



JÚLIA COELHO SOUSA

**ANÁLISE DO EFEITO DA VELOCIDADE DE ROTAÇÃO E GRAU DE
ENCHIMENTO NA DINÂMICA DE PARTÍCULAS EM TAMBOR
ROTATIVO PARA A SECAGEM DE CAFÉS USANDO DEM**

**LAVRAS – MG
2023**

JÚLIA COELHO SOUSA

**ANÁLISE DO EFEITO DA VELOCIDADE DE ROTAÇÃO E GRAU DE
ENCHIMENTO NA DINÂMICA DE PARTÍCULAS EM TAMBOR ROTATIVO
PARA A SECAGEM DE CAFÉS USANDO DEM**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de Lavras, como parte das
exigências do Curso de Engenharia Química, para a
obtenção do título de Bacharel.

Prof^a Dra. Suellen Mendonça Nascimento
Orientadora

**LAVRAS – MG
2023**

JÚLIA COELHO SOUSA

**ANÁLISE DO EFEITO DA VELOCIDADE DE ROTAÇÃO E GRAU DE
ENCHIMENTO NA DINÂMICA DE PARTÍCULAS EM TAMBOR ROTATIVO
PARA A SECAGEM DE CAFÉS USANDO DEM**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada à
Universidade Federal de Lavras, como parte das
exigências do Curso de Engenharia Química, para a
obtenção do título de Bacharel.

APROVADO em 01 de dezembro de 2023.

Prof. Dr. Irineu Petri Junior DEG/UFLA

Prof^a. Dra. Isabele Cristina Bicalho DEG/UFLA

Prof^a. Dra. Suellen Mendonça Nascimento
Orientadora

**LAVRAS – MG
2023**

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a todos que desempenharam um papel crucial na realização do meu trabalho de conclusão de curso. Em primeiro lugar, agradeço a Deus por me guiar, fornecendo força e orientação ao longo de toda essa jornada acadêmica.

À minha mãe, Mara, ao meu pai, José Eli, ao meu irmão, Vinícius, quero expressar minha sincera gratidão pelo amor, apoio e incentivo incondicionais que vocês me proporcionaram ao longo desses anos. O apoio emocional, encorajamento e palavras de sabedoria foram fundamentais para minha conquista. Vocês foram os meus pilares durante minha trajetória e com toda certeza só cheguei até aqui pois vocês me possibilitaram isso.

Minha imensa gratidão à dedicada orientadora, Suellen, pela sua orientação e pelo conhecimento compartilhado. Suas valiosas sugestões, paciência e mentorias foram fundamentais para o desenvolvimento sólido e relevante do trabalho. Além disso, agradeço ao Rodolfo e ao Pedro. Seus conhecimentos e explicações foram essenciais para execução deste trabalho.

Por fim, mas não menos importante, quero agradecer aos meus queridos amigos, que estiveram ao meu lado, oferecendo apoio e incentivo ao longo todo o percurso. Suas palavras de encorajamento, momentos de descontração e apoio mútuo foram um conforto para superar os desafios acadêmicos. Um agradecimento especial à família Egg, que ofereceu um grande suporte nesta etapa final do curso.

A cada um de vocês, expressei minha mais profunda gratidão. Sem o apoio, amor, orientação e amizade de todos vocês, essa conquista não teria sido possível. Sou verdadeiramente grata por ter compartilhado essa jornada com pessoas tão especiais em minha vida.

RESUMO

O café é um dos recursos primários de maior valor global. Em seu processamento, a secagem é uma etapa crucial, pois reduz a umidade do grão, prevenindo a degradação do material. A secagem utilizando secadores rotativos com suspensores destaca-se pela sua simplicidade, eficiência e flexibilidade. A eficácia do processo pode ser aprimorada pelo uso de micro-ondas no aquecimento dos grãos, resultando em melhorias nas características do produto final. Estudos experimentais sobre esse equipamento pode ser dispendioso em termos de recursos financeiros e tempo. Diante disso, o objetivo do presente trabalho foi realizar a análise numérica da fluidodinâmica de grãos de café arábica descascado e despulpado antes da torra em um secador micro-ondas rotativo, com o intuito de analisar a influência da fração de preenchimento e a velocidade de rotação na dinâmica das partículas. Para isso, foi utilizado o Método dos Elementos Discretos (DEM), que permite a análise minuciosas do comportamento de cada partícula de forma individual. Para realizar as simulações foi utilizado o *software Liggghts®*, sendo utilizado um tambor de diâmetro de 62,98 cm e comprimento de 14,13, com nove suspensores de dois segmentos de 3,935 cm de altura e 7,87 cm de comprimento. Para representar os grãos de café, foi utilizado um *clump* de três esferas, sendo uma esfera central de diâmetro de 3,28 mm e duas laterais de 1,9 mm, dispostas em um ângulo de 30°. Para análise da influência da velocidade e fração de preenchimento, foi realizado um Planejamento Composto Central (PCC), utilizando as combinações de fração de preenchimento de 7,58, 20, 50, 80 e 92,43% e de velocidade de rotação de 5,86, 10, 20, 30 e 34,14 rpm. Para realizar as análises dos dados, foi utilizado o *software ParaView®*. As respostas foram coletadas após 10 segundos de simulação, tempo suficiente para que fosse atingido o regime estacionário. Através das análises foi possível concluir que para frações de preenchimento maiores que 20%, o tambor sempre estava sobrecarregado, sendo mais vantajoso trabalhar em conjunto com baixas velocidades. Já com o aumento da velocidade de rotação, foi possível identificar que o ângulo de última descarga aumenta e o tempo de retenção diminui. Para um desempenho maior na secagem, é aconselhável trabalhar com menores frações de preenchimento. Através da análise da superfície de resposta das três variáveis dependentes, não foi possível determinar um ponto ótimo de operação do equipamento na faixa de variáveis estudadas. Com isso, conclui-se que a utilização da ferramenta DEM foi bastante eficaz, permitindo o estudo aprofundado sobre as partículas no processo de secagem em um tambor rotativo com micro-ondas.

Palavras-chave: Cafés especiais; Fluidodinâmica computacional; Secagem em micro-ondas.

ABSTRACT

Coffee is one of the most valuable primary resources globally. In its processing, drying is a crucial step, as it reduces the moisture in the grain, preventing degradation of the material. Drying using rotary dryers with hangers stands out for its simplicity, efficiency and flexibility. The effectiveness of the process can be improved by using microwaves to heat the grains, resulting in improvements in the characteristics of the final product. Experimental studies on this equipment can be expensive in terms of financial resources and time. Therefore, the objective of the present work was to carry out a numerical analysis of the fluid dynamics of peeled and pulped Arabica coffee beans before roasting in a rotating microwave dryer, with the aim of analyzing the influence of the fill fraction and rotation speed. in particle dynamics. For this, the Discrete Element Method (DEM) was used, which allows for a detailed analysis of the behavior of each particle individually. To carry out the simulations, the Liggghts® software was used, using a drum with a diameter of 62.98 cm and a length of 14.13, with nine two-segment hangers measuring 3.935 cm in height and 7.87 cm in length. To represent the coffee beans, a clump of three spheres was used, with a central sphere measuring 3.28 mm and two lateral spheres measuring 1.9 mm, arranged at an angle of 30°. To analyze the influence of speed and filling fraction, a Central Composite Planning (PCC) was carried out, using combinations of filling fraction of 7.58, 20, 50, 80 and 92.43% and rotation speed of 5.86, 10, 20, 30 and 34.14 rpm. To perform data analysis, the ParaView® software was used. The responses were collected after 10 seconds of simulation, enough time for steady state to be reached. Through the analyzes it was possible to conclude that for filling fractions greater than 20%, the drum was always overloaded, making it more advantageous to work together at low speeds. With the increase in rotation speed, it was possible to identify that the last discharge angle increases and the retention time decreases. For better drying performance, it is advisable to work with smaller filling fractions. By analyzing the response surface of the three dependent variables, it was not possible to determine an optimal operating point for the equipment in the range of variables studied. With this, it is concluded that the use of the DEM tool was quite effective, allowing in-depth study of the particles in the drying process in a rotating drum with microwaves.

Keywords: Specialty coffees; Computational fluid dynamics; Microwave drying.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura do café	15
Figura 2 – Esquema da estrutura de um secador rotativo com suspensores	17
Figura 3 – Representação das regiões (A) e das fases (B) ativa e passiva de um secador rotativo com suspensores	18
Figura 4 – Formatos de suspensores utilizados em secadores rotativos	19
Figura 5 – Parâmetros para determinação do número teórico de suspensores	20
Figura 6 – Condições de carregamento de um secador rotativo com suspensores: sobrecarregado (A), carregamento ideal (B) e sobrecarregado (C)	21
Figura 7 – Representação esquemática de um forno micro-ondas	23
Figura 8 – Representação de <i>hotspots</i> em uma cavidade de um forno micro-ondas	24
Figura 9 – Algoritmo empregado nas simulações DEM	26
Figura 10 – Propagação da onda de Rayleing	28
Figura 11 – Representação do café arábica descascado e despulpado antes da torra em forma de <i>clump</i>	32
Figura 12 – Malha computacional criada no software <i>GMSH</i>	33
Figura 13 – Regiões de controle da massa de sólido nos suspensores	38
Figura 14 – Duas camadas de <i>hotspots</i> e região sem <i>hotspots</i>	38
Figura 15 – Região sem a presença de <i>hotspots</i>	38
Figura 16 – Instabilidade no início do processo	40
Figura 17 – Perfil do fluxo de partículas para diferentes combinações de fração de preenchimento e velocidade de rotação	41
Figura 18 – Massa de sólido nos suspensores em função do ângulo de rotação	43
Figura 19 – Descarga de partículas no suspensor de região de controle 7	44
Figura 20 – Massa de sólidos nos suspensores em função do ângulo para altas velocidades de rotação	44
Figura 21 – Massa de sólidos nos suspensores em função do ângulo para baixas velocidades de rotação	45
Figura 22 – Massa de sólidos nos suspensores em função do ângulo para altas frações de preenchimento	46
Figura 23 – Superfície de resposta para (a) massa de sólido fora da região de <i>hotspots</i> , (b) tempo de permanência e (c) ângulo de última descarga	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades físicas do café arábica descascado e despolpado antes da torra	33
Tabela 2 – Parâmetros empregados na simulação	34
Tabela 3 – Planejamento Composto Central (PCC)	35
Tabela 4 – Massa de café na região de <i>hotspots</i> para as simulações	46
Tabela 5 – Dados do tempo de permanência e ângulo de última descarga	47

LISTA DE SÍMBOLOS

g	Aceleração de gravidade	[m/s ²]
l_2	Altura do suspensor	[m]
AR_p	Atrito de rolamento da partícula	[-]
AE	Coefficiente de atrito estático	[-]
L	Comprimento do tambor	[m]
D	Diâmetro do tambor	[m]
D_{50}	Diâmetro médio	[mm]
r_H	Distância entre o centro do tambor e a junção dos dois segmentos do suspensor	[m]
r_i	Distância entre o centro da massa da partícula até o ponto de contato	[m]
F_n^E	Força normal do modelo de Hertz-Mindlin	[kg/ms ²]
F_{ij}	Força de contato entre partículas i e j	[kg/ms ²]
F_t	Força tangencial	[kg/ms ²]
f	Grau de enchimento do tambor	[-]
m	Massa	[kg]
G^*	Módulo de cisalhamento	[Pa]
E^*	Módulo de Young	[kg/ms ²]
I	Movimento de inércia	[kg/ms ²]
$n_{teórico}$	Número teórico de suspensores	[-]
T	Período	[s]
r_p	Raio da partícula	[m]
R	Raio do tambor	[m]
R_{ij}^*	Raio equivalente entre duas partículas i e j	[m]
t_c	Tempo crítico de integração	[s]
F_n	Vetor normal unitário na linha que passa pelo centro das partículas	[kg/ms ²]
V_s	Volume da partícula	[m ³]
V_p	Volume real de uma partícula	[m ³]

Símbolos gregos

ν	Ângulo em função do ângulo de repouso dinâmico formado pelo material particulado quando o suspensor está na posição 0°	[$^\circ$]
α	Ângulo entre as retas que passam pelas duas extremidades do suspensor e o centro	[$^\circ$]
$\nu _{\delta_L=0^\circ}$	Ângulo de repouso dinâmico no suspensor na posição 0°	[$^\circ$]
ρ_p	Densidade da partícula	[kg/m ³]
ϕ	Esfericidade	[-]
ε	Porosidade do leito	[-]
ν_p	Razão de Poisson	[-]
δ_n	Sobreposição normal das partículas	[m]
δ_t	Sobreposição tangencial das partículas	[m]
τ	Torque	[kg/ms ²]
ω	Velocidade angular da partícula	[rpm]
ν_R	Velocidade da onda de Rayleigh	[rpm]
u	Velocidade linear	[rpm]

SUBSCRITOS

ij	Interação entre as partículas i e j
i	Partícula i
j	Partícula j

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Objetivos	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1	Visão geral do café	14
2.2	Secadores rotativos com suspensores	16
2.2.1	Formato dos suspensores	18
2.2.2	Número teórico de suspensores.....	19
2.2.3	Fração de preenchimento no secador rotativo com suspensores.....	21
2.2.4	Ângulo de última descarga e velocidade de rotação	22
2.3	Aquecimento via micro-ondas	23
2.4	Abordagem numérica.....	25
2.4.1	Abordagem Lagrangeana – Método dos Elementos Discretos (DEM)....	25
2.4.1.1	<i>Time-step</i>	27
2.4.1.2	Parâmetros utilizados no DEM	28
2.4.1.3	<i>Clumps</i>	29
2.5	Estudos sobre tambores rotativos com suspensores	29
3	METODOLOGIA NUMÉRICA	32
3.1	Propriedades físicas do café.....	32
3.2	Geometria e malha computacional do tambor rotativo.....	33
3.3	Simulação utilizando a abordagem Lagrangeana	34
3.3.1	Efeito do grau de preenchimento e velocidade de rotação na secagem	35
3.4	Análise das simulações	36
3.5	Método de análise dos resultados	39
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
4.1	Análise da estabilidade do processo	40
4.2	Dinâmica das partículas	41
4.3	Massa de café na região de <i>hotspots</i>	46
4.4	Tempo de permanência e ângulo de última descarga	47
4.5	Análise da superfície de resposta para as três variáveis dependentes.....	48
5	CONCLUSÕES.....	51
5.1	Sugestão para trabalhos futuros	52
6	REFERÊNCIAS	53

1 INTRODUÇÃO

A operação unitária de secagem é extensivamente empregada para reduzir o nível de umidade de diversos materiais. Além de alterar as propriedades físicas, essa operação unitária é crucial na conservação de produtos como cereais e alimentos perecíveis, uma vez que a retirada da umidade prolonga o tempo de conservação dos grãos (COSTA, 2007).

Conforme informações do Sindicato da Indústria de Café do Estado de Minas Gerais (SINDICAFÉ, 2023), o café é classificado como um dos recursos mais valiosos em todo o mundo, contribuindo com até 70% das receitas nacionais de exportação. Esse grão exemplifica de maneira prática a relevância do processo de secagem. Para garantir a sua conservação por um período de um ano, é fundamental que o nível de umidade não exceda 12%. Qualquer nível acima desse limite pode resultar no acúmulo de calor excessivo e no crescimento de micro-organismos, o que, por sua vez, leva à degradação dos grãos (PORTELLA e EICHELBERGER, 2001).

A secagem pode ser efetuada de várias formas, sendo as mais comuns o uso de secadores mecânicos e a exposição ao sol para secagem natural. A seleção do método de secagem apropriado requer uma avaliação dos prós e contras de cada um desses métodos, considerando tanto a perspectivas técnicas quanto econômicas.

No contexto da secagem empregando secadores mecânicos, o tambor rotativo, que utiliza energia convectiva, se destaca pela sua simplicidade, alta eficiência produtiva e flexibilidade em relação a tamanhos, formatos, teores de umidade e fluidez das partículas. Esse tipo de secador é ideal para a desidratação de materiais granulares que possuem livre fluxo, como sementes, grãos e minérios (LEE, 2008; PERRY e GREEN, 1997). Também é possível incorporar suspensores ao tambor rotativo, cuja finalidade é criar um movimento de cascata para as partículas contidas dentro do tambor, melhorando assim a uniformidade e a exposição ao ar durante o procedimento de secagem.

A eficiência de transferência de calor e massa em secadores rotativos com suspensores está intrinsecamente ligada a relação entre as fases sólidas e fluidas ao longo de toda extensão do tambor. Esse processo é influenciado por variáveis de projeto do equipamento e condições de operação, tais como as dimensões do equipamento, a inclinação, a velocidade de rotação, o número de suspensores, a taxa de alimentação de sólidos, a quantidade de ar de secagem e as características do material em questão (SAEMAN e MITCHELL, 1954).

A técnica de secagem por micro-ondas está em crescimento e é aplicada a diversos materiais, inclusive ao café, devido à eficácia do processo. Pesquisas recentes demonstram que

o uso de micro-ondas resulta em uma melhoria nas características do produto final. A combinação dessa técnica com a injeção de ar, conhecida como secagem híbrida, tem o potencial de tornar o processo mais eficiente em comparação com a secagem puramente convectiva, possibilitando a manutenção da qualidade do produto enquanto reduz o tempo de secagem.

Realizar estudos experimentais em equipamentos que combinam estas técnicas podem ser dispendioso em termos de recursos financeiros e tempo. Nesse contexto, uma ferramenta que viabiliza a análise do movimento de grãos de café é o Método dos Elementos Discretos (*Discrete Element Method* - DEM), o qual possibilita a investigação da distribuição das partículas de maneira homogênea, tanto em relação ao ar de secagem quanto às fontes de radiação. O DEM aborda cada partícula de forma individual, permitindo a obtenção de informações minuciosas sobre o comportamento das partículas em uma escala microscópica.

1.1 Objetivos

O propósito deste trabalho consistiu na análise numérica da fluidodinâmica de grãos de café de alta qualidade em um secador micro-ondas rotativo, investigando como as partículas se comportam em resposta à velocidade de rotação e à fração de preenchimento. Esse estudo foi conduzido por meio de modelagem computacional que emprega a abordagem DEM (Método dos Elementos Discretos).

Com o propósito de alcançar os objetivos principais, serão buscados os seguintes objetivos específicos.

- Aplicar o Método dos Elementos Discretos (DEM), para caracterizar o escoamento granular no tambor rotativo com suspensores;
- Avaliar numericamente o efeito do carregamento do tambor e da velocidade de rotação sobre a distribuição de sólidos na seção transversal do equipamento.
- Caracterizar o comportamento da região de *hotspots* através da determinação numérica da massa de grãos de café nos suspensores e região sem a presença de *hotspots*.
- Avaliar a superfície de resposta das variáveis dependentes do Planejamento Composto Central (PCC) afim de determinar o ponto ótimo de operação do equipamento.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo é apresentado o embasamento teórico para compreender a produção de café. São abordadas as diferentes etapas do processo produtivo, explorando especificamente os secadores rotativos com suspensores, o uso de micro-ondas para aquecimento e a aplicação de simulações numéricas para modelar o fluxo dentro do tambor pelo Método dos Elementos Discretos (DEM).

2.1 Visão geral do café

O café é um dos produtos agrícolas mais relevantes globalmente, sendo superado apenas pelo petróleo com relação à importância econômica, o que o posiciona como um dos produtos de exportação de maior valor nos dias de hoje. Conforme o Sindicato da Indústria de Café do Estado de Minas Gerais (SINDICAFÉ-MG, 2023), o café é considerado um dos recursos primários de maior valor global. Em nações subdesenvolvidas, a exportação desse grão pode contribuir com até 70% das receitas nacionais.

Apesar da diversidade de espécies de café identificadas, duas delas predominam na produção mundial, respondendo por aproximadamente 98% de todo café cultivado. São elas o *Coffea arábica*, conhecido como café arábica, e o *Coffea canéfora*, chamado de café robusta (GEERAERT *et al.*, 2019).

Conforme indicado no documento divulgado pela Organização Internacional de Café (OIC), em junho de 2023 as exportações globais de café verde totalizaram 9,31 milhões de sacas. Destaca-se que as exportações de café verdes robusta registraram um aumento significativo de 11,6% em relação a julho de 2022, atingindo um total de 3,59 milhões de sacas no mesmo mês deste ano.

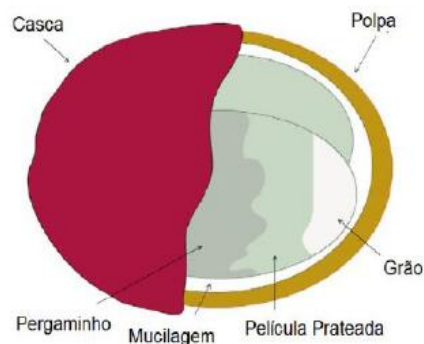
O café desempenha um papel crucial na economia global, sendo altamente valorizado por seu status como *commodity* quanto por seu potencial como *speciality*. Consumidores em todo o mundo buscam preços competitivos e características sensoriais específicas, e isso desafia as nações que cultivam café a se adaptarem para atender a essas demandas em constante evolução (SINDICAFÉ-MG, 2023).

No ciclo de produção do café, há várias fases cruciais, em que cada uma desempenha um papel fundamental na determinação dos atributos buscados pelos consumidores. Conforme indicado por Carneiro (2021), as etapas essenciais no processo de produção incluem o plantio, a colheita, o processamento, a secagem, a torrefação e a moagem dos grãos.

Segundo Angeloni et al. (2019), já foram identificados mais de mil compostos responsáveis pelas características sensoriais do café e acredita-se que as características físicas dos grãos possam influenciar diretamente na qualidade da bebida. Logo, ao propor um processo de secagem espera-se que a estrutura do grão seja preservada.

A estrutura dos grãos de café inclui uma casca lisa chamada exocarpo, seguida de uma camada viscosa chamada polpa ou mucilagem (mesocarpo) e, em seguida, o endocarpo composto por fibras esclerenquimáticas que envolvem as sementes. Na Figura 1 está representada a estrutura do grão de café.

Figura 1 – Estrutura do café.



Fonte: Esquivel e Jiménez (2012).

Dentre as etapas de processamento do café, a etapa de secagem emerge como um destaque significativo. A secagem pode ser conceituada como um procedimento de troca de calor e massa entre o produto e o ar de secagem, cujo propósito é eliminar o excesso de umidade presente nos grãos por meio da evaporação (BROOKER, 1992).

Durante um longo período, a única técnica reconhecida para secar grãos envolvia a exposição ao sol em terreiros, referida como processo de secagem por via seca ou natural. Esse termo é empregado devido à natureza do processo, que mantém a integridade dos grãos, preservando seus componentes. Adicionalmente, esse método é ambientalmente mais amigável, uma vez que resulta apenas em resíduos líquidos com baixo conteúdo de matéria orgânica (MALTA et al., 2008). No entanto, devido ao fato de ser uma das etapas mais críticas do processo e, principalmente, por aumentar o risco de contaminação e oferecer controle limitado sobre o processo, a secagem natural tem gradualmente cedido lugar à secagem mecânica.

Entretanto, a técnica de secagem em terreiro não foi completamente abandonada. Pesquisas indicam que uma etapa inicial de pré-secagem em terreiros, além de reduzir os custos

de energia relacionadas à secagem mecânica, pode também influenciar positivamente na excelência do produto final. Isso ocorre devido à diminuição dos níveis de lixiviação de potássio no grão quando ele é submetido a essa pré-secagem de três dias (BORÉM et al, 2006).

O método de processamento por via úmida, que consiste no uso de secadores mecânicos, viabiliza uma secagem mais ágil em contraste com o método de secagem no sol, resultando em uma eficácia mesmo em períodos chuvosos e em regiões de alta umidade. Adicionalmente, essa abordagem elimina as variações climáticas que poderiam prejudicar a qualidade do café, diminui a demanda de área amplas de secagem e requer menos trabalho manual. Nesse processo, ocorre a eliminação da casca e da polpa, podendo ou não incluir a retirada da mucilagem dos grãos. Essa técnica é preferencialmente adotada, pois elimina substâncias que poderiam prejudicar a qualidade final do produto por conterem micro-organismos que podem causar fermentações (MALTA et al., 2008).

No entanto, é crucial ressaltar algumas desvantagens como o investimento inicial mais elevado em maquinarias e os custos com energia ou lenha para operação desses secadores.

Dentre os secadores mecânicos empregados na secagem de grãos, os secadores rotativos se destacam. Esse equipamento é essencialmente constituído por um cilindro tubular horizontal giratório que roda em torno de seu eixo longitudinal com uma velocidade angular específica, assegurando um contato uniforme entre os grãos e o ar de secagem.

2.2 Secadores rotativos com suspensores

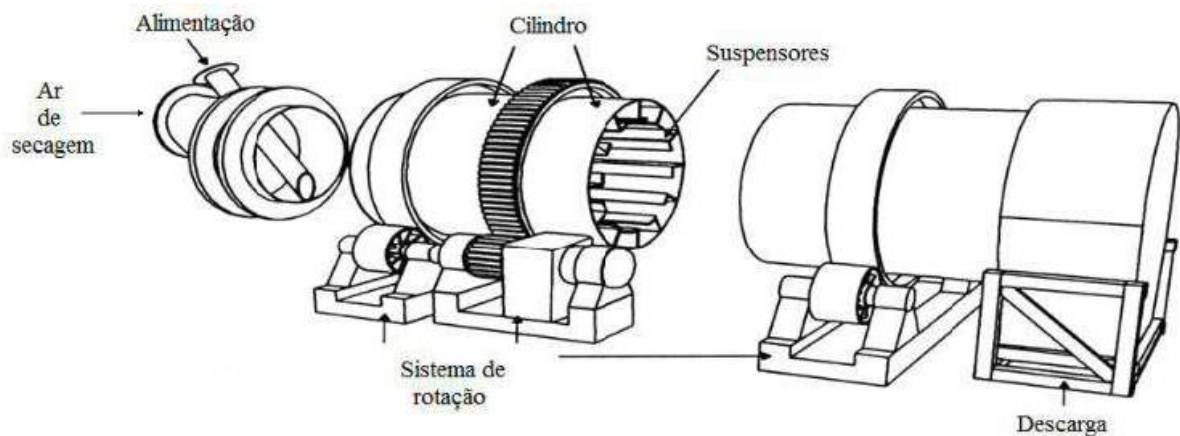
Os secadores rotativos com suspensores são amplamente empregados no processamento de partículas com variados tamanhos, formatos, níveis de umidade e níveis de fluidez, tornando-se ideais para a secagem de materiais granulares que fluem livremente, tais como sementes, grãos, açúcar e minérios (LEE, 2008; PERRY e GREEN, 1997).

O equipamento é composto por um tambor cilíndrico levemente inclinado em relação a horizontal, normalmente variando de 0 a 5°, e rotacional em torno de seu eixo longitudinal. A relação entre o comprimento e o diâmetro deste dispositivo variando de quatro a dez, enquanto o diâmetro pode abranger um intervalo de 0,2 m a 3 m (PERRY e GREEN, 1997).

A função dos suspensores é criar um padrão de movimento de cascata para as partículas contidas no interior do tambor rotativo. Conforme essas partículas percorrem a porção inferior do tambor, os suspensores as transportam e, posteriormente, a rotação do tambor as descarregam. Esse processo intensifica o contato entre os sólidos e o ar de secagem, otimizando

as trocas de calor e massa (PERRY e GREEN, 1997). Na Figura 2 está representado um típico secador rotativo com suspensores.

Figura 2 – Esquema da estrutura de um secador rotativo com suspensores.



Fonte: Perry e Green (1997).

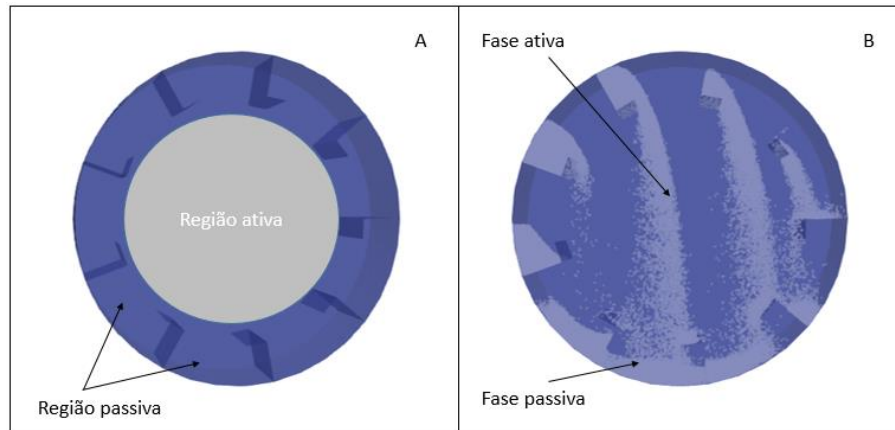
A taxa de transferência de calor e massa nos secadores rotativos está condicionada a diversas condições de operação, tais como dimensão do equipamento, inclinação, velocidade de rotação, número de suspensores, alimentação de sólidos e ar e a temperatura do ar de secagem e do material (SAEMAN e MITCHELL, 1954).

O movimento das partículas no secador é um processo complexo influenciado por uma variedade de mecanismos. Conforme discutido por Kemp e Oakley (1997), que abordam o comportamento das partículas nos secadores, diversas forças agem sobre as partículas, resultando em seu movimento. Essas forças incluem a ação da gravidade, que é influenciada pela inclinação do tambor, a força de arraste exercida pelo fluxo de ar sobre as partículas que estão em queda livre, o impacto das partículas na superfície inferior do equipamento após serem liberadas dos suspensores, e a rotação das partículas na base do secador.

O secador rotativo com suspensores apresenta uma seção transversal dividida em duas regiões: ativa e passiva. A região passiva constitui o espaço ocupado pelos suspensores e pela camada de partículas na parte inferior do tambor. Os sólidos transportados pelos suspensores e aqueles no fundo do tambor são chamados de fase passiva. A região ativa é a área central do secador, onde ocorre o contato direto entre o material sólido e gás quente, resultando em uma secagem mais intensa. A fase ativa é composta pelo material que cai dos suspensores, formando uma cortina que tem impacto direto na transferência de calor e massa. A mudança entre as fases

é influenciada pelas características do material e dos parâmetros operacionais. Na Figura 3 estão as representações das regiões ativa e passiva.

Figura 3 – Representação das regiões (A) e das fases (B) ativa e passiva de um secador rotativo com suspensores.



Fonte: Do autor (2023).

2.2.1 Formato dos suspensores

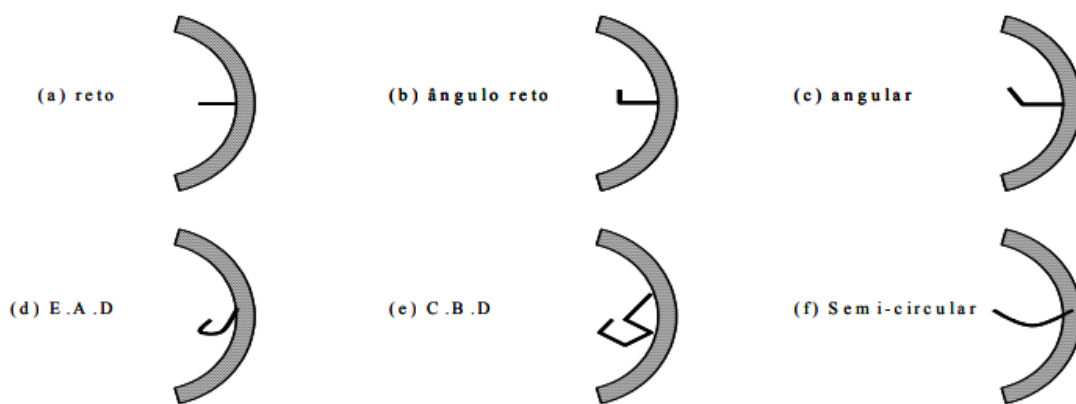
Os suspensores assumem um papel fundamental na promoção da interação entre a fase sólida e fluida, desempenhando um papel determinante para o desempenho eficaz do secador. Isso ocorre porque eles exercem controle sobre o padrão de cascata das partículas, a distribuição do material na seção transversal, a quantidade de sólidos nas regiões ativa e passiva, bem como a frequência de renovação da superfície de contato. Além disso, os suspensores também têm a capacidade de influenciar no tempo de residência dos sólidos no secador e o grau de mistura do leito (SUNKARA, 2013).

A profundidade dos suspensores deve situar-se entre $D/12$ e $D/8$, onde D representa o diâmetro do secador (PERRY e GREEN, 1997). Há diversos formatos empregados em secadores, e a escolha da configuração está diretamente relacionada com as características do sólido a ser seco. A Figura 4 exibe exemplos de alguns modelos de suspensores.

Os suspensores retos são recomendados para a secagem de partículas altamente coesas e filamentosas, pois contribuem para um aumento significativo na mistura dentro do leito. Por outro lado, quando se lida com materiais de baixa coesão, os suspensores de ângulo reto, angulares e semicirculares são mais apropriados. Os suspensores de ângulo reto e angulares são considerados opções mais simples de fabricar em comparação com outros formatos. Os

suspensores angulares podem ser compostos por mais de dois segmentos. Secadores com suspensores de dois segmentos têm a capacidade de suportar uma maior carga de partículas, assegurando que uma quantidade substancial de sólidos seja incorporada na corrente de gás. Suspensores angulares de três segmentos favorecem uma mistura eficaz do material ainda úmido e estabelecem um contato com o ar de secagem, resultando em uma temperatura e teor de umidade uniformes no material. Por outro lado, os suspensores semicirculares são considerados os mais simples de serem produzidos (PERRY e GREEN, 1997).

Figura 4 – Formatos de suspensores utilizados em secadores rotatórios.



Fonte: Lisboa (2005).

Foram desenvolvidos alguns projetos de suspensores com fundamentação teórica, especialmente por Kelly (1992), com a finalidade de aprimorar o funcionamento dos secadores. Estes incluem os suspensores de igual distribuição angular (EAD) e os suspensões de distribuição normal (CBD). No entanto, as configurações são bastante complexas e pouco aplicadas.

Nos secadores rotativos de considerável comprimento, é possível utilizar uma variedade de configurações de suspensores ao longo de sua extensão, de modo a adequar o secador às diversas propriedades do material conforme o processo de secagem progride.

2.2.2 Número teórico de suspensores

A escolha do número de suspensores é um passo crucial no projeto de tambores rotativos com suspensores, uma vez que o aumento da quantidade de suspensores resulta em uma maior cortina de sólidos, promovendo um contato mais amplo entre o material sólido e o ar de secagem (NASCIMENTO, 2018).

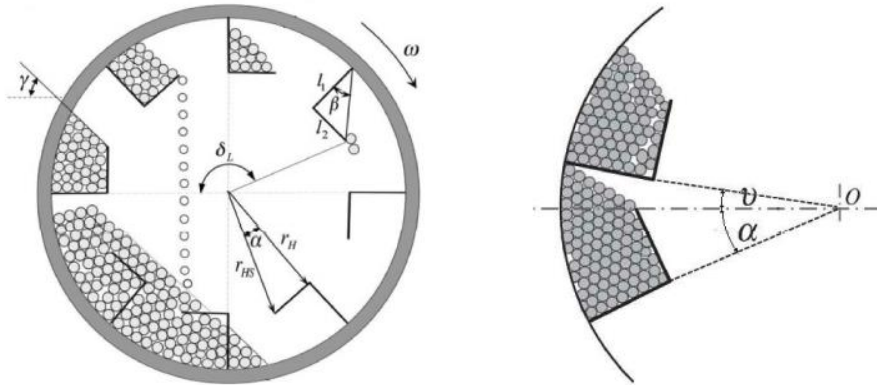
O número teórico de suspensores representa a quantidade máxima de suspensores que pode ser incorporado a um tambor rotativo sem que haja interferência mútua no carregamento, assegurando assim que cada suspensor seja capaz de carregar a maior quantidade de partículas de maneira eficiente (NASCIMENTO, 2018).

Sunkara et al. (2013) formularam a Equação 1 que permite estimar o número teórico de suspensores com dois segmentos e ângulo reto ($n_{teórico}$).

$$n_{teórico} = \frac{360^\circ}{(\alpha + \nu)} \quad (1)$$

A seguir está a definição de cada parâmetro necessário para o cálculo do número teórico de suspensores.

Figura 5 – Parâmetros para determinação do número teórico de suspensores.



Fonte: Sunkara *et al.* (2013).

O ângulo entre as retas que conectam as duas extremidades do suspensor com o centro é determinado usando a Equação 2.

$$\tan \alpha = \frac{l_2}{r_H} \quad (2)$$

Onde l_2 é a altura do suspensor e r_H é a distância entre o centro do tambor e a junção dos dois segmentos do suspensor.

O parâmetro ν é um ângulo em relação ao ângulo de repouso dinâmico formado pelo material particulado quando o suspensor está na posição 0° . Ele é calculado conforme Equação 3.

$$\tan \nu = \left(1 - \frac{r_H}{R} \right) \tan \gamma |_{\delta_L=0^\circ} \quad (3)$$

Onde R é o raio do tambor e $\gamma |_{\delta_L=0^\circ}$ é o ângulo de repouso dinâmico.

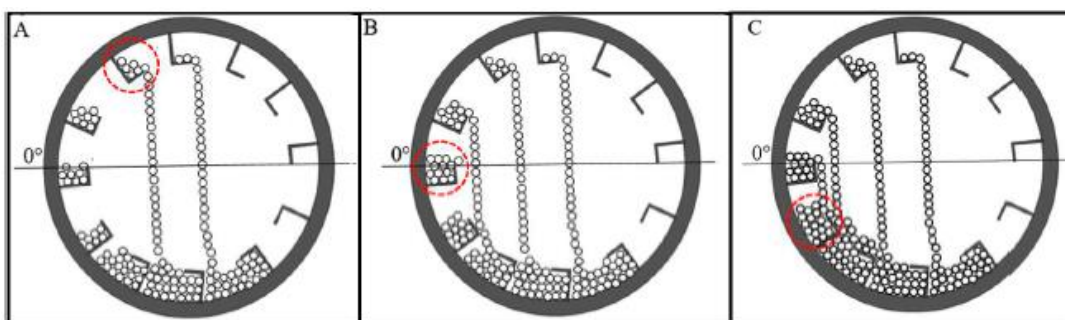
2.2.3 Fração de preenchimento no secador rotativo com suspensores

O *holdup* é definido como a carga de sólidos no interior do secador, ou seja, a fração de preenchimento, e é uma variável fundamental para caracterizar o comportamento das partículas. Segundo Karali (2015), essa variável operacional exerce uma influência substancial na quantidade e distribuição de sólidos nas regiões ativas e passivas. Além disso, ela desempenha um papel crucial no tempo de residência das partículas no tambor e na eficiência da transferência de calor e massa.

Normalmente, os secadores rotativos devem operar com 10 a 15% de seu volume preenchido com o material sólido para não afetar a eficácia do equipamento. Isso porque, quando operado com uma fração abaixo dessa faixa, o carregamento se torna insuficiente para preencher completamente os suspensores. Já acima da faixa, é possível que algumas partículas no fundo do tambor não sejam carregadas, assim passando sem a remoção da água (PERRY e GREEN, 1997).

Os secadores rotativos são categorizados em subcarregados, com carregamento ideal e sobrecarregados, demonstrados na Figura 6. Essa categorização é realizada analisando o ângulo de primeira descarga dos suspensores (FUF).

Figura 6 – Condições de carregamento de um secador rotativo com suspensores: subcarregado (A), carregamento ideal (B) e sobrecarregando (C).



Fonte: Silveira (2022).

Um tambor é definido como subcarregado quando os suspensores não estão totalmente preenchidos com o material sólido, resultando na descarga em posições posteriores a 0° , representado na Figura 6A. Como os suspensores apresentam uma massa abaixo da sua capacidade e dependendo da velocidade de rotação, o tempo de residência do sólido no equipamento é reduzido. Além disso, a interação entre o sólido e o ar de secagem diminui (AJAYI e SHEEHAN, 2012).

Em situação de carregamento ideal, os suspensores operam completamente preenchidos e a descarga das partículas sólidas começa exatamente na posição angular 0° , como representado na Figura 6B. Nessa condição, maiores quantidades de cortinas são formadas, aumentando a interação entre o material particulado e o ar de secagem (AJAYI e SHEEHAN, 2012).

Define-se sobrecarregado quando o secador opera com uma carga excessiva para preencher os suspensores, então a descarga começa antes da posição de 0° , representada pela Figura 6C. Dessa maneira, ocorre o deslocamento do material excedente na parte inferior do tambor, limitando seu contato com o ar de secagem (AJAYI e SHEEHAN, 2012).

De forma geral, o tambor rotativo operando de forma subcarregado ou sobrecarregado resulta em baixa eficiência do equipamento. Portanto, a consideração do carregamento ideal é fundamental no projeto de secadores.

2.2.4 Ângulo de última descarga e velocidade de rotação

O ângulo de última descarga (LUF) possui grande importância na caracterização do escoamento dos sólidos em tambores rotativos com suspensores. Isso ocorre devido à relação direta entre a posição da última descarga e o transporte realizado pelos suspensores, resultando em uma maior formação de cortinas. Esse fenômeno amplia a área de contato entre o material e o ar de secagem, conseqüentemente, elevando a eficiência da secagem e a uniformidade do processo.

O autor pioneiro na investigação do impacto das variáveis operacionais sobre o ângulo de última descarga, Karali (2015), definiu o LUF como o ponto em que a carga dos suspensores era igual a 0. Suas pesquisas revelaram que, ao analisar o efeito da velocidade de rotação, um aumento na velocidade resulta em um ângulo de última descarga ampliado.

Contudo, uma alta velocidade de rotação nem sempre beneficia o processo de secagem. Isso acontece devido à necessidade de manter a qualidade dos grãos de café e evitar danos que possam afetar negativamente o sabor da bebida, assim é crucial controlar a velocidade de rotação. De acordo com Perry e Green (1997), as velocidades típicas em tambores rotativos variam de 1 a 5 rotação por minuto (rpm). No caso do café, não é aconselhável exceder 5 rpm, pois velocidades mais elevadas podem resultar em danos aos grãos.

2.3 Aquecimento via micro-ondas

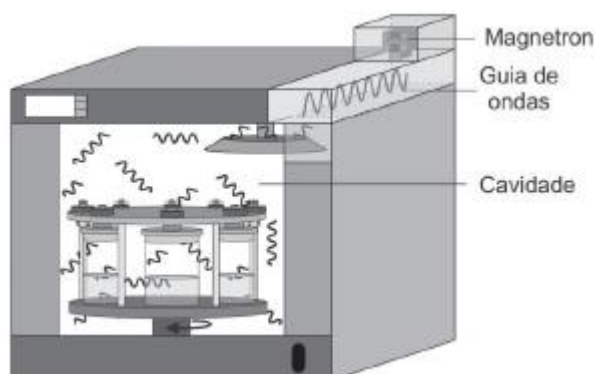
As micro-ondas são ondas eletromagnéticas que cobrem a faixa de frequência do espectro eletromagnético que varia de 300 MHz a 300 GHz, com comprimentos que variam de 1 metro a 1 centímetro. Podem ser aplicadas para uso industrial, científico e domésticos, com equipamentos específicos em faixas de frequências distintas (SOUZA, NOGUEIRA e RASSINI, 2002).

O aquecimento de materiais por meio de micro-ondas é alcançado através da indução da rotação dos dipolos permanentes das moléculas. Quando uma onda eletromagnética atravessa uma região, ela provoca oscilações no campo eletromagnético dessa área, induzindo o alinhamento dos dipolos presentes nas moléculas, os quais passam a acompanhar as oscilações da onda eletromagnética. Essa rotação dos dipolos resulta no aumento da energia cinética das moléculas e, portanto, no aumento da temperatura do material. No caso de moléculas com dipolos induzidos, o mesmo fenômeno ocorre, porém com menor intensidade (PANISSET, 2014).

Em essência, o forno micro-ondas é composto por três elementos principais: a cavidade, o guia de ondas e o magnetron. Cada um deles desempenha um papel específico na viabilização do aquecimento de materiais por meio de micro-ondas.

O magnetron é um dispositivo cilíndrico que incorpora um ânodo e cátodo, normalmente constituídos com materiais como cobre ou ferro, que gera radiação de micro-ondas quando uma alta tensão é aplicada, desencadeando sua oscilação. O guia de ondas, por sua vez, é uma estrutura composta por um tubo oco metálico que direciona a radiação para o interior da cavidade. Já a cavidade, consiste em um compartimento fechado no qual as micro-ondas são direcionadas ao material.

Figura 7 – Representação esquemática de um forno micro-ondas.



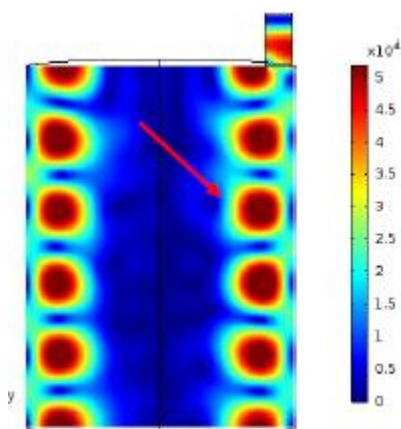
Fonte: Carvalho (2023).

Nos dispositivos que utilizam o aquecimento por micro-ondas, o processo ocorre através de ondas eletromagnéticas emitidas pelos magnetrons e direcionadas por guias de ondas. Esses guias de ondas direcionam as ondas eletromagnéticas ao alvo a ser aquecido dentro do forno. A posição do guia de ondas desempenha um papel crucial na forma como o alimento é aquecido.

Em um estudo conduzido por Carvalho e Petri (2022a), empregando a fluidodinâmica computacional, investigou-se o impacto da localização e da quantidade de guias de ondas em secadores rotativos com micro-ondas utilizados na secagem de cafés especiais. Os resultados revelaram que diferentes configurações de guias de ondas resultam em campos eletromagnéticos diversos dentro do forno, levando à identificação de uma posição ótima. Adicionalmente, a pesquisa destacou que o uso de múltiplos magnetrons em cavidades acelera o aquecimento da água após 10 minutos, embora não alcance a mesma eficiência das cavidades equipadas com um único guia de ondas.

Conforme mencionado por Meredith (1998), as cavidades podem ser classificadas como monomodo, admitindo apenas um modo de onda, ou multimodo, que suporta múltiplos modos de frequência ressonante. Essa diferenciação provoca a criação de regiões de alta concentração do campo eletromagnético, denominadas *hotspots*, que resultam em um aquecimento mais intenso para o material posicionado nessas áreas. Na Figura 8 está a representação de *hotspots* estudados por Carvalho (2023).

Figura 8 – Representação de *hotspots* em uma cavidade de um forno micro-ondas.



Fonte: Carvalho (2023).

As cavidades de micro-ondas podem apresentar várias formas, sendo as retangulares e cilíndricas as mais comuns. As cavidades cilíndricas, embora menos frequentes, se destacam por sua notável eficiência de aquecimento. Em estudo conduzido por Carvalho e Petri (2022b), que empregou simulações de fluidodinâmica computacional, foram projetadas duas cavidades

cilíndricas específicas para a secagem de cafés especiais. Suas análises contemplaram a distribuição do campo eletromagnético, variações na temperatura de água na cavidade, potência de saída e o campo elétrico gerado.

2.4 Abordagem numérica

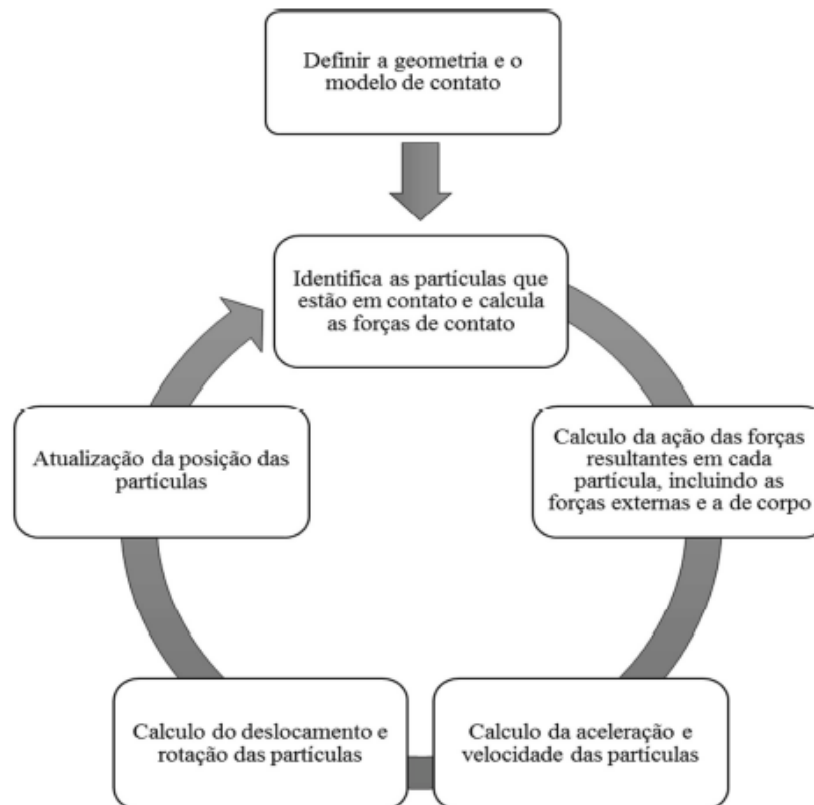
As simulações numéricas são amplamente utilizadas para descrever o fluxo granular em diversas aplicações, possibilitando maior nível de detalhamento dos fenômenos investigados. Com as simulações e investigações experimentais, é possível compreender como é a dinâmica das partículas no interior de tambores rotativos com suspensores. As abordagens Euleriana Granular Multifásica e a Lagrangeana são usualmente empregadas para a modelagem.

Na abordagem Euleriana, as diferentes fases (fluido e sólido) que compõem o sistema são tratadas matematicamente como contínuas e interpenetrantes. Apesar de trazer resultados satisfatórios, com um custo computacional relativamente baixo, essa abordagem não permite o acompanhamento de uma partícula a nível microscópico. Desta maneira, para posteriores análises de grau de mistura e forças de colisões entre as partículas, a abordagem Lagrangeana se mostra promissora. Por isso, a seguir está descrita de forma mais detalhada a abordagem Lagrangeana, que será utilizada neste trabalho.

2.4.1 Abordagem Lagrangeana – Método dos Elementos Discretos (DEM)

O Método dos Elementos Discretos (*Discrete Element Method* – DEM) foi desenvolvido por Cundall e Strack (1979) e é utilizado para modelar a dinâmica de materiais particulados e granulares. Essa abordagem examina minuciosamente cada partícula de maneira individual, possibilitando informações em níveis microscópicos. Adicionalmente, a trajetória de cada partícula é monitorada considerando as interações com partículas vizinhas e com as superfícies do equipamento. A Figura 9 ilustra um algoritmo simplificado do princípio do DEM.

Figura 9 – Algoritmo empregado nas simulações DEM.



Fonte: Lima (2017).

O DEM emprega a segunda Lei de Newton em sua forma diferencial para modelar o movimento rotacional e translacional de partículas, como ilustrado nas Equações 4 e 5. Para obter a posição e a velocidade de cada partícula i , a soma das forças que atuam sobre a partícula é determinada a cada passo do tempo, e as equações de movimento são integradas ao longo do tempo.

$$m_i \frac{du_i}{dt} = \sum_j F_{ij} + m_i g \quad (4)$$

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = - \sum_j r_{p,i} F_{nij} \times F_{ij} \quad (5)$$

$$\frac{dr_i}{dt} = u_i \quad (6)$$

Sendo m_i , u_i , I_i , g , ω_i e r_p a massa, a velocidade linear, o movimento de inércia, a aceleração da gravidade, a velocidade angular da partícula i e o vetor de posição da partícula, respectivamente. Já F_{ij} e $F_{n,ij}$ são a força de contato entre as partículas i e j e o vetor normal unitário na linha que passa pelo centro das partículas i e j , respectivamente.

Dois modelos são amplamente empregados em simulação no DEM para representar a interação entre forças e deslocamento: o modelo linear de mola-amortecedor e o modelo não linear de Hertz-Mindlin. O modelo de Hertz-Mindlin é o mais prevalente em simulação, pela

sua capacidade de considerar a forma das partículas, tornando-o mais adequado para situações com altas concentrações granulares. Esse modelo possibilita a sobreposição das partículas enquanto em contato, permitindo, conseqüentemente, a consideração das deformações do material (RENZO e MAIO, 2005).

Renzo e Maio (2005) propuseram o modelo de Hertz-Mindlin, uma relação não linear entre as forças e o deslocamento, como apresentado nas Equações 7 e 8, sendo E^* , R_{ij}^* e δ_n o módulo de Young, o raio equivalente entre duas partículas i e j com contato e a sobreposição entre as partículas normal das partículas, respectivamente.

$$F_n^E = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R^*} \delta_{n,ij}^{3/2} \quad (7)$$

$$R_{ij}^* = \frac{r_i r_j}{r_i + r_j} \quad (8)$$

Realizando algumas considerações e simplificações, é possível obter a Equação 9 para a força tangencial, em que G^* representa o módulo de cisalhamento e δ_t é a sobreposição tangencial entre as partículas.

$$F_t = -\frac{2}{3} (8G^* \sqrt{R^*} \delta_{n,ij}^{0,5}) \delta_{t,ij} \quad (9)$$

Quando o atrito de rolamento (AR_p) é importante para uma aplicação, ele pode ser incluído no modelo e calculado utilizando a Equação 10, que leva em consideração o torque nas áreas de contato.

$$\tau = -AR_p F_n^E r_i \omega_i \quad (10)$$

Onde r_i é a distância entre o centro da massa da partícula até o ponto de contato.

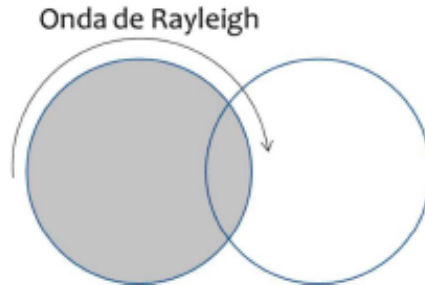
A modelagem pelo método de elementos discretos requer a determinação de diversos parâmetros, que estão relacionados tanto às propriedades físicas das partículas quanto às interações que ocorrem entre elas. Portanto, o principal desafio do método reside na obtenção precisa desses parâmetros, que podem ser obtidos por meio de medições diretas ou através de um processo de calibração. Nos próximos tópicos, está a definição do passo no tempo (*time-step*) utilizados nas simulações, bem como os parâmetros de entrada.

2.4.1.1 *Time-step*

Para assegurar a estabilidade da solução em uma simulação pelo DEM, é crucial determinar um passo no tempo (*time-step*) adequado. Isso se deve ao fato de que o movimento de cada partícula é influenciado pelas perturbações que se propagam em sua proximidade, chamada de onda de Rayleigh. Essa onda é caracterizada como a onda mecânica que se propaga

na superfície de corpos elásticos. Portanto, é necessário que o tempo de integração utilizado seja inferior ao tempo requerido para que a onda atravesse a partícula de menor dimensão.

Figura 10 – Propagação da onda de Rayleigh.



Fonte: Brandão (2017).

Conforme mencionado por Lima (2017), a literatura aconselha que o passo de tempo utilizado em simulação DEM não ultrapasse 20% do valor do tempo crítico de integração. A velocidade da onda de Rayleigh (v_R) e o intervalo de tempo crítico de integração (t_c), estão apresentados nas Equações 12 e 13.

$$v_R = (0,1613 v_p + 0,8766) \sqrt{\frac{G}{\rho_p}} \quad (12)$$

$$t_c = \frac{\pi r^2 \sqrt{\frac{\rho_p}{G}}}{(0,1613 v_p + 0,8766)} \quad (13)$$

Em que v_p e ρ é a razão de Poisson e a densidade da partícula e r é o raio da menor partícula no sistema, respectivamente.

2.4.1.2 Parâmetros utilizados no DEM

O modelo de simulação do DEM necessita de alguns parâmetros de entrada que estão associados às características físicas das partículas, como a densidade, módulo de cisalhamento e razão de Poisson, e às propriedades de interação entre as partículas, como os coeficientes de restituição, de atrito estático e de atrito de rolamento

O coeficiente de restituição é um parâmetro utilizado para medir a energia cinética conservada após a colisão entre dois corpos sólidos, podendo ser determinada pela razão entre a velocidade depois e antes do impacto. O coeficiente varia de 0, representando colisões perfeitamente inelásticas, até 1, indicando colisões perfeitamente elásticas.

O coeficiente de atrito estático (AE) é a força oposta ao movimento relativo entre corpos e atua nos pontos de contato entre duas superfícies.

O atrito de rolamento (AR) representa a resistência ao movimento de rolamento de partículas esféricas. Essa forma de atrito é ocasionada pela dissipação de energia no contato e pelo comportamento plástico dos sólidos, dependendo das suas características específicas. É importante observar que o coeficiente de atrito de rolamento apresenta ordem de grandeza muito menor em comparação ao coeficiente de atrito estático.

2.4.1.3 Clumps

Normalmente os *softwares* de simulações DEM consideram que as partículas têm a forma de esferas, não sendo condizente com a realidade e afetando o estudo sobre o escoamento. Para isso, é necessário criar um conjunto de partículas agrupadas, conhecido como *clump*, que age como um corpo rígido único com contorno deformáveis, resultando em uma simulação mais precisa e condizente com a realidade (SHAMSI e MIRGHASEMI, 2012).

Em seu estudo, Resende (2023) avaliou o impacto da configuração das partículas de café, formadas por uma, duas e três esferas, na simulação do fluxo dos grãos utilizando a abordagem DEM. Constatou-se que o *clump* composto por três esferas se mostrou o mais adequado para reproduzir o comportamento das partículas de café no tambor rotativo, em conformidade com dados experimentais disponíveis na literatura.

2.5 Estudos sobre tambores rotativos com suspensores

O deslocamento dos sólidos dentro do secador rotativo é complexo e está sujeito à influência de diversos fatores, tais como o campo gravitacional, as colisões entre as partículas e entre estas e as paredes do tambor e dos suspensores, bem como a força de arraste resultante do fluxo de ar sobre as partículas nas cascatas (KEMP e OAKLEY, 1997).

Em sistemas tão complexos, a análise minuciosa dos diversos fatores que influenciam a fluidodinâmica das partículas é crucial. Isso permite a caracterização do sistema e oferece uma base teórica para investigações futuras, considerando a interação conjunta de todos esses fatores. Esse cenário tem impulsionado estudos dedicados à compreensão da dinâmica dos sólidos em secadores rotativos, incluindo a secagem de grãos de café. A seguir, estão estudos realizados por três autores sobre o processo de secagem de café.

Resende (2023) em seu estudo, visou avaliar a influência da estrutura da partícula de café, composta por uma, duas ou três esferas, na simulação do escoamento utilizando o DEM em um tambor rotativo. A pesquisa inclui a calibração dos parâmetros de integração de cada estrutura, buscando reproduzir propriedades como o ângulo de repouso dinâmico e transição entre regimes de escoamento. Resende (2023) utilizou um planejamento composto central, variando o coeficiente de atrito. O *clump* de três esferas, apesar do maior custo computacional, mostrou-se mais adequado, sendo calibrado com valores específicos para coeficiente de atrito. A simulação no regime de rolamento resultou em um ângulo de repouso de $37,55^\circ$, com desvio de $-0,4\%$ em relação ao dados experimentais, representando bem as transições entre os regimes de escoamento. Partículas de uma e duas esferas foram relevantes, mas adequadas apenas para o regime de rolamento.

Carvalho (2023) analisou a fluidodinâmica de grãos de café em um secador micro-ondas rotativo, visando projetar dimensões ideais e determinar a quantidade ótima de suspensores. Utilizando simulações no *software Fluent*, empregou-se um tambor rotativo de 62,98 cm de diâmetro e 14,13 cm de comprimento. Foi implementado um planejamento de três níveis para definir o comprimento e a quantidade ideais de suspensores. Os suspensores ótimos foram utilizados para investigar a influência da velocidade de rotação e da fração de preenchimento, variando de 1 a 35 rpm e 10 a 90%, respectivamente. A conclusão foi que 9 suspensores de 7,78 cm de largura proporcionam uma operação otimizada. A análise das superfícies de resposta indicou que a velocidade ideal de operação está entre 2 e 3 rpm. Notou-se que velocidades acima de 5 rpm resultam em um aumento do ângulo de repouso dinâmico dos grãos. A variação da fração de preenchimento afetou o tempo de retenção dos grãos nos suspensores, sugerindo que o equipamento projetado é eficiente para operação industrial, oferecendo boa homogeneização e baixo custo operacional.

Resende (2017) em seu estudo avaliou experimentalmente os regimes de escoamento das partículas de café em um tambor rotativo, identificando as transições entre os regimes e medindo as velocidades de transição. O ângulo de repouso dinâmico obtido foi de $36,49^\circ$, demonstrando ser praticamente independente do grau de enchimento do tambor. O estudo ressaltou a importância da transição do regime de rolamento para o cascadeamento durante a torrefação do café. Essa mudança é crucial para garantir a uniformidade na transferência de calor no equipamento, sendo fundamental que o regime de escoamento do leito de partículas esteja situado entre o rolamento e o cascadeamento. Constatou que o aumento no preenchimento do tambor demanda maior velocidade de rotação para mudar o regime de cascadeamento para catarateamento. Além disso, o trabalho efetuou uma comparação entre as velocidades críticas de

centrifugação encontradas experimentalmente e as correlações da literatura, contribuindo para o aprimoramento das técnicas de previsão desse tipo de escoamento.

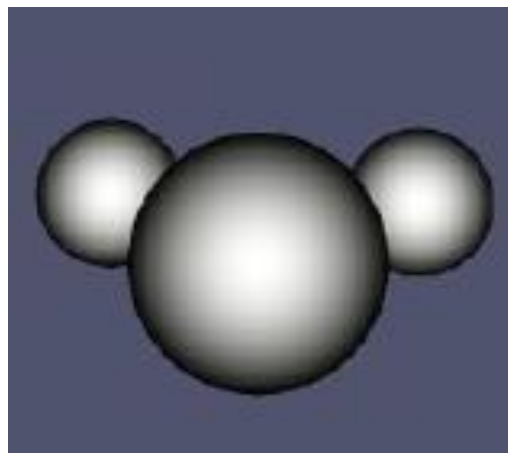
3 METODOLOGIA NUMÉRICA

A pesquisa foi conduzida através de simulações computacionais utilizando a abordagem lagrangeana e pela posterior análise de seus resultados. Nesta seção, está a metodologia empregada, bem como os programas computacionais utilizados.

3.1 Propriedades físicas do café

De acordo com Resende (2023), a representação mais precisa do grão de café arábica descascado e despolpado antes da torra é obtida com *clump* de três esferas, sendo essa composta por uma esfera central de diâmetro 3,28 milímetros e duas laterais de diâmetro 1,90 milímetros, dispostas a um ângulo de 30° em relação ao centro da esfera central e com uma leve sobreposição. Na Figura 11 está a representação do café em forma de *clump*.

Figura 11 – Representação do café arábica descascado e despolpado antes da torra em forma de *clump*.



Fonte: Resende (2023).

As características físicas das partículas de grãos de café arábica descascado e despolpado antes da torra foram retiradas do estudo de Resende (2017) e Resende (2023) e estão dispostas na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1 – Propriedades físicas do café arábica descascado e despulpado antes da torra.

Propriedades	Símbolos	Valor
Densidade real	ρ_s	1.368,3 +/- 3,9 kg/m ³
Diâmetro médio	D ₅₀	5,24 mm
Porosidade do leito	ϵ	0,47 +/- 0,01
Esfericidade	ϕ	0,88
Volume real de uma partícula	V _p	2,51x10 ⁻⁸ m ³

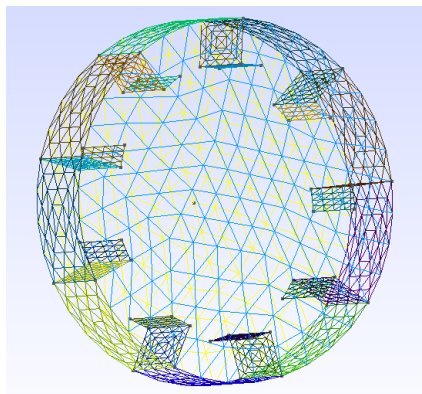
Fonte: Resende (2017) e Resende (2023).

3.2 Geometria e malha computacional do tambor rotativo

Para o estudo, utilizou-se um tambor rotativo desenvolvido por Carvalho e Petri (2022b), no qual foi aplicada uma redução de 25% de seu comprimento, conforme determinando por Carvalho (2023). Essa redução teve como finalidade principal diminuir os custos computacionais necessários para a simulação. O equipamento em questão apresenta 62,98 centímetro de diâmetro e 14,13 centímetro de comprimento, com nove suspensores de dois segmentos, cada um com 3,935 centímetro de altura e 7,87 centímetros de comprimento, com angulação de 90°.

Para criar a geometria e a malha computacional do tambor, foi utilizado o *GMSH*, um *software* dedicado à geração de malhas para análises de elementos finitos. A malha gerada é restrita às superfícies do equipamento, possibilitando a integração com o *software Liggghts*®. A Figura 12 exibe a representação da geometria e da malha resultante desse processo.

Figura 12 – Malha computacional criada no software *GMSH*.



Fonte: Do autor (2023).

3.3 Simulação utilizando a abordagem Lagrangeana

Para realizar as simulações, foi utilizado o *software Liggghts®*, uma versão gratuita compatível com o sistema operacional Linux. Este *software* se baseia na abordagem lagrangeana em seus cálculos.

A abordagem lagrangeana abrange apenas a fase discreta, composta pelas partículas. Nas simulações realizadas, foi desconsiderada a presença do ar de secagem, dado que, na presença de micro-ondas, o ar apresenta uma velocidade significativamente reduzida, uma vez que sua função principal é remover a umidade do ambiente, justificando essa consideração.

O modelo de contato utilizado foi o de Hertz-Mindlin, que requer diversos parâmetros de entrada, incluindo propriedades das partículas e interações partícula-partícula e partícula-parede. Alguns desses parâmetros foram mantidos constante e coincidem com as medidas reais, seguindo as condições estabelecidas no estudo de Resende (2017). Demais parâmetros foram retirados do estudo de Resende (2023), conforme detalhado na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros empregados na simulação.

Módulo de cisalhamento	5×10^6 Pa	
Razão de Poison	0,25	
Passo de tempo	$4,6 \times 10^{-6}$ s (20% do tempo de Rayleigh)	
Coeficiente de restituição	Partícula- partícula	0,5
	Partícula-parede	0,59
Coeficiente de atrito estático	Partícula- partícula	0,403
	Partícula-parede	0,735
Coeficiente de atrito de rolamento	Partícula- partícula	0,020
	Partícula-parede	0,020
Tempo de simulação	30 s	

Fonte: Resende (2017) e Resende (2023).

Os dados apresentados na Tabela 2, foram validados por meio de simulação por Resende (2023), em que determinou o ângulo de repouso dinâmico de $37,55^\circ$, com desvio de 0,4% em relação ao valor experimental obtido por Resende (2017). Esse resultado foi validado através da utilização de um tambor de 21,5 cm de diâmetro e 50 cm de comprimento, com 10% de seu volume preenchido de partículas e velocidade de rotação de 12,5 rpm.

Além desses parâmetro de entrada, é necessário especificar algumas condições de operação do equipamento, como o número de partículas e o período, que são determinados de acordo com a fração de preenchimento e a velocidade de rotação, respectivamente.

3.3.1 Efeito do grau de preenchimento e velocidade de rotação na secagem

O grau de preenchimento e a velocidade de rotação são variáveis que exercem um impacto notável no desempenho de um secador rotativo, uma vez que determinam a massa de sólidos presentes nas regiões ativa e passiva.

A velocidade de rotação do tambor tem efeito direto na descarga dos sólidos nos suspensores, ou seja, na quantidade de partículas retidas nos suspensores, o que, por sua vez, afeta significativamente no processo de secagem dos grãos. Por outro lado, a fração de preenchimento desempenha um papel crucial no tempo requerido para a secagem.

Com intuito de analisar essas duas variáveis e compreender o fluxo de escoamento no tambor rotativo, bem como determinar a combinação mais eficaz, foi desenvolvido um Planejamento Composto Central (PCC). A Tabela 3 exhibe as combinações da fração de preenchimento e da velocidade de rotação. Através dessas configurações, torna-se possível definir o número de partículas e o período, parâmetros essenciais para a condução da simulação.

Tabela 3 – Planejamento Composto Central (PCC).

Simulações	Fração de preenchimento (%)	Velocidade de rotação (rpm)	Número de partículas	Período (s)
A	20 (-1)	10 (-1)	219.282	6
B	20 (-1)	30 (+1)	219.282	2
C	80 (+1)	10 (-1)	877.128	6
D	80 (+1)	30 (+1)	877.128	2
E	7,58 (-1,414)	20 (0)	83.101	3
F	92,43 (+1,414)	20 (0)	1.103.372	3
G	50 (0)	5,86 (-1,414)	548.205	10,24
H	50 (0)	34,14 (+1,414)	548.205	1,76
I	50 (0)	20 (0)	548.205	3

Fonte: Do autor (2023).

O número de partículas pode ser determinado utilizando as Equações 14. O período é o tempo exigido para que o tambor conclua uma volta completa e ele pode ser determinado pela Equação 15.

$$N^{\circ} \text{ total de partículas} = \frac{\pi R^2 L (1-\varepsilon) f}{V_s} \quad (14)$$

$$T = \frac{1}{\text{frequência}} \quad (15)$$

Sendo que para determinar o número de partícula é necessário o R, L, ε , f e V_s , o raio, o comprimento, a porosidade do leito, o grau de enchimento do tambor e volume das partículas, respectivamente. Para encontrar o período é necessário conhecer a frequência em s^{-1} .

O PCC foi estabelecido com o propósito de incorporar todas as possíveis variações, englobando um intervalo de volume útil no tambor rotativo de 20 % (-1) a 80% (+1), juntamente com uma faixa de velocidade de rotação de 10 rpm (-1) a 30 rpm (+1). Além disso, foram considerados valores intermediários (0) de 50% para fração de preenchimento e uma velocidade de 20 rpm. Para garantir uma cobertura abrangente, os valores foram extrapolados, e todos esses cálculos envolveram um fator alfa (α) de 1,414.

O PCC possibilita uma análise detalhada das variáveis dependentes do processo, que consiste no tempo de retenção, o ângulo de última descarga e a massa fora da região de *hotspots*.

3.4 Análise das simulações

Como as simulação realizada, foi empregado o software de código aberto *ParaView*®, que possibilita a visualização das simulação para conduzir as análises essenciais para o estudo. Através dele, é possível analisar o tempo de residência dos grãos nos suspensores, a cascata formada, o ângulo de última descarga e a massa de grãos na região dos *hotspots*. Essas variáveis são fundamentais para compreender o comportamento do escoamento em um tambor rotativo com suspensores.

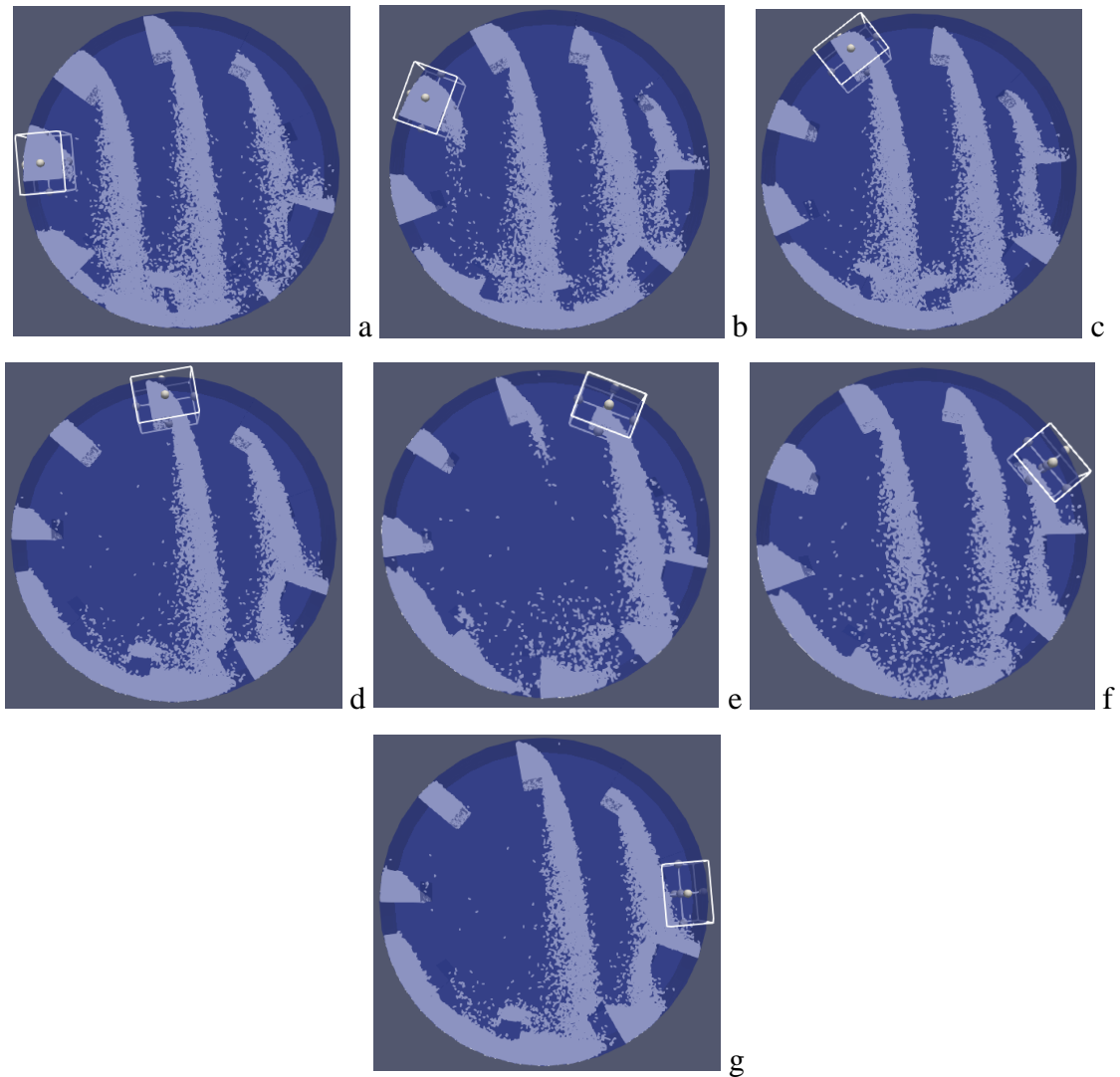
O tempo de retenção é o intervalo necessário para que o tambor atinja o ângulo de descarga (LUF), que representa o ângulo onde o suspensor está completamente vazio. Estes parâmetros podem ser monitorados por meio da simulação gerada no *ParaView*®. Além disso, também é possível observar a cascata gerada. Para essas análises, é necessário que a simulação já tenha se iniciado. Os resultados foram avaliados a partir do intervalo de tempo em que a massa dos suspensores atingia um padrão cíclico, uma vez que, nesse momento, o comportamento indica que o sistema já atingiu a estabilidade.

Para obter os valores de massa de sólido nos suspensores, foram confeccionadas, no *software ParaView®*, sete regiões na parte superior do tambor, com intervalos de 30°, por meio da função corte (*Clip*) disponível no *software*, como mostra a Figura 13. Essas áreas foram definidas para abranger apenas os suspensores e as partículas sólidas presentes neles, assegurando que não fosse incluídas partículas que já estavam em processo de queda.

Conforme o estudo de Carvalho e Petri (2022c), há duas camadas de *hotspots*, que são os pontos onde ficam as maiores concentrações de micro-ondas, indicando a preferência de ter os grãos concentrados nessa região, como mostrado na Figura 14. Diante dessa constatação dos autores, considerou-se que apenas um cilindro central, com diâmetro de 22 centímetros, não faz parte da região de *hotspots*, conforme indicado na Figura 15. Ao utilizar a ferramenta de corte (*Clip*) disponível no *ParaView®*, foi possível calcular a proporção de sólidos presentes nessa área. Subtraindo a massa de partículas contidas no cilindro do total de massa de partículas no tambor, foi possível calcular a quantidade de café na área de interesse.

Em todas as 9 simulações, foram realizados os mesmos cortes e observações, possibilitando, assim, a comparação dos resultados entre elas e com a literatura.

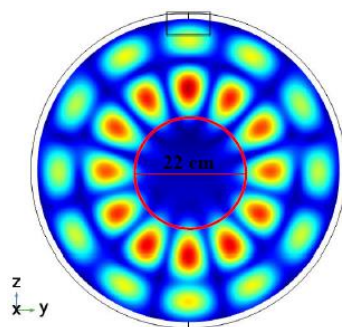
Figura 13 – Regiões de controle da massa de sólido nos suspensores.



Legenda: Posição das regiões de controle: (a) 0° (b) 30° (c) 60° (d) 90° (e) 120° (f) 150° e (g) 180° .

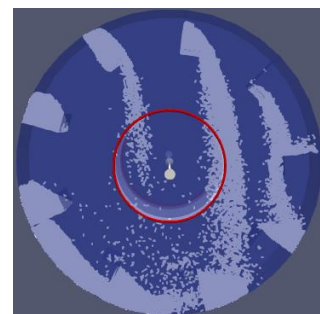
Fonte: Do autor (2023).

Figura 14 – Duas camadas de *hotspots* e região sem *hotspots*.



Fonte: Carvalho e Petri (2022c).

Figura 15 – Região sem a presença de *hotspots*.



Fonte: Do autor (2023).

3.5 Método de análise dos resultados

O software *ParaView*® possui a capacidade de criar gráficos que simplificam a análise comparativa de dados e fornece a contagem de partículas nas áreas delimitadas pelos *Clips* criados. No entanto, para obter informações mais nítidas e precisas, é necessário exportar os dados para arquivos no formato CSV (*Comma-separated values*). Isso permite a obtenção desses dados no Excel, o que facilita na investigação mais minuciosa do processo de secagem de cafés especiais no tambor rotativo.

No contexto deste estudo, será apenas utilizado o número de partículas dentre os diversos dados extraídos do *ParaView*®. Esses dados representam a quantidade de partículas presentes nos *Clips* em intervalos de 100 *time-steps* durante a simulação.

Para obter dados mais representativos do escoamento, é possível analisar o gráfico gerado no software *ParaView*®, de número de partículas por tempo, para identificar o momento em que a quantidade de partículas nos suspensores se estabiliza, o que ocorre após certo período de simulação.

No estudo da massa nos suspensores, serão consideradas apenas as cinco maiores massas, uma vez que o objetivo é atingir um carregamento ideal, ou seja, quando os suspensores estão completamente preenchidos. Com base nisso, será calculada a média do número de partículas nos suspensores.

Na análise da região sem a presença do *hotspots*, será realizado o cálculo da média e do desvio padrão de todos os valores. Além disso, serão comparadas as maiores e menores quantidades de partículas presentes no *Clip*.

Para determinar o tempo de residência, basta observar a simulação em andamento e registrar o tempo até que a última partícula saia do suspensor. O mesmo procedimento será adotado para determinar o ângulo de última descarga, adicionando apenas uma régua virtual (*Meazure*®) para medir o ângulo usando a tangente. Todo o processo será repetido três vezes para cada simulação e assim encontrando valores mais representativos por meio da média.

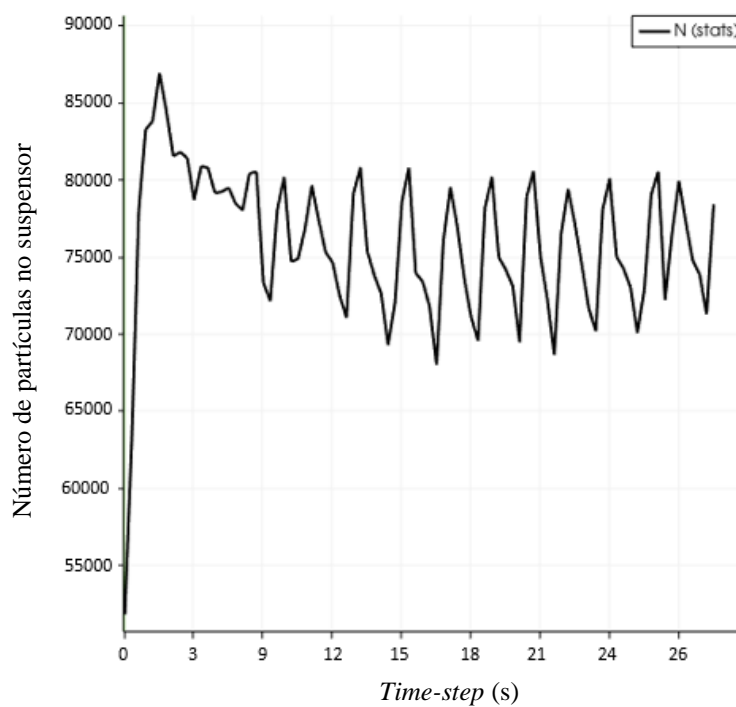
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados obtidos nas simulações numéricas empregando o Método dos Elementos Discretos (DEM) para investigar o comportamento das partículas no interior do tambor rotativo com suspensores.

4.1 Análise da estabilidade do processo

Para que os dados sejam representativos, é essencial que o processo tenha obtido estabilidade, evitando, assim, a inclusão de dados quando o fluxo inicial de partículas é transiente. Utilizando os gráficos produzidos pelo *ParaView*®, foi possível analisar o número de partículas em uma região em função do *time-step*, como mostra a Figura 16. Analisando a Figura 16, é possível observar que após o arquivo 30, que corresponde a aproximadamente 10 segundos, a massa de sólidos no suspensor passa a ter um comportamento cíclico, indicando que o tambor já está operando em regime estacionário. .

Figura 16 – Instabilidade no início do processo.

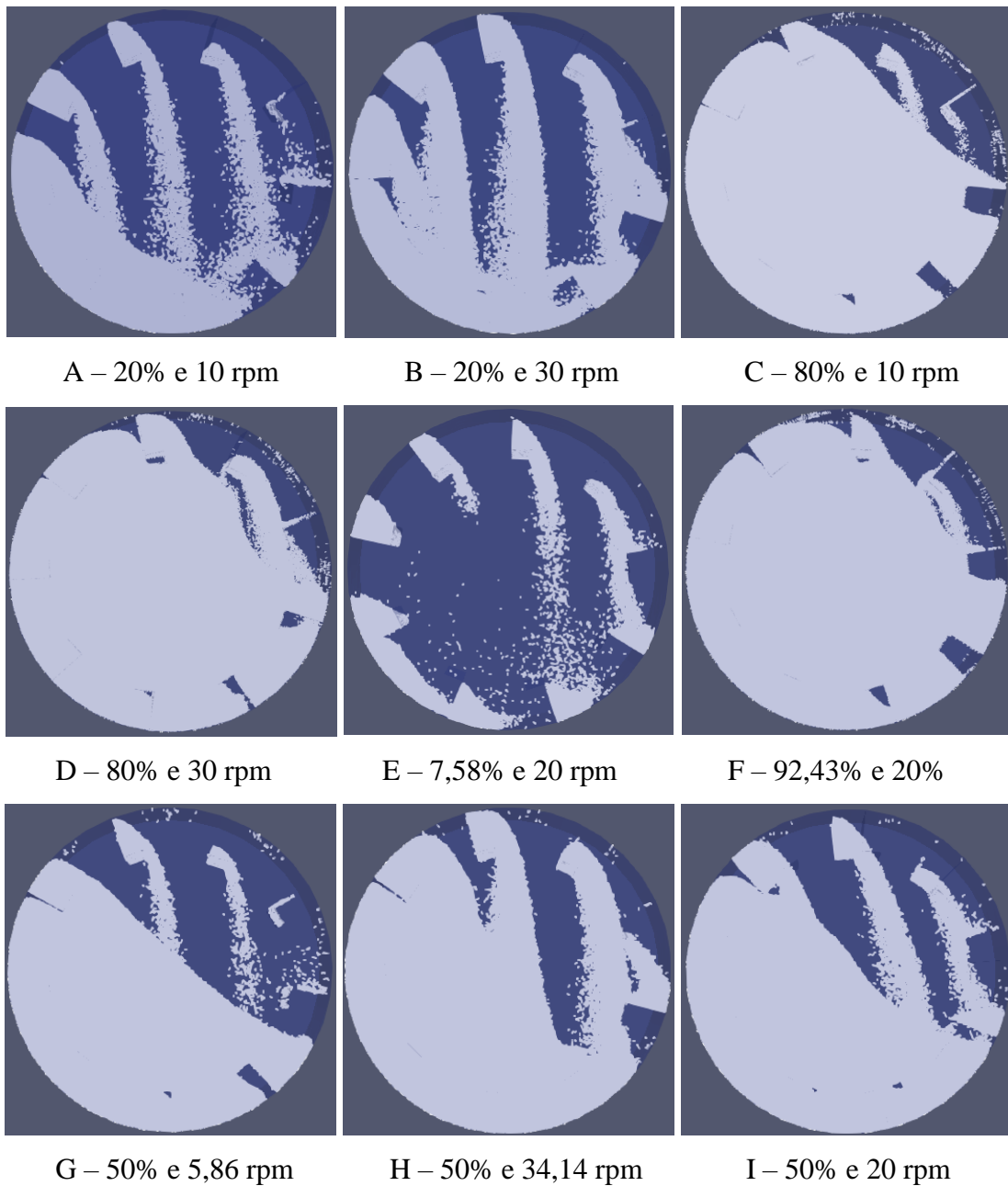


Fonte: Do autor (2023).

4.2 Dinâmica das partículas

Com o objetivo de analisar o comportamento das partículas de café no interior do tambor, procedeu-se à variação das velocidades de rotação e da fração de preenchimento. Os perfis das partículas são apresentados na Figura 17.

Figura 17 – Perfil do fluxo de partículas para diferentes combinações de frações de preenchimento e velocidade de rotação.



Fonte: Do autor (2023).

Ao analisar a simulação A, é possível observar a presença de partículas na porção superior dos suspensores quando estes estão situados a 180° . O carregamento das partículas até essas posições angulares superiores se mostra vantajoso quando deseja-se secar usando micro-ondas. De acordo com Carvalho (2023) é desejável que essa parte do equipamento esteja ocupada por partículas, visto que é uma região com *hotspots*. Comparando com a simulação B, que tem o mesmo grau de enchimento, mas uma velocidade de rotação superior, observa-se que o aumento da velocidade de rotação leva a uma maior quantidade de partículas na região dos *hotspots*, uma vez que o material é mantido por mais tempo no interior do suspensor.

Quando a fração de preenchimento é maior, como mostrado nas simulações C, D e F, é perceptível que nos pontos iniciais do leito o excesso de partículas prejudica a formação das cortinas. Uma grande vantagem disso é reduzir as forças de colisões entre as partículas devido à menor distância entre elas. No entanto, essa condição também resulta em uma distribuição menos homogênea das partículas, pois a mistura se torna difícil. Isso ocorre devido à concentração significativamente maior de grãos no centro do equipamento, dificultando que eles possuam um comportamento cíclico através dos suspensores.

Ao analisar uma fração de preenchimento intermediária e constante (50%) e variar a velocidade de rotação, conforme ilustrado nas simulações G, H e I, pode-se observar um aumento gradual na inclinação das cortinas de partículas, sugerindo um arraste dos sólidos. Esse fenômeno pode afetar negativamente o processo de secagem dos grãos, uma vez que velocidades de rotação mais elevadas podem resultar em colisões significativas entre as partículas, bem como entre as partículas e as paredes do equipamento, comprometendo a integridade dos grãos. Apesar disso, observa-se que as velocidades maiores favoreceriam que as partículas ficassem mais tempos nos suspensores e o ângulo de última descarga fosse aumentado.

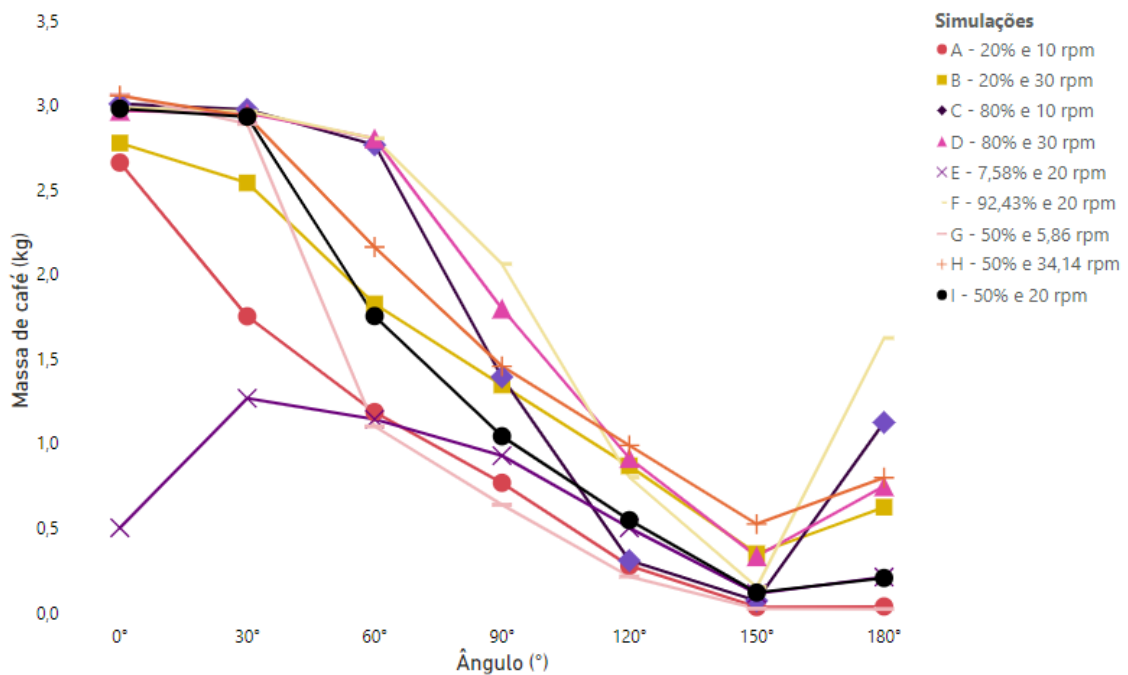
De modo geral, ao comparar as diferentes velocidades de rotação, pode-se observar que as velocidades mais elevadas resultam em ângulos de última descarga maiores, o que melhora a eficiência da secagem dos grãos por meio das micro-ondas. No entanto, em altas velocidades, como representado nas simulações B, D e H, os grãos tendem a aderir às paredes do equipamento, indicando o início do regime de centrifugação. Esse comportamento não é favorável para o processo de secagem, pois além de comprometer a integridade dos grãos pode-se prejudicar a mistura destes.

Ao examinar os perfis ilustrados das simulações na Figura 17, fica claro que o tambor está funcionando em uma condição de sobrecarga, com exceção da simulação E. Isso se deve ao fato de que, nas simulações, os ângulos de primeira descarga são observados antes de atingir

a posição de 0° . Já na simulação E, o ângulo de primeira descarga ocorre após o 0° , caracterizando uma condição de subcarga.

Também é possível analisar o comportamento da massa de café nos suspensores em relação ao ângulo do tambor, considerando diferentes frações de preenchimento e velocidade de rotação, conforme ilustrado na Figura 18.

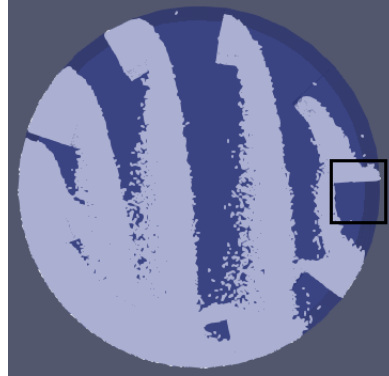
Figura 18 – Massa de sólidos nos suspensores em função do ângulo de rotação.



Fonte: Do autor (2023).

Ao analisar o gráfico, é evidente que, com exceção das simulações A e G, que tem em comum as velocidades de rotação mais baixas, ocorre um aumento na massa em todas as simulações após o ângulo de 150° . Esse aumento se deve ao fato que o suspensor anterior à posição 180° descarrega partículas sobre o suspensor localizado a 180° , resultando na contagem de massa na parte exterior do suspensor de interesse. Portanto, para este estudo, os resultados da região de controle 7 (180°) serão desconsiderados. A Figura 19, ilustra esse fenômeno.

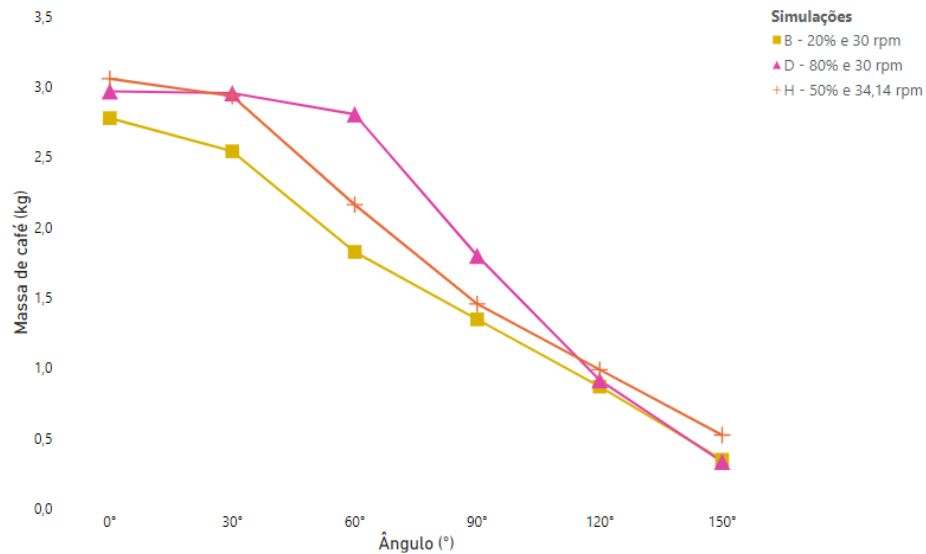
Figura 19 – Descarga de partícula no suspensor de região de controle 7.



Fonte: Do autor (2023).

Para um estudo mais detalhado, a seguir está a Figura 20, 21 e 22, que corresponde a combinações de velocidades de rotação elevadas, baixas velocidades e maiores frações de preenchimento, respectivamente.

Figura 20 – Massa de sólidos nos suspensores em função do ângulo para altas velocidade de rotação.

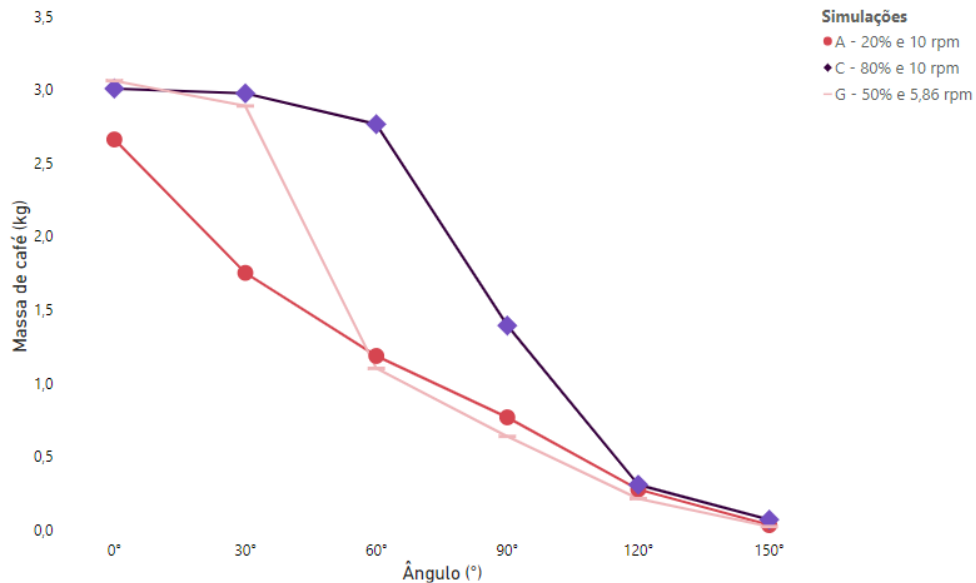


Fonte: Do autor (2023).

Ao examinar a Figura 20, fica evidente que, para velocidades de rotação mais elevadas, os suspensores são completamente esvaziados em ângulos maiores. Isso ocorre devido à presença de um grande número de partículas no suspensor no ângulo de 150°. Esse comportamento pode ter implicações positivas para o processo de secagem dos grãos, já que os suspensores permanecem carregados por mais tempo, potencialmente aumentando a eficiência

do uso das micro-ondas. No entanto, é importante considerar que altas velocidade de rotação podem comprometer a integridade dos grãos, o que pode resultar em uma qualidade inferior do café.

Figura 21 – Massa de sólidos nos suspensores em função do ângulo para baixas velocidades de rotação.

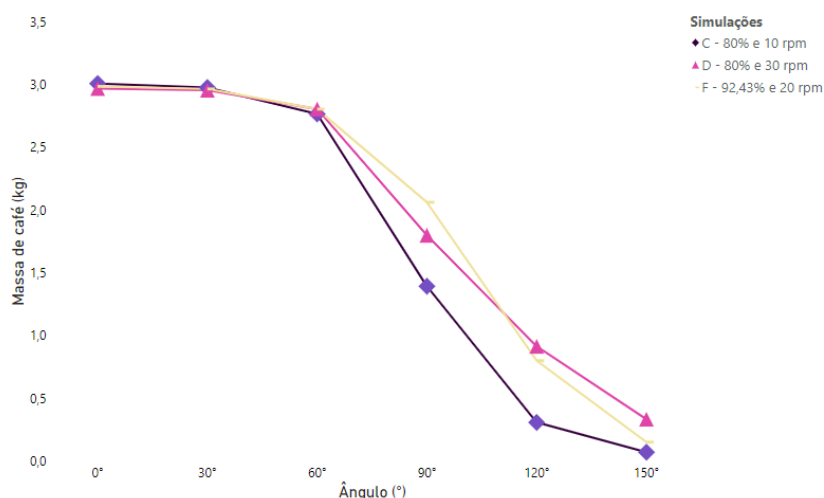


Fonte: Do autor (2023).

Para baixas velocidades, nota-se uma redução na quantidade de café na região de controle aos 150°, indicando que o suspensor sob investigação é esvaziado em ângulos próximos. Conforme sugerido pela literatura, essas velocidades de rotação mais baixas estão alinhadas com o desempenho ideal do equipamento, visto que é recomendável que estejam na faixa de 3 a 5 rotações por minuto, pois velocidades mais elevadas podem resultar em danos aos grãos (SILVA et al, 2008).

Pela Figura 22, fica evidente que, quando há maiores quantidades de café no interior do equipamento, o suspensor consegue carregar uma quantidade maior de café até chegar à posição de 180°. Isso sugere que, para maiores frações de preenchimento, ocorrem períodos mais longos em que o café permanece no suspensor.

Figura 22 – Massa de sólidos nos suspensores em função do ângulo para altas frações de preenchimento.



Fonte: Do autor (2023).

4.3 Massa de café na região de *hotspots*

A fim de analisar o efeito da variação da velocidade de rotação e fração de preenchimento na massa de café na região de *hotspots*, foram coletados os seguintes dados, mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 – Massa de café na região de *hotspots* para as simulações.

Simulações	Fração de enchimento (%)	Velocidade de rotação (rpm)	Massa de café dentro do tambor (kg)	Massa de café na região de <i>hotspots</i> (kg)	Porcentagem de café fora da região de <i>hotspots</i> (%)
A	20	10	7,531	7,418	1,50
B	20	30	7,531	7,052	6,36
C	80	10	30,124	22,966	23,76
D	80	30	30,124	23,191	23,01
E	7,58	20	2,854	2,811	1,50
F	92,43	20	37,895	30,583	19,29
G	50	5,86	18,828	14,625	22,32
H	50	34,14	18,828	14,423	23,39
I	50	20	18,828	15,029	20,17

Fonte: Do autor (2023).

Ao examinar a Tabela 4, fica evidente que trabalhar com fração de preenchimento baixa, como nas simulações A, B e E, mesmo com uma variação considerável na velocidade, é possível concluir que apresentam uma alta eficiência na secagem, uma vez que a maioria das partículas de café se encontram na região de *hotspots*, sendo ainda mais favorável em velocidades mais baixas.

Em todas as simulações realizadas, é evidente que a grande maioria das partículas se encontram na região de interesse. Isso é notável, já que a maior porcentagem de partículas fora da região de *hotspots* atingiu apenas 23,76%.

Para as condições de maiores sobrecargas, acima dos 20% de fração de preenchimento, independente da velocidade, há pouca variação na massa de sólidos fora da região de *hotspots*, ficando sempre em torno de 20% do café fora da região mais concentrada em micro-ondas. Como as velocidades mais altas, tendem a prejudicar a integridade dos grãos, recomenda-se então que utilize as velocidades mais baixas.

4.4 Tempo de permanência e ângulo de última descarga

Para aprofundar ainda mais sobre as variações da fração de preenchimento e de velocidade de rotação, os parâmetros de tempo de permanência das partículas no suspensor e ângulo de última descarga, estão dispostos na Tabela 5.

Tabela 5 – Dados do tempo de permanência e ângulo de última descarga.

Simulações	Fração de enchimento (%)	Velocidade de rotação (rpm)	Tempo de permanência (s)	Ângulo de última descarga (°)
A	20	10	2,40	149,12
B	20	30	0,90	162,35
C	80	10	2,80	157,84
D	80	30	1,13	169,24
E	7,58	20	1,37	152,80
F	92,43	20	1,50	172,22
G	50	5,86	4,30	158,35
H	50	34,14	0,70	162,77
I	50	20	1,40	158,26

Fonte: Do autor (2023).

Ao analisar os dados do ângulo de última descarga, fica evidente que, mantendo a velocidade de rotação constante, quanto maior for a fração de preenchimento, maior será o ângulo de última descarga. Isso implica em maiores distâncias percorridas pelos suspensores para transportar os sólidos, resultando na formação de cortinas por uma maior área na secção transversal. Este fato leva, por conseguinte, a um possível aumento na taxa de secagem pois as partículas terão mais tempo nas regiões de maiores concentrações de *hotspots*.

Além disso, observa-se que, para altas velocidade de rotação, o ângulo de última descarga também tende a aumentar. Com o aumento da velocidade, as partículas têm maior probabilidade de ficarem retidas na parede do equipamento, o que intensifica o contato com as micro-ondas de secagem.

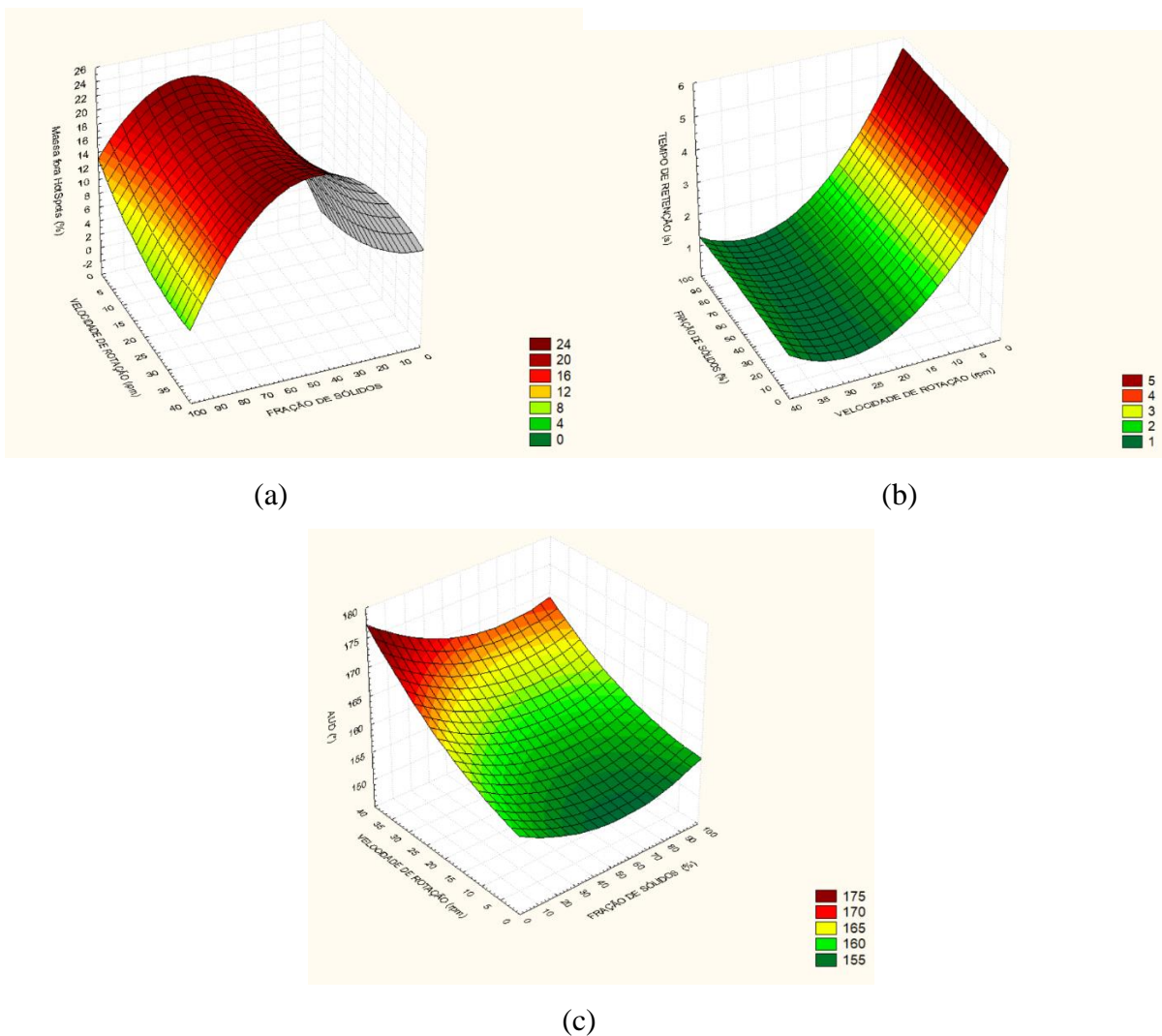
A simulação que apresentou o menor ângulo de descarga foi a simulação A, caracterizada por uma baixa fração de preenchimento e uma baixa velocidade de rotação. Isso indica que trabalhar sob essas condições reduziria o tempo de contato entre as partículas e as micro-ondas.

Ao analisar o tempo de permanência dos sólidos nos suspensores, pode-se observar que à medida que a velocidade de rotação aumenta, os grãos de café passam menos tempo nos suspensores. Portanto, conclui-se que a secagem por micro-ondas é mais eficaz em velocidade mais baixas. Quanto à fração de preenchimento, percebe-se que maiores frações de enchimento também contribuem para um maior tempo de permanência nos suspensores.

4.5 Análise das superfícies de resposta para as três variáveis dependentes

Para uma análise mais aprofundada dos resultados anteriormente apresentados, a Figura 23 exibe as superfícies de resposta das variáveis dependente do PCC.

Figura 23 – As superfícies de resposta para (a) massa de sólidos fora da região de *hotspots*, (b) tempo de permanência e (c) ângulo de última descarga.



Fonte: Do autor (2023).

A superfície de resposta ajustada para a massa de sólidos fora da região de *hotspots* e o ângulo de última descarga exibem coeficiente de correlação quadráticos inferiores a 0,6, não caracterizando um bom ajuste. Embora manifeste um bom comportamento quando observado na análise individual de cada parâmetro, os coeficientes mais baixos sugerem que o modelo não se ajusta de maneira satisfatória a essas interações conjuntas.

Ao examinar o tempo de permanência, observou-se um ajuste do coeficiente de correlação quadrático de 0,94. A Equação 16 apresenta o modelo para prever o tempo de permanência ajustado de acordo com os resultado do PCC.

$$TR = 1,37378 - 1,03229\omega + 0,52035\omega^2 \quad (16)$$

A velocidade de rotação é a única variável que exerce um impacto significativo no tempo de permanência, com um valor-p de 0,05.

Ao buscar a otimização do tempo de permanência na região, identificou-se um único ponto crítico, caracterizado por uma fração de preenchimento de 41,55% e uma velocidade de rotação de 9,77 rpm. Entretanto, observou-se que esse ponto não corresponde a um mínimo e nem a um máximo, mas sim a um ponto de sela.

5 CONCLUSÕES

Com base no exposto, o trabalho alcança satisfatoriamente seus objetivos, concentrando-se na investigação da fluidodinâmica de grãos especiais em um secador micro-ondas rotativo usando o DEM. Essa abordagem possibilitou a análise da influência da velocidade de rotação e da fração de preenchimento do tambor, enriquecendo a compreensão da dinâmica das partículas durante o funcionamento do equipamento.

É possível inferir que a dinâmica do escoamento no interior da cavidade é significativamente influenciada pela velocidade de rotação. Analisando a influência da velocidade para diversas condições de carregamento, observou-se que para os casos em que a fração de preenchimento são maiores do que 20%, o tambor estava sempre sobrecarregado. Nesta condição, a massa de sólido fora da região de *hotspots* se mantinha em torno de 20%. Logo, para essa variável, é vantajoso trabalhar em velocidades mais baixas de rotação.

Ainda considerando a velocidade de rotação, é possível deduzir que, à medida que ela aumenta, o ângulo de última descarga cresce, beneficiando a eficácia da secagem por micro-ondas. No entanto, é crucial observar que, simultaneamente, o aumento da velocidade resulta em um tempo de retenção menor dos sólidos nos suspensores.

Para assegurar um alto desempenho do processo de secagem, é aconselhável operar o tambor rotativo com quantidades menores de café. Isso reduz a quantidade de café fora da região de *hotspots*, melhorando o rendimento do processo. Portanto, recomenda-se a utilização de frações de preenchimento que variem de 10% a 15%, como recomendado na literatura. No entanto, isto leva a necessidade de estudos posteriores para verificar se a diminuição dessa fração de enchimento não aumentaria muito a força de colisão entre as partículas, o que prejudicaria a integridade dos grãos.

Em relação ao ângulo de última descarga, é possível concluir que maiores frações de preenchimento resultam em ângulos maiores, facilitando a secagem por micro-ondas.

As avaliações realizadas através da superfície de resposta para as variáveis dependentes não puderam ser ajustadas, pois, no caso das variáveis de massa de sólido fora da região de *hotspots* e ângulo de última descarga, o coeficiente quadrático não se mostrou um ajuste adequado. Por outro lado, no que diz respeito ao tempo de permanência, a velocidade de rotação se mostrou uma variável significativa e foi possível identificar um ponto crítico, embora tenha sido caracterizado como um ponto de sela.

A utilização da ferramenta DEM revelou-se eficaz, permitindo um estudo mais aprofundado das partículas no processo de secagem em um tambor rotativos com micro-ondas.

5.1 Sugestão para trabalhos futuros

Para aprimorar os estudos da dinâmica de partículas nos secadores rotativos com suspensores, é interessante em trabalhos posteriores investigar a mistura das partículas no tambor, a fim de aprofundar a compreensão sobre o uso dos suspensores, e avaliar as forças de colisão envolvidas entre as partículas.

6 REFERÊNCIAS

- 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.
- ANGELONI, G., GUERRINI, L., MASELLA, P., BELLUMORI, M., DALUIO, S., PARENTI, A., INNOCENTI, M. **What kind of coffee do you drink? An investigation on effects of eight different extraction methods**. Food Research International, v.116, p.1327-1335, 2019
- BORÉM, F. M.; RIBEIRO, D. M.; PEREIRA, R. G. F. A.; ROSA, S. D. V. F; MORAIS, A. R., **Qualidade do Café Submetido a Diferentes Temperaturas, Fluxos de Ar e Períodos de Pré-secagem**. Coffee Science, Lavras, v. 1, n. 1, p. 55-63, 2006.
- BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying and Storage Of Grains and Oilseeds**. Springer US, 1992. 450 p.
- CARNEIRO, Carla Maria. **Processo produtivo do café: Torrefação e Qualidade**. Orientador: Prof. Dr. Rubens Gerdraite. 2021. 38 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia -MG, 2021
- CARVALHO, Andressa de Jesus Braz. **Projeto de suspensores para um secador micro-ondas rotativo aplicado na secagem de cafés especiais**. Orientador: Irineu Petri Júnior. 2023. 66 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2023.
- CARVALHO, A. J. B, PETRI, I. J. (a) **Análise CFD do posicionamento e quantidade de guia de ondas em secadores rotativos micro-ondas aplicados na secagem de cafés especiais**. In: Anais do XI Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, 2022, Uberlândia. Anais eletrônicos... Campinas, Galoá, 2022.
- CARVALHO, A. J. B, PETRI, I. J. (b) **Aplicação das técnicas de fluidodinâmica computacional no dimensionamento de cavidades de tambores rotativos aplicados na secagem micro-ondas de cafés especiais**. In: Anais do XI Congresso Brasileiro 56 de Sistemas Particulados, 2022, Uberlândia. Anais eletrônicos... Campinas, Galoá, 2022.
- CARVALHO, A. J. B, PETRI, I. J. (c) **Dinâmica de partículas e previsão do campo eletromagnético em um secador micro-ondas rotativo aplicado a secagem de cafés especiais**. In: Anais da I Semana de Engenharia Química, 2022, Lavras.
- COSTA, Ennio Cruz da. **Secagem industrial**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2007. *E-book*. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 11 set. 2023.

- CUNDALL, P. A.; STRACK, O. D. L. **A discrete numerical model for granular assemblies.** *Geotechnique*, v. 29, n. 1, p. 47–65, 1979.
- ESQUIVEL, P., JIMÉNEZ, V.M. **Functional properties of coffee and coffee by-products.** *Food Research International*, v.46, p.488-495, 2012
- GEERAERT, L., BERECHA, G., HONNAY, O., AERTS, R. **Organoleptic quality of Ethiopian Arabica coffee deteriorates with increasing intensity of coffee forest management.** *Journal of Environmental Management*, v.231, p.282-288, 2019.
- KARALI, M.A. **Analysis study of the axial transport and heat transfer of a flighted rotary drum operated at optimum loading,** 143 p. Ph. D. thesis, Otto Von Guericke University, Magdeburg, Alemanha, 2015.
- KELLY, J. J. Flight design in rotary dryers. *Drying Technology*, v. 10. p. 979-993, 1992.
- KEMP, I. C.; OAKLEY, D. E. **Simulation and scale-up of pneumatic conveying and cascading rotary dryers.** *Drying Technology*, v. 15, p. 1699-1710, 1997.
- LEE, A. **Modelling the solids transport phenomena within flighted rotary dryers.** 284 p. PhD thesis, James Cook University, 2008.
- LIMA, R. M. **Estudo da dinâmica de partículas em tambores rotatórios empregando a abordagem numérica lagrangeana.** Dissertação de mestrado. 98 p. PPGEQ-UFU, Uberlândia/MG, 2017.
- LISBOA, M. H. **Estudo de secadores rotatórios na secagem de fertilizantes.** Dissertação de mestrado. 100 p. PPGEQ-UFU, Uberlândia/MG, 2005.
- MALTA, M. R. CHAGAS, S. J. R.; CHALFOUN, S. M. **Colheita e pós-colheita do café: recomendações e coeficientes técnicos.** *Informe Agropecuário*, v.29, n.247, p.83-94, 2008.
- MEREDITH, R. J. **Engineers' Handbook of Industrial Microwave Heating.** London: The Institution of Electrical Engineers, 1998.
- NASCIMENTO, S. M. **Estudo da dinâmica de partículas em tambor rotatório com suspensores: análise experimental e numérica utilizando abordagens Euleriana e Lagrangeana.** Tese (doutorado) -UFU, Uberlândia - MG, 108 p., 2018.
- ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL DO CAFÉ. **Relatório sobre o mercado de café – agosto 2023.** Disponível em: <https://www.icocoffee.org/documents/cy2022-23/cmr-0823-p.pdf>. Acesso em: 27 set. 2023.
- PANISSET, C. M. A. **Novas Alternativas para o Sistema de Separação Sólido-Líquido na Perfuração de Poços de Petróleo: Teste de uma Unidade de VCS; Busca do Aumento de Eficiência da Operação de Hidrocicloneamento; e Tratamento da Borra de Centrifugação por Microondas.** Tese (Doutorado), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.

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

PORTELLA, José Antonio; EINCHELBERGER, Luiz. **Secagem de Grãos**. 1. ed. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2001. 194 p.

RESENDE, Álvaro José Lima. **Estudo da influência da forma da representação da partícula de café para a simulação de escoamento em tambor rotativo**. Orientador: Suellen Mendonça Nascimento. 2023. 64 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2023.

RESENDE, I. J.. **Estudo experimental e numérico da dinâmica de grãos de café em um tambor rotatório**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, 93 p., 2017.

RENZO, A., MAIO, F.P. **An improved integral non-linear model for the contact of particles in distinct element simulations**. Chemical Engineering Science, v. 60, p. 1303-1312, 2005.

SHAMSI, M. M. M.; MIRGHASEMI, A. A.. **Numerical simulation of 3D semi-real-shaped granular particle assembly**. Powder Technology, vol. 221, p. 431-446, 2012.

SAEMAN, W. C.; MITCHELL, T. R. Jr. **Analysis of rotary dryer and cooler performance**. Chem. Eng. Progress. v. 50, p. 467-475, 1954.

SHAMSI, M. M. M.; MIRGHASEMI, A. A.. **Numerical simulation of 3D semi-real-shaped granular particle assembly**. Powder Technology, vol. 221, p. 431-446, 2012.

SILVA, J. S.; AFONSO, A. D. L.; DONZELLES, S. M.; NOGUEIRA, R. M. **Secagem e secadores**. Viçosa: Aprenda Fácil. p.109-146, 2008.

SILVEIRA, Jeniffer Cristina. **Estudo experimental e numérico do efeito de variáveis operacionais e de projeto sobre a dinâmica de partículas em tambores rotatórios com suspensores**. Orientador: Claudio Roberto Duarte e Marcos A. de Souza Barrozo. 2022. 134 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, [S. l.], 2022. SINDICAFÉ-MG – Sindicato da Indústria de Café do Estado de Minas Gerais. Disponível em: <http://sindicafe-mg.com.br/cafe-no-mundo>. Acesso em: 11 set. 2023.

SOUZA, G. B.; NOGUEIRA, A. R. D. A.; RASSINI, J. B. **Determinação de matéria seca e umidade em solos e plantas com forno de micro-ondas doméstico**. Circular Técnica MAPA, v. 33, p. 1–9. São Paulo. 2002.

SUNKARA, K. R. **Granular flow and design studies in flightes rotating drums**. Tese de doutorado, Otto-von-Guericke-Universit"at Magdeburg, Alemanha, 2013.