Heterogeneity Solids

Os valores de MAP são apresentados na Tabela 24, enquanto os valores de CoV (DSH) estão apresentados na Tabela 25.

Observa-se que a variação de l_1 impacta diretamente a quantidade de material presente na região ativa. Para menores valores de l_1 , há maior concentração de massa em determinadas regiões, enquanto para maiores valores, como $l_1 = 0,18$, observa-se uma distribuição mais uniforme, porém com menor concentração local de sólidos.

Tabela 24 – Massa de sólidos na região ativa (MAP) numérica.

	Suspensor N° 23	Suspensor N° 24	Suspensor N° 27
Material	F8-115-115-0,08-0,13	F8-115-115-0,18-0,13	*F8-115-115-0,13-0,13
	(g)	(g)	(g)
Vidro 2 mm	19,30	10,52	11,71
Vidro 5 mm	55,34	27,75	34,69
Aço 6 mm	126,98	77,25	86,13
BBS 6 mm	41,59	18,77	24,60
Feijão	21,37	12,44	17,86
Milho	21,41	9,60	12,85
Arroz	6,88	9,87	4,19
			*PC

Fonte: Autor, 2026.

Em relação à dispersão, os valores de CoV indicam que o aumento de l_1 favorece a homogeneidade do véu granular, comportamento associado à maior distribuição espacial das partículas ao longo da região ativa. Por outro lado, menores valores de l_1 resultam em maior concentração de partículas em regiões específicas, aumentando a heterogeneidade do sistema.

Tabela 25 – Coeficiente de Variação (CoV) em % e Erro absoluto.

Material	Suspensor N° 23 F8-115-115-0,08-0,13			Suspensor N° 24 F8-115-115-0,18-0,13			Suspensor N° 27 *F8-115-115-0,13-0,13		
	e	n	erro	e	n	erro	e	n	erro
	<i>i</i>			<i>i</i>			<i>i</i>		
Vidro 2 mm	<i>i</i>	93,1	-	<i>i</i>	77,6	-	<i>i</i>	76,7	-
Vidro 5 mm	<i>i</i>	120	-	<i>i</i>	107,9	-	<i>i</i>	87,3	-
Aço 6 mm	129,4	130,1	0,70	109,4	107,9	1,50	116,7	112,9	3,80
BBS 6 mm	112,9	114,5	1,6	114,3	118,6	4,3	103,6	108,4	4,8
Feijão	128,2	128,6	0,4	104,1	102,6	1,5	112,3	116,4	4,1
Milho	106,4	107,9	1,5	107,1	107,1	0	106,5	108,6	2,1
Arroz	85,8	85,4	0,4	90,1	90,1	0	89,3	88,3	1

Experimental (e) | Numérico (n) | Indeterminado (i) | *PC

Fonte: Autor, 2026.

Os resultados numéricos de MAP e CoV apresentam boa concordância com as tendências observadas experimentalmente, indicando que o modelo é capaz de representar adequadamente a distribuição de partículas na região ativa. Pequenas diferenças podem ser atribuídas às simplificações do modelo, especialmente no que se refere à representação da forma das partículas e às interações durante o escoamento.

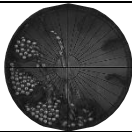
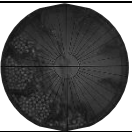
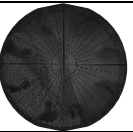
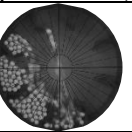
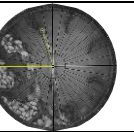
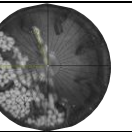
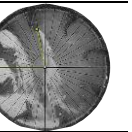
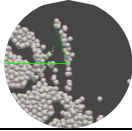
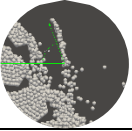
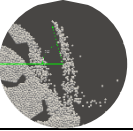
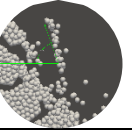
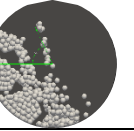
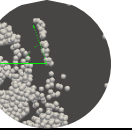
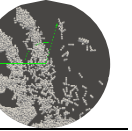
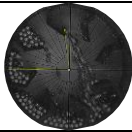
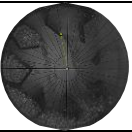
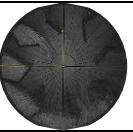
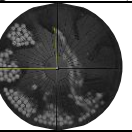
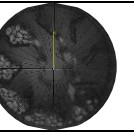
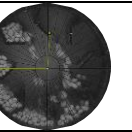
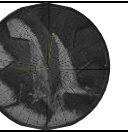
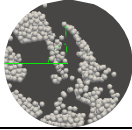
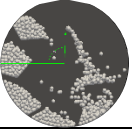
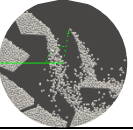
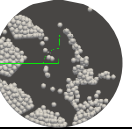
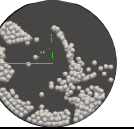
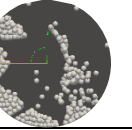
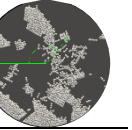
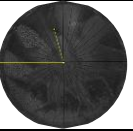
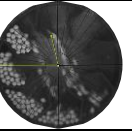
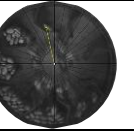
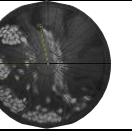
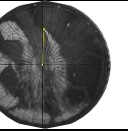
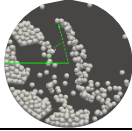
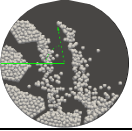
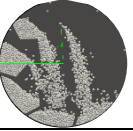
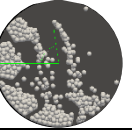
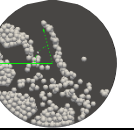
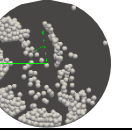
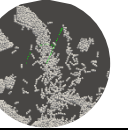
5.3.5 Avaliação da influência de l_2 (comprimento do segmento conectado ao segmento l_1)

Na Tabela 26, observa-se que, com o aumento do comprimento l_2 , há um aumento expressivo no LUF. Resultados semelhantes foram reportados por Karali (2015), que concluiu que suspensores com maiores comprimentos de segmento promovem o aumento do ângulo de última descarga.

No entanto, assim como observado para l_1 , as partículas apresentam melhor formação do véu granular na configuração de $l_2 = 0,08$, uma vez que é a única condição em que não há subcarregamento, resultando em maior aproveitamento da região ativa.

Na condição do ponto central ($l_2 = 0,13$), observa-se o carregamento ideal para a maioria dos materiais. Além disso, ao comparar com $l_2 = 0,08$, há melhor distribuição do véu granular na região ativa e maiores alturas de queda. Esse comportamento está associado à redistribuição da fase densa no fundo do tambor, que influencia diretamente a dinâmica de descarga.

Tabela 26 - Variação do l_2 em relação ao ponto central.

l_2 (mm)	Suspensor N° 25 F8-115-115-0,13-0,08						
	Aço 6 mm	Vidro 5 mm	Vidro 2 mm	BBS 6 mm	Feijão	Milho	Arroz
0,08	Experimental (e)						
							
	Numérico (n)						
							
LUF _e =	63,7°	61,2°	57,2°	76,3°	68,2°	74,2°	73,2°
LUF _n =	69,3°	68,7°	73,9°	70,3°	64,5°	70,3°	105,7°
l_2 (mm)	Suspensor N° 26 F8-115-115-0,13-0,18						
	Aço 6 mm	Vidro 5 mm	Vidro 2 mm	BBS 6 mm	Feijão	Milho	Arroz
0,18	Experimental (e)						
							
	Numérico (n)						
							
LUF _e =	84,2°	86,5°	88,8°	90,5°	87,9°	95,1°	97,5°
LUF _n =	86,9°	91,9°	100,0°	92,2°	86,8°	91,5°	129,6°
l_2 (mm)	Suspensor N° 27 *F8-115-115-0,13-0,13						
	Aço 6 mm	Vidro 5 mm	Vidro 2 mm	BBS 6 mm	Feijão	Milho	Arroz
0,13*	Experimental (e)						
							
	Numérico (n)						
							
LUF _e =	79,4°	72,6°	79,7°	84,6°	79,7°	90,0°	92,8°
LUF _n =	75,8°	79,4°	85,9°	81,3°	75,1°	82,4°	113,4°

*PC

Fonte: Autor, 2026.

Tabela 27 - Erro absoluto (°) entre resultados do LUF experimentais e numéricos para as configurações avaliadas (variando l_2).

Suspensor	Aço 6 mm	Vidro 5 mm	Vidro 2 mm	BBS 6 mm	Feijão	Milho	Arroz
Nº 25	5,60	7,50	16,70	6,00	3,70	3,90	32,50
Nº 26	2,70	5,40	11,20	1,70	1,10	3,60	32,10
Nº 27*	3,60	6,80	6,20	3,30	4,60	7,60	20,60

*PC

Fonte: Autor, 2026.

Observa-se, de modo geral, boa concordância entre os resultados experimentais e numéricos, conforme apresentado na Tabela 27, indicando que o modelo é capaz de reproduzir a dinâmica de descarga para as diferentes configurações de l_2 . No entanto, maiores desvios são observados para materiais como o arroz, o que pode estar associado à maior influência da forma e da orientação das partículas.

A variação no ângulo de descarga reflete mudanças no carregamento dos suspensores, o que se manifesta na massa de sólidos acumulada ao longo do movimento.

Solids Holdup

Os valores de SH são apresentados na Tabela 28.

Tabela 28 – Massa de sólidos no suspensor (SH) e erro absoluto.

Material	Suspensor Nº 25			Suspensor Nº 26			Suspensor Nº 27*		
	F8-115-115-0,13-0,08			F8-115-115-0,13-0,18			*F8-115-115-0,13-0,13		
	e (g)	n (g)	erro (g)	e (g)	n (g)	erro (g)	e (g)	n (g)	erro (g)
Vidro 2 mm	<i>i</i>	<i>i</i>	-	86,14	43,37	42,77	71,34	49,38	21,96
Vidro 5 mm	<i>i</i>	<i>i</i>	-	110,38	118,90	8,52	109,45	140,36	30,91
Aço 6 mm	<i>i</i>	<i>i</i>	-	233,35	248,63	15,28	263,4	259,29	04,11
BBS 6 mm	<i>i</i>	<i>i</i>	-	80,16	88,51	8,35	88,9	97,38	08,48
Feijão	<i>i</i>	<i>i</i>	-	36,84	42,25	5,41	57,29	55,33	01,96
Milho	<i>i</i>	<i>i</i>	-	41,10	38,84	2,26	40,39	48,44	08,05
Arroz	<i>i</i>	<i>i</i>	-	36,31	28,72	7,59	33,63	23,77	09,86

Experimental (e) | Numérico (n) | Indeterminado (i) | *PC

Fonte: Autor, 2026.

Observa-se que, para $l_2 = 0,08$, os valores experimentais foram classificados como indeterminados, indicando condição de sobrecarregamento, na qual a elevada quantidade de sólidos dificulta a identificação do momento de desprendimento da primeira partícula.

Para $l_2 = 0,18$, observa-se redução da massa retida em relação ao ponto central, comportamento associado ao aumento do LUF e ao descarregamento mais tardio das partículas. Já na condição intermediária ($l_2 = 0,13$), observa-se comportamento mais próximo do carregamento ideal.

Os resultados numéricos acompanham a tendência observada experimentalmente, embora diferenças possam ser atribuídas à simplificação do modelo, principalmente na representação das interações entre partículas. A partir dessa massa acumulada, define-se a quantidade efetivamente transferida para a região ativa, bem como sua distribuição espacial.

Mass in the Active Phase e Dispersion Heterogeneity Solids

Os valores de MAP são apresentados na Tabela 29, enquanto os valores de CoV (DSH) estão apresentados na Tabela 30.

Observa-se que a variação de l_2 impacta diretamente a quantidade de material na região ativa. Para menores valores de l_2 , observa-se maior concentração de massa na região ativa, enquanto para maiores valores ocorre redistribuição do material, com redução da concentração local.

Tabela 29 – Massa de sólidos na região ativa (MAP) numérica.

	Suspensor N° 25	Suspensor N° 26	Suspensor N° 27
Material	F8-115-115-0,13-0,08	F8-115-115-0,13-0,18	*F8-115-115-0,13-0,13
	(g)	(g)	(g)
Vidro 2 mm	24,49	7,24	11,71
Vidro 5 mm	69,53	16,13	34,69
Aço 6 mm	152,73	90,57	86,13
BBS 6 mm	54,27	19,53	24,60
Feijão	26,47	11,96	17,86
Milho	24,66	11,96	12,85
Arroz	9,87	9,20	4,19
*PC			

Fonte: Autor, 2026.

Em relação à dispersão, observa-se que menores valores de l_2 tendem a resultar em menores valores de CoV, indicando maior homogeneidade do véu granular. Já para maiores valores de l_2 , observa-se aumento do CoV, indicando maior heterogeneidade, associada à descarga menos uniforme das partículas.

Os resultados numéricos apresentam boa concordância com as tendências observadas experimentalmente, indicando que o modelo é capaz de representar adequadamente a distribuição das partículas na região ativa.

Tabela 30 – Coeficiente de Variação (CoV) em % e Erro absoluto.

Material	Suspensor N° 25			Suspensor N° 26			Suspensor N° 27*		
	F8-115-115-0,13-0,08			F8-115-115-0,13-0,18			*F8-115-115-0,13-0,13		
	e	n	erro	e	n	erro	e	n	erro
Vidro 2 mm	<i>i</i>	111	-	<i>i</i>	94	-	<i>i</i>	76,7	-
Vidro 5 mm	<i>i</i>	125	-	<i>i</i>	159	-	<i>i</i>	87,3	-
Aço 6 mm	127,9	127,9	0,00	155,2	163,5	8,30	116,7	112,9	3,80
BBS 6 mm	145,8	147,5	1,7	150,8	147,8	3	103,6	108,4	4,8
Feijão	141,3	141,6	0,3	157,9	151,4	6,5	112,3	116,4	4,1
Milho	135,8	131,1	4,7	174,5	169,3	5,2	106,5	108,6	2,1
Arroz	90,3	88,8	1,5	106,9	106,8	0,1	89,3	88,3	1

Experimental (e) | Numérico (n) | Indeterminado (i) |*PC

Fonte: Autor, 2026.

5.3.6 Avaliação da influência das propriedades físicas das partículas nas variáveis-resposta

De modo geral, as propriedades físicas das partículas influenciam diretamente a dinâmica de transporte e descarga no interior do tambor, refletindo nos parâmetros LUF, SH, MAP e DSH.

Inicialmente, essa influência se manifesta no comportamento de descarga, representado pelo LUF. Observa-se que partículas menores, como o vidro 2 mm, apresentam maiores valores de LUF, comportamento associado ao maior número de partículas para um mesmo volume, o que intensifica os contatos e aumenta a resistência ao escoamento. Em contrapartida, partículas maiores apresentam menor número de interações e escoam com maior facilidade, resultando em menores ângulos de descarga. Para materiais de mesma dimensão, a densidade também

altera essa dinâmica, sendo observado que o aço descarrega em ângulos menores quando comparado ao BBS, devido à maior ação gravitacional.

Esse comportamento de descarga está diretamente relacionado à quantidade de material que permanece retida nos suspensores, sendo refletido nos valores de SH. Assim, partículas maiores tendem a apresentar maior massa retida devido ao maior volume individual, enquanto partículas menores, mais móveis, escoam com maior facilidade. Para materiais de mesma dimensão, a maior densidade do aço resulta em maiores valores de SH em comparação ao BBS. Já para partículas de forma irregular, a geometria passa a desempenhar papel relevante: o feijão (circularidade 0,60) apresenta maior retenção devido ao intertravamento, enquanto o milho (0,75) apresenta maior facilidade de rolamento. O arroz (0,36), por sua vez, apresenta maior capacidade de rearranjo, resultando em menores valores de massa retida.

A quantidade de material retida influencia diretamente o volume de partículas transportadas e lançadas na região ativa, sendo esse efeito observado na MAP. Dessa forma, materiais que apresentam maior retenção tendem também a apresentar maior massa na região ativa. Assim, partículas maiores e mais densas resultam em maiores valores de MAP, enquanto partículas menores e menos densas apresentam menor quantidade de material disponível nessa região. Para materiais irregulares, o feijão novamente se destaca com maiores valores, enquanto o arroz apresenta menores valores, em função da maior capacidade de reorganização durante o escoamento.

Por fim, a forma como esse material se distribui na região ativa é refletida na dispersão, avaliada pelo CoV (DSH). Nesse caso, partículas menores tendem a apresentar menores valores de CoV, indicando maior homogeneidade, devido à maior mobilidade e capacidade de rearranjo. Em contrapartida, partículas maiores apresentam maior inércia e menor capacidade de acomodação, resultando em distribuições menos uniformes. Para materiais de mesma dimensão, partículas mais densas tendem a apresentar maior CoV, enquanto materiais menos densos apresentam distribuição mais homogênea. Para partículas de forma irregular, a influência da geometria se torna ainda mais evidente, sendo o arroz o material que apresenta maior sensibilidade às condições operacionais, devido ao seu formato alongado, que influencia sua orientação e trajetória durante o movimento.

Além disso, observa-se que a representação numérica das partículas, especialmente no caso do arroz, modelado como um *clump* de esferas, não reproduz completamente os efeitos de

anisotropia e orientação, o que contribui para as diferenças observadas entre os resultados experimental e numérico.

5.4 Fenômeno de Mistura

No estudo da dinâmica de mistura em tambores rotatórios equipados com suspensor, foram analisadas diferentes composições de partículas visando avaliar seus efeitos no comportamento do leito granular para o suspensor no ponto central (Suspensor 27). O grau de preenchimento do tambor foi de 30%, correspondendo a 15% do volume para cada tipo de partícula, e a velocidade de rotação utilizada foi de 1,94 rad/s.

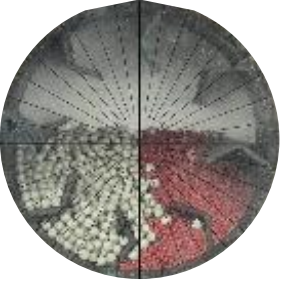
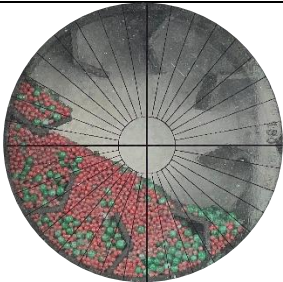
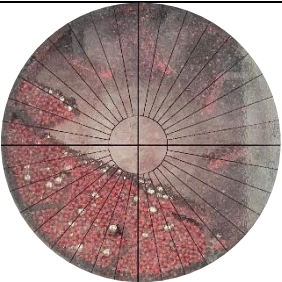
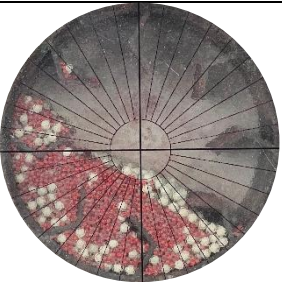
As combinações investigadas incluíram: esferas de vidro com diâmetros de 2,0 mm e 5,0 mm, para analisar o efeito do tamanho das partículas; esferas de BBS (6,0 mm) e de aço (6,0 mm), para observar o impacto da variação da massa específica em partículas de mesmo diâmetro; a mistura de esferas de vidro (2,0 mm) e de aço (6,0 mm), com o objetivo de estudar o efeito concorrente entre partículas; e a combinação de esferas de vidro (2,0 mm) com esferas de BBS (6,0 mm), a fim de avaliar o efeito associado das partículas na estrutura do leito.

O efeito concorrente e associado na mistura está indicando que propriedades físicas como tamanho e densidade podem causar alterações na qualidade final da mistura. Para o efeito concorrente, por exemplo: partículas do tipo 1 possuem maior tamanho e maior massa específica, enquanto partículas do tipo 2 tem características opostas, ou seja, menor tamanho e menor massa específica. Em termos de comportamento, partículas de tamanho maior tentem a se localizar na parede do tambor, enquanto partículas de maior massa específica tem a tendência de ir para o centro do tambor. Em resumo, o efeito concorrente possui partículas com características físicas que tendem a comportamentos distintos durante o movimento do leito granular.

As partículas que compõe o efeito associado geralmente possuem características físicas que a levam a se localizarem no mesmo sentido, por exemplo: partícula tipo 1 possui menor tamanho e maior massa específica o que leva as partículas a se localizarem no centro do tambor.

As figuras expostas na Tabela 31 representam a visualização experimental das composições de partículas para o estudo do fenômeno de mistura, antes e após a rotação do tambor.

Tabela 31 - Visualização experimental das composições de partículas.

Posição inicial das partículas			
			
Posição final das partículas			
			
Vidro 2 mm + Vidro 5 mm	Aço 6 mm + BBS 6 mm	Vidro 2 mm + Aço 6 mm	Vidro 2 mm + BBS 6 mm

Fonte: Autor, 2026.

Para a quantificação experimental do índice de mistura não foi possível obter resultados satisfatórios, uma vez que a avaliação se restringiu apenas à vista frontal do tambor, não sendo possível investigar a distribuição das partículas em todo o seu volume. A tentativa inicial foi realizada utilizando o *software* ImageJ, entretanto, sem sucesso na extração de dados quantitativos confiáveis. Em razão dessa limitação, a análise do índice de mistura foi conduzida por meio de simulações numéricas, apresentadas no tópico a seguir.

5.4.1 Fenômeno de Mistura - Numérica

Nesta etapa, os resultados obtidos pelas simulações numéricas em LIGGGHTS® foram analisados, de forma a complementar as observações experimentais. Por meio do DEM, foi possível quantificar parâmetros como o índice de mistura, permitindo avaliar de maneira mais precisa os efeitos de tamanho, densidade, associado e concorrente na dinâmica das partículas.

Além disso, foi realizada uma comparação direta entre dois cenários: um tambor com suspensor e outro sem suspensor, operando sob as mesmas condições de velocidade de rotação (1,94 rad/s) e fração de preenchimento (30%, sendo 15% para cada tipo de partícula). Essa

abordagem possibilitou identificar de forma clara a influência geométrica dos suspensores sobre a eficiência da mistura, isolando os efeitos inerentes às propriedades físicas das partículas.

Na Tabela 32 e na Tabela 33 estão expostas as posições iniciais e finais das partículas para os dois tambores, evidenciando visualmente o processo de redistribuição do leito granular ao longo da simulação e a diferença no desempenho entre os cenários avaliados.

Tabela 32 - Posições inicial e final das partículas nas simulações do tambor com suspensor para diferentes composições (tamanho, densidade, associado e concorrente).

Posição inicial das partículas			
Posição final das partículas			
Vidro 2 mm (azul) + Vidro 5 mm (vermelha)	Aço 6 mm (azul) + BBS 6 mm (vermelha)	Vidro 2 mm (azul) + Aço 6 mm (vermelha)	Vidro 2 mm (azul) + BBS 6 mm (vermelha)

Fonte: Autor, 2026.

Por meio dos resultados obtidos nas simulações, foi possível realizar as seguintes análises, apresentadas nos tópicos a seguir e foi possível gerar os gráficos de Tempo *versus* Índice de Mistura (IM), que permitem avaliar a eficiência da homogeneização das partículas ao longo da simulação. O eixo y representa o valor do IM, que varia entre 0 (leito totalmente segregado) e 1 (mistura completamente homogênea), enquanto o eixo x corresponde ao tempo (s). Valores baixos de IM (até ~0,4) indicam mistura deficiente, caracterizada por segregação acentuada. Valores intermediários (0,4–0,7) refletem um estado de mistura parcial, no qual há certa dispersão, mas ainda persistem regiões segregadas. Já valores elevados (acima de 0,7–0,8) sinalizam um leito granular homogêneo, próximo da condição ideal. Assim, a interpretação das

curvas permite identificar não apenas o grau de mistura atingido, mas também a velocidade com que o sistema caminha em direção ao estado de homogeneização.

Tabela 33 - Posições inicial e final das partículas nas simulações do tambor sem suspensor para diferentes composições (tamanho, densidade, associado e concorrente).

Posição inicial das partículas			
Posição final das partículas			
Vidro 2 mm (azul) + Vidro 5 mm (vermelha)	Aço 6 mm (azul) + BBS 6 mm (vermelha)	Vidro 2 mm (azul) + Aço 6 mm (vermelha)	Vidro 2 mm (azul) + BBS 6 mm (vermelha)

Fonte: Autor, 2026.

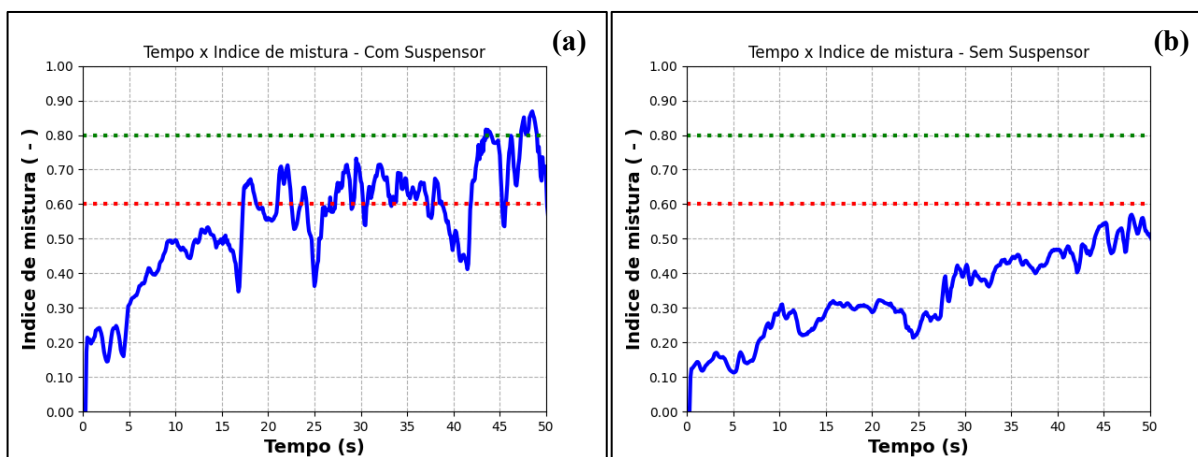
5.4.1.1 Análise da Densidade (Aço 6 mm + BBS 6 mm)

No tambor sem suspensor (Figura 29 (b)), observa-se que o índice de mistura apresenta crescimento lento e limitado, partindo de valores próximos a 0,2 e atingindo apenas cerca de 0,5 ao final do tempo de simulação. Esse comportamento está associado à diferença de densidade entre as partículas, enquanto o aço possui maior densidade ($5.858,5 \text{ kg/m}^3$), as esferas de BBS são significativamente mais leves ($2.099,4 \text{ kg/m}^3$). Essa característica favorece a segregação (Yamamoto *et al.*, 2016), em que as partículas de aço tendem a permanecer mais próximas da parede e da base do tambor, enquanto as de BBS ocupam regiões superiores, reduzindo o contato entre os materiais. Ambas as partículas possuem o mesmo diâmetro (6 mm), o que elimina a diferença de tamanho como fator determinante para a mistura observada.

Como consequência, a ausência de suspensores limita o mecanismo de mistura, que ocorre apenas por rolamento e deslizamento, resultando em baixa homogeneidade.

Por outro lado, no tambor equipado com suspensores (Figura 29 (a)), o índice de mistura cresce rapidamente e alcança valores próximos de 0,8 em torno de 20 s, chegando a oscilar em patamares próximos de 0,9. Nesse caso, a ação dos suspensores promove o lançamento de ambas as partículas para a região ativa, intensificando colisões e redistribuições que quebram a tendência de segregação por densidade. A comparação entre os dois cenários evidencia, portanto, que a presença de suspensores não apenas acelera o processo de mistura, mas também é essencial para homogeneizar materiais de diferentes densidades.

Figura 29 – Gráficos do Tempo x Índice de mistura (Aço 6 mm + BBS 6 mm) – (a) tambor com suspensor e (b) tambor sem suspensor.



Fonte: Autor, 2026.

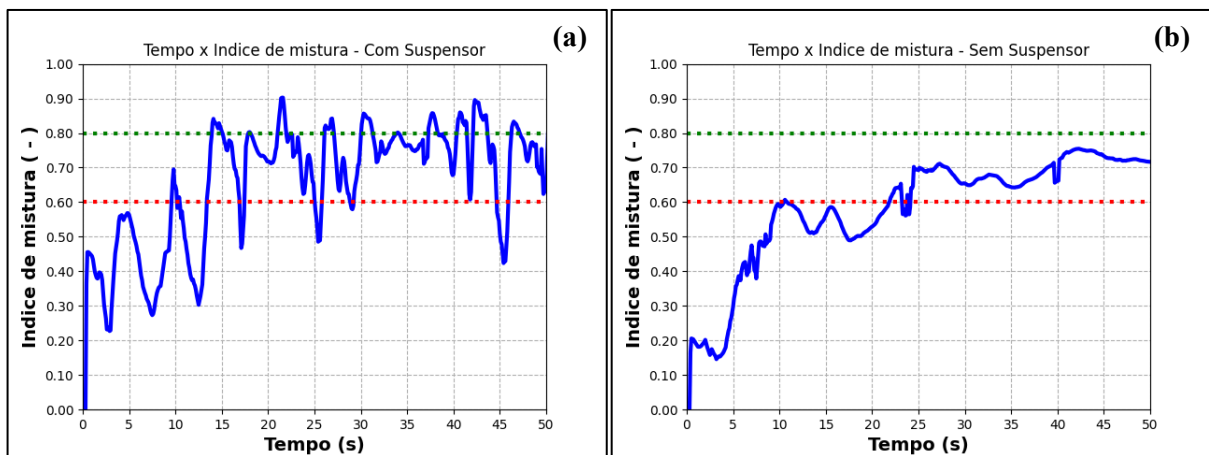
5.4.1.2 Análise do Tamanho (Vidro 2 mm + Vidro 5 mm)

No tambor sem suspensor (Figura 30 (b)), observa-se que o índice de mistura apresenta um crescimento mais lento e gradual ao longo do tempo. Nos primeiros segundos, os valores permanecem baixos, indicando predominância da segregação natural causada pela diferença de tamanho entre as partículas de vidro (2 mm e 5 mm). Esse comportamento está associado ao mecanismo típico de mistura em tambores sem suspensores, em que o movimento das partículas ocorre principalmente por rolamento e escorregamento da camada superficial. Nessas condições, as partículas menores tendem a se alojar na região central do tambor (percolação), enquanto partículas de maior diâmetro se acumulam nas regiões superiores do leito, o que dificulta a homogeneização. Como resultado, o índice de mistura atinge um patamar intermediário (próximo a 0,7), sem alcançar valores elevados de homogeneidade.

No tambor com suspensor (Figura 30 (a)), nota-se uma elevação mais rápida do índice de mistura, que oscila em torno de valores mais altos (próximos de 0,9) ao longo do tempo. A presença dos suspensores intensifica o mecanismo de catarata, promovendo maior recirculação de partículas e aumentando as colisões e redistribuições entre diferentes camadas do leito. Isso reduz significativamente o efeito da segregação por percolação e favorece uma mistura mais homogênea.

Embora o gráfico apresente oscilações, o patamar médio atingido é visivelmente superior ao do tambor sem suspensor, confirmando a eficiência desse dispositivo em melhorar a qualidade da mistura.

Figura 30 – Gráficos do Tempo x Índice de mistura (Vidro 2 mm + Vidro 5 mm) – (a) tambor com suspensor e (b) tambor sem suspensor.



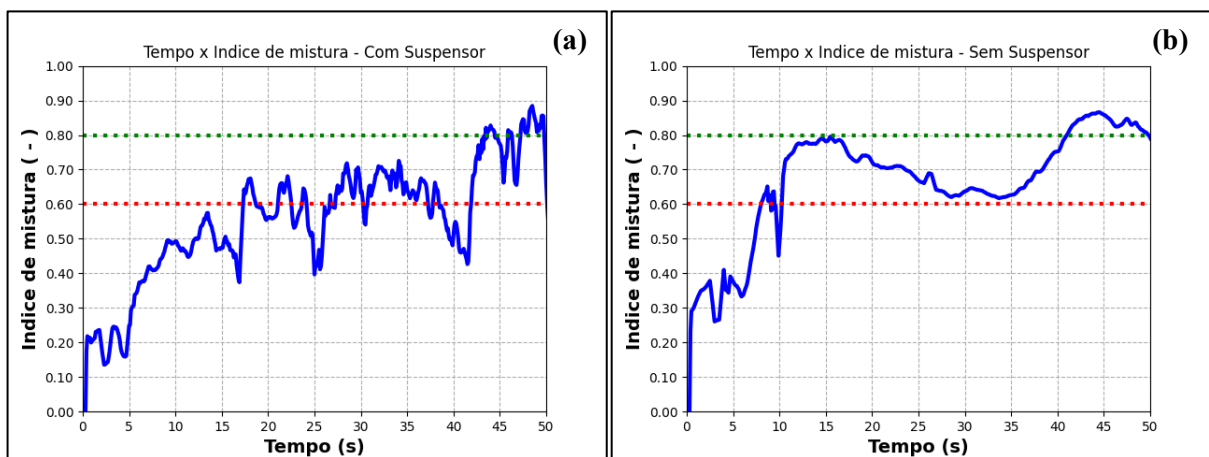
Fonte: Autor, 2026.

5.4.1.3 Efeito Concorrente (Vidro 2 mm + Aço 6 mm)

No tambor sem suspensor (Figura 31 (b)), nota-se que o índice de mistura apresenta crescimento inicial relativamente rápido, estabilizando-se em torno de 0,7–0,8 após aproximadamente 15 a 20 segundos. Esse comportamento reflete a ação concorrente das propriedades físicas: enquanto o maior diâmetro do aço favoreceria sua permanência próximo à periferia do tambor, a maior densidade dessas partículas induz sua migração para as regiões inferiores do leito. Já as partículas de vidro (menores e menos densas) tendem a ocupar camadas superiores. Essa oposição de efeitos gera uma segregação parcial persistente, que limita o fenômeno de mistura.

No tambor com suspensor (Figura 31 (a)), o índice de mistura evolui de forma mais consistente e alcança valores superiores (próximos a 0,9), embora apresente oscilações ao longo do tempo. A presença dos suspensores intensifica a recirculação do leito, promovendo maior redistribuição vertical das partículas e mitigando a tendência de segregação por densidade e tamanho. Esse efeito é crucial no caso concorrente, pois as forças que atuam em sentidos opostos só podem ser compensadas por uma agitação adicional. Assim, mesmo que a segregação ainda ocorra, a ação dos suspensores permite uma mistura mais uniforme ao longo do tempo em comparação ao tambor sem suspensor.

Figura 31 – Gráficos do Tempo x Índice de mistura (Vidro 2 mm + Aço 6 mm) – (a) tambor com suspensor e (b) tambor sem suspensor.

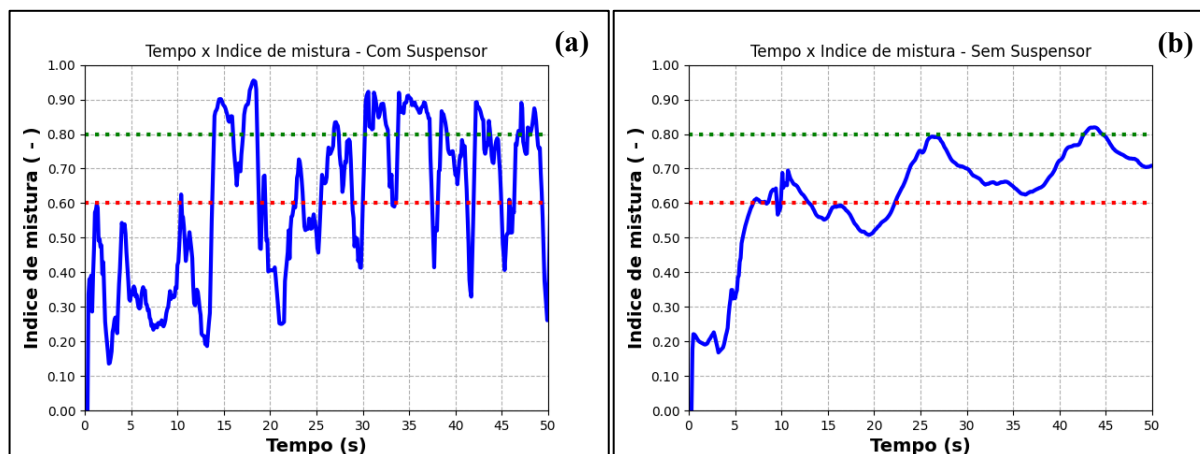


Fonte: Autor, 2026.

5.4.1.4 Efeito Associado (Vidro 2 mm + BBS 6 mm)

É possível observar na (Figura 32 (a)) que houve uma melhoria significativa no índice de mistura ao inserir o suspensor. O gráfico demonstra picos acima da linha de 0,80, indicando um leito mais homogêneo, além de o tempo necessário para atingir a homogeneização das partículas ser menor quando comparado ao tambor sem suspensor (Figura 32 (b)).

Figura 32 – Gráfico do Tempo x Índice de mistura (Vidro 2 mm + BBS 6 mm) – (a) tambor com suspensor e (b) tambor sem suspensor.



Fonte: Autor, 2026.

No caso do efeito associado, destaca-se que as densidades dos materiais são bastante semelhantes ($2257,9 \text{ kg/m}^3$ e $2099,4 \text{ kg/m}^3$, respectivamente), de modo que a segregação observada não se relaciona a diferenças de massa específica, mas sim ao efeito de tamanho. Nesse contexto, o fenômeno de percolação se torna predominante: as partículas menores de vidro tendem a migrar para a região central do leito, enquanto as esferas maiores de BBS permanecem predominantemente na periferia. Resultados semelhantes foram relatados por Brandão *et al.* (2020) e Chen *et al.* (2016), que demonstram que diferenças dimensionais acentuadas intensificam a segregação radial em tambores rotativos.

A presença dos suspensores se mostra fundamental para mitigar esse comportamento, uma vez que promove maior recirculação do leito e redistribuição das partículas. Como consequência, o índice de mistura atinge valores mais elevados ($\approx 0,9$), em comparação com o tambor sem suspensor, que permanece limitado a patamares intermediários ($\approx 0,7\text{--}0,8$). Tal resultado reforça o papel dos suspensores como recurso eficaz para mitigar a segregação induzida por diferenças de tamanho, corroborando observações de Jiang *et al.* (2011) sobre a eficiência desses elementos em sistemas rotativos.

6 CONCLUSÃO

A análise da dinâmica granular em tambores rotatórios com suspensores evidenciou que a geometria dos suspensores exerce influência direta sobre o comportamento das partículas na região ativa, impactando simultaneamente as variáveis LUF, SH, MAP e DSH.

De forma geral, observou-se que o aumento do ângulo α_1 promove a redução da massa de sólidos retida nos suspensores (SH), indicando uma menor capacidade de carregamento, enquanto o ângulo α_2 apresenta efeito oposto, favorecendo o acúmulo de material. Essa resposta não linear entre as variáveis reforça a necessidade do uso do Planejamento Composto Central (PCC), permitindo avaliar os efeitos combinados e identificar tendências que não seriam observadas de forma isolada.

Além disso, os comprimentos dos segmentos (l_1 e l_2) mostraram papel importante na dinâmica de descarga e na formação do véu granular. Configurações com menores ângulos e menores comprimentos favoreceram uma distribuição mais homogênea das partículas na região ativa, refletida em menores valores de CoV (DSH) e melhor aproveitamento da fase ativa (MAP). Por outro lado, aumentos nesses parâmetros tendem a concentrar o material e tornar a descarga menos uniforme.

Em relação ao LUF, verificou-se que, embora os parâmetros geométricos influenciem a dinâmica de descarga, a saída das partículas ocorre dentro de uma faixa angular característica do sistema, indicando que essa variável está mais associada às condições operacionais e às propriedades físicas do material do que exclusivamente à geometria.

As propriedades físicas das partículas também apresentaram influência significativa sobre todas as variáveis analisadas. Partículas maiores e mais densas tendem a aumentar SH e MAP, devido ao maior efeito gravitacional e inercial, enquanto partículas menores apresentam maior capacidade de rearranjo, resultando em menor dispersão (maior CoV). Já partículas irregulares, como feijão e arroz, evidenciaram efeitos associados ao intertravamento e à circularidade, impactando diretamente a dinâmica de escoamento e distribuição.

Do ponto de vista metodológico, os resultados experimentais e numéricos apresentaram boa concordância, indicando que o modelo DEM utilizado foi capaz de representar adequadamente o comportamento do sistema. Nesse sentido, a abordagem numérica se mostrou consistente como um *digital twin*, permitindo a análise de variáveis de difícil mensuração experimental, especialmente na região ativa do tambor.

No que se refere ao fenômeno de mistura, os resultados numéricos evidenciaram de forma clara a influência dos suspensores na intensificação da homogeneização. O tambor com suspensores apresentou valores de índice de mistura superiores (acima de 0,8), enquanto o tambor sem suspensores apresentou desempenho inferior, limitado aos mecanismos naturais de rolamento e deslizamento. Esse comportamento confirma que a presença dos suspensores favorece a formação do véu granular e aumenta a interação entre partículas, reduzindo os efeitos de segregação, principalmente em sistemas com diferenças de tamanho e densidade.

Por fim, os resultados demonstram que a otimização da geometria dos suspensores, aliada ao entendimento das propriedades físicas das partículas, é fundamental para o controle da dinâmica granular e para o aumento da eficiência de processos industriais que utilizam tambores rotatórios.

Como perspectiva futura, sugere-se o desenvolvimento de abordagens experimentais que permitam a análise tridimensional do escoamento, de modo a complementar os resultados obtidos via simulação e aprofundar a compreensão da distribuição espacial das partículas no sistema.

REFERÊNCIAS

- AHMED, Mohamed; BLAZQUEZ, Carlos; SCOTT, Stuart. Experimental and numerical study of the effect of flights on the performance of rotary dryers. **Drying Technology**, v. 33, n. 4, p. 456–469, 2015.
- AJAYI, O. O.; SHEEHAN, M.E. Application of image analysis to determine design loading in flighted rotary dryers. **Powder Technology**, v. 223, p. 123-130, 2012.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2011.05.013>
- ALTAIR ENGINEERING INC. *What is DEM: theoretical background behind the Discrete Element Method (DEM)*. [S.l.]: Altair Engineering, 2021. E-book. Disponível em: <https://www.altair.com/edem>. Acesso em: 02 fev. 2026
- ARNTZ, M. M. H. D., OTTHER, W. K. Den., BRIELS, W. J., BUSSMANN, P. J. T., BOOM, R. M. Granular mixing and segregation in a horizontal rotating drum: A simulation study on the impact of rotational speed and fill level. **AIChE Journal**, v. 54, n. 12, p. 3133–3146, dez. 2008. DOI: [10.1002/aic.11622](https://doi.org/10.1002/aic.11622)
- ARYAEI, A.; HASHEMNIA, K.; JAFARPUR, K. Experimental and numerical study of ball size effect on restitution coefficient in low velocity impacts. **International Journal of Impact Engineering**, v. 37, n. 10, p. 1037–1044, out. 2010. DOI: [10.1016/j.ijimpeng.2010.04.005](https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2010.04.005).
- BAKER, C. G. J. The design of flights in cascading rotary dryers. **Drying Technology**, v. 6, p. 631-653, 1988. <https://doi.org/10.1080/07373938808916402>
- BARROZO, M. A. S.; SANTOS, D. A.; DUARTE, C. R. **Rotary Drum; Fluid Dynamics, Dimensioning Criteria, and Industrial Applications**. 2024.
- BEAULIEU, C. *et al.* Effect of particle angularity on flow regime transitions and segregation of bidisperse blends in a rotating drum. **Computational Particle Mechanics**, v. 9, n. 3, p. 443–463, 1 maio 2022.
- BRANDÃO, R. J. **Investigação numérica e experimental do escoamento granular e dos fenômenos de segregação radial e axial em tambor rotatório**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2019. DOI: 123456789/24614.

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**, v. 364, p. 1–12, 2020. DOI: [10.1016/j.powtec.2020.01.036](https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.01.036).

BRANDAO, 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**, v. 364, p. 1–12, 15 mar. 2020.

CALHEIROS, Cleyla Janey Peixoto. **Análise da dinâmica granular no interior de tambores rotatórios: abordagem experimental e numérica baseada em parâmetros DEM e regimes de escoamento**. 2026. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2026.

CHEN, H.; ZHAO, X. Q.; XIAO, Y. G.; LIU, Y. L.; LIU, Y. Radial mixing and segregation of granular bed bi-dispersed both in particle size and density within horizontal rotating drum. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)**, v. 26, n. 2, p. 527–535, 2016.

CLEARY, P. W. **Discrete element modelling of industrial granular flow applications**. Engineering Computations, v. 2, n. 3, p. 385–415, 1998. DOI: [10.1108/02644409810225871](https://doi.org/10.1108/02644409810225871).

CUNDALL, P. A.; STRACK, O. D. L. A discrete numerical model for granular assemblies. **Géotechnique**, v. 29, n. 1, p. 47–65, 1979. doi.org/10.1680/geot.1979.29.1.47.

DURAN, J. **Sands, Powders, and Grains: An Introduction to the Physics of Granular Materials**. [s.l.] Springer Science & Business Media, 2000.

ELMISAOU, S.; KHAMAR, L.; BENJELLOUN, S.; KHAMAR, M.; GHIDAGLIA, J. M. Numerical study of fertilizer granules dynamics within rotary drum granulator. In: **Computer Aided Chemical Engineering**, v. 50, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-88506-5.50052-8>.

GENG, F. *et al.* Numerical simulation on mixing dynamics of flexible filamentous particles in the transverse section of a rotary drum. **Particuology**, v. 11, n. 5, p. 594–600, out. 2013.

GENG, F. *et al.* Numerical simulation on mixing kinetics of slender particles in a rotary dryer. **Powder Technology**, v. 193, n. 1, p. 50–58, jul. 2009.

GENG, F. LI, Y.; YUAN, L.; LIU, M.; WANG, X.; YUAN, Z.; YAN, Y.; LUO, D. Experimental study on the space time of flexible filamentous particles in a rotary dryer. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 44, p. 708–715, jan. 2013.

HEILBUTH, R. R. **Estudo da mistura e segregação de material granular em tambor rotatório com suspensores empregando a abordagem numérica Lagrangeana**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.14393/ufu.di.2019.42>.

Jiang, M., Zhao, Y., Liu, G., & Zheng, J. Enhancing mixing of particles by baffles in a rotating drum mixer. **Particuology**, 9, 270–278, 2011.

KARALI, M. A. M.; SPECHT, E.; HERZ, F.; MELLMANN, J. **Analysis study of the axial transport and heat transfer of a flighted rotary drum operated at optimum loading**. [s.l.: s.n.], 2015.

KELLY, J.J.; O'DONNELL, J.P. **Residence time model for rotary drums**. Trans. IchemE, v. 55, p. 243-252, 1977.

KROKIDA, M. K.; MAROULIS, Z. B. EFFECT OF DRYING METHOD ON SHRINKAGE AND POROSITY. **Drying Technology**, v. 15, n. 10, p. 2441–2458, nov. 1997.

LI, M.; AN, X. Mixing characteristics and flow behaviors of different shaped tetrahedra in a rotary drum: A numerical study. **Powder Technology**, v. 417, 1 mar. 2023.

LISBOA, M. H. *et al.* A study of particle motion in rotary dryer. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 24, n. 3, p. 365–374, 2007.

LOMINÉ, F.; HELLOU, M.; ROQUES, Y. An analysis of optimal segmented flight design in a rotary dryer. **Powder Technology**, v. 407, 1 jul. 2022.

LUDING, S. **Cohesive, frictional powders: contact models for tension**. Granular Matter, v. 10, p. 235–246, 2008. DOI: [10.1007/s10035-008-0099-x](https://doi.org/10.1007/s10035-008-0099-x).

MELLMANN, J. The transverse motion of solids in rotating cylinders-forms of motion and transition behavior. **Powder Technology**. 2001. Disponível em: <www.elsevier.com/locate/powtec>.

MIAO, Q. *et al.* Axial segregation characteristics and size-induced flow behavior of particles in a novel rotary drum with curved sidewalls. **Particuology**, v. 87, p. 1–19, 1 abr. 2024.

MUJUMDAR, A. S. **Handbook of Industrial Drying**, CRC Press, 2014.

<https://doi.org/10.1201/b17208>

NASCIMENTO, S. M. **Estudo da dinâmica de partículas em tambor rotatório com suspensores: análise experimental e numérica utilizando abordagens Euleriana e Lagrangeana**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2018.

NASCIMENTO, S. M. **Estudo experimental e de simulação da dinâmica de material particulado em tambor rotatório com suspensores**. Dissertação de mestrado. 106 p. PPGEQ-UFU- Uberlândia/MG, 2014.

NOUH, S. A.; KUSHAARI, K.; LAU, K. K.; SAMSURI, S. Material characterization and inter/intra-particle validation for DEM simulation of urea coating process. **Particuology**, v. 88, p. 32-48, 2024. DOI: [10.1016/j.partic.2023.09.010](https://doi.org/10.1016/j.partic.2023.09.010).

O'SULLIVAN, C. **Particulate discrete element modelling: a geomechanics perspective**. Boca Raton: CRC Press, 2011.

OTTINO, J. M.; KHAKHAR, D. V. Mixing and Segregation of Granular Materials. **Annual Review of Fluid Mechanics**, v. 32, n. 1, p. 55–91, jan. 2000.

PERRY, R. H.; GREEN, D. W. **Perry's Chemical Engineers' Handbook**. 7. ed. New York: McGraw-Hill, 1997.

PICHLER, M. *et al.* Influence of particle residence time distribution on the biomass pyrolysis in a rotary kiln. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 158, 1 set. 2021.

PITON, M.; HUCHET, F.; LE CORRE, O.; LE GUEN, L.; CAZACLIU, B. A coupled thermal-granular model in flights rotary kiln: **Industrial validation and process design**. **Applied Thermal Engineering**, v. 75, p. 1011–1021, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.10.052>.

PORTER, S. J., The design of Rotary Dryers and Coolers, **Transport Institute of Chemical Engineering**, v. 41, p. 272-287, 1963.

RHODES, M.; SEVILLE, J. **Introduction to Particle Technology Third Edition**. [s.l.] Wiley-Blackwell, 2024.

SANTOS, D. A., DADALTO, F. O., SCATENA, R., DUARTE, C. R., BARROZO, M. A. S. A hydrodynamic analysis of a rotating drum operating in the rolling regime. **Chemical**

Engineering Research and Design, v. 94, p. 204–212, 1 fev. 2015. DOI:

[10.1016/j.cherd.2014.07.028](https://doi.org/10.1016/j.cherd.2014.07.028).

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, 1 mar. 2016.

SANTOS, R. L. *et al.* Analysis of particles collisions in a newly designed rotating dryer and its impact on the Camu-Camu (*Myrciaria dubia*) pulp drying. **Drying Technology**, v. 40, n. 10, p. 2034–2045, 2021.

SCATENA, R. *et al.* **Caracterização dos diferentes regimes de escoamento presentes em um tambor rotatório**. [s.l.], 2014.

SCHOFIELD, F. R.; GLIKIN, P. G. Rotary coolers for granular fertilizer, **Chemical and Process Engineering Resources**, v. 40, p. 183, 1962.

SEIDENBECHER, J. *et al.* Modelling the final discharge angle in flighted rotary drums. **Granular Matter**, v. 24, n. 4, 1 nov. 2022.

SILVEIRA, J. C. *et al.* A fluid dynamic study of the active phase behavior in a rotary drum with flights of two and three segments. **Powder Technology**, v. 368, p. 297–307, 15 maio 2020.

SILVEIRA, J. **Estudo experimental e numérico do efeito de variáveis operacionais e de projeto sobre a dinâmica de partículas em tambores rotatórios com suspensores**.

Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2022. Disponível em:

<https://doi.org/10.14393/ufu.te.2022.5303>.

TABERLET, N. *et al.* Superstable Granular Heap in a Thin Channel. **Physical Review Letters**, v. 91, n. 26, 24 dez. 2003.

TAVAKKOL, S. *et al.* An Eulerian-Lagrangian method for wet biomass carbonization in rotary kiln reactors. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 139, 1 abr. 2021.

TAVAREZ, F. A.; PLESHA, M. E. Discrete element method for modelling solid and particulate materials. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, v. 70, n. 4, p. 379–404, 23 abr. 2007.

TSUJI, Y.; TANAKA, T.; ISHIDA, T. **Lagrangian numerical simulation of plug flow of cohesionless particles in a horizontal pipe.** *Powder Technology*, v. 71, n. 3, p. 239-250, 1992. DOI: [10.1016/0032-5910\(92\)88030-L](https://doi.org/10.1016/0032-5910(92)88030-L).

WANG, L., ZHOU, W., DING, Z., LI, X., ZHANG, C. Experimental determination of parameter effects on the coefficient of restitution of differently shaped maize in three-dimensions. **Powder Technology**, v. 284, p. 187–194, 1 nov. 2015. DOI: [10.1016/j.powtec.2015.06.042](https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.06.042).

XIA, Y.; STICKEL, J. J.; JIN, W.; KLINGER, J. A review of computational models for the flow of milled biomass I: Discrete-particle models. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 8, n. 16, p. 6142-6156, 2020. DOI: [10.1021/acssuschemeng.0c00402](https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c00402).

YAMAMOTO, Michinori; ISHIHARA, Shingo; KANO, Junya. Evaluation of particle density effect for mixing behavior in a rotating drum mixer by DEM simulation. **Advanced Powder Technology**, v. 27, n. 3, p. 864–870, maio 2016.

YANG, R. Y. *et al.* Numerical simulation of particle dynamics in different flow regimes in a rotating drum. **Powder Technology**, v. 188, n. 2, p. 170–177, dez. 2008.

YANG, R. Y. *et al.* Numerical simulation of particle dynamics in different flow regimes in a rotating drum. **Powder Technology**, v. 188, n. 2, p. 170–177, 20 dez. 2008.

ZHOU, Z. *et al.* Enhancing mixing of cohesive particles by baffles in a rotary drum. **Particuology**, v. 25, p. 104–110, abr. 2016.

ZHOU, Z. *et al.* Enhancing mixing of cohesive particles by baffles in a rotary drum. **Particuology**, v. 25, p. 104–110, 1 abr. 2016.

ZHU, H. P. *et al.* Discrete particle simulation of particulate systems: A review of major applications and findings. **Chemical Engineering Science**, v. 63, n. 23, p. 5728–5770, dez. 2008.

ZHU, X. *et al.* DEM Simulation of a Rotary Drum with Inclined Flights Using the Response Surface Methodology. **Processes**, v. 11, n. 5, p. 1363–1363, 29 abr. 2023.

APÊNDICE A – PLANEJAMENTO COMPOSTO CENTRAL (N, α_1 , α_2 , l_1 e l_2)

Planejamento Composto Central (N, α_1 , α_2 , l_1 e l_2)					
Simulação	N	α_1 (°)	α_2 (°)	l_1 (mm)	l_2 (mm)
1	6	100	100	0,1	0,15
2	6	100	100	0,15	0,1
3	6	100	130	0,1	0,1
4	6	100	130	0,15	0,15
5	6	130	100	0,1	0,1
6	6	130	100	0,15	0,15
7	6	130	130	0,1	0,15
8	6	130	130	0,15	0,1
9	10	100	100	0,1	0,1
10	10	100	100	0,15	0,15
11	10	100	130	0,1	0,15
12	10	100	130	0,15	0,1
13	10	130	100	0,1	0,15
14	10	130	100	0,15	0,1
15	10	130	130	0,1	0,1
16	10	130	130	0,15	0,15
17	4	115	115	0,13	0,13
18	12	115	115	0,13	0,13
19	8	85	115	0,13	0,13
20	8	145	115	0,13	0,13
21	8	115	85	0,13	0,13
22	8	115	145	0,13	0,13
23	8	115	115	0,08	0,13
24	8	115	115	0,18	0,13
25	8	115	115	0,13	0,08
26	8	115	115	0,13	0,18
27*	8	115	115	0,13	0,13

Fonte: Autor, 2026.

APÊNDICE B – CÓDIGO EM *PYTHON* PARA CÁLCULO DO DSH

O script a seguir foi desenvolvido em *Python* para o processamento das imagens da região ativa e cálculo do parâmetro DSH. Foram utilizadas as bibliotecas *OpenCV* para processamento de imagens, *NumPy* para operações numéricas e *Matplotlib* para visualização e delimitação das regiões de análise.

```
import cv2
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib.patches as patches

def analyze_active_phase_dispersion(image_path, threshold=150, n_bins=12, show_plot=True):
    """
    Calculates the dispersion (CoV) of particles in the active phase using binary pixel counting.

    Parameters:
    - image_path: Path to the input image (JPG/PNG).
    - threshold: Grayscale value (0-255) to separate particles from background.
    - n_bins: Number of grid cells across the diameter of the ROI.
    - show_plot: Boolean, set to False to suppress the image window during optimization loops.

    Returns:
    - cov (float): The Coefficient of Variation (%). Minimize this value.
    """

    # --- 1. Load Image ---
    img_orig = cv2.imread(image_path)
    if img_orig is None:
        raise ValueError(f'Could not load image at {image_path}')

    h, w = img_orig.shape[:2]

    # --- 2. Detect ROI (Red Circle) ---
    # Convert to HSV to isolate the red overlay color
    hsv = cv2.cvtColor(img_orig, cv2.COLOR_BGR2HSV)

    # Red exists in two ranges in HSV (0-10 and 170-180)
    lower_red1 = np.array([0, 50, 50]); upper_red1 = np.array([10, 255, 255])
    lower_red2 = np.array([170, 50, 50]); upper_red2 = np.array([180, 255, 255])

    red_mask = cv2.inRange(hsv, lower_red1, upper_red1) + cv2.inRange(hsv, lower_red2, upper_red2)
    contours, _ = cv2.findContours(red_mask, cv2.RETR_EXTERNAL,
cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)

    # Find the largest red contour to define the circle
    center = (w // 2, h // 2)
    radius = h // 3 # Fallback default

    if contours:
        largest_contour = max(contours, key=cv2.contourArea)
        (x, y), r = cv2.minEnclosingCircle(largest_contour)
        center = (int(x), int(y))
        radius = int(r)

    # --- 3. Preprocessing: Binarization ---
    # Convert to grayscale
```

```

gray = cv2.cvtColor(img_orig, cv2.COLOR_BGR2GRAY)

# Apply threshold. Pixels > threshold become 255 (white), others 0 (black)
_, binary_img = cv2.threshold(gray, threshold, 255, cv2.THRESH_BINARY)

# --- 4. Grid Analysis (Pixel Counting) ---
# Define bounding box of the ROI
x_min, y_min = center[0] - radius, center[1] - radius
diameter = 2 * radius
bin_size_px = diameter / n_bins

valid_pixel_counts = []

# Arrays for visualization
bin_vis_data = [] # Stores (rect, count) for plotting

for r in range(n_bins):
    for c in range(n_bins):
        # Calculate bin boundaries
        x0 = int(max(0, x_min + c * bin_size_px))
        x1 = int(min(w, x_min + (c + 1) * bin_size_px))
        y0 = int(max(0, y_min + r * bin_size_px))
        y1 = int(min(h, y_min + (r + 1) * bin_size_px))

        # Determine Bin Center
        xc, yc = (x0 + x1) / 2, (y0 + y1) / 2

        # MASK CHECK: Is the bin center inside the circular ROI?
        dist_to_center = np.sqrt((xc - center[0])**2 + (yc - center[1])**2)

        if dist_to_center <= radius:
            # Slice the binary image for this bin
            bin_slice = binary_img[y0:y1, x0:x1]

            # Count white pixels
            count = cv2.countNonZero(bin_slice)

            valid_pixel_counts.append(count)
            bin_vis_data.append(((x0, y0, x1, y1), count))

# --- 5. Statistical Calculation ---
valid_counts_array = np.array(valid_pixel_counts)

if len(valid_counts_array) > 0:
    mean_val = np.mean(valid_counts_array)
    std_val = np.std(valid_counts_array)
    # Avoid division by zero
    cov = (std_val / mean_val) * 100 if mean_val > 0 else 0.0
else:
    cov = 0.0

print(f'Analysis Complete: CoV = {cov:.2f}% | Valid Bins: {len(valid_counts_array)}')

# --- 6. Visualization (Optional) ---
if show_plot:
    fig, ax = plt.subplots(figsize=(10, 10))
    # Show the binary image background
    ax.imshow(binary_img, cmap='gray')

    # Draw ROI Circle

```

```

        roi_circle = patches.Circle(center, radius, linewidth=3, edgecolor='cyan', facecolor='none',
label='Active Region')
        ax.add_patch(roi_circle)

    # Draw Valid Bins
    for (rect_coords, count) in bin_vis_data:
        x0, y0, x1, y1 = rect_coords
        rect = patches.Rectangle((x0, y0), x1-x0, y1-y0,
                                linewidth=1, edgecolor='lime', facecolor='green', alpha=0.3)
        ax.add_patch(rect)

    # Show count text
    ax.text((x0+x1)/2, (y0+y1)/2, str(count),
           color='yellow', fontsize=9, ha='center', va='center', fontweight='bold')

    ax.set_title(f"Active Phase Dispersion (Binary Count)\nCoV: {cov:.2f}%", color='black')
    plt.axis('off')
    plt.tight_layout()
    plt.show()

    return cov

# --- USAGE EXAMPLE ---
if __name__ == "__main__":
    # Replace with your actual image filename
    image_file = "1000011614.jpg"

    # Run the analysis
    metric = analyze_active_phase_dispersion(image_file, threshold=150, n_bins=12)

```

APÊNDICE C – *SCRIPTS* UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES DEM

Script 1 – Definição de variáveis e parâmetros

Este *script* é responsável pela definição das propriedades físicas das partículas, parâmetros geométricos do tambor e constantes utilizadas nas simulações.

```
# Definição de propriedades físicas, parâmetros geométricos
# e variáveis temporais utilizadas nas simulações DEM.
# Todas as unidades estão no Sistema Internacional (SI).
```

```
# -----
# CONFIGURAÇÕES GERAIS
# -----
```

```
echo both
units si # Sistema Internacional: m, kg, s, N, Pa
```

```
# =====
# DADOS DA PARTÍCULA (TIPO 1)
# =====
```

```
# Densidade da partícula (kg/m³)
variable Rho1          universe 5858.55
```

```
# Diâmetro da partícula (m)
variable Dp1          universe 0.0065
```

```
# Raio da partícula (m)
variable Rp1          equal 0.5*${Dp1}
```

```
# Porosidade do leito (fração)
variable Poros1       universe 0.63
```

```
# Fração volumétrica ocupada pelas partículas
variable PartFrac1    equal 1.0-${Poros1}
```

```
# Volume de uma partícula esférica (m³)
variable VolP1        equal 4.0/3.0*PI*(${Rp1})^3.0
```

```
# Módulo de Young da partícula (Pa)
variable YM1          universe 5.0e6
```

```
# Razão de Poisson da partícula
variable PR1          universe 0.2
```

```
# Módulo de cisalhamento da partícula (Pa)
#  $G = E / [2(1+\nu)]$ 
variable G1           equal (${YM1}/(2.0*(${PR1}+1.0)))
```

```
# =====
# DADOS DO EQUIPAMENTO (PAREDE / MESH - TIPO 2)
# =====
```

```
# Densidade do equipamento (kg/m³)
variable Rho          universe 7000.0
```

```
# Módulo de Young da parede (Pa)
```

```

variable YM          universe 5.0e6

# Razão de Poisson da parede
variable PR          universe 0.3

# Módulo de cisalhamento da parede (Pa)
variable G           equal ($ {YM}/(2.0*($ {PR}+1.0)))

# =====
# PARÂMETROS DE INTERAÇÃO
# =====

# -----
# Coeficientes de restituição
# (fração de energia recuperada após colisão)
# -----

variable ePIP1       universe 0.52 # partícula-partícula
variable ePIW        universe 0.9  # partícula-parede
variable eWP1        equal 1.0*${ePIW} # parede-partícula
variable eWW         universe 0.5  # parede-parede

# -----
# Coeficientes de atrito estático
# (resistência inicial ao deslizamento)
# -----

variable msPIP1      universe 0.317 # partícula-partícula
variable msPIW       universe 1.437 # partícula-parede
variable msWP1       equal 1.0*${msPIW} # parede-partícula
variable msWW        universe 0.5  # parede-parede

# -----
# Coeficientes de atrito de rolamento
# (resistência ao movimento rotacional relativo)
# -----

variable mrPIP1      universe 0.048 # partícula-partícula
variable mrPIW       universe 0.020 # partícula-parede
variable mrWP1       equal 1.0*${mrPIW} # parede-partícula
variable mrWW        universe 0.05  # parede-parede

# =====
# LISTA DE VIZINHOS
# =====

# Tamanho do bin para busca de vizinhos (m)
# Geralmente múltiplo do diâmetro da partícula
variable binsize     equal 1.5*${Dp1}

# =====
# VARIÁVEIS TEMPORAIS
# =====

# Tempo de criação/preenchimento (s)
variable timecreation universe 5.0

# Tempo total de simulação da fase de rotação (s)
variable tempo       universe 10.0

```

```

# Número de Rayleigh (critério para estabilidade do timestep em DEM)
variable Rayleigh      equal ((PI*${Rp1}/(0.163*${PR1}+0.8166))*(${Rho1}/${G1})^0.5)

# Passo de tempo adotado (1/100 do critério de Rayleigh)
variable MyDt          equal ((1.0/100.0)*${Rayleigh})

# Intervalo de escrita dos arquivos de saída (s)
variable writeInterval universe 0.01

# Intervalo para backup/restart (s)
variable bkpInterval   universe 5.0

# Número de passos de tempo para criação das partículas
variable timeSC         equal round(${timecreation}/${MyDt})

# Intervalo (em passos) para salvar arquivos VTK
variable saveEvery      equal round(${writeInterval}/${MyDt})

# Intervalo (em passos) para salvar restart
variable bkpEvery       equal round(${bkpInterval}/${MyDt})

# Número total de passos na fase de rotação
variable nTimeStep      equal round(${tempo}/${MyDt})

# =====
# NÚMERO DE PARTÍCULAS
# =====

# Número total de partículas inseridas
variable nPl            universe 1284.4

# =====
# VELOCIDADE DE ROTAÇÃO
# =====

# Velocidade angular do tambor (rad/s)
# Valor negativo indica sentido horário (dependendo do sistema de referência)
variable omega1         equal -1.94

# =====
# GEOMETRIA DO TAMBOR
# =====

# Diâmetro interno do tambor (m)
variable diameter       equal 0.161

# Raio do tambor (m)
variable radius         equal (${diameter}/2.0)

# Posição inicial em z (m)
variable lenght0        equal 0.0

# Posição final em z (m)
variable lenght1        equal 0.10

# Largura da região de inserção (factory region)
variable width          equal (${radius}/(2.5))

```

Script 2 – Inserção das partículas

Este *script* realiza a inserção das partículas no interior do tambor, respeitando o grau de preenchimento estabelecido para cada condição simulada.

```
### Mixing test - cc
### Filling test – PCC
# Script de preenchimento/inicialização do tambor (um tipo de partícula).
# Observação: create_box 2 define dois tipos: (1) partícula e (2) parede/mesh (tambor/suspensor).

### Initialization
# -----
# CONFIGURAÇÕES INICIAIS
# -----

# Define o sistema de unidades (SI): metros, kg, s, N, Pa, etc.
units si

# Define o tipo de partícula como esfera (necessário para DEM no LIGGGHTS)
atom_style      sphere

# Estrutura interna para mapear átomos em array (melhora acesso a propriedades)
atom_modify     map array

# Condições de contorno (boundary) em x, y e z:
# 'f f f' = fronteiras fixas (não periódicas). Aqui o domínio é "fechado" e
# as partículas interagem com paredes/limites conforme definido pelas paredes/mesh.
boundary        f f f

# Desativa a terceira lei de Newton global (off), comum em DEM para certas configurações
# e para evitar double-counting dependendo do setup.
newton          off

# Configura comunicação paralela: 'single vel yes' inclui informação de velocidade
# quando necessário para troca entre domínios (importante em DEM).
communicate     single vel yes

# Controla eco (log) dos comandos (both = tela + log)
echo both

# Definição manual de processadores (comentada). Útil se você quiser forçar decomposição.
#processors     3 1 2

# Inclui arquivo externo com variáveis (parâmetros físicos e geométricos):
# Ex.: raio do tambor, comprimento, timestep, número de partículas, coeficientes, etc.
include in.variables

# -----
# DOMÍNIO COMPUTACIONAL
# -----

# Define a região do domínio (caixa retangular) no sistema de coordenadas.
# Usa variáveis definidas em in.variables:
# -${radius} a ${radius} em x
# -${radius} a ${radius} em y
# ${lenght0} a ${lenght1} em z
region          domain block -${radius} ${radius} -${radius} ${radius} ${lenght0} ${lenght1} units box
```

```

# Cria a "caixa" de simulação com 2 tipos atômicos (aqui: type 1 = partículas; type 2 = parede mesh)
create_box          2 domain

# -----
# LISTA DE VIZINHOS (NEIGHBORS)
# -----

# Define o "bin size" para construção de lista de vizinhos (binsize em metros).
neighbor            ${binsize} bin

# Sem atraso na atualização da lista (delay 0) para acompanhar contatos em DEM.
neigh_modify        delay 0

### Setup
# -----
# PROPRIEDADES DE MATERIAL E INTERAÇÕES
# -----

# Define módulo de Young por tipo de átomo (peratomtype).
# Aqui: type 1 e type 2 recebem YM1 e YM (ex.: partícula e parede).
fix m1 all property/global youngsModulus peratomtype ${YM1} ${YM}

# Define razão de Poisson por tipo de átomo.
fix m2 all property/global poissonsRatio peratomtype ${PR1} ${PR}

# Coeficiente de restituição para pares de tipo (peratomtypepair):
# A matriz aqui é 2x2 (tipos 1 e 2), preenchida na ordem exigida pelo LIGGGHTS.
# Representa a energia recuperada após colisões (inelasticidade).
fix m3 all property/global coefficientRestitution peratomtypepair 2 ${eP1P1} ${eP1W} ${eWP1} ${eWW}

# Coeficientes de atrito estático (resistência inicial ao deslizamento) para pares de tipo.
fix m4 all property/global coefficientFriction peratomtypepair 2 ${msP1P1} ${msP1W} ${msWP1} ${msWW}

# Coeficientes de atrito de rolamento (resistência ao rolamento) para pares de tipo.
fix m5 all property/global coefficientRollingFriction peratomtypepair 2 ${mrP1P1} ${mrP1W} ${mrWP1}
${mrWW}

# -----
# INSERÇÃO DE PARTÍCULAS (TEMPLATE E DISTRIBUIÇÃO)
# -----

# Define um "template" de partículas esféricas (tipo 1), com densidade e raio constantes.
# O número grande (seed) garante reprodutibilidade da geração.
fix pts1 all particletemplate/sphere 15485863 atom_type 1 density constant ${Rho1} radius constant ${Rp1}

# Define distribuição discreta: 1 template (pts1) com fração 1.0 (100%).
# Para mistura, normalmente existiriam dois templates, um para cada partícula.
fix pdd1 all particledistribution/discrete 32452843 1 pts1 1.0

# -----
# REGIÃO DE INSERÇÃO ("FACTORY")
# -----

# Define uma região cilíndrica onde as partículas serão inicialmente inseridas.
# cylinder z: eixo do cilindro paralelo ao eixo z
# centro (0,0), raio 0.03, zmin 0.02, zmax 0.08 (em unidades SI).
region factory1 cylinder z 0.0 0.0 0.03 0.02 0.08 units box

```

```

# -----
# IMPORTAÇÃO DE MALHA (GEOMETRIA CAD)
# -----

# Importa a geometria do suspensor (mesh STL) e define seu tipo como 2 (parede).
# scale 0.001 converte unidades do STL (tipicamente mm) para m.
fix cad all mesh/surface file meshes/suspensor27.stl type 2 scale 0.001

# Define a malha importada como parede granular utilizando o modelo de contato indicado.
# 'n_meshes 1 meshes cad' indica uma malha nomeada "cad".
fix meshwalls all wall/gran model hertz tangential history rolling_friction cdt mesh n_meshes 1 meshes cad

# -----
# DEFINIÇÃO DO MODELO DE CONTATO DEM
# -----

# Define o estilo do par (pair_style) como granular:
# - hertz: contato normal elástico não linear
# - tangential history: componente tangencial com histórico (atrito de Coulomb)
# - rolling_friction cdt: componente de rolamento (modelo CDT)
pair_style gran model hertz tangential history rolling_friction cdt

# Aplica o modelo a todos os tipos
pair_coeff * *

### Detailed settings
# -----
# INTEGRAÇÃO, GRAVIDADE E PASSO DE TEMPO
# -----

# Integrador de movimento para partículas esféricas (equações translacionais e rotacionais)
fix          integrate all nve/sphere

# Gravidade: magnitude 9.81, vetor (0, -1, 0) => direção -y.
# Isso define qual eixo é vertical no seu sistema.
fix          grav all gravity 9.81 vector 0.0 -1.0 0.0

# Passo de tempo (timestep) definido por variável ${MyDt}
timestep     ${MyDt}

# -----
# SAÍDAS (THERMO) E CONTROLE DE PASSO
# -----

# Computa energia de rotação das partículas (útil para diagnóstico)
compute      1 all erotate/sphere

# Verifica estabilidade numérica do timestep para DEM a cada 1000 passos
# (limites 0.1 e 0.1 conforme sua configuração).
fix          ts all check/timestep/gran 1000 0.1 0.1

# Define o que será impresso no log/terminal periodicamente (custom)
thermo_style custom step atoms cpuremain

# Frequência de impressão
thermo       1000

# Ignora perdas (lost ignore) e desativa normalização (norm no)
thermo_modify lost ignore norm no

```

```

# -----
# COMANDO DE INSERÇÃO (PACKING)
# -----

# Insere as partículas no domínio apenas uma vez (insert_every once).
# overlapcheck no: não checa sobreposição (mais rápido, mas pode inserir com overlap).
# particles_in_region: número de partículas definido pela variável ${nP1}.
# region factory1: insere dentro do cilindro definido acima.
# ntry_mc 100000: tentativas Monte Carlo para encontrar posições.
fix ins1 all insert/pack seed 67867967 distributiontemplate pdd1 insert_every once overlapcheck no
particles_in_region ${nP1} region factory1 ntry_mc 100000

# -----
# EXPORTAÇÃO PARA VISUALIZAÇÃO E PÓS-PROCESSAMENTO
# -----

# Exporta campos das partículas em VTK para visualização no ParaView:
# posição, velocidade, força, raio, tipo, etc.
dump dmp all custom/vtk ${saveEvery} post/granularfillingdrum*.vtk id type type x y z vx vy vz fx fy fz radius

# Exporta a geometria (mesh) em STL ao longo do tempo (útil para checagem e registro)
dump dumpstl all mesh/stl ${saveEvery} post/geometryfillingdrum*.stl

# -----
# EXECUÇÃO DA SIMULAÇÃO (FILLING/STABILIZATION)
# -----

# Roda a simulação por ${timeSC} passos/tempo (definido em in.variables), com opção upto
run ${timeSC} upto

# -----
# FINALIZAÇÃO DO ESTÁGIO E SALVAMENTO DE ESTADO
# -----

# Remove o fix de inserção para encerrar a fase de preenchimento
unfix ins1

# Salva um arquivo restart contendo o estado final (posições/velocidades) para a etapa seguinte
# (normalmente o script de rotação do tambor).
write_restart post/restart/two_seg.restart

```

Script 3 –Rotação do tambor

Este *script* impõe a rotação do tambor e executa a simulação considerando as definições físicas previamente estabelecidas.

```

# Script da etapa de rotação do tambor no LIGGGHTS®.
# Este estágio lê o arquivo restart gerado após o preenchimento (filling),
# define novamente propriedades de interação e impõe rotação à geometria (mesh)
# por meio de move/mesh. A saída (VTK/STL) é usada para pós-processamento no ParaView.

### Initialization
# -----
# CONFIGURAÇÕES INICIAIS
# -----

# Define o sistema de unidades (SI): m, kg, s, N, Pa, etc.

```

```

units si

# Define o tipo de partícula como esfera (DEM)
atom_style      sphere

# Mapeia átomos em estrutura array (facilita acesso/eficiência)
atom_modify     map array

# Condições de contorno fixas em x, y e z (não periódicas)
boundary        f f f

# Desativa a terceira lei de Newton global (comum em algumas configurações DEM)
newton          off

# Comunicação entre processadores (inclui velocidades quando necessário)
communicate     single vel yes

# Eco de comandos (tela + log)
echo both

# Define a decomposição paralela (3 x 1 x 2). Aqui está ativo.
# Observação: isso força a divisão do domínio para execução em paralelo.
processors      3 1 2

# Inclui arquivo externo com variáveis (parâmetros geométricos/físicos/operacionais)
include in.variables

# -----
# DOMÍNIO E LEITURA DO ESTADO INICIAL
# -----

# Declara região do domínio (caixa), usando variáveis do arquivo in.variables:
# -${radius} a ${radius} em x e y; ${length0} a ${length1} em z.
region          domain block -${radius} ${radius} -${radius} ${radius} ${length0} ${length1} units box

# Lê o arquivo restart gerado ao final do script de preenchimento.
# Isso recupera posições, velocidades e estado das partículas.
read_restart    post/restart/two_seg.restart

# -----
# LISTA DE VIZINHOS (NEIGHBORS)
# -----

# Define o "bin size" usado no algoritmo de vizinhos
neighbor        ${binsize} bin

# Atualização sem atraso (delay 0), apropriado para contatos em DEM
neigh_modify    delay 0

### Setup
# -----
# PROPRIEDADES DE MATERIAL E INTERAÇÕES
# -----

# Define módulo de Young por tipo (tipo 1 = partículas; tipo 2 = parede/mesh)
fix m1 all property/global youngsModulus peratomtype ${YM1} ${YM}

# Define razão de Poisson por tipo
fix m2 all property/global poissRatio peratomtype ${PR1} ${PR}

```

```

# Define coeficientes de restituição para pares (matriz 2x2):
# eP1P1 (partícula-partícula), eP1W (partícula-parede), eWP1, eWW.
fix m3 all property/global coefficientRestitution peratomtypepair 2 ${eP1P1} ${eP1W} ${eWP1} ${eWW}

# Define coeficientes de atrito estático para pares de tipo (matriz 2x2)
fix m4 all property/global coefficientFriction peratomtypepair 2 ${msP1P1} ${msP1W} ${msWP1} ${msWW}

# Define coeficientes de atrito de rolamento para pares de tipo (matriz 2x2)
fix m5 all property/global coefficientRollingFriction peratomtypepair 2 ${mrP1P1} ${mrP1W} ${mrWP1} ${mrWW}

# -----
# OBSERVAÇÃO SOBRE TEMPLATES/DISTRIBUIÇÃO
# -----
# As linhas abaixo definem template e distribuição de partículas (tipo 1).
# Neste script, as partículas já foram inseridas anteriormente e recuperadas via read_restart.
# Assim, estes comandos não inserem novas partículas; eles apenas mantêm a estrutura padrão
# do seu conjunto de scripts (caso você reaproveite para outras condições).

# Define template de partícula esférica tipo 1 com densidade e raio constantes
fix pts1 all particletemplate/sphere 15485863 atom_type 1 density constant ${Rho1} radius constant ${Rp1}

# Define distribuição discreta de partículas (100% pts1)
fix pdd1 all particledistribution/discrete 32452843 1 pts1 1.0

# -----
# REGIÃO (FACTORY) - NÃO USADA PARA INSERÇÃO NESTE ESTÁGIO
# -----
# A região abaixo define um bloco ocupando praticamente o domínio.
# Ela não é utilizada para inserção aqui (não há fix insert/pack neste script),
# mas pode ter sido mantida para padronização/compatibilidade.
region factory1 block -${width} ${width} -${width} ${width} ${length0} ${length1} units box

# -----
# IMPORTAÇÃO DA MALHA (GEOMETRIA DO TAMBOR/SUSPENSOR)
# -----

# Importa o arquivo STL do suspensor/tambor e define como tipo 2 (parede mesh).
# scale 0.001 converte (por exemplo) mm para m.
fix cad all mesh/surface file meshes/suspensor27.stl type 2 scale 0.001

# Define a malha como parede granular com modelo de contato:
# hertz + tangential history + rolling friction (cdt)
fix meshwalls all wall/gran model hertz tangential history rolling_friction cdt mesh n_meshes 1 meshes cad

# -----
# MOVIMENTO DA MALHA (ROTAÇÃO DO TAMBOR)
# -----

# Impõe rotação à malha "cad" em torno do eixo z, com origem em (0,0,0).
# axis 0 0 1 define o eixo de rotação.
# omega v_omega1 indica que a velocidade angular é definida por variável (v_omega1),
# que deve estar definida em in.variables (ex.: omega1 = 1.94 rad/s).
fix movecad all move/mesh mesh cad rotate/variable origin 0. 0. 0 axis 0. 0. 1. omega v_omega1

# -----
# DEFINIÇÃO DO MODELO DE CONTATO DEM
# -----

# Define o modelo granular (Hertz-Mindlin com histórico tangencial e rolamento CDT)

```

```

pair_style          gran model hertz tangential history rolling_friction cdt
pair_coeff          * *

### Detailed settings
# -----
# INTEGRAÇÃO, GRAVIDADE E PASSO DE TEMPO
# -----

# Integrador para esferas (translação e rotação)
fix                integrate all nve/sphere

# Gravidade com magnitude 9.81 e direção -y (0, -1, 0)
fix                grav all gravity 9.81 vector 0.0 -1.0 0.0

# Passo de tempo (definido em in.variables)
timestep           ${MyDt}

# -----
# SAÍDAS (THERMO) E CONTROLE NUMÉRICO
# -----

# Configura saída termodinâmica: passo, número de partículas, energia cinética, cpu
thermo_style       custom step atoms ke cpu
thermo             1000
thermo_modify      norm no lost ignore

# -----
# CHECAGEM DE TIMESTEP E INICIALIZAÇÃO
# -----

# Verifica timestep para DEM em um passo antes da simulação principal
# (frequência 1; limites 0.01 e 0.01 conforme seu setup).
fix                ctg all check/timestep/gran 1 0.01 0.01

# Executa 1 passo para inicializar e verificar estabilidade
run                1

# Remove a checagem antes do run principal (para não interferir no restante)
unfix              ctg

# -----
# EXPORTAÇÃO PARA VISUALIZAÇÃO E PÓS-PROCESSAMENTO
# -----

# Exporta campos das partículas em VTK para ParaView
dump dmp all custom/vtk ${saveEvery} post/granularrotatingdrum*.vtk id type type x y z vx vy vz fx fy fz radius

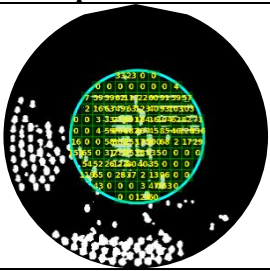
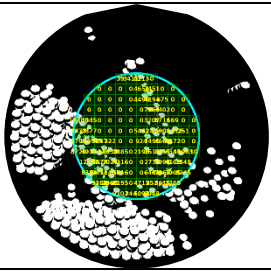
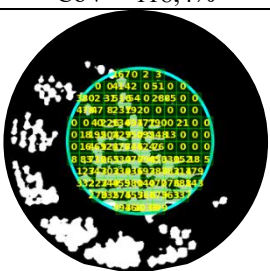
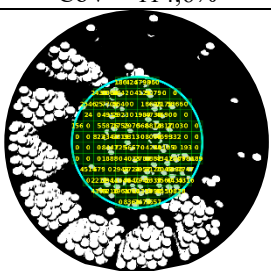
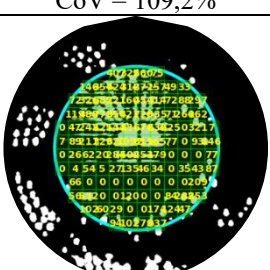
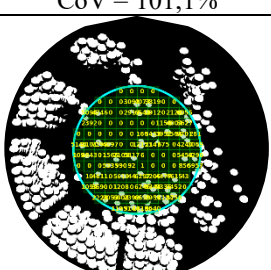
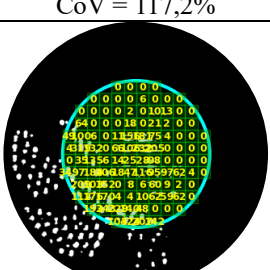
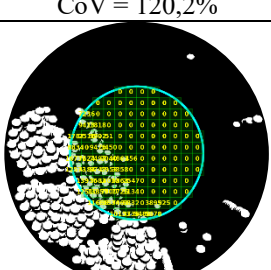
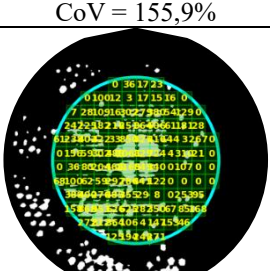
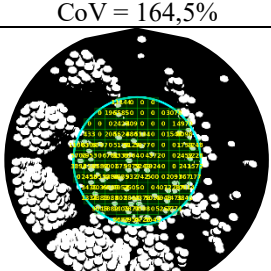
# Exporta geometria (mesh) em STL ao longo do tempo
dump dumpstl all mesh/stl ${saveEvery} post/geometryrotatingdrum*.stl

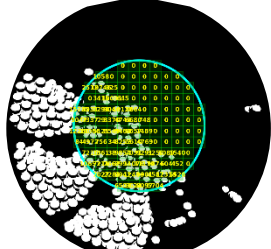
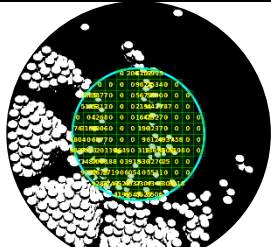
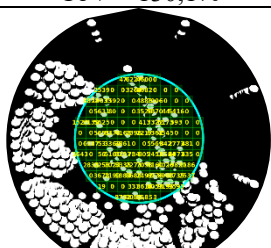
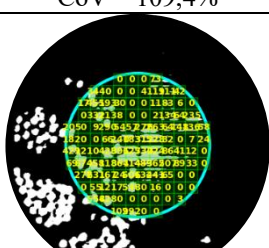
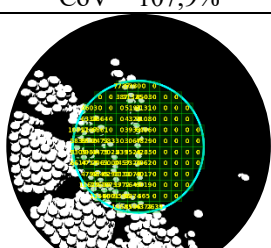
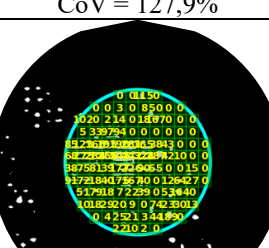
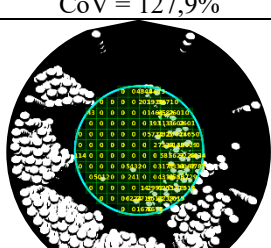
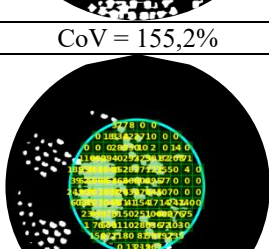
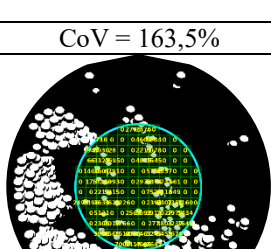
# -----
# EXECUÇÃO PRINCIPAL (ROTAÇÃO)
# -----

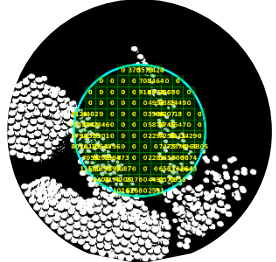
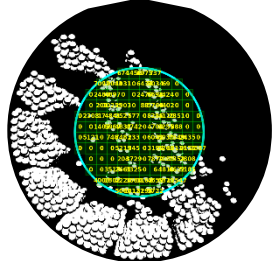
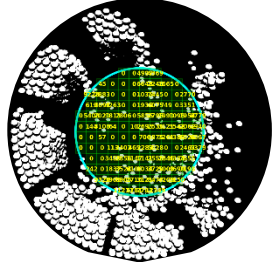
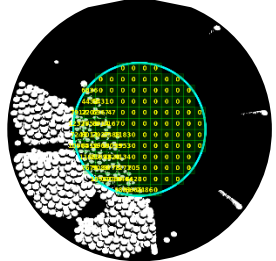
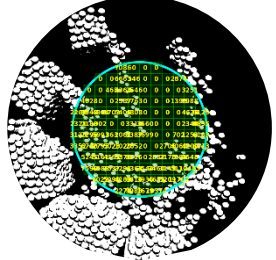
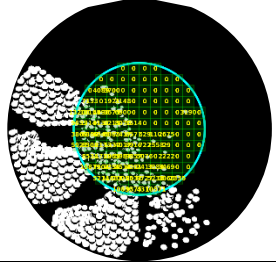
# Roda a simulação por ${nTimeStep} (definido em in.variables).
# Este é o trecho que efetivamente realiza a rotação do tambor e o escoamento granular.
run                ${nTimeStep}

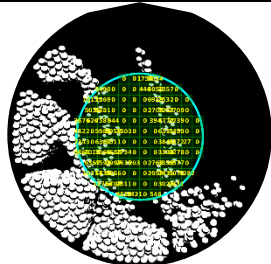
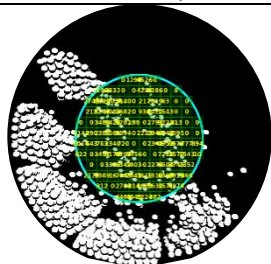
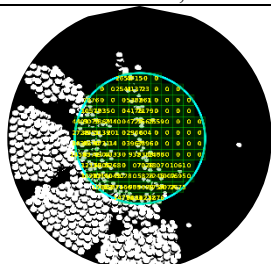
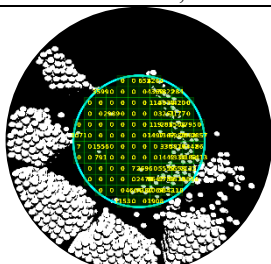
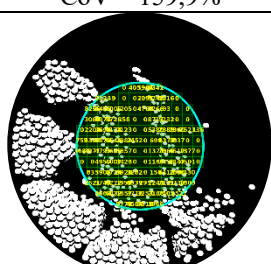
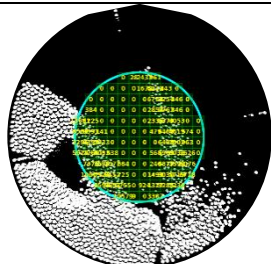
```

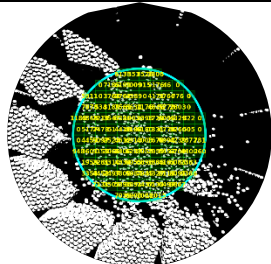
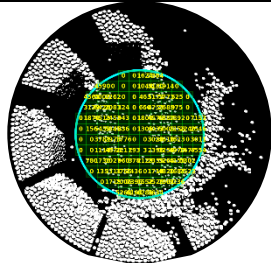
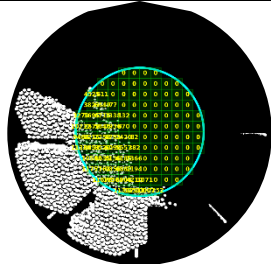
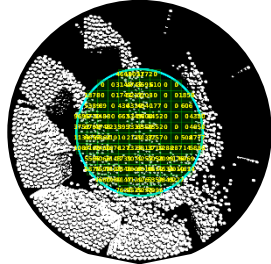
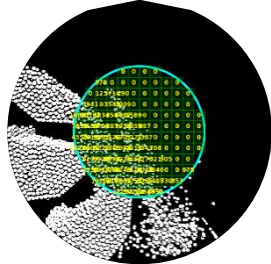
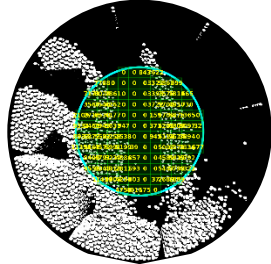
APÊNDICE D – FIGURAS EXPERIMENTAIS E NUMÉRICAS DA *DISPERSION HETEROGENEITY SOLIDS* (DSH)

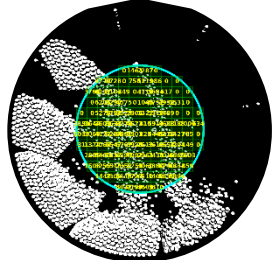
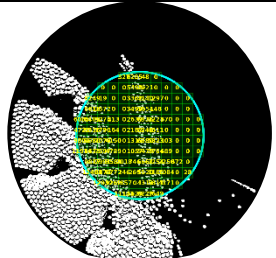
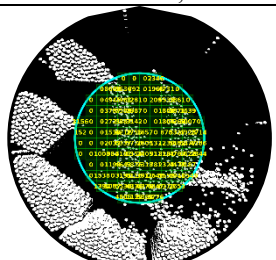
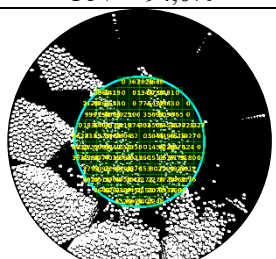
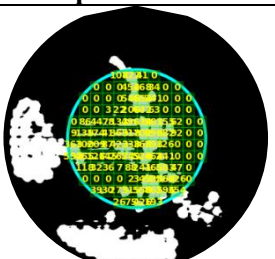
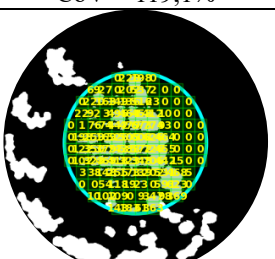
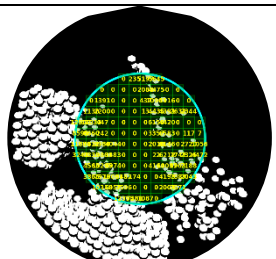
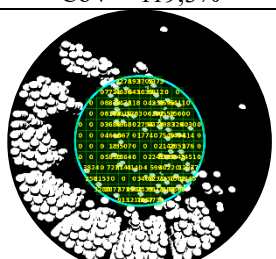
AÇO	Suspensor	Figuras experimentais	Figuras numéricas
	17		
		CoV = 118,4%	CoV = 114,6%
	18		
		CoV = 109,2%	CoV = 101,1%
	19		
		CoV = 117,2%	CoV = 120,2%
	20		
		CoV = 155,9%	CoV = 164,5%
	21		
		CoV = 116,0%	CoV = 108,6%

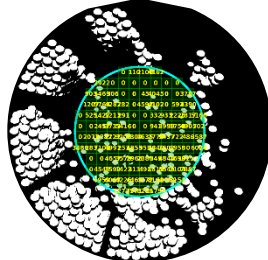
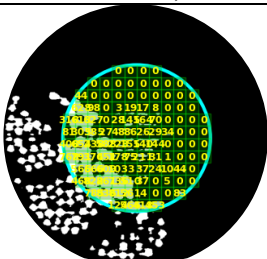
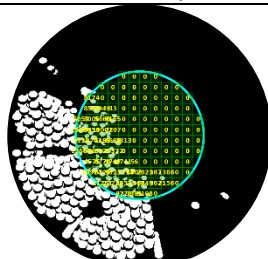
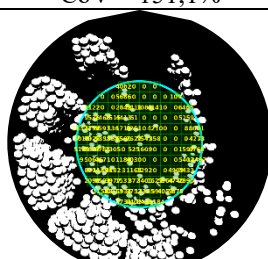
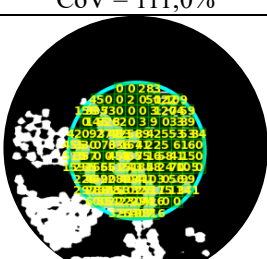
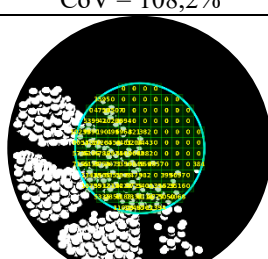
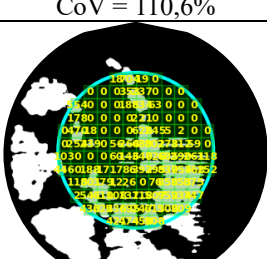
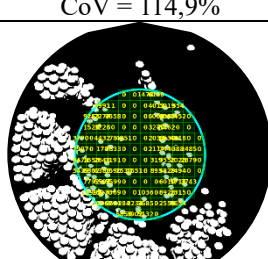
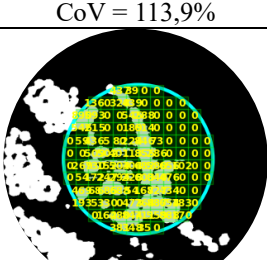
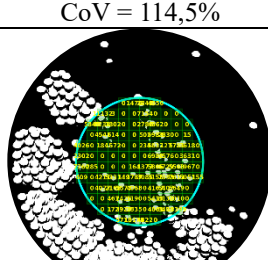
	22		
		CoV = 122,3%	CoV = 121,8%
	23		
		CoV = 129,4%	CoV = 130,1%
	24		
		CoV = 109,4%	CoV = 107,9%
	25		
		CoV = 127,9%	CoV = 127,9%
	26		
		CoV = 155,2%	CoV = 163,5%
	27		
		CoV = 116,7%	CoV = 112,9%
Suspensor		Figuras	Figuras

VIDRO 5		experimentais	numéricas
	17		
		CoV =	CoV = 119,9%
	18		
		CoV =	CoV = 106,2%
	19		
		CoV =	CoV = 104,0%
	20		
		CoV =	CoV = 164,1%
	21		
		CoV =	CoV = 95,9%
	22		
		CoV =	CoV = 114,2%

VIDRO 2	23		
		CoV =	CoV = 120,0%
	24		
		CoV =	CoV = 107,9%
	25		
		CoV =	CoV = 125,0%
	26		
		CoV =	CoV = 159,9%
	27		
		CoV =	CoV = 87,3%
VIDRO 2	Suspensor	Figuras experimentais	Figuras numéricas
	17		
		CoV =	CoV = 127,7%%

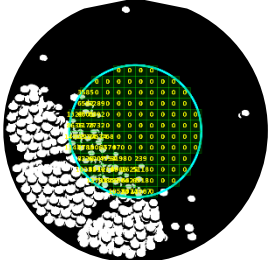
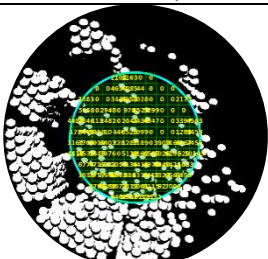
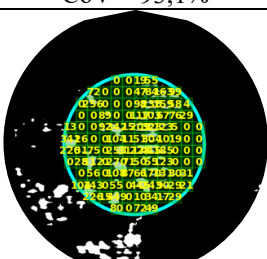
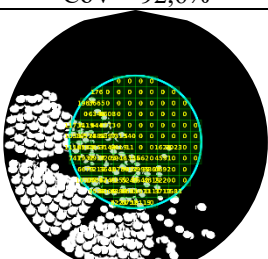
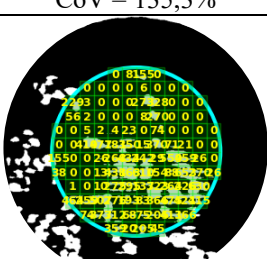
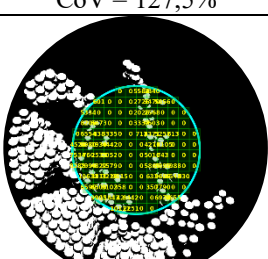
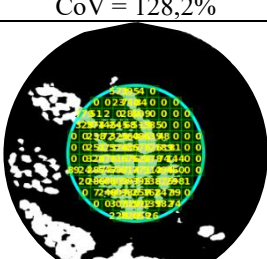
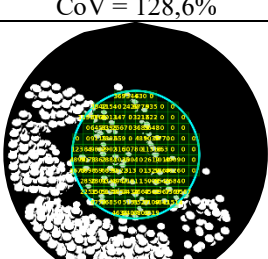
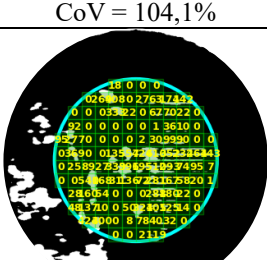
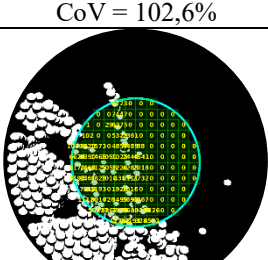
	18		
		CoV =	CoV = 65,6%
	19		
		CoV =	CoV = 93,6%
	20		
		CoV =	CoV = 153,7%
	21		
		CoV =	CoV = 84,8%
	22		
		CoV =	CoV = 119,7%
	23		
		CoV =	CoV = 93,1%

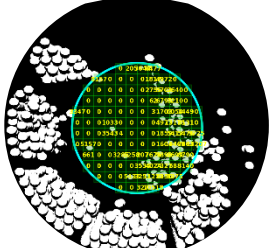
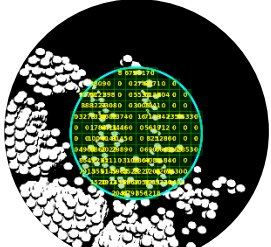
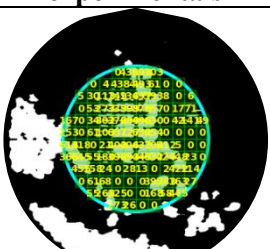
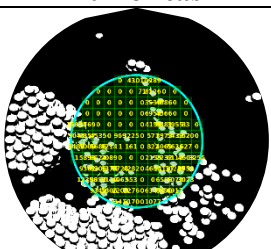
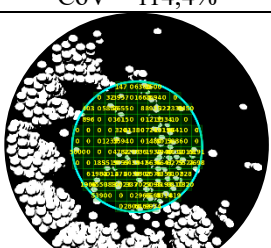
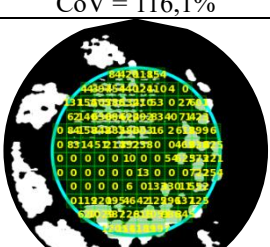
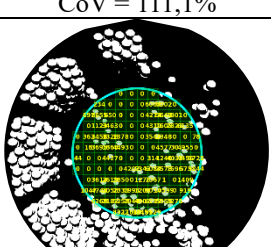
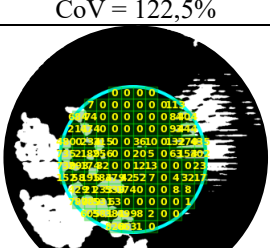
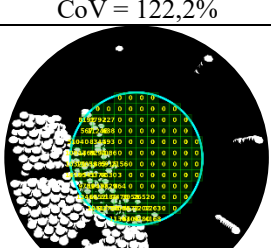
	24		
		CoV =	CoV = 77,6%
	25		
		CoV =	CoV = 111,0%
	26		
		CoV =	CoV = 94,0%
	27		
		CoV =	CoV = 76,7%
	BBS	Suspensor	Figuras experimentais
		17	
			CoV = 119,1%
		18	
			CoV = 112,4%
			Figuras numéricas
			
			CoV = 119,3%
			
			CoV = 113,4%

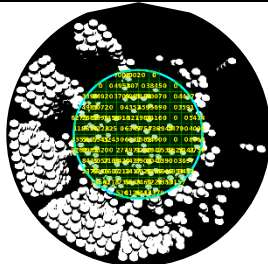
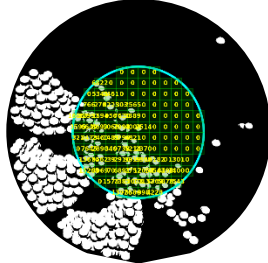
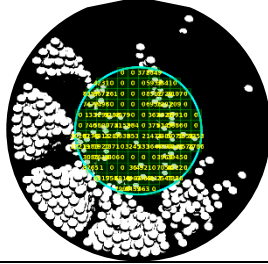
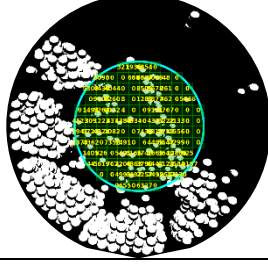
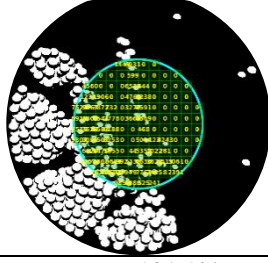
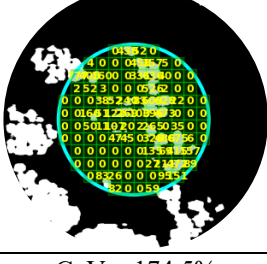
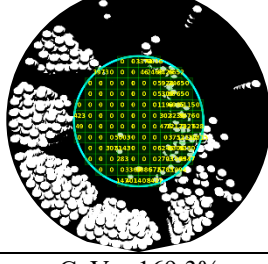
	19		
		CoV = 102,0%	CoV = 105,6%
	20		
		CoV = 150,4%	CoV = 151,1%
	21		
		CoV = 111,0%	CoV = 108,2%
	22		
		CoV = 110,6%	CoV = 114,9%
	23		
		CoV = 113,9%	CoV = 114,5%
	24		
		CoV = 114,3%	CoV = 118,6%

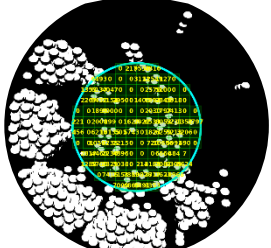
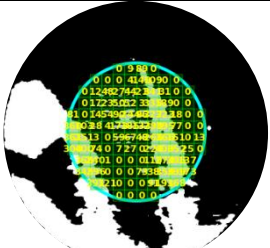
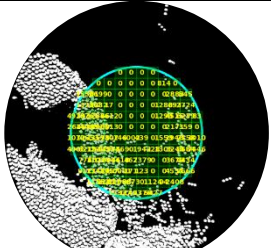
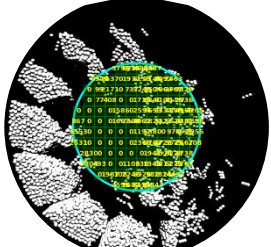
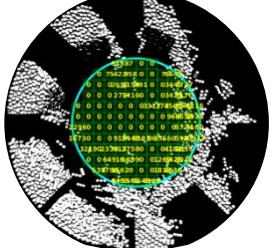
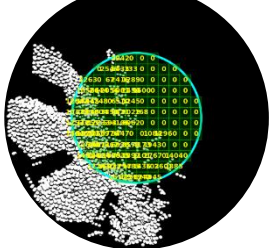
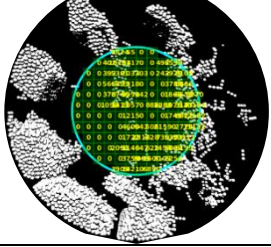
	25		
		CoV = 145,8%	CoV = 147,5%
	26		
		CoV = 150,8%	CoV = 147,8%
	27		
		CoV = 103,6%	CoV = 108,4%
	Suspensor	Figuras experimentais	Figuras numéricas
	17		
		CoV = 137,1%	CoV = 133,8%
	18		
		CoV = 117,2%	CoV = 116,1%
	19		
		CoV = 135,4%	CoV = 140,4%

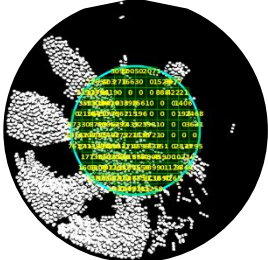
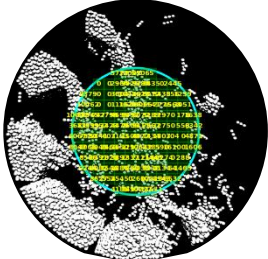
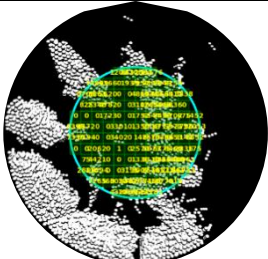
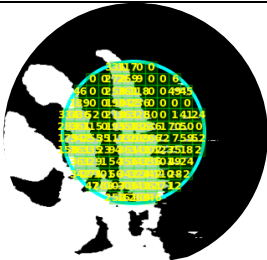
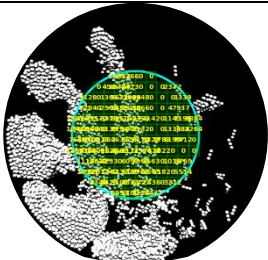
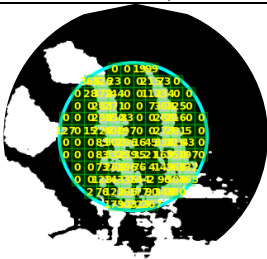
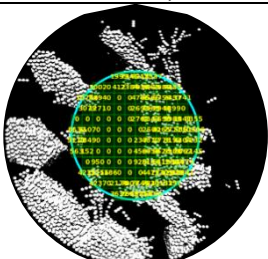
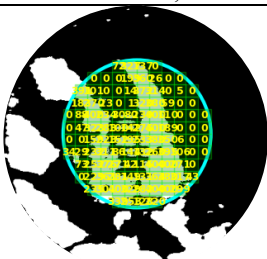
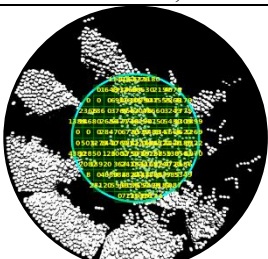
FEIJÃO

	20		
		CoV = 170,0%	CoV = 174,5%
	21		
		CoV = 93,1%	CoV = 92,6%
	22		
		CoV = 135,3%	CoV = 127,5%
	23		
		CoV = 128,2%	CoV = 128,6%
	24		
		CoV = 104,1%	CoV = 102,6%
	25		
		CoV = 141,3%	CoV = 141,6%

MILHO	26		
		CoV = 157,9%	CoV = 151,4%
	27		
		CoV = 112,3%	CoV = 116,4%
	Suspensor	Figuras experimentais	Figuras numéricas
	17		
		CoV = 113,7%	CoV = 114,4%
	18		
		CoV = 116,1%	CoV = 111,1%
	19		
		CoV = 122,5%	CoV = 122,2%
	20		
		CoV = 157,9%	CoV = 161,7%

	21		
		CoV = 81,9%	CoV = 87,6%
	22		
		CoV = 131,2%	CoV = 133,4%
	23		
		CoV = 106,4%	CoV = 107,9%
	24		
		CoV = 107,1%	CoV = 107,1%
	25		
		CoV = 135,8%	CoV = 131,1%
	26		
		CoV = 174,5%	CoV = 169,3%

ARROZ	27		
		CoV = 106,5%	CoV = 108,6%
	Suspensor	Figuras experimentais	Figuras numéricas
	17		
		CoV = 124,1%	CoV = 122,9%
	18		
		CoV = 124,0%	CoV = 107,9%
	19		
		CoV = 147,8%	CoV = 150,0%
	20		
		CoV = 133,7%	CoV = 136,6%
	21		
		CoV = 142,3%	CoV = 145,5%

	22		
		CoV = 102,0%	CoV = 100,6%
	23		
		CoV = 85,8%	CoV = 85,4%
	24		
		CoV = 90,1%	CoV = 90,1%
	25		
		CoV = 90,3%	CoV = 88,8%
	26		
		CoV = 106,9%	CoV = 106,8%
	27		
		CoV = 89,3%	CoV = 88,3%

Fonte: Autor, 2026.

APÊNDICE E – CURVAS DE CALIBRAÇÃO MASSA × ÁREA

Usados no cálculo de SH

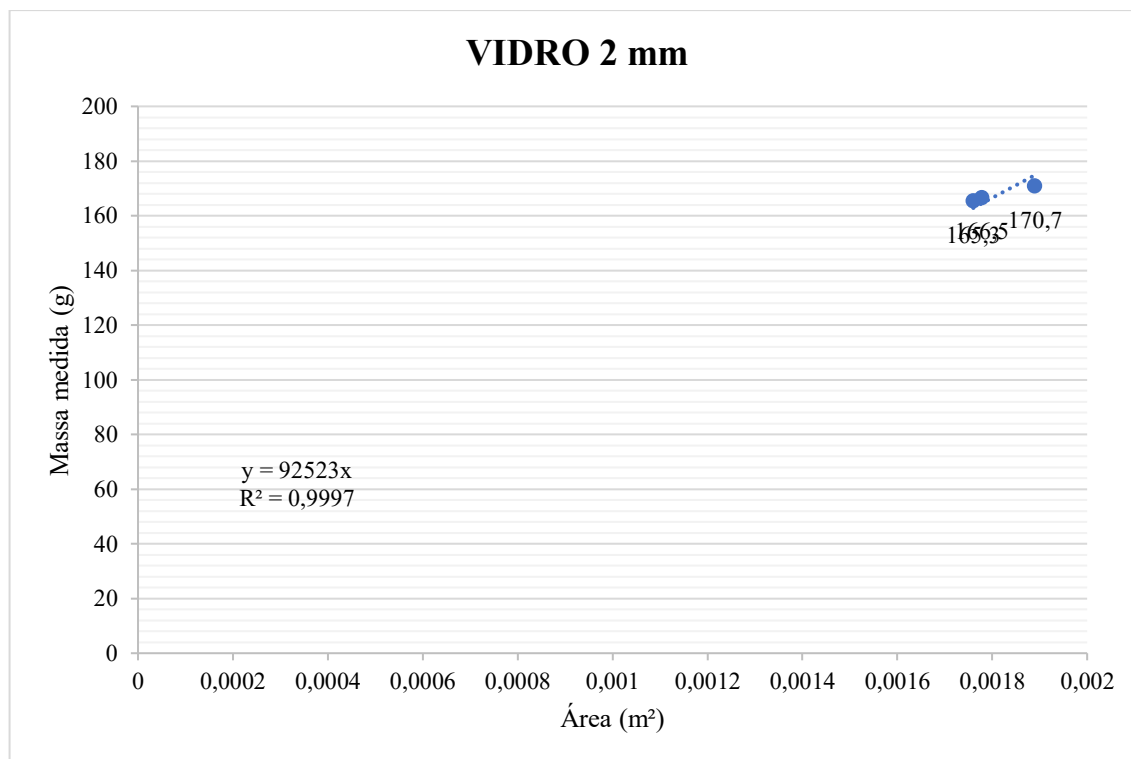
Partícula: Vidro 2 mm

Tabela 34 - Dados experimentais do Vidro 2 mm para calibração massa × área.

Ponto	Área (m ²)	Massa (g)
1		166,5
2		165,3
3		170,7

Fonte: Autor, 2026.

Figura 33 - Curva de calibração massa × área para o Vidro 2 mm.



Fonte: Autor, 2026.

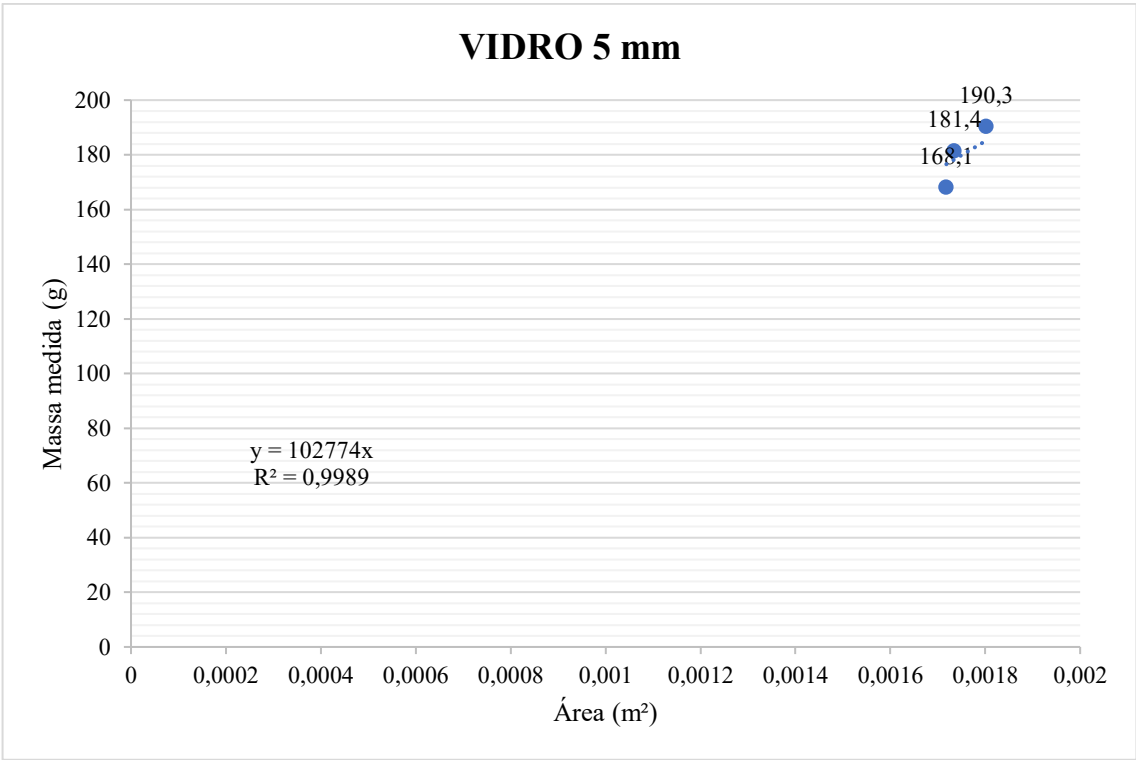
Partícula: Vidro 5 mm

Tabela 35 - Dados experimentais do Vidro 5 mm para calibração massa × área.

Ponto	Área (m²)	Massa (g)
1	0,001718	168,1
2	0,001735	181,4
3	0,001802	190,3

Fonte: Autor, 2026.

Figura 34 - Curva de calibração massa × área para o Vidro 5 mm.



Fonte: Autor, 2026.

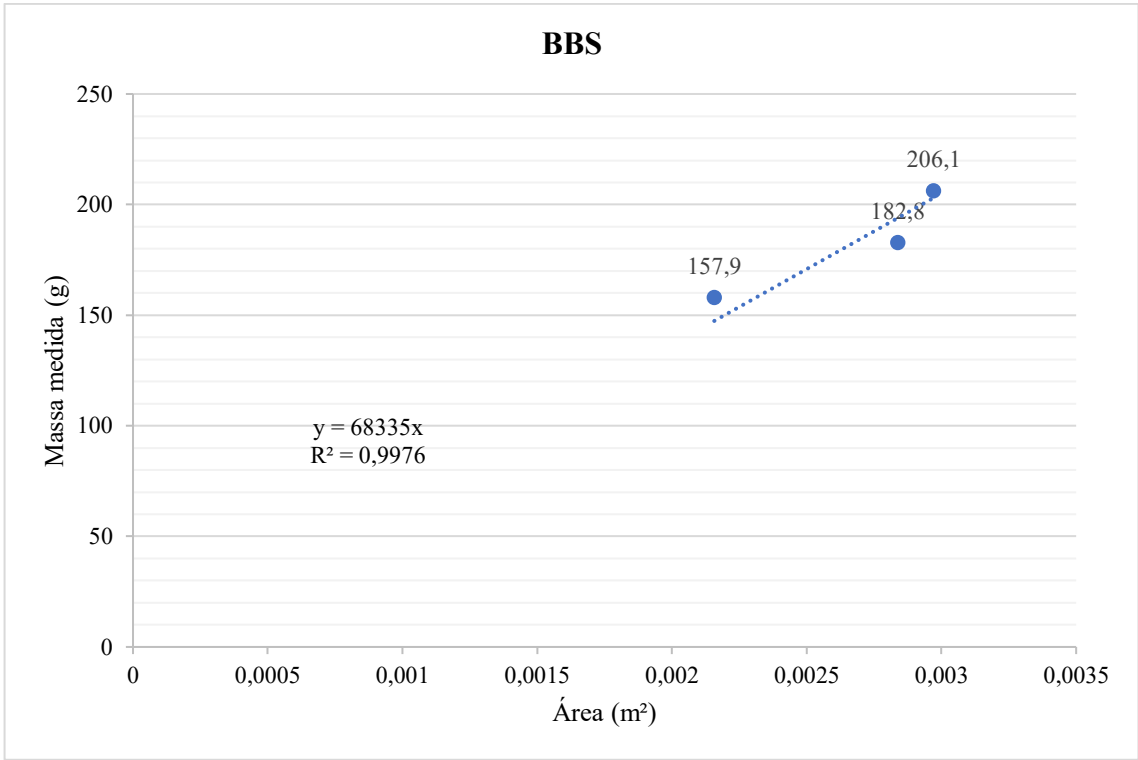
Partícula: BBS

Tabela 36 - Dados experimentais do BBS para calibração massa × área.

Ponto	Área (m²)	Massa (g)
1	0,002157	157,9
2	0,002838	182,8
3	0,002972	206,1

Fonte: Autor, 2026.

Figura 35 - Curva de calibração massa × área para o BBS.



Fonte: Autor, 2026.

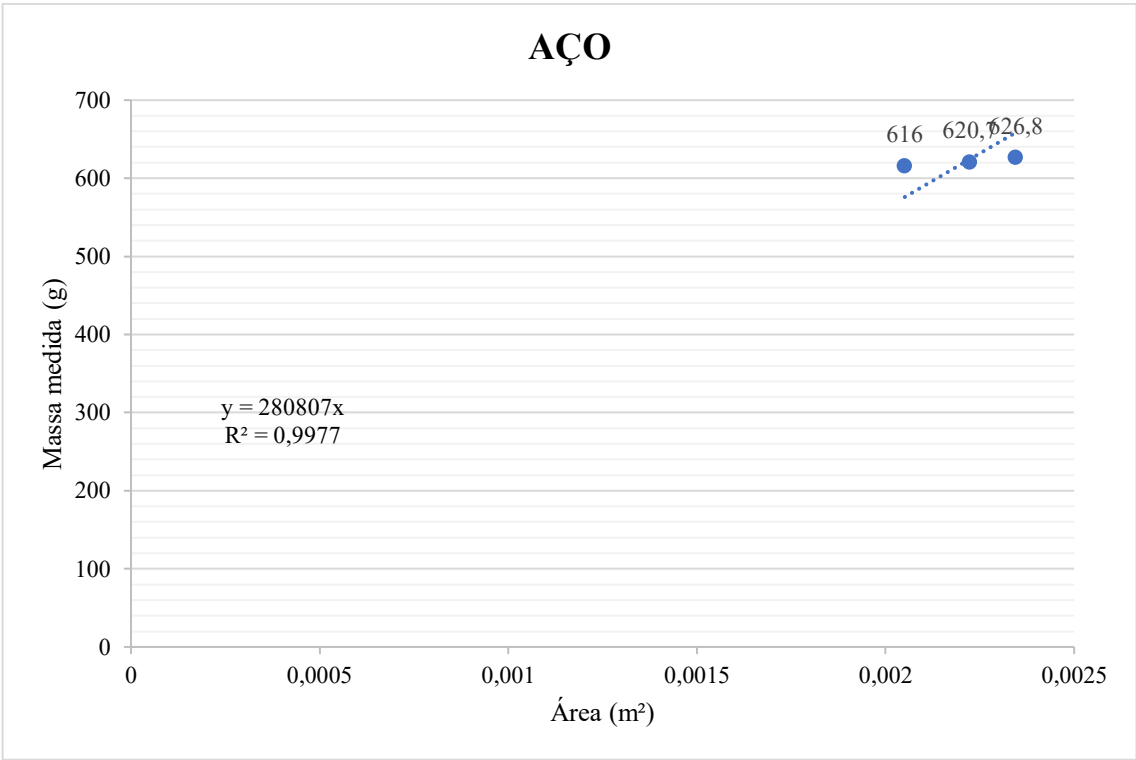
Partícula: Aço

Tabela 37 - Dados experimentais do Aço para calibração massa × área.

Ponto	Área (m²)	Massa (g)
1	0,002345	626,8
2	0,002223	620,7
3	0,002051	616,0

Fonte: Autor, 2026.

Figura 36 - Curva de calibração massa × área para o Aço.



Fonte: Autor, 2026.

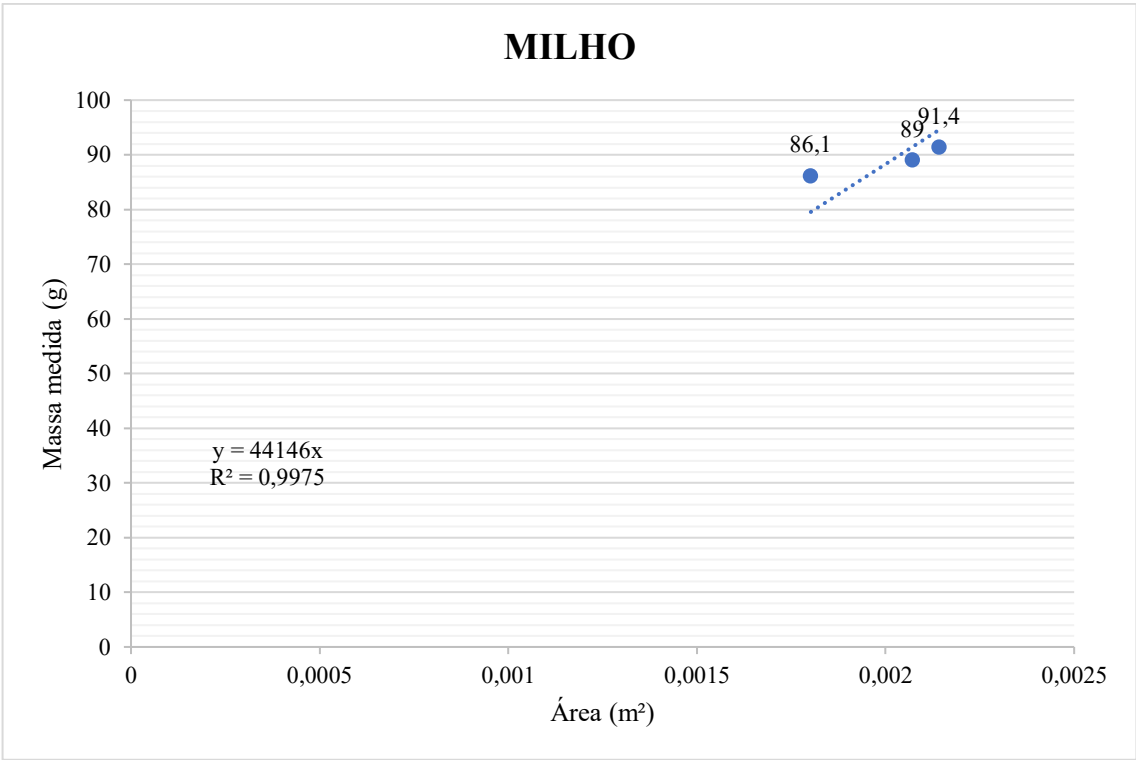
Partícula: Milho

Tabela 38 - Dados experimentais do Milho para calibração massa × área.

Ponto	Área (m²)	Massa (g)
1	0,002142	91,4
2	0,001802	86,1
3	0,002071	89,0

Fonte: Autor, 2026.

Figura 37 - Curva de calibração massa × área para o Milho.



Fonte: Autor, 2026.

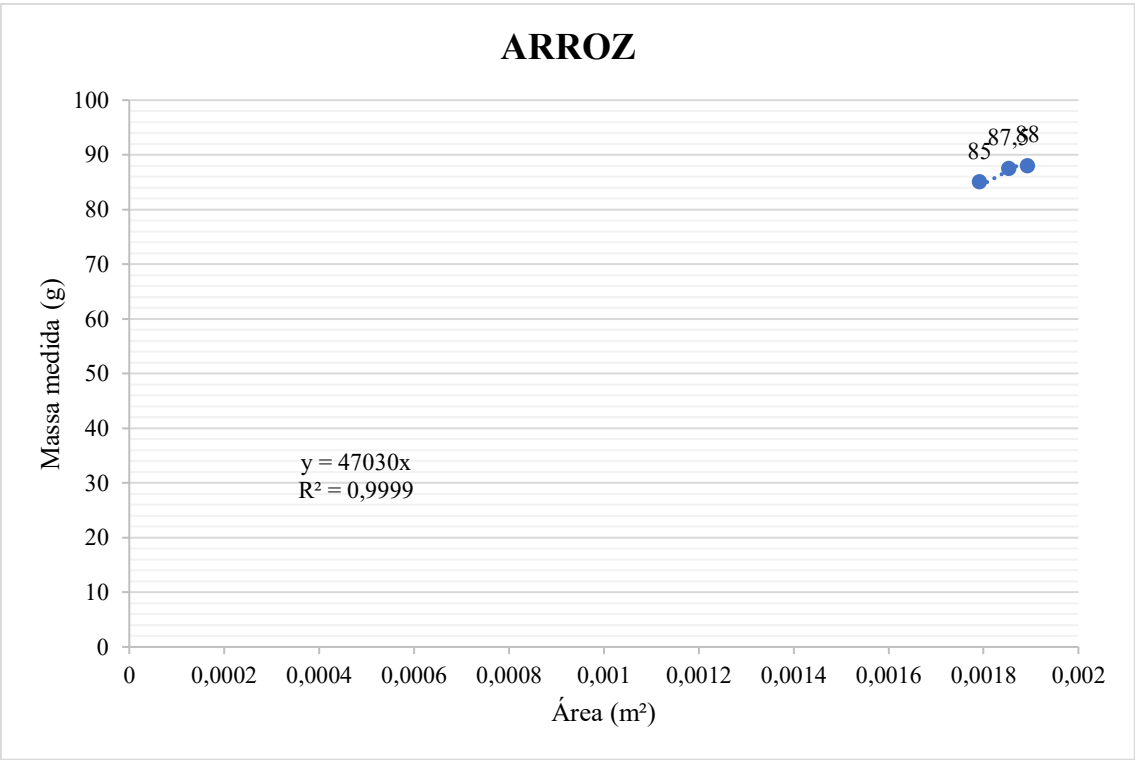
Partícula: Arroz

Tabela 39 - Dados experimentais do Arroz para calibração massa × área.

Ponto	Área (m²)	Massa (g)
1	0,001792	85,0
2	0,001853	87,5
3	0,001893	88,0

Fonte: Autor, 2026.

Figura 38 - Curva de calibração massa × área para o Arroz.



Fonte: Autor, 2026.

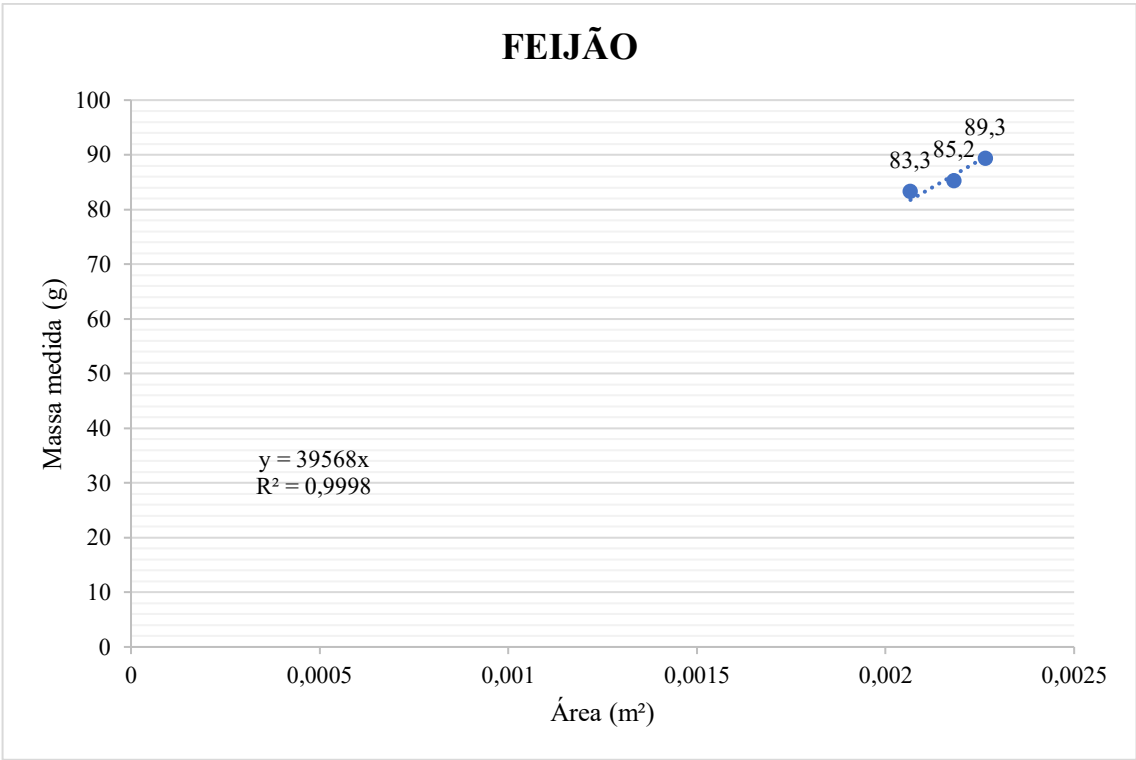
Partícula: Feijão

Tabela 40 - Dados experimentais do Feijão para calibração massa × área.

Ponto	Área (m²)	Massa (g)
1	0,002182	85,2
2	0,002066	83,3
3	0,002265	89,3

Fonte: Autor, 2026.

Figura 39 - Curva de calibração massa × área para o Feijão.



Fonte: Autor, 2026.

APÊNDICE F – TRABALHOS DERIVADOS DESTA PESQUISA

O presente trabalho originou a submissão do seguinte trabalho completo:

Autor(es): Adiel Alves da Silva; Edilene Ferreira da Silva; Kerolayne Vitoria Ferreira Santos; Pedro Antonio Bezerra Santos; Cleyla Janey Peixoto Calheiros; Suellen Mendonça Nascimento; Rodolfo Junqueira Brandão.

Título: ESTUDO EXPERIMENTAL E NUMÉRICO DA DINÂMICA GRANULAR NO INTERIOR DE TAMBORES ROTATÓRIOS COM SUSPENSORES

Evento: 41º Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados – Aracajú (SE)

Anais: <https://sites.google.com/view/enemp/anais-do-enemp-2024>

Situação: apresentado

ESTUDO EXPERIMENTAL E NUMÉRICO DA DINÂMICA GRANULAR NO INTERIOR DE TAMBORES ROTATÓRIOS COM SUSPENSORES

SILVA, Adiel Alves da¹; SILVA, Edilene Ferreira da¹; SANTOS, Kerolayne Vitoria Ferreira¹; SANTOS, Pedro Antonio Bezerra¹; CALHEIROS, Cleyla Janey Peixoto^{1,2}; NASCIMENTO, Suellen Mendonça³; BRANDÃO, Rodolfo Junqueira^{*1}

¹Centro de Tecnologia - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Alagoas (UFAL)

²Curso Técnico de Química, Instituto Federal de Alagoas (IFAL)

³Departamento de Engenharia Química e de Materiais, Universidade Federal de Lavras (UFLA)

*Autor de correspondência. E-mail: rodolfo.brandao@ctec.ufal.br

Resumo: Tambores rotatórios são equipamentos amplamente utilizados na indústria para diversos processos, como secagem, mistura, reação e granulação. Uma modificação comum em tambores rotatórios é a utilização de suspensores, cuja função é recolher o material no fundo do tambor, transportá-lo até uma altura e em seguida descarregá-lo sob a região transversal do tambor. Como esta é a região em que ocorre o maior contato entre fase sólida e fase fluida, esta é chamada de região ativa. Este trabalho tem por objetivo realizar uma análise de sensibilidade através de uma unidade experimental alterando as variáveis: número de suspensores, tamanho dos segmentos do suspensor e os ângulos entre o primeiro segmento e o casco do tambor e entre os dois segmentos, utilizando o planejamento composto central. O efeito dessas variáveis foi analisado sob o carregamento dos sólidos nos suspensores e a distribuição desses na região ativa do tambor. Através dos estudos deste trabalho foi possível observar que o número de suspensores e o comprimento dos segmentos, influenciam significativamente na classificação de carregamento do tambor, que por sua vez impactam na distribuição sob a região ativa. Quanto maiores os ângulos entre suspensor e casca do tambor, menores os ângulos de última descarga. Menores ângulos entre os segmentos dos suspensores, elevam a massa de sólidos no suspensor em função da posição angular, também influenciando na classificação do carregamento. A alteração do número de suspensores não teve significado expressivo em relação ao melhor aproveitamento da região ativa, as configurações para uma região ativa mais homogênea foram nos valores de α_1 e α_2 iguais a 85° e nos comprimentos l_1 e l_2 iguais a 0,08.

Palavras-chave: tambor rotatório; região ativa; suspensores.

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY OF GRANULAR DYNAMICS INSIDE ROTARY DRUMS WITH FLIGHTS

Abstract: Rotary drums are widely used in industry for various processes, such as drying, mixing, reaction, and granulation. A common modification in rotary drums is the use of flights, which function to collect material from the bottom of the drum, transport it to a certain height, and then discharge it across the drum's cross-section. As this is the region where the greatest contact between the solid and fluid phases occurs, it is called the active region. This study aims to perform a sensitivity analysis using an experimental unit by altering variables such as the number of lifters, the size of the lifter segments, and the angles between the first segment and the drum shell, as well as between the two segments, using central composite design. The effect of these variables was analyzed in terms of the loading of solids in the lifters and their distribution in the

O presente trabalho originou a submissão do seguinte trabalho completo:

Autor(es): Adiel Alves da Silva, Pedro Antonio Bezerra Santos, Cleyla Janey Peixoto Calheiros, Thais Logetto Caetité Gomes, Joao Inacio Soletti, Suellen Mendonça Nascimento, Rodolfo Junqueira Brandão e Marcos Antonio de Souza Barrozo.

Título: *Influence of Flight Geometry on Particle Dispersion in the Active Phase of Rotary Dryers: An Image Analysis Approach*

Evento: 2026 *International Drying Symposium* – IDS'26 – Paris, France

Situação: submetido e aprovado

Influence of Flight Geometry on Particle Dispersion in the Active Phase of Rotary Dryers: An Image Analysis Approach

Adiel Alves da Silva¹, Pedro Antonio Bezerra Santos¹, Cleyla Janey Peixoto Calheiros¹, Thais Logetto Caetité Gomes¹, Joao Inacio Soletti¹, Suellen Mendonça Nascimento², Rodolfo Junqueira Brandão^{1*}, Marcos Antonio de Souza Barrozo³

¹ University Federal of Alagoas, Center of Technology, Av. Lourival Melo Mota, s/n, Tabuleiro do Martins, Maceio, 57072-970, Brazil

² University Federal of Lavras, Department of Chemical and Materials Engineering, Trevo Rotatório Professor Edmir Sá Santos, Lavras, 37203-202, Brazil

³ University Federal of Uberlândia, Faculty of Chemical Engineering, Avenida João Naves de Ávila, 2121, Santa Mônica, Uberlândia, 38400-902, Brazil

*E-mail of the corresponding author: rodolfo.brandao@ctec.ufal.br

Abstract

In rotary dryers equipped with flights, heat and mass transfer occur predominantly in the active phase, where solid-fluid interfacial exposure is maximized. The efficiency of this stage depends directly on the spatial distribution of particles, which is governed by flight geometry. This work investigated the influence of different geometric configurations on particle dispersion within the active phase using rice grains as particulate material and employing a Central Composite Design (CCD). Dispersion was quantified by the Coefficient of Variation (CoV), obtained via image analysis processed using a Python-based algorithm, serving as a robust dimensionless metric for equipment optimization. The evaluation of 27 configurations revealed CoV values ranging from 85.47% to 150.09%, highlighting distinct dispersion regimes. It was observed that lower CoV values correlate with a more uniform distribution and higher utilization of the active phase, whereas high values indicate particle clustering and underutilization of the drying volume. Configurations 23, 25, and 27 exhibited the best performance (lowest CoV), characterized by symmetric segment angles ($\alpha_1 = \alpha_2 = 115^\circ$) and length ratios (l_1/D and l_2/D): (0.08, 0.13), (0.13, 0.08), and (0.13, 0.13), respectively. The results demonstrate that the combined optimization of these geometric parameters is crucial for the formation of a homogeneous particle curtain and, consequently, for the efficiency of the drying process.

Keywords: Rotary Dryer; Image Analysis; Particle Dispersion; Flight Geometry; Active Phase.

Introduction

Rotary dryers equipped with internal flights are widely used in industrial drying operations due to their robustness and scalability (Elmisaoui et al., 2021; Nascimento, 2018). In these systems, heat and mass transfer occur predominantly in the active phase, where particles are lifted and released to form a cascading curtain, maximizing solid-fluid interfacial exposure. The spatial distribution of particles within this active region is therefore a key factor governing drying efficiency.

Drying performance in flighted rotary drums depends directly on how uniformly particles are dispersed during their free fall. Non-uniform curtains, particle clustering, or underutilization of the drying volume reduce effective contact between phases and compromise heat and mass transfer rates. Since particle trajectories and curtain structure are

O presente trabalho originou a submissão do seguinte trabalho completo:

Autor(es): Adiel Alves da Silva, Cleyla Janey Peixoto Calheiros e Rodolfo Junqueira Brandão.

Título do projeto de pesquisa: AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA DINÂMICA DE PARTÍCULAS NO INTERIOR DE TAMBORES ROTATÓRIOS COM E SEM SUSPENSORES.

Título do plano de atividades: ESTUDO EXPERIMENTAL DA DINÂMICA GRANULAR NO INTERIOR DE TAMBORES ROTATÓRIOS COM SUSPENSORES.

Evento: 35º Congresso Acadêmico de Iniciação Científica (CAIC/UFAL)

Anais: <https://www.repositorio.ufal.br/>

Situação: apresentado e premiado com a [Premiação de Excelência Acadêmica](#).