



ANDRESSA DE JESUS BRAZ CARVALHO

**PROJETO DE SUSPENSORES PARA UM SECADOR
MICRO-ONDAS ROTATIVO APLICADO NA SECAGEM
DE CAFÉS ESPECIAIS**

**LAVRAS – MG
2023**

ANDRESSA DE JESUS BRAZ CARVALHO

**PROJETO DE SUSPENSORES PARA UM SECADOR MICRO-ONDAS
ROTATIVO APLICADO NA SECAGEM DE CAFÉS ESPECIAIS**

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

Prof. Dr. Irineu Petri Júnior
Orientador
Prof^ª. Dr^ª. Suellen Mendonça Nascimento
Coorientadora

**LAVRAS – MG
2023**

ANDRESSA DE JESUS BRAZ CARVALHO

**PROJETO DE SUSPENSORES PARA UM SECADOR MICRO-ONDAS
ROTATIVO APLICADO NA SECAGEM DE CAFÉS ESPECIAIS**

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

APROVADO em 07 de junho de 2023.

Prof^ª. Dr^ª. Renata de Aquino Brito Lima Corrêa
DEG/UFLA

Msc. Paula Giarolla Silveira
PPGCA/UFLA

Prof^ª. Dr^ª. Suellen Mendonça Nascimento
DEG/UFLA

Prof. Dr. Irineu Petri Júnior
DEG/UFLA

**LAVRAS – MG
2023**

Aos meus pais Silvana e Arnaldo.

Aos meus irmãos Afonso e Álvaro.

Dedico

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à Deus, por sempre ter me dado forças para seguir buscando a realização dos meus objetivos. Por ter me ajudado em todas as dificuldades, me fazendo enxergar uma solução mesmo quando tudo parecia impossível.

Agradeço também aos meus pais, Arnaldo e Silvana, e aos meus irmãos, Álvaro e Afonso, por sempre terem me dado todo o apoio possível e nunca terem desacreditado de mim, até quando eu mesma descreditei. Vocês foram os meus pilares durante minha trajetória e com toda certeza só cheguei até aqui pois vocês me possibilitaram isso. Agradeço também a todos os meus familiares, avós, tios e primos, que de alguma maneira contribuíram com a minha trajetória.

Ao meu namorado, Stanley, agradeço por sempre me fazer enxergar as coisas como elas realmente são. Me ajudando a tirar as pedras que encontrava no caminho, durante minha trajetória. Foi essencial tê-lo ao meu lado durante toda a graduação.

Aos meus amigos de graduação, de maneira especial as integrantes do trio da ABI, Elisa e Bruna e da dupla de 5, Ju, Juju, Laura e Tatiane, que durante todo o meu trajeto me acompanharam, me dando forças sempre que necessário. Foi incrível dividir os momentos da graduação com vocês, não tenho dúvida que meus dias se tornaram bem melhores com a presença de vocês, tornando a graduação mais suportável. Agradeço também ao Bernardo por ter me dado o título de chefe e se tornado um grande amigo, agradeço por todos os conselhos e incentivos ao longo da minha graduação.

Agradeço a todos os professores que contribuíram de alguma forma com o meu objetivo. De maneira especial, ao meu orientador, Irineu, agradeço por todo ensinamento ao longo da minha trajetória e pela paciência. Por além de ser um excelente orientador, ter se tornado um grande amigo e me dado diversos conselhos. Saber que sempre tinha uma porta naquele corredor que eu podia bater que iria me escutar foi um diferencial para a minha trajetória. Agradeço também a minha coorientadora Suellen, por ter sido sempre paciente e me ajudado durante minha trajetória.

RESUMO

A secagem é uma operação unitária que tem o objetivo de reduzir a umidade do produto. Existem diversos tipos de secadores e sua escolha depende das propriedades do material a ser seco e para atender as exigências dos consumidores de café deve-se garantir que sejam utilizados os melhores métodos para o seu processamento. Atualmente, o aquecimento via micro-ondas vem ganhando destaque, devido as suas diversas vantagens. O tambor rotativo com suspensores se mostra promissor quando se trata da secagem de grãos, pois facilita a homogeneização do material. Entretanto, os trabalhos que tratam de secagem de cafés em micro-ondas cilíndricos são escassos na literatura, principalmente devido à dificuldade do dimensionamento desse tipo de equipamento. Portanto, o objetivo desse trabalho foi realizar o estudo da fluidodinâmica de grãos de cafés especiais em um secador micro-ondas rotativo, com o intuito de realizar o projeto das dimensões e quantidade ótima de suspensores no secador, além da realização do estudo da influência da velocidade de rotação e fração de preenchimento na dinâmica das partículas. As simulações foram realizadas no software *Fluent*, sendo utilizado um tambor rotativo de 62,98 cm de diâmetro e 14,13 cm de comprimento. Foi feito um planejamento a três níveis para determinação do comprimento e a quantidade de suspensores ótimos. Para análise da influência da velocidade e fração de preenchimento foram utilizados os suspensores ótimos, com velocidades de 1, 2, 3, 5, 10, 15, 25 e 35 rpm e fração de preenchimento de 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 e 90%. Obteve-se que para maiores quantidades de suspensores foram geradas mais cortinas. Pela análise das superfícies de respostas, pôde-se concluir que devem ser utilizados 9 suspensores de 7,87 cm de largura para uma melhor operação. Com a análise do perfil de fração de sólidos, para velocidades de rotação superiores a 5 rpm, notou-se um aumento do ângulo de repouso dinâmico dos grãos de café e uma inclinação das cortinas. A velocidade ideal de operação encontrada foi de 2 ou 3 rpm. Com a variação da fração de preenchimento, notou-se que o tempo de residência dos grãos no suspensor aumentou com o aumento do preenchimento, o que também foi percebido pela análise do perfil de fração de sólidos. Com isso, conclui-se que a utilização da ferramenta CFD foi bastante eficaz, pois permitiu que fosse projetado um equipamento que pode ser utilizado no âmbito semi-industrial, devido a boa homogeneização que fornecerá para os grãos, gerando um baixo custo operacional.

Palavras-chave: CFD, velocidade, preenchimento, *Coffea Arábica L. Cv. Topázio*.

ABSTRACT

Drying is a unit operation which objective is to reduce the moisture content of a product. There are several types of dryers, and their selection depends on the material's properties that are going to be dried. To attend the demands of coffee consumers, it is important to ensure that the best methods are used for its processing. Nowadays, microwave heating is gaining prominence due to its various advantages. The rotary drum with flights is becoming promise on the grains' drying, as it facilitates material's homogenization. However, there are only few studies in the literature about the coffee's drying in a cylindrical microwave dryer, mainly due to the difficulty in sizing this type of equipment. Therefore, this work's objective was to study the fluid dynamics of special coffee beans in a rotary microwave dryer, with the aim of projecting the dimensions and the best numbers of flights in the dryers, as well as studying the influence of rotation speed and fill fraction on particle dynamics. The simulations were performed using the Fluent software, with a rotary drum of 62.98 cm in diameter and 14.13 cm in length. A three-level planning was used to determine the best length and number of flights. For the analysis of the influence of speed and fill fraction, the optimal flights were used, with speeds of 1, 2, 3, 5, 10, 15, 25, and 35 rpm, and fill fractions of 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, and 90%. It was noticed that the higher quantities of flights generated more curtains. From the analysis of the response surfaces, it was concluded that 9 flights with a width of 7.87 cm should be used for a better operation. By analyzing the solids fraction profile, it was observed that for rotation speeds above 5 rpm, there was an increase in the dynamic angle of repose of the coffee beans and a tilting of the curtains. The ideal operating speed was found to be 2 or 3 rpm. With varying fill fraction, it was noticed that the residence time of the beans in the lifter increased with increased filling, which was also observed in the solids fraction profile. Therefore, it can be concluded that the use of CFD (Computational Fluid Dynamics) was quite effective, as it allowed the design of equipment that can be used in an industrial context, providing good homogenization for the beans, and generating low operational costs.

Keywords: CFD, speed, fill fraction, *Coffea Arábica L. Cv. Topázio*.

LISTA DE SÍMBOLOS

\vec{g}	Aceleração da gravidade	[m/s ²]
l_2	Altura do suspensor	[m]
C_D	Coefficiente de arraste	[-]
e_{ss}	Coefficiente de restituição	[-]
K_{sf}	Coefficiente de troca de momento entre as fases fluida e sólida	[-]
$u_{s,i}$	Componente da velocidade na direção i	[m/s]
D	Diâmetro	[m]
d_s	Diâmetro das partículas da fase sólida	[m]
r_H	Distância entre o centro do tambor e a junção dos segmentos	[m]
$g_{0,ss}$	Função de distribuição radial	[-]
Re_r	Número de Reynolds relativo	[-]
n_F	Número de suspensores	[-]
p_s	Pressão de sólidos	[kg/ms ²]
p_{fric}	Pressão friccional	[kg/ms ²]
p	Pressão termodinâmica	[kg/ms ²]
R	Raio do tambor	[m]
I_{2D}	Segundo variante do tensor tensão	[-]
$D_{s,ij}$	Tensor de deformação	[kg/ms ²]
\bar{I}	Tensor unitário	[kg/ms ²]
\vec{v}	Vetor velocidade	[m/s]

Símbolos gregos

$\gamma _{\delta_L=0^\circ}$	Ângulo de repouso dinâmico no suspensor na posição 0°	[°]
α	Ângulo compreendido entre as retas que passam pelas duas extremidades do suspensor e o centro	[°]
φ_e	Ângulo de repouso estático	[°]
ϑ	Ângulo que tem relação com o ângulo de repouso dinâmico formado quando o suspensor se encontra na posição 0°.	[°]
ρ	Densidade	[kg/m ³]
γ_{θ_s}	Dissipação da energia por colisões	[-]
α	Fração volumétrica	[-]

θ_s	Temperatura granular na fase sólida	[-]
$\bar{\tau}$	Tensor tensão	[kg/ms ²]
ϕ_{fs}	Troca de energia entre as fases fluida e sólida	[-]
ω	Velocidade angular de rotação	[rpm]
μ	Viscosidade	[kg/ms]
λ_s	Viscosidade granular bulk	[kg/ms]
$\mu_{s,cin}$	Viscosidade granular cinética	[kg/ms]
$\mu_{s,col}$	Viscosidade granular colisional	[kg/ms]
$\mu_{s,fric}$	Viscosidade granular friccional	[kg/ms]

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Processamento do café por via seca e úmida.	4
Figura 2 – Grãos de café com diferentes teores de umidade ao longo do processo de secagem.	5
Figura 3 – Secagem de café em terreiro.	6
Figura 4 – Secador rotativo marca Pinhalense modelo SRE-150.	7
Figura 5 – Esquema de um secador rotatório com suspensores.	8
Figura 6 – Geometria de suspensores (a) reto, (b) de ângulo reto, (c) angulares e (d) helicoidais.	9
Figura 7 – Cascadeamento de sólidos no interior de um secador com suspensores.	10
Figura 8 – Demonstração de algumas variáveis importantes para a determinação do número teórico de suspensores.	12
Figura 9 – Tambor (a) subcarregado, (b) com carregamento ideal e (c) sobrecarregado.	13
Figura 10 – Representação esquemática de um forno micro-ondas.	15
Figura 11 – Magnetron.	16
Figura 12 – Guia de ondas retangular.	16
Figura 13 – Representação de <i>hotspots</i> em uma cavidade de um forno micro-ondas.	17
Figura 14 – Representação das dissipações viscosas que podem estar presente em um escoamento granular.	21
Figura 15 – Medição do ângulo de repouso dinâmico por meio do <i>software Meazure</i>	27
Figura 16 – Linha para medição da velocidade em função da posição radial.	27
Figura 17 – Superfície com grãos de café fixados sobre fita dupla face.	29
Figura 18 – Aparato experimental para medição do ângulo de repouso.	29
Figura 19 – Região de controle para obtenção da massa de sólidos no suspensor no teste de independência de malha.	31
Figura 20 – Região sem a presença de <i>hotspots</i>	33
Figura 21 – Região de controle para obtenção da massa de sólidos no tambor com (a) 14 suspensores, (b) 9 suspensores e (c) 4 suspensores.	33
Figura 22 – Representação dos ângulos 0° e 180°	34
Figura 23 – Ângulo de repouso dinâmico para o café verde.	36
Figura 24 – Perfil de velocidade experimental e simulado para grãos de café verde.	37
Figura 25 – Resultados da (a) fração de sólidos e (b) velocidade média das partículas para diferentes posições axiais.	39
Figura 26 – Teste de independência de malha.	40
Figura 27 – Distribuição do (a) <i>skewness</i> e (b) razão de aspecto dos elementos de malha.	40
Figura 28 – Perfil de fração de sólidos para as simulações nº (a) 1, (b) 2, (c) 3, (d) 4, (e) 5, (f) 6, (g) 7, (h) 8, (i) 9, (j) 10 e (k) 11.	42
Figura 29 - Massa de sólidos em um suspensor em função do ângulo de rotação para diferentes comprimentos e quantidades de suspensores.	43
Figura 30 - Superfície de resposta para (a) o tempo de permanência, (b) o ângulo de última descarga e (c) a massa de café na região de hotspots.	45

Figura 31 – Perfil de fração de sólidos para a velocidade de rotação de (a) 1 rpm, (b) 2 rpm, (c) 3 rpm, (d) 5 rpm, (e) 10 rpm, (f) 15 rpm, (g) 25 rpm e (h) 35 rpm.	46
Figura 32 - Massa de sólidos em um suspensor em função do ângulo de rotação para diferentes velocidades de rotação.	47
Figura 33 - Perfil de fração de sólidos com (a) 10%, (b) 20%, (c) 30%, (d) 40%, (e) 50%, (f) 60%, (g) 70%, (h) 80% e (i) 90% de volume do tambor preenchido com café.	50
Figura 34 - Massa de sólidos em um suspensor em função do ângulo de rotação para diferentes frações de preenchimento.	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Volume, capacidade e fração de preenchimento recomendada pelo fabricante para diferentes modelos de tambores rotativos.....	14
Tabela 2 – Propriedades físicas dos grãos de café verde utilizados na simulação.	26
Tabela 3 – Condições empregadas nas simulações com abordagem Euleriana.	27
Tabela 4 - Propriedades físicas dos grãos de café.	30
Tabela 5 – Variáveis independentes codificadas e na escala original utilizadas no planejamento a três níveis para análise de suspensores de dois segmentos.	32
Tabela 6 – Ângulo de repouso estático para os cafés seco e úmido.	37
Tabela 7 – Resultados do planejamento de experimentos a três níveis.	44
Tabela 8 – Massa de café na região de <i>hotspots</i> para as velocidades de rotação estudadas.....	48
Tabela 9 – Massa de café na região de hotspots para as diferentes frações de preenchimento do tambor.	52

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivos	2
2	REFERENCIAL TEÓRICO	3
2.1	Produção de café	3
2.1.1	Processamento	3
2.1.2	Secagem	4
2.2	Secadores rotativos com suspensores	8
2.2.1	Geometria de suspensores	9
2.2.2	Dinâmica de partículas no tambor	10
2.2.3	Número teórico de suspensores	11
2.2.4	Ângulo de última descarga	12
2.2.5	Fração de preenchimento	12
2.3	Aquecimento via micro-ondas	14
2.4	Fluidodinâmica Computacional	17
2.4.1	Pré-processamento	18
2.4.2	Processamento	19
2.4.2.1	Modelagem multifásica do escoamento granular – Abordagem Euleriana	19
2.4.3	Pós-processamento	25
3	METODOLOGIA	26
3.1	Validação Experimental das simulações	26
3.2	Estudo do efeito de parede do tambor para redução do seu comprimento	28
3.2.1	Determinação do ângulo de repouso estático dos grãos de café	28
3.2.2	Simulações numéricas	29
3.3	Teste de independência de malha	30
3.4	Planejamento de experimentos para suspensores com 2 segmentos	31
3.5	Velocidade de rotação do tambor	34
3.6	Fração de preenchimento do tambor	35
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
4.1	Validação experimental	36
4.2	Ângulo de repouso estático	37
4.3	Simplificação do escoamento no eixo longitudinal do tambor	38
4.4	Teste de independência de malha	39
4.5	Projeto de suspensores com dois segmentos	41
4.6	Análise da velocidade de rotação para secagem de grãos de cafés especiais ..	45
4.7	Análise da fração de preenchimento dos tambores para secagem de grãos de cafés especiais	49
5	CONCLUSÕES	53
5.1	Sugestão para trabalhos futuros	54
6	REFERÊNCIAS	55

1 INTRODUÇÃO

A secagem é uma operação unitária muito utilizada para diminuir a umidade de materiais como madeiras, derivados da borracha, couros e plásticos. Além disso, esta pode ser utilizada para a melhor conservação, como é o caso dos cereais, alimentos e dos materiais perecíveis. A retirada da água do produto, aumenta significativamente o período de armazenamento de grãos (COSTA, 2007).

A umidade ideal para conservação de grãos em ambientes abertos está entre 10 e 13%. Grãos com teores de umidade acima de 14% apresentam respiração ativa, o que pode favorecer a liberação de calor e ocasionar no desenvolvimento de micro-organismos, resultando na deterioração dos grãos. Para cada tipo de grão tem-se uma faixa de umidade recomendada para o armazenamento. Quando se trata especificamente do café, para que este seja armazenado até um ano, deve-se ter uma umidade máxima de 12%, já quando se quer estender esse prazo, deve-se utilizar uma umidade de 11% (HARRINGTON, 1972; PORTELLA e EICHELBERGER, 2001).

A secagem de café pode ser feita utilizando diferentes maneiras. Alguns métodos encontrados na literatura para a secagem de café são: por meio de um secador intermitente de fluxo concorrente (FILHO e SILVA, 2006), por meio de um secador mecânico com passagem de ar (ALVES *et al.*, 2013), por meio de terreiros e camada fixa (BORÉM *et al.*, 2008) e em terreiros de concreto (RESENDE *et al.* 2009). A escolha do tipo de secagem adequada exige a comparação entre as vantagens e desvantagens de cada um dos métodos disponíveis, levando-se em consideração o ponto de vista técnico e econômico (HELDMAN e HARTEL, 2000).

Devido a sua flexibilidade, simplicidade de operação e altas taxas de produção, o tambor rotativo ganha destaque quando se trata da secagem de café. Na maioria dos casos, são inseridos suspensores no tambor, estes fazem o levantamento do produto e em certa altura o soltam, fazendo com que haja a formação das cortinas através do fluxo de ar de secagem. Os suspensores ajudam na homogeneização do material e aumentam a área de contato entre o ar de secagem e o material que está sendo seco (DELELE *et al.*, 2014).

Outro método que vem ganhando destaque atualmente é a secagem por micro-ondas. Na literatura são encontrados diversos trabalhos recentes que utilizam dessa técnica para diferentes materiais, podendo ser citados a secagem de: semente de abóbora (VIEIRA *et al.*, 2021), amêndoas de noz de macadâmia (SILVA *et al.*, 2011), resíduo de

acerola (SOUSA *et al.*, 2020), banana nanica (GEROMEL e FREITAS, 2020) e café (RABELLO *et al.*, 2022; COSTA *et al.*, 2021).

Entretanto, o estudo desses equipamentos de maneira experimental pode demandar muitos custos financeiros e de tempo. Portanto, a Fluidodinâmica Computacional (*Computational Fluid Dynamics* – CFD) se torna uma grande aliada. Com a utilização dessa ferramenta pode-se prever diversos tipos de processos com a utilização apenas de *softwares* computacionais que fazem a resolução das equações diferenciais de conservação de massa, quantidade de movimento e energia (MAITELLI, 2010).

Devido a sua importância, na literatura, são encontrados diversos trabalhos que fazem o estudo da secagem por meio da ferramenta CFD. Podem ser citados o estudo da secagem em leito fluidizado do farelo de soja (SILVA, 2012) e secagem de morango em secadores solar e micro-ondas (NETO *et al.*, 2019).

1.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho foi realizar o estudo da fluidodinâmica de grãos de cafés especiais em um secador micro-ondas rotativo, com o intuito de realizar o projeto das dimensões e quantidade ótima de suspensores no secador. Além disso, pretende-se realizar um estudo da influência da velocidade de rotação e fração de preenchimento do tambor para avaliar a dinâmica das partículas durante a operação do tambor.

Para atingir os objetivos gerais mencionados, foram propostos os seguintes objetivos específicos:

- Validação numérica de simulação de tambores rotativos operando com cafés;
- Estudo da redução do comprimento do tambor rotativo, para diminuição dos custos computacionais;
- Realização do teste de independência de malha;
- Projeto de suspensores com dois segmentos para o secador micro-ondas, utilizando-se da técnica de planejamento de experimentos;
- Análise da velocidade de rotação do tambor rotativo contendo grãos de cafés especiais;
- Estudo da fração de preenchimento do tambor rotativo destinado a secagem de cafés especiais.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nessa seção é apresentada uma fundamentação teórica sobre a produção do café no cenário brasileiro e mundial, as etapas do processo produtivo, os secadores rotativos com suspensores, o aquecimento por meio de micro-ondas e sobre a abordagem numérica via fluidodinâmica computacional.

2.1 Produção de café

A importância do café na economia mundial é indiscutível. Segundo o Sindicato da Indústria de Café do Estado de Minas Gerais (SINDICAFÉ-MG, 2023), o café é um dos produtos primários mais valiosos do mundo. Em países subdesenvolvidos, a exportação de café pode chegar a auxiliar em até 70% das despesas.

Atualmente, o café ainda é considerado como *commodity*, embora venha ganhando status de *speciality*, devido ao aumento nas exigências dos consumidores da bebida. Os consumidores de café buscam por preços competitivos e, além disso, características específicas, como aroma que agregue a qualidade e valor do grão. Com isso, os países produtores de café precisam se adequar no mercado, de modo que atenda as exigências dos consumidores (SINDICAFÉ-MG, 2023).

Segundo a Associação Brasileira da Indústria de Café (ABIC, 2022), entre novembro de 2021 e outubro de 2022 foram consumidas 21,3 milhões de sacas de café no Brasil. Estes dados reforçam o papel do café como uma bebida de extrema importância na indústria nacional, apesar da crise econômica causada pela pandemia da COVID-19. No ano de 2022 estima-se que as vendas da indústria de café alcançaram R\$ 23,5 bilhões. O consumo elevado de café no país o coloca como segundo maior consumidor desse grão do mundo. Além disso, o Brasil se enquadra como o maior produtor mundial de café.

Existem diversas etapas no processo produtivo do café e cada uma delas é de extrema importância para que o produto tenha as características desejadas pelo consumidor. Segundo Carneiro (2021), as principais etapas do processo produtivo são: plantio, colheita, processamento, secagem, torrefação e moagem dos grãos.

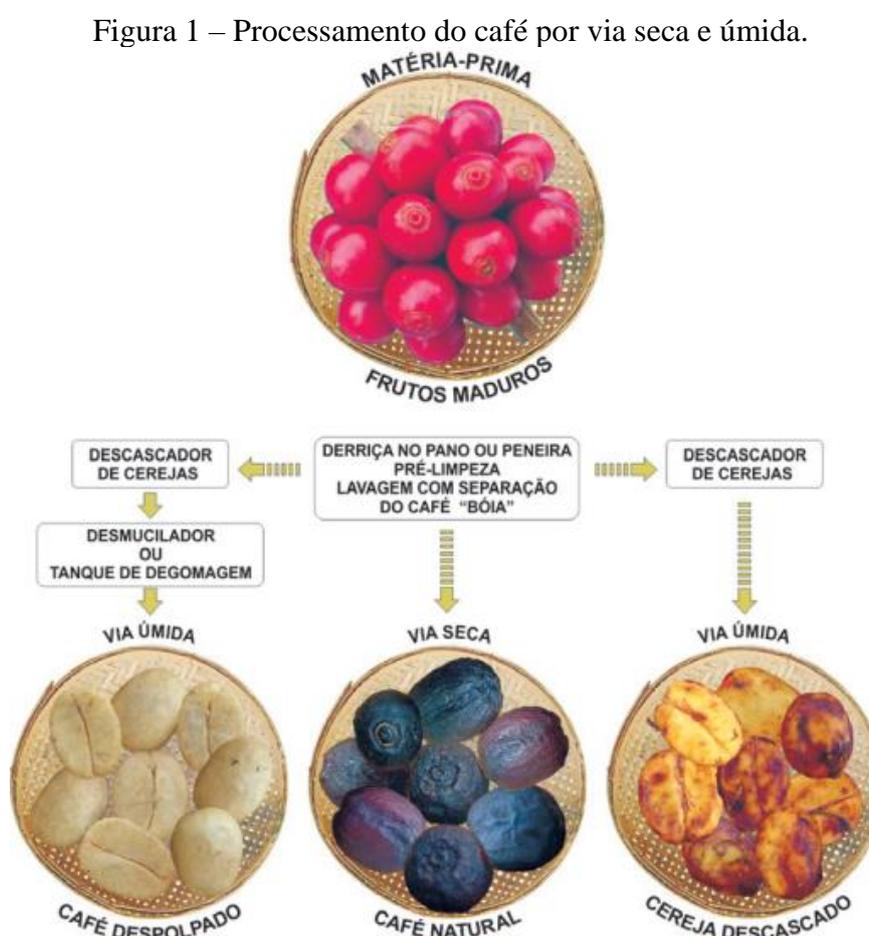
2.1.1 Processamento

Após a colheita dos grãos de café, estes podem ser processados por via seca ou úmida. No processamento por via seca, o fruto é seco com casca e dá origem aos cafés naturais. Esta denominação é atribuída pois trata-se de um processo que preserva a

integridade dos grãos, mantendo inalteradas as suas partes constituintes. Além disso, é pouco agressivo para o meio ambiente, visto que gera apenas efluentes líquidos com baixo teor de matéria orgânica (MALTA *et al.*, 2008; REZENDE, 2017).

Já no processamento por via úmida, ocorre a retirada da casca, polpa e pode ou não ocorrer a eliminação da mucilagem dos grãos. Esse processo é mais utilizado pois nele são eliminadas substâncias que podem ser prejudiciais para a qualidade final do produto por possuírem micro-organismos que provocam fermentações (MALTA *et al.*, 2008).

A Figura 1 apresenta um esquema do processamento do café por via seca e úmida.



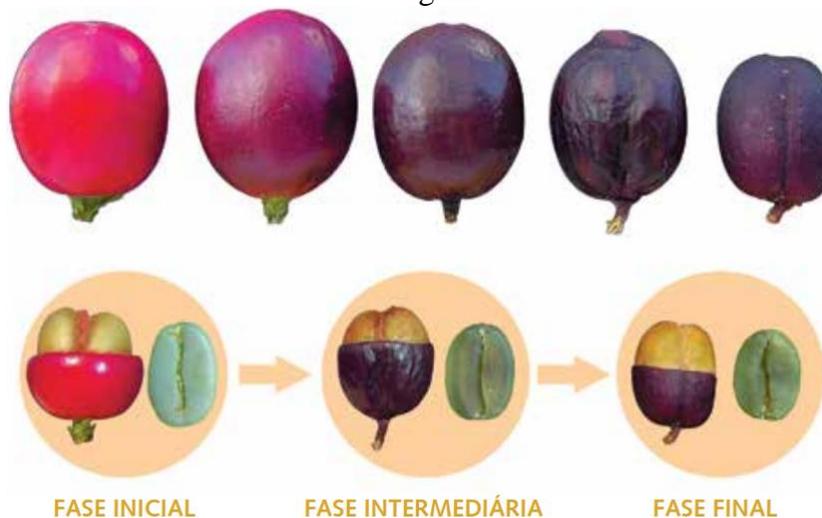
Fonte: Adaptado de Rezende (2017).

2.1.2 Secagem

Segundo Mesquita *et al.* (2016), a secagem é um processo que tem por objetivo reduzir a umidade do café de cerca de 45 a 55% (b.u.) até cerca de 10,5 a 11,5% (b.u.). Com isso, reduz-se o teor de água e impossibilita o desenvolvimento de micro-organismos responsáveis pelas fermentações que alteram o sabor e o aroma do produto.

A Figura 2 apresenta grãos de café com diferentes teores de umidade ao longo do processo de secagem.

Figura 2 – Grãos de café com diferentes teores de umidade ao longo do processo de secagem.



Fonte: Mesquita *et al.* (2016).

Para o consumidor, a acidez percebida é um atributo de extrema importância. Esta pode variar de acordo com o estado de maturação dos frutos, local de origem, tipo de colheita, forma de processamento, tipo de secagem e condições climáticas (SIQUEIRA e ABREU, 2006). Durante a secagem dos grãos, podem ocorrer transformações químicas, físicas e fisiológicas nos grãos de café, resultando em uma desorganização ou alteração da seletividade das membranas celulares (RIBEIRO *et al.*, 2003). Os grãos de café que sofrem alterações bruscas na membrana celular, devido à má condução do processo de secagem, lixiviam uma maior quantidade de solutos, resultando em maiores valores de condutividade elétrica e lixiviação do potássio, apresentando perda de qualidade (KRZYZANOWSKY *et al.*, 1991; PRETE, 1992; PIMENTA *et al.*, 2000).

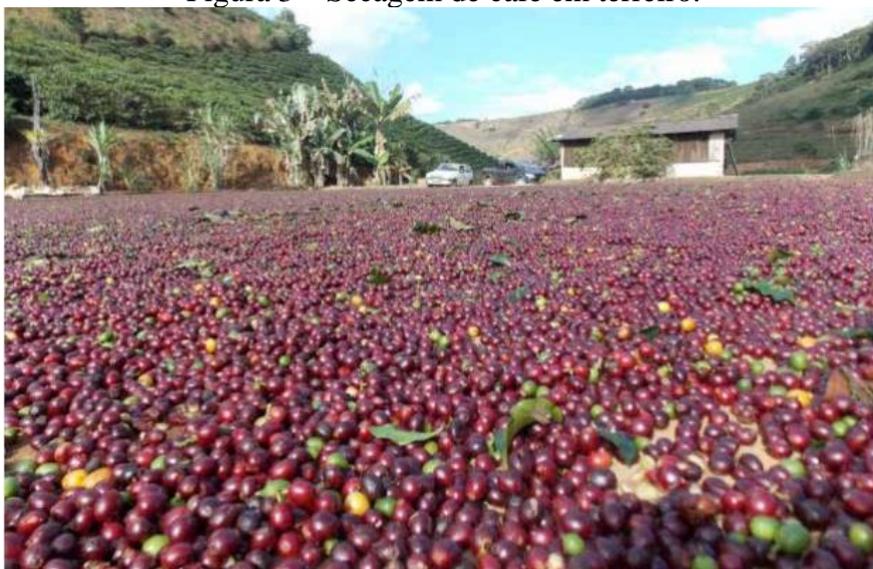
O grão de café pode passar por diversas transformações químicas e contaminações microbianas, sendo os principais microrganismos contaminantes: *Fusarium sp.*, *Cladosporium sp.*, *Aspergillus sp.*, *Colletotrichum coffeanum*, *Penicillium sp.* e *Rhizopus sp.*. As transformações químicas enzimáticas podem ocorrer caso a secagem do café não seja feita de maneira adequada, ocorrendo a degradação do mesocarpo mucilaginoso e ocasionando em uma qualidade inferior da bebida. Já as contaminações microbianas podem ocorrer devido a falta de cuidado nas operações agrícolas que acometem em um sabor desagradável à bebida, principalmente se a secagem dos grãos não ocorrer de maneira uniforme (EL HALAL, 2008).

Em seu trabalho, Oliveira (2010) conclui que tanto a temperatura utilizada quanto o tipo de secagem influenciam na qualidade do café obtido. Café despulpado seco à temperatura de 40 a 50°C, e em terreiro, obtiveram maior integridade das membranas e vesículas celulares, resultando em grãos de melhor qualidade. Já os grãos secos com ar aquecido a 60°C e depois 40°C ou 40°C e depois 60°C apresentaram rompimento e coalescência das vesículas, rompimento das membranas, formação de gotas de óleo e preenchimento dos espaços intercelulares, originando um grão de qualidade inferior.

Borém *et al.* (2006) avaliaram o efeito de diferentes temperaturas, fluxo de ar e períodos de pré-secagem em terreiro na qualidade do café cereja descascado (*Coffea arabica* L.). Como conclusão, tiveram que o aumento do tempo da pré-secagem, redução de fluxo de ar e baixas temperaturas auxiliam na diminuição da condutividade elétrica e da lixiviação de potássio do café. Além disso, com a elevação da temperatura nota-se uma redução do teor de açúcares totais. Por fim, concluíram que o café cereja descascado deve permanecer no mínimo por três dias no terreiro para favorecer a obtenção de cafés de melhor qualidade.

A secagem em terreiros, apresentada na Figura 3, é o método mais utilizado no Brasil, pois apresenta baixo custo de implementação e é de fácil manejo. Entretanto, este sistema é altamente dependente das condições climáticas e pode demorar mais de uma semana para que o café alcance à umidade de 11% (b.u.). Nesse método, os grãos de cafés são esparramados no terreiro em camadas com determinada espessura e os raios solares fazem a sua secagem (MESQUITA *et al.*, 2016).

Figura 3 – Secagem de café em terreiro.



Fonte: Mesquita *et al.* (2016).

Outro método bastante utilizado é a secagem em secadores rotativos. No Brasil, segundo Silva *et al.* (2014), o secador rotativo Pinhalense é um dos modelos mais utilizados, sendo este apresentado na Figura 4. Este equipamento é basicamente formado por um cilindro tubular horizontal que gira em torno de seu próprio eixo longitudinal com uma certa velocidade angular.

Figura 4 – Secador rotativo marca Pinhalense modelo SRE-150.



Fonte: Silva *et al.* (2014).

O secador rotativo pode operar em batelada ou em regime contínuo, apresentando uma leve inclinação do tambor. Em ambos os regimes, o ar de secagem quente adentra na cavidade em uma das extremidades e entra em contato com o material que está em seu interior. No caso de secadores contínuos, este pode operar em contracorrente, sendo o ar de secagem alimentado na extremidade oposta do material ou em concorrente, sendo ambos alimentados na mesma extremidade (SILVA *et al.*, 2014).

A fim de manter a integridade dos grãos de café e não danificar sua estrutura, ocasionando em um sabor ruim para a bebida, a velocidade de rotação do tambor deve ser controlada. Segundo Silva *et al.* (2008), as velocidades empregadas em tambores rotativos variam de 1 a 15 rpm. Entretanto, não é recomendado que se utilize velocidades de rotação superiores a 5 rpm quando se trata de café, pois isso pode ocasionar danos aos grãos.

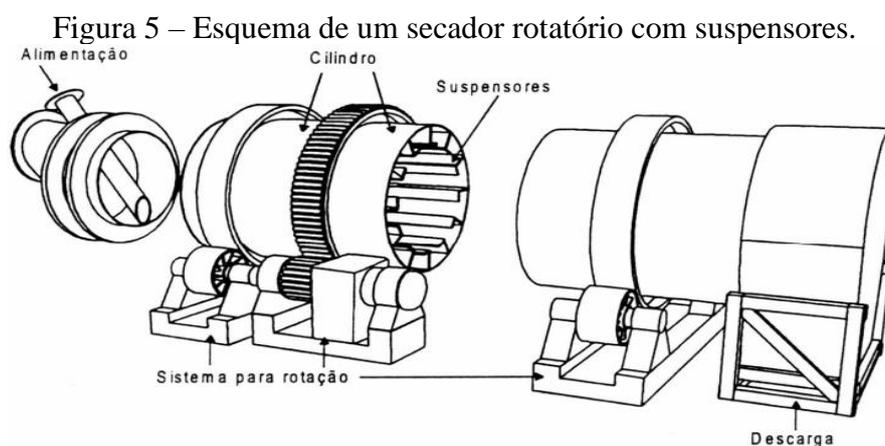
Silva *et al.* (2014), desenvolveram uma pesquisa sobre tambor rotativo intermitente, enfatizando seu projeto, construção e uso. O secador foi denominado intermitente pois o produto que estava sendo seco era agitado por cinco minutos, seguidos de duas horas de secagem estacionária. O objetivo dos autores foi desenvolver uma alternativa para a secagem de café produzido por pequenos cafeicultores. Como

conclusão, tiveram que com a utilização de tambores rotativos não se necessita de grandes áreas de terreiro para a secagem. Além disso, como o ar de secagem era dirigido para a parte inferior do equipamento, a parte superior poderia funcionar como câmara de descanso, sendo este uma etapa importante para a secagem de café. Vale ressaltar que todo o trabalho foi desenvolvido visando a qualidade do produto e agregação de valor.

Logo após a secagem, o café pode passar pela etapa de beneficiamento. Nessa, tem-se o objetivo de realizar o aprimoramento da qualidade dos grãos. Para isso, são utilizadas máquinas que fazem a separação das sementes boas e inadequadas, com base na diferença física entre elas. Em seu trabalho, Giomo *et al.* (2004) concluíram que o beneficiamento em máquina de ar e peneiras e em mesa gravitacional contribuem expressivamente com a qualidade fisiológica dos grãos de café.

2.2 Secadores rotativos com suspensores

Nos secadores rotativos comumente utilizados no processo de secagem de grãos, podem ser inseridos suspensores e com isso, tem-se o auxílio na homogeneização, podendo ser utilizado para secagem de grãos, açúcar e minérios (LEE, 2008). O objetivo do suspensor é promover um regime de cascadeamento dos sólidos que estão no interior do tambor rotativo. Ao passar pela seção inferior do tambor, os suspensores são carregados com as partículas, que são posteriormente descarregados devido a rotação do tambor. Com isso, aumenta-se o contato entre o sólido e o ar de secagem, favorecendo as transferências de calor e massa (PERRY e GREEN, 1997; REVOL *et al.*, 2001). Um esquema do secador rotatório com suspensores é apresentado na Figura 5.



Fonte: Perry e Green (1997).

Na operação de secadores rotativos, diversas variáveis podem influenciar direta ou indiretamente nas taxas de transferência de calor e massa. Dentre elas, podem ser

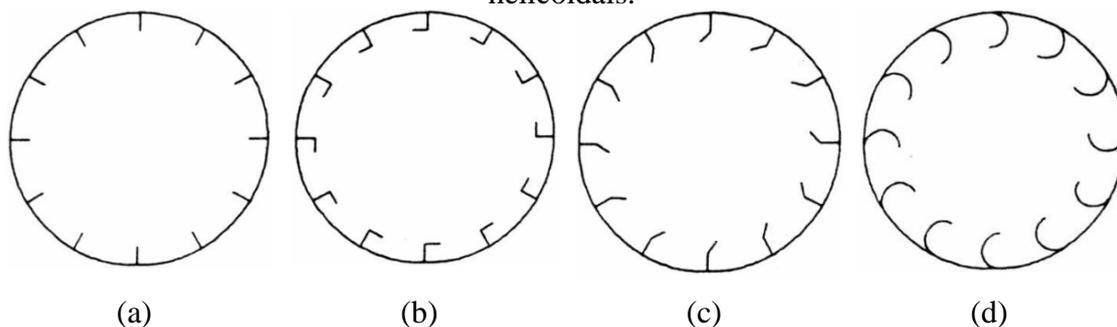
citadas: taxas de alimentação do sólido e do ar, temperatura do ar de secagem e do material inserido no tambor, diâmetro e comprimento do equipamento, inclinação e rotação do tambor, capacidade e número de suspensores do secador (SAEMAN e MITCHELL, 1954).

Sunkara *et al.* (2013) promoveram um estudo sobre suspensores em tambor rotativo. No trabalho em questão, tiveram por objetivo desenvolver um modelo teórico de suspensor retangular para um tambor rotativo sem a circulação de ar de secagem. Com o desenvolvimento da metodologia, determinaram um modelo matemático para estimar a área superficial das cortinas de partículas formadas no tambor rotativo. Concluíram que com o aumento do número de suspensores aumenta-se a área das cortinas formadas. Além disso, comprimentos maiores de suspensores fizeram com que os sólidos fossem descarregados em maiores angulações.

2.2.1 Geometria de suspensores

Segundo Perry e Green (1997), a profundidade do suspensor deve estar dentro do intervalo de $D/12$ a $D/8$, sendo D o diâmetro do secador. Na literatura, são encontrados diversos formatos de suspensores, sendo alguns apresentados na Figura 6. Sua escolha dependente das características do material a ser seco e da finalidade de utilização do suspensor.

Figura 6 – Geometria de suspensores (a) reto, (b) de ângulo reto, (c) angulares e (d) helicoidais.



Fonte: Arruda (2008).

Os suspensores de apenas um segmento, mostrado na Figura 6a, geralmente são utilizados na secagem de materiais impregnantes que podem aderir nas paredes internas do tambor. Já para sólidos que não são aderentes, pode-se utilizar suspensores de dois segmentos angulares ou de ângulo reto, apresentados nas Figuras 6b e 6c, respectivamente, sendo o de ângulo reto mais apropriado quando se quer aumentar o tempo de permanência dos sólidos no suspensor. Em secadores contínuos, para promover

uma rápida entrada dos sólidos, evitando o acúmulo do material, pode-se utilizar os suspensores helicoidais na entrada do equipamento, apresentados na Figura 6d (FERNANDES, 2008).

2.2.2 Dinâmica de partículas no tambor

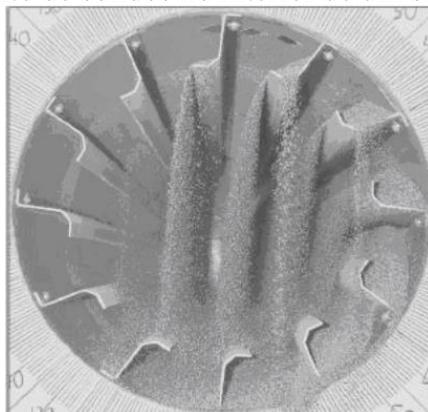
Os secadores rotatórios, com a presença de suspensores, apresentam um movimento complexo de partículas em seu interior, sendo este influenciado por diferentes mecanismos. De acordo com a rotação do tambor, as partículas são levantadas e caem de determinada altura. Essa altura é determinada pelo diâmetro do equipamento e influencia diretamente na taxa de secagem, já que será alterado o tempo de contato entre as partículas e o ar de secagem. Caso o tambor seja contínuo e possua uma certa inclinação, a cada queda as partículas avançam uma certa distância (REVOL *et al.*, 2001).

Ao caírem para a parte inferior do tambor, as partículas rebatem nas paredes e atingem outras partículas, provocando a mistura dos grãos. As partículas que não foram carregadas pelos suspensores, deslocam-se para frente e rolam por cima de outras partículas. Em secadores contínuos, o ar quente de secagem que adentra no tambor pode facilitar ou dificultar o avanço dos sólidos, sendo dependente da operação em contracorrente ou concorrente (REVOL *et al.*, 2001).

Segundo Kemp e Oakley (1997) são diversas as forças que atuam sobre as partículas inseridas no tambor rotativo, podendo ser citadas as forças: gravitacional, de arraste, de repique e de rolagem das partículas no fundo do secador.

A Figura 7 apresenta a fluidodinâmica das partículas no interior de um tambor rotatório com suspensores. Com o movimento do tambor, há a formação de cortinas, devido ao descarregamento dos sólidos nos suspensores.

Figura 7 – Cascadeamento de sólidos no interior de um secador com suspensores.



Fonte: Bicalho *et al.* (2010).

2.2.3 Número teórico de suspensores

Segundo Nascimento (2018), a determinação do número máximo de suspensores que um tambor comporta é de extrema importância. Quanto maior o número de suspensores, maior será a quantidade de cortinas de grãos formadas, aumentando o contato entre o sólido e o ar de secagem e auxiliando na homogeneização dos grãos.

É importante conhecer o número teórico de suspensores, pois esta é a quantidade máxima de suspensores que o tambor comporta sem que um suspensor atrapalhe o carregamento do seu subsequente, fazendo, assim o maior carregamento possível de partículas. Segundo Sunkara *et al.* (2013), é possível prever o número teórico de suspensores de dois segmentos de ângulo reto por meio de uma equação matemática, apresentada na Equação 1.

$$n_F = \frac{360^\circ}{\alpha + \vartheta} \quad (1)$$

sendo n_F o número de suspensores (*flights*).

O ângulo α é formado entre as duas retas que passam pelas extremidades do suspensor e o centro do tambor, sendo calculado pela Equação 2.

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{l_2}{r_H} \right) \quad (2)$$

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

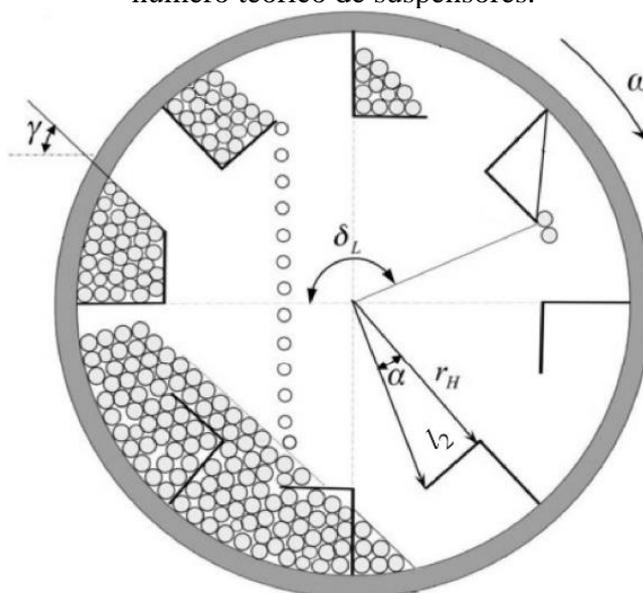
Já o ângulo ϑ tem relação com o ângulo de repouso dinâmico formado pelo material particulado quando o suspensor se encontra na posição 0° ($\gamma|_{\delta_L=0^\circ}$). Este pode ser obtido pela Equação 3.

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

sendo R o raio do tambor e γ o ângulo de repouso dinâmico.

Para um melhor entendimento das variáveis contidas nas Equações 1, 2 e 3, tem-se a demonstração das mesmas na Figura 8.

Figura 8 – Demonstração de algumas variáveis importantes para a determinação do número teórico de suspensores.



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

2.2.4 Ângulo de última descarga

O ângulo de última descarga pode ser definido como o ângulo em que a última partícula de material deixa o suspensor (KARALI, 2015). Segundo Nascimento (2018), quanto maior este valor, maiores serão as distâncias que os suspensores transportam os grãos, aumentando o contato entre o material sólido e o ar de secagem. Com maiores números de cortinas formados, aumenta-se a taxa de secagem e, também, a homogeneização do material.

2.2.5 Fração de preenchimento

Segundo Perry e Green (1997), secadores do tipo tambor rotativo devem operar com 10 a 15% do seu volume preenchido com o material que será seco. Uma fração de preenchimento inferior a esse valor não é suficiente para preencher completamente os suspensores, não sendo eficiente sua operação. Além disso, uma carga superior a recomendada para tambores contínuos faz com que alguns grãos no interior do tambor passem sem a remoção da água, ocasionando em um material com teor de água elevado.

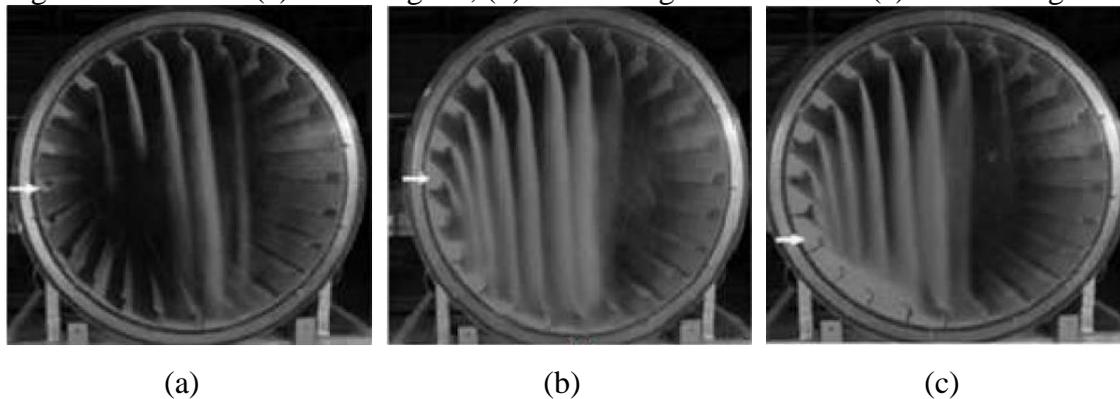
Os secadores rotatórios podem ser classificados como subcarregados, com carregamento ideal e sobrecarregados. Para que seja feita essa classificação, é analisado o ângulo de primeira descarga dos suspensores (NASCIMENTO, 2018).

O secador subcarregado é definido quando os suspensores não estão completamente cheios do material que está sendo seco e, portanto, a descarga ocorre em posições superiores a 0° , apresentado na Figura 9a. Nesse tipo de operação, nota-se um tempo de residência reduzido dos sólidos nos suspensores. Além disso, diminui-se o contato entre o sólido e o ar de secagem, pois são formadas menos cortinas (AJAYI E SHEEHAN, 2012).

O tambor possui carregamento ideal quando os suspensores operam com carga máxima e a descarga dos sólidos ocorre exatamente no ângulo 0° , apresentado na Figura 9b. Nessa condição, é formado o maior número de cortinas, aumentando o contato entre o sólido e o ar de secagem (AJAYI E SHEEHAN, 2012).

Por fim, na condição de sobrecarregamento, o secador opera com uma carga maior do que a necessária para completar os suspensores, sendo esta condição apresentada na Figura 9c. Com sobrecarregamento, a descarga de sólidos tem início antes da posição de 0° e ocorre um rolamento do material em excesso na parte inferior do tambor. O material que se encontra na base do equipamento não apresenta contato com o gás de secagem, apresentando uma maior umidade (AJAYI E SHEEHAN, 2012).

Figura 9 – Tambor (a) subcarregado, (b) com carregamento ideal e (c) sobrecarregado.



Fonte: Ajayi e Sheehan (2012).

Pinhalense (2023) fornece um catálogo com as informações técnicas dos secadores rotativos destinados à secagem de café, cereais e sementes. Nesse documento, são encontradas as dimensões do equipamento, além da capacidade recomendada pelo fabricante para diferentes modelos. A Tabela 1 apresenta o volume, a capacidade e a fração de preenchimento máxima recomendada para diferentes modelos disponíveis para a secagem de café.

Tabela 1 – Volume, capacidade e fração de preenchimento recomendada pelo fabricante para diferentes modelos de tambores rotativos.

Modelo	Volume (m³)	Capacidade (m³)	Fração de preenchimento máxima (%)
SRE-025	5,82	2,5	42,93
SRE-050	11,80	5,0	42,39
SRE-075	11,80	7,5	63,58
SRE-090	16,83	9,0	53,49
SRE-150	25,14	15,0	59,67
SRE-240	32,12	24,0	74,72

Fonte: Pinhalense (2023).

Desse modo, segundo as informações técnicas fornecida por Pinhalense (2023), fabricante dos modelos mais utilizados para secagem de café, os tambores rotativos podem ser operados de maneira sobrecarregada, com frações de preenchimento superiores a recomendada por Perry e Green (1997). Nesse regime de operação é seco um maior volume de material e ainda assim se garante uma secagem homogênea, principalmente se como método de aquecimento forem utilizados micro-ondas.

2.3 Aquecimento via micro-ondas

De acordo com Mai (2008), micro-ondas são ondas eletromagnéticas que possuem frequência entre 300 MHz e 300 GHz, sendo que seu comprimento de onda varia de 1 m a 1 mm. A aplicação de ondas eletromagnéticas é diversa, sendo que cada equipamento utiliza uma faixa de operação distinta. Segundo o regulamento da comissão Federal de Comunicação e das Leis Internacionais de Rádio, existe apenas quatro frequências de operação permitidas (SOUZA *et al.*, 2002):

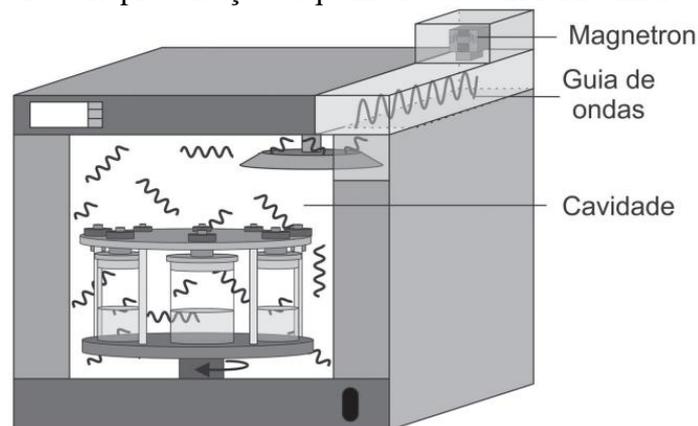
- 915 MHz, que possui utilização industrial;
- 2450 MHz, que possui utilização científica e em fornos domésticos;
- 5800 e 22125 MHz, que possui aplicação na área médica;

Ao absorver radiação na frequência de micro-ondas, o material sofre um aumento de temperatura. Isto ocorre devido a processos de dissipação de energia, sendo observados os fenômenos de rotação de dipolos e migração iônica. Em ambos os mecanismos, são observadas movimentação das espécies do material, resultando em seu aquecimento (KINGSTON *et al.*, 1997; NEAS e COLLINS, 1988).

Basicamente o forno micro-ondas é constituído por cavidade, guia de ondas e magnetron, como apresentado na Figura 10. Cada um desses componentes tem uma

função específica para tornar possível o aquecimento de um material por micro-ondas. O magnetron é um diodo cilíndrico com ânodo e cátodo, sendo que a aplicação de uma tensão elevada resulta na sua oscilação, gerando a radiação de micro-ondas. O guia de ondas é o constituinte pela qual a radiação é direcionada até o interior da cavidade. E, por fim, a cavidade é um recipiente enclausurado onde as micro-ondas serão refletidas em direção ao material (PECORARO *et al.*, 1997; PETRI 2017).

Figura 10 – Representação esquemática de um forno micro-ondas.



Fonte: Adaptado de Moraes *et al.* (2019).

O magnetron, mostrado na Figura 11, é uma peça fundamental para o funcionamento do forno micro-ondas, sendo seu princípio de funcionamento baseado no efeito de circuitos ressonantes. Esse equipamento consiste na combinação de um cátodo com um ânodo oco geralmente feito de cobre ou ferro. Ao se aplicar uma alta voltagem no cátodo, elétrons são liberados e vão em direção ao ânodo, que entram em ressonância sob a influência do campo magnético que é gerado próximo ao cátodo (MORAES *et al.*, 2019; MAI, 2008).

O guia de ondas é um tubo oco metálico podendo ser retangular ou elíptico. É importante que este seja fabricado em um material que tenha alta capacidade de refletir as micro-ondas, diminuindo as possíveis perdas. O equipamento em questão, apresentado na Figura 12, tem por objetivo encaminhar as ondas eletromagnéticas até a cavidade, onde o material se encontra (VIEIRA, 2003).

Figura 11 – Magnetron.



Fonte: Mai (2008).

Figura 12 – Guia de ondas retangular.

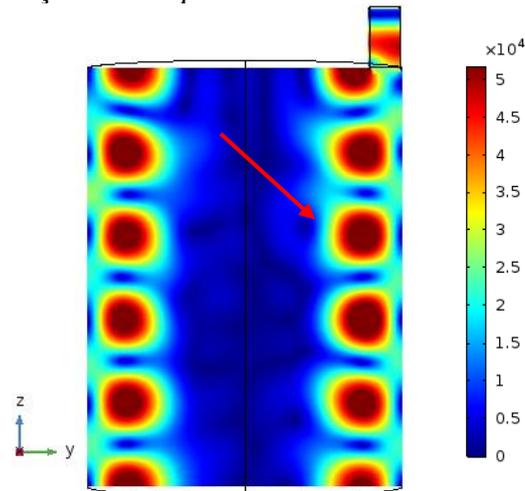


Fonte: Stroski (2018).

Carvalho e Petri (2022b) desenvolveram um trabalho com o intuito de analisar, via fluidodinâmica computacional, o posicionamento e a quantidade de guia de ondas em secadores rotativos micro-ondas utilizados na secagem de cafés especiais. Notou-se que diferentes posicionamentos para os guias de ondas geram diferentes campos eletromagnéticos no interior da cavidade do forno, sendo obtido um posicionamento ótimo. Ainda nesse trabalho, concluíram que cavidades com múltiplos magnetrons ocasionam em maiores temperaturas da água após um tempo de aquecimento de 10 minutos, embora não possuam a mesma eficiência da cavidade com apenas um guia de ondas.

A cavidade é um recipiente metálico enclausurado constituído de aço inoxidável, alumínio ou aço pintado que fica posicionado no final do guia de ondas. Em seu interior, as ondas eletromagnéticas são refletidas sobre o material que passa pelo processo de aquecimento (PETRI, 2017; MAI, 2008). Segundo Meredith (1998), as cavidades podem ser monomodo ou multimodo. As cavidades monomodo são caracterizadas por apresentarem somente um modo de onda se propagando em seu interior. Já quando se trata de cavidades multimodos, são encontrados vários modos de frequência ressonante, ocasionando na formação de diversos *hotspots*, devido a distribuição heterogênea do campo eletromagnético. Os *hotspots* apresentam pontos de concentração do campo eletromagnético, como apresentado na Figura 13. Portanto, o material que estiver localizado nesta região passará por um maior aquecimento.

Figura 13 – Representação de *hotspots* em uma cavidade de um forno micro-ondas.



Fonte: Autor (2023).

As cavidades micro-ondas podem possuir diferentes formatos, se destacando as retangulares e cilíndricas. As cavidades retangulares possuem uso laboratorial e doméstico e geralmente operam em regime batelada, por apresentarem uma melhor acomodação para o material em seu interior (PETRI, 2017). Embora menos utilizadas que as cavidades retangulares, as cavidades cilíndricas apresentam grande capacidade de aquecimento.

Carvalho e Petri (2022a) fizeram o dimensionamento, via fluidodinâmica computacional, de duas cavidades cilíndricas a serem operadas com o objetivo de realizar a secagem de cafés especiais. No trabalho desenvolvido, analisaram a distribuição do campo eletromagnético, a variação da temperatura da água inserida na cavidade, a potência de saída e o campo elétrico gerado. Chegaram à conclusão de que para obter uma cavidade ótima de 119,28 litros deve ser utilizado 45 cm de diâmetro e 75 cm de comprimento, sendo que esta possui potência útil de 1000 W. Já para obtenção de uma cavidade ótima de 175,98 litros, deve-se utilizar um diâmetro de 62,98 cm e um comprimento de 56,5 cm, totalizando uma potência útil de 997,48 W.

2.4 Fluidodinâmica Computacional

A fluidodinâmica computacional (*Computational Fluid Dynamics* - CFD) é uma área de conhecimento que tem o objetivo de estudar métodos computacionais para simular fenômenos que envolvem o escoamento de fluidos. Esta técnica envolve duas grandes áreas, sendo elas fenômenos de transporte e o cálculo numérico. Na sua prática, as equações de origem na mecânica dos fluidos são resolvidas pela utilização de métodos numéricos (SOUZA, 2017).

Com a utilização dessa ferramenta, pode-se obter perfis de velocidade, pressão e temperatura nas regiões desejadas. Portanto, esta é amplamente utilizada em diferentes segmentos do mercado, pois pode auxiliar na formulação de projetos. Atualmente, são encontrados diversos trabalhos que utilizam da técnica de CFD para realizar o estudo da secagem de café com diferentes métodos (SOUZA, 2017).

Em seu trabalho, Velez-Piedrahida *et al.* (2018) desenvolveram um estudo do efeito da geometria de um secador solar para a secagem de café com a utilização de CFD. Com o seu desenvolvimento, os autores concluíram que a ferramenta de CFD é bastante versátil e confiável para a comparação térmica com diferentes geometrias de abertura de janelas de secadores solares.

Para fazer a resolução de problemas com a utilização da técnica de fluidodinâmica computacional (CFD), a metodologia é geralmente dividida em três partes: pré-processamento, processamento e pós processamento. Cada uma dessas etapas apresenta grande importância para que sejam obtidos resultados precisos.

2.4.1 Pré-processamento

O pré-processamento consiste na etapa em que o usuário faz a inserção de um problema e dos parâmetros deste no programa CFD. Para isso, deve ser definida a geometria CAD que será utilizada, sendo esta o domínio computacional. Para que se possa realizar as simulações, a geometria deve ser discretizada, sendo gerada uma malha. Ainda nessa etapa, deve ser feita a seleção do fenômeno físico ou químico e a definição das propriedades dos fluidos (VERSTEEG e MALALASEKERA, 2007).

É de extrema importância para a resolução de problemas com a aplicação da técnica de fluidodinâmica computacional, que sejam especificadas condições de contorno, sejam feitas as definições do critério de convergência e sejam definidos os métodos utilizados para discretização (VERSTEEG e MALALASEKERA, 2007).

Vale ressaltar que a precisão dos resultados que serão gerados é altamente dependente da qualidade do pré-processamento, principalmente pela etapa de formação da malha computacional. A solução do problema é realizada por meio dos nós que há dentro de cada uma das células e, portanto, quanto maior o número de células, mais precisa será a solução.

Carvalho e Petri (2021) avaliaram os métodos de criação e fizeram a otimização de malhas tridimensionais. Em seu trabalho, foi mostrado que o método utilizado para confecção da malha computacional influencia diretamente nos resultados gerados.

Concluíram que o melhor método para geração de malhas no *software Meshing Mode Fluent* é o *Poly-hexcore*, seguido do *Polyhedra*.

2.4.2 Processamento

Basicamente, na etapa de processamento são aplicados métodos para a solução numérica de equações diferenciais. Segundo Çengel e Ghajar (2011), os métodos que podem ser utilizados são: diferenças finitas, elementos finitos, volumes finitos e espectral. O mais comumente utilizado em *softwares* comerciais é o método dos volumes finitos, em que as equações aproximadas são obtidas por meio de balanços no volume-elementar.

De acordo com Versteeg e Malalasekera (2007), caso seja utilizado o método dos volumes finitos, o algoritmo faz a integração das equações governantes sobre todos os volumes de controle definidos no domínio. Após isso, faz a conversão das equações integrais resultantes em um sistema de equações algébricas e, por fim, resolve as equações algébricas por meio de algum método iterativo, podendo ser citados os métodos: de Jacobi, de Gauss-Seidel, das Sobre-Relaxações Sucessivas e *Multigrid*.

2.4.2.1 Modelagem multifásica do escoamento granular – Abordagem Euleriana

Com a utilização de tambores rotatórios com suspensores, observa-se a presença de duas fases que possuem movimentos distintos no interior do equipamento, sendo eles o material a ser seco e o ar. Portanto, o escoamento é considerado multifásico e as propriedades das diferentes fases e a interação entre elas devem ser consideradas. Na literatura são encontradas duas abordagens distintas para a modelagem de sistemas granulares multifásicos, sendo elas: Euleriana e Lagrangeana (SANTOS, 2015; NASCIMENTO, 2018).

Na abordagem Euleriana, as fases sólida e fluida são tratadas como contínuas e interpenetrantes e as frações de cada uma das fases é considerada como contínua no espaço e no tempo (DUARTE, 2006). Já na abordagem Lagrangeana as trajetórias de todas as partículas são monitoradas e uma integração temporal das leis de conservação é aplicada sobre cada uma das partículas individualmente (BRANDÃO, 2017).

A conservação de continuidade para a fase fluida e para a fase granular, na abordagem Euleriana, são dadas pelas Equações 2 e 3, respectivamente.

$$\frac{\partial(\alpha_f \rho_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f \vec{v}_f) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\alpha_s \rho_s)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s) = 0 \quad (3)$$

sendo α a fração volumétrica, \vec{v} o vetor velocidade e ρ a densidade. Os subscritos f e s em todas as equações presentes nesse trabalho são referentes a fase fluida e sólida, respectivamente.

Além disso, a condição apresentada na Equação 4 deve ser satisfeita.

$$\alpha_f + \alpha_s = 1 \quad (4)$$

As expressões que descrevem a conservação da quantidade de movimento para as fases fluida e sólida podem então ser expressas pelas Equações 5 e 6, respectivamente.

$$\frac{\partial(\alpha_f \rho_f \vec{v}_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f \vec{v}_f \vec{v}_f) = -\alpha_f \nabla p + \nabla \bar{\tau}_f + \alpha_f \rho_f \vec{g} + (K_{sf}(\vec{v}_s - \vec{v}_f)) \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\alpha_s \rho_s \vec{v}_s)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s \vec{v}_s) = -\alpha_s \nabla p - \nabla p_s + \nabla \bar{\tau}_s + \alpha_s \rho_s \vec{g} + (K_{sf}(\vec{v}_f - \vec{v}_s)) \quad (6)$$

sendo p e p_s as pressões termodinâmica e de sólidos, respectivamente, $\bar{\tau}$ o tensor tensão, \vec{g} a aceleração da gravidade e K_{sf} a troca de momento entre as fases sólida e fluida.

O coeficiente de troca fluido-sólido, K_{sf} , contabiliza o efeito do arraste que a fase fluida exerce sobre a fase granular. Este pode ser estimado de diversas maneiras e depende do modelo adotado na modelagem do escoamento. No presente trabalho foi utilizado o modelo proposto por Gidaspow *et al.* (1992), sendo este apresentado nas Equações 7 e 8.

$$K_{sf} = \frac{3}{4} C_D \frac{\alpha_s \alpha_f \rho_f |\vec{v}_s - \vec{v}_f|}{d_s} \alpha_f^{-2,65}, \text{ para } \alpha_f > 0,8 \quad (7)$$

$$K_{sf} = 150 \frac{\alpha_s(1-\alpha_f)\mu_f}{\alpha_f d_s^2} + 1,75 \frac{\rho_f \alpha_s |\vec{v}_s - \vec{v}_f|}{d_s}, \text{ para } \alpha_f \leq 0,8 \quad (8)$$

onde d_s é o diâmetro das partículas da fase sólida e μ_f a viscosidade do fluido.

O coeficiente de arraste, C_D , presente na Equação 7, pode ser calculado conforme a Equação 9.

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{(Re_r \alpha_f)} [1 + 0,15(Re_r \alpha_f)^{0,687}], & Re_r \leq 1000 \\ 0,44 & , Re_r > 1000 \end{cases} \quad (9)$$

sendo Re_r o número de Reynolds relativo.

O Número de Reynolds relativo, Re_r , pode ser calculado conforme a Equação 10.

$$Re_r = \frac{\rho_f |\vec{v}_f - \vec{v}_s| d_s}{\mu_f} \quad (10)$$

Quando um fluido é colocado em movimento, devido à presença da viscosidade, este apresenta um atrito interno o qual tende a homogeneizar ou transferir o movimento

advindo de camadas de fluido superiores por todo o volume (WHITE, 2010). Para a modelagem do tensor tensão viscosa da fase fluida, $\bar{\tau}_f$, presente na Equação 5, adota-se a equação de Navier-Stokes para fluidos newtonianos, apresentada na Equação 11.

$$\bar{\tau}_f = \mu_f \left[\nabla \vec{v}_f + (\nabla \vec{v}_f)^T \right] - \frac{2}{3} \mu_f (\nabla \cdot \vec{v}_f) \bar{I} \quad (11)$$

onde \bar{I} é o tensor unitário e o sobrescrito T denota a matriz transposta.

De maneira análoga à fase fluida, o tensor tensão da fase granular é apresentado na Equação 12.

$$\bar{\tau}_s = \alpha_s \mu_s [\nabla \vec{v}_s + (\nabla \vec{v}_s)^T] - \alpha_s \left(\lambda_s - \frac{2}{3} \mu_s \right) (\nabla \cdot \vec{v}_s) \bar{I} \quad (12)$$

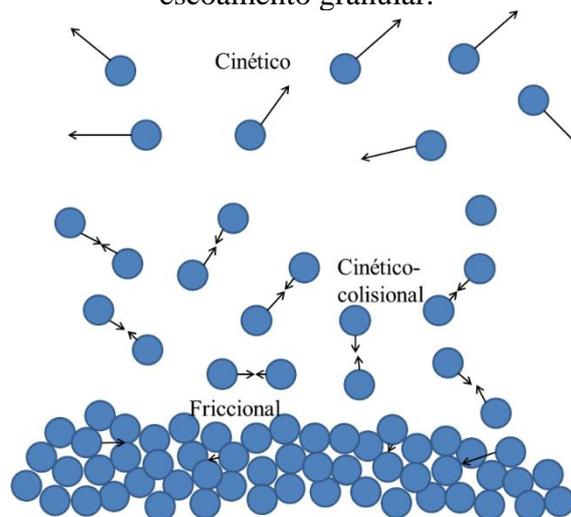
onde μ_s é a viscosidade granular cisalhante e λ_s é a viscosidade granular *bulk*.

Para entender alguns termos que estão presentes na Equação 12, é necessário desenvolver um estudo sobre a teoria cinética do escoamento granular.

2.4.2.1.1 Teoria cinética granular

Ao considerar o escoamento granular, existem regiões em que há maior porosidade e regiões em que há menor porosidade. Este comportamento precisa ser levado em consideração para a modelagem correta do sistema. As três principais regiões encontradas nesse tipo de escoamento são: cinético, colisional e friccional, sendo apresentadas na Figura 14.

Figura 14 – Representação das dissipações viscosas que podem estar presente em um escoamento granular.



Fonte: Santos (2015).

A região cinética é a mais diluída dentre as demais. Nela, as partículas apresentam comportamento caótico e aleatório. Além disso, nota-se dissipação viscosa devido ao

movimento aleatório das partículas. Já na região cinética-colisional é encontrada uma concentração maior de partículas, quando comparada com a região cinética. Nesta região, as partículas continuam se movimentando aleatoriamente, mas podem também sofrer colisões instantâneas. Por fim, na região friccional nota-se grande concentração de sólidos, não sendo observadas oscilações aleatórias ou colisões instantâneas. Nesta região, observa-se contatos íntimos e duradouros entre as partículas e simultaneamente nota-se o deslizamento de uma partícula sobre outras (SANTOS, 2015).

A viscosidade de cisalhamento dos sólidos, μ_s , pode ser calculada por meio da Equação 13, sendo consideradas as viscosidades cinética ($\mu_{s,cin}$), colisional ($\mu_{s,col}$) e friccional ($\mu_{s,fricc}$).

$$\mu_s = \mu_{s,col} + \mu_{s,cin} + \mu_{s,fric} \quad (13)$$

sendo $\mu_{s,cin}$, $\mu_{s,col}$ e $\mu_{s,fricc}$ as viscosidades granular cinética, colisional e friccional, respectivamente.

A viscosidade colisional tem relação com o movimento aleatório das partículas e pode ser obtida pelo modelo proposto por Gidaspow *et al.* (1992), apresentado na Equação 14.

$$\mu_{s,col} = \frac{4}{5} \alpha_s \rho_s d_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \left(\frac{\theta_s}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

sendo $g_{0,ss}$ a função de distribuição radial, e_{ss} o coeficiente de restituição e θ_s a temperatura granular.

A viscosidade cinética pode ser obtida por diferentes modelos, sendo utilizado o proposto por Gidaspow *et al.* (1992), apresentado na Equação 15.

$$\mu_{s,cin} = \frac{10 \rho_s d_s \sqrt{\theta_s \pi}}{96 \alpha_s (1 + e_{ss})} g_{0,ss} \left[1 + \frac{4}{5} g_{0,ss} \alpha_s (1 + e_{ss}) \right]^2 \quad (15)$$

Por fim, a viscosidade friccional também pode ser obtida por diferentes modelos disponíveis no *software Fluent*. A Equação 16 apresenta a expressão proposta por Schaeffer (1987).

$$\mu_{s,fric} = \frac{p_{fric} \text{sen}(\varphi_e)}{2\sqrt{I_{2D}}} \quad (16)$$

onde p_{fric} é a pressão friccional, φ_e o ângulo de fricção interna, ou ângulo de repouso estático e I_{2D} o segundo variante do tensor tensão.

O segundo invariante do tensor tensão, I_{2D} , é calculado pela Equação 17.

$$I_{2D} = \frac{1}{6} \left[(D_{s,xx} - D_{s,yy})^2 + (D_{s,yy} - D_{s,zz})^2 + (D_{s,zz} - D_{s,xx})^2 \right] + D_{s,xy}^2 + D_{s,yz}^2 + D_{s,zx}^2 \quad (17)$$

A forma geral do tensor de deformação, $D_{s,ij}$ é dada pela Equação 18.

$$D_{s,ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_{s,i}}{\partial x_j} + \frac{\partial u_{s,j}}{\partial x_i} \right) \quad (18)$$

sendo $D_{s,ij}$ o componente do tensor taxa de deformação e $u_{s,i}$ o componente da velocidade na direção i .

Utilizando o modelo *based-ktgf* disponível no *software Fluent* para a pressão friccional, considera-se que a função radial tende ao infinito conforme a fração de sólidos tende ao limite de empacotamento do leito. Com isso, é possível obter o valor da viscosidade friccional.

Além das viscosidades já apresentadas, tem-se também a viscosidade *bulk*, λ_s , que aparece na Equação 12. Esta é responsável por determinar a resistência das partículas a expansão e compressão. Lun *et al.* (1984) propuseram a Equação 19 para determinação dessa propriedade.

$$\lambda_s = \frac{4}{3} \alpha_s^2 \rho_s d_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \left(\frac{\theta_s}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (19)$$

Para o modelo Euleriano multifásico, a teoria cinética granular é baseada na teoria cinética dos gases (LUN *et al.*, 1984). Uma importante propriedade considerada na fase sólida quando empregada essa abordagem é a pressão de sólidos. Essa é uma força por unidade de área, sendo exercida pelas partículas sobre uma superfície durante o seu escoamento. A Equação 20 apresenta a expressão para o cálculo da pressão de sólido, sendo o primeiro termo cinético e o segundo um termo colisional.

$$p_s = \alpha_s \rho_s \theta_s + 2 \rho_s (1 + e_{ss}) \alpha_s^2 g_{0,ss} \theta_s \quad (20)$$

A função de distribuição radial, $g_{0,ss}$, tem o objetivo de fazer a transição entre o escoamento compressível, em que o espaço entre as partículas ainda pode diminuir e o escoamento incompressível em que o leito já está com o seu máximo de empacotamento. Esta função altera a probabilidade de colisões entre as partículas do leito quando a concentração da fase sólida é elevada e é dada pela Equação 21.

$$g_{0,ss} = \left[1 - \left(\frac{\alpha_s}{\alpha_{s,max}} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^{-1} \quad (21)$$

Outra propriedade importante na abordagem Euleriana é a temperatura granular, θ_s , dada pela Equação 22. Considerando o conceito de temperatura dos gases em termodinâmica, as moléculas ficam mais agitadas quando possuem temperaturas mais elevadas. De maneira análoga, a temperatura granular é mais elevada para menores frações de sólidos, já que assim as partículas possuem maior mobilidade (SANTOS, 2011).

$$\theta_s = \frac{1}{3} \langle \vec{C}_s \cdot \vec{C}_s \rangle \quad (22)$$

onde os colchetes representam a média do conjunto.

Desse modo, a Equação 23 representa a expressão de transporte derivada da teoria cinética.

$$\frac{3}{2} \left[\frac{\partial(\alpha_s \rho_s \theta_s)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s \theta_s) \right] = (-p_s \bar{I} + \bar{\tau}_s) : \nabla \vec{v}_s + \nabla \cdot (k_{\theta_s} \nabla \theta_s) - \gamma_{\theta_s} + \varphi_{fs} \quad (23)$$

onde $(-p_s \bar{I} + \bar{\tau}_s) : \nabla \vec{v}_s$ é a geração de energia pelo tensor de cisalhamento, $\nabla \cdot (k_{\theta_s} \nabla \theta_s)$ denota a difusão de energia, γ_{θ_s} o termo de dissipação de energia por meio de colisões e φ_{fs} representa a troca de energia entre as fases fluida e sólida.

Ao empregar o modelo algébrico padrão disponível no *software Fluent* a temperatura granular é resolvida desconsiderando-se os termos de convecção e difusão da expressão de transporte que constituem a Equação 23.

O coeficiente de dissipação de energia representa a taxa de dissipação de energia da fase sólida devido a colisões entre as partículas e pode ser obtido conforme a Equação 24 proposta por Lun *et al.* (1984).

$$\gamma_{\theta_s} = \frac{12(1 - e_{ss}^2) g_{0,ss}}{d_s \sqrt{\pi}} \rho_s \alpha_s^2 \theta_s^{\frac{3}{2}} \quad (24)$$

A troca de energia entre as fases fluida e sólida pode ser obtida pela Equação 25.

$$\varphi_{fs} = -3K_{fs} \theta_s \quad (25)$$

Santos *et al.* (2013) desenvolveram um estudo experimental e por CFD, utilizando a abordagem Euleriana, do comportamento hidrodinâmico em um tambor rotativo. Com o desenvolvimento do trabalho, os autores observaram diferentes movimentos de sólidos com o aumento da velocidade de rotação do tambor. Além disso, foram observados perfis distintos para os diferentes modelos analisados.

Amaral (2017), teve por objetivo determinar a distribuição do teor de água no interior de um fruto de café durante e ao final do processo de secagem com a utilização da fluidodinâmica computacional, a fim de descrever as transferências de calor e massa.

Com o desenvolvimento do trabalho, notou-se que a fluidodinâmica computacional é uma grande aliada, pois os dados experimentais se ajustaram bem aos simulados, apresentando erro relativo de 1,8% apenas.

2.4.3 Pós-processamento

Na etapa de pós-processamento é feita a interpretação dos resultados obtidos na etapa de processamento. Algumas das análises gráficas que podem ser feitas são: plotagem de vetores ou de linhas de contorno, plotagem de perfis de velocidade, pressão, temperatura, fração de sólidos, entre outras (LOPEZ, 2017).

3 METODOLOGIA

Nesta seção serão descritos detalhes da metodologia utilizada para determinação do ângulo de repouso, validação experimental dos parâmetros utilizados, validação da redução do comprimento do tambor para redução dos custos computacionais, teste de independência de malha do tambor reduzido, determinação da quantidade e comprimento ótimo de um suspensor, influência da velocidade de operação e fração de preenchimento.

3.1 Validação Experimental das simulações

Para que fosse validada a metodologia numérica de simulação de tambores rotativos operando com cafés, foi feita uma comparação entre os resultados simulados e experimentais desenvolvidos por Resende *et al.* (2017). Desse modo, foram comparados o ângulo de repouso dinâmico e o perfil de velocidade das partículas em diferentes pontos do tambor.

No trabalho de Resende *et al.* (2017), foi utilizado um tambor de 21,5 cm de diâmetro e 12,5 cm de comprimento. Para diminuir o custo computacional, nesse trabalho, será utilizado 25% do comprimento original. Nas paredes internas do tambor, foi inserida uma lixa de 0,8 mm, a fim de garantir a condição de não deslizamento. Tal condição experimental foi considerada no *software* de simulação.

A velocidade de rotação do tambor foi de 1,26 rad/s, sendo utilizada a ferramenta de malha móvel, disponível no *software Fluent*. Foi simulada uma volta completa do tambor, totalizando-se 5 segundos. Utilizou-se um volume de preenchimento de 10% com grãos de café verde, sendo as propriedades físicas utilizadas no *software Fluent* determinadas por Resende *et al.* (2017), apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades físicas dos grãos de café verde utilizados na simulação.

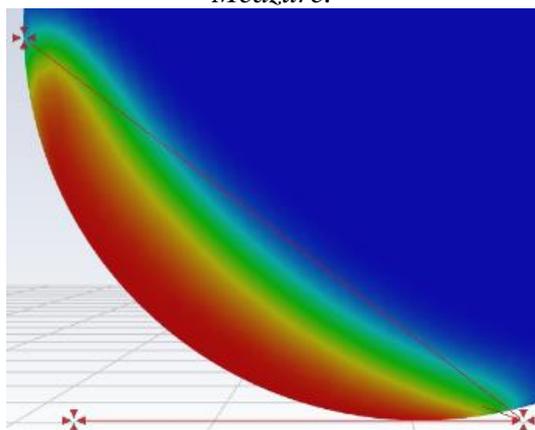
Propriedade	Valor
Densidade (kg/m ³)	1368,3
Diâmetro característico (mm)	5,24
Porosidade	0,47

Fonte: Resende *et al.* (2017).

Para que sejam realizadas as simulações dos tambores rotativos no *software Fluent*, foi utilizado o modelo multifásico Euler-Euler, em que as fases são consideradas contínuas e interpenetrantes. Nessa modelagem, é necessário que sejam definidas algumas propriedades das fases simuladas, sendo essas apresentadas na Tabela 3. Além disso, foi utilizada a condição de não deslizamento nas paredes.

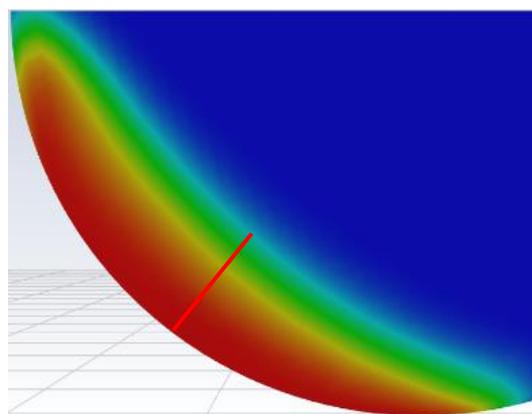
Para determinação do ângulo de repouso dinâmico simulado, foi utilizado o *software Measure*, como mostra a Figura 15. Ao demarcar as linhas apresentadas na Figura 15, o *software* retorna o ângulo que é formado entre elas. Vale ressaltar que a linha superior foi traçada de uma maneira em que as regiões que se sobrepõem a ela, compensem as regiões faltantes. Além disso, a linha inferior tangenciou o tambor na parte inferior.

Figura 15 – Medição do ângulo de repouso dinâmico por meio do *software Measure*.



Fonte: Autor (2023).

Figura 16 – Linha para medição da velocidade em função da posição radial.



Fonte: Autor (2023).

Tabela 3 – Condições empregadas nas simulações com abordagem Euleriana.

Parâmetro	Condição utilizada	Referência
Modelo de arraste	Gidaspow	Gidaspow <i>et al.</i> (1992)
Coefficiente de restituição partícula-partícula	0,67	-
Viscosidade granular	Gidaspow	Nascimento <i>et al.</i> (2014)
Viscosidade granular bulk, Pressão de sólidos e Distribuição Radial	Lun	Huang <i>et al.</i> (2013) e Santos <i>et al.</i> (2013)
Temperatura granular	Algebraic	Santos <i>et al.</i> (2013)
Viscosidade friccional	Schaeffer	Nascimento <i>et al.</i> (2014)
Pressão friccional	based-ktgf	Ding e Gidaspow (1990)
Discretização da pressão	PRESTO!	-
Discretização espacial e temporal	Primeira Ordem Upwind	-
Critério de convergência	10^{-2} para o momento e 10^{-3} para os demais	-

Fonte: Autor (2023).

A fim de determinar o perfil de velocidades em função da posição radial, foi traçada uma reta no próprio *software Fluent* na metade do comprimento do tambor. Esta deveria estar exatamente no meio do leito de partículas, de uma extremidade a outra. Com

o auxílio da ferramenta *xy-plot*, disponível no *software Fluent*, foram obtidas as velocidades dos grãos de cafés em diferentes pontos na linha radial, como mostra a Figura 16.

Após a validação da metodologia numérica de simulação de tambores rotativos operando com cafés, pode-se iniciar as simulações para realização do projeto de suspensores para um secador micro-ondas rotativo.

3.2 Estudo do efeito de parede do tambor para redução do seu comprimento

O equipamento utilizado para estudo neste trabalho foi o tambor ótimo desenvolvido por Carvalho e Petri (2022a), possuindo 62,98 cm de diâmetro e 56,5 cm de comprimento. Entretanto, para que sejam diminuídos os custos computacionais necessários para a simulação, foi proposta uma redução do comprimento tambor.

Para isso, no *software SpaceClaim*, foi confeccionada a geometria do tambor com as dimensões originais e com 22 suspensores. Os suspensores utilizados possuíam 6,81 cm de comprimento e 3,405 cm de altura, sendo estes valores compreendidos no intervalo estabelecido por Perry e Grren (1997). Para determinação do número teórico de suspensores para esse comprimento de suspensor utilizando-se das Equações 1, 2 e 3, o valor do ângulo de repouso dinâmico foi aproximado para o ângulo de repouso estático das partículas de café utilizadas na simulação. Além disso, essa propriedade também é requerida no *software Fluent* para utilização da abordagem Euleriana.

3.2.1 Determinação do ângulo de repouso estático dos grãos de café

Para determinação do ângulo de repouso estático, foram utilizados grãos de cafés especiais *Coffea Arábica L. Cv. Topázio* com umidade de 46% (b.u.), caracterizando grãos úmidos e de 13% (b.u.), caracterizando grãos secos. Os cafés foram adquiridos de um lote de cafés especiais da Agência de Inovação do Café (InovaCafé) da Universidade Federal de Lavras. Os grãos foram colhidos manualmente pelo sistema de derriça no pano, sendo excluídos os grãos verdes. Os cafés passaram pelo sistema de descascamento e despulpamento via úmida, aumentando o tempo de armazenamento dos grãos.

Primeiramente, os grãos de café secos (com 13% de umidade) foram fixados aleatoriamente sobre uma fita dupla face, que estava afixada em um plano, como mostra a Figura 17.

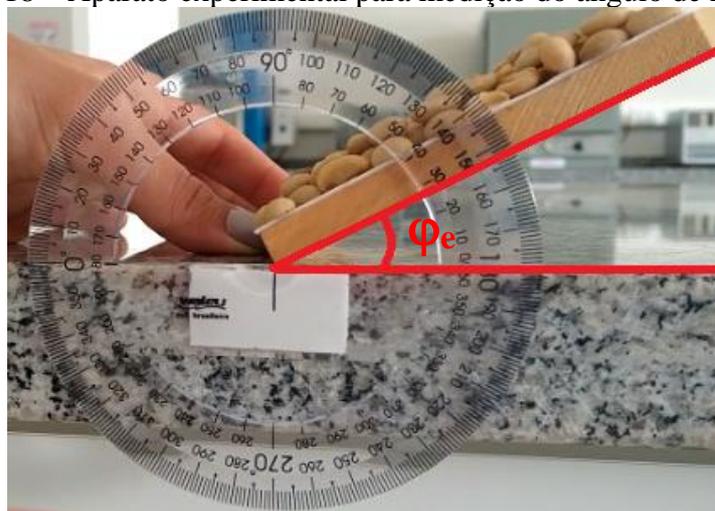
Figura 17 – Superfície com grãos de café fixados sobre fita dupla face.



Fonte: Autor (2023).

Grãos de café secos foram dispostos livremente sobre aqueles que estavam afixados à superfície. Aumentou-se, gradativamente, a inclinação do plano, até que as partículas livres começassem a se movimentar sobre as outras aderidas a superfície, como mostra a Figura 18. A medição foi repetida 10 vezes, sendo determinada a média do ângulo de repouso para grãos de café (*Coffea arabica* L. cv. Topázio) seco e o desvio padrão das medidas. A mesma metodologia foi aplicada para os grãos de café com umidade de 46%.

Figura 18 – Aparato experimental para medição do ângulo de repouso.



Fonte: Autor (2023).

3.2.2 Simulações numéricas

Com a utilização das propriedades validadas na seção 3.1, apresentadas na Tabela 3, e empregando-se uma rotação de 3 rpm, foi feita a simulação da rotação do tambor por 20 segundos, representando uma volta completa do tambor.

Foi utilizada uma fração de preenchimento de 30% do volume com grãos de café especiais *Coffea Arábica L. Cv. Topázio* apresentados na seção 3.2.1 que tem suas propriedades apresentadas na Tabela 4, obtidas por Freire e Petri (2022).

Tabela 4 - Propriedades físicas dos grãos de café.

Propriedade	Valor
Densidade real (kg/m ³)	1035,06
Densidade <i>bulk</i> (kg/m ³)	571,25
Diâmetro do grão (mm)	7,67
Porosidade	0,4481

Fonte: Freire e Petri (2022).

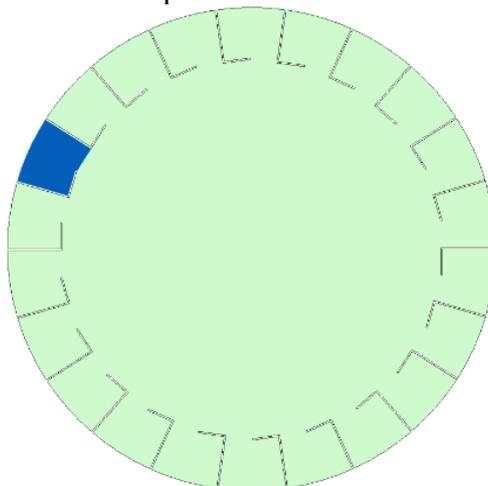
As condições numéricas empregadas foram as apresentadas na Tabela 3, validadas anteriormente. Após as simulações foram criados planos que seccionam o comprimento do tambor a cada 0,5 cm de uma extremidade até o centro do tambor. Com isso, em cada um dos planos foi obtida a fração de sólidos e a velocidade média dos grãos de café. A partir desses resultados, foi feita a análise quantitativa por meio de um gráfico, sendo possível determinar a partir de qual distância da extremidade do equipamento os efeitos de parede não influenciam mais no escoamento das partículas.

3.3 Teste de independência de malha

A fim de minimizar os erros de discretização, deve ser realizado um teste de independência de malha. Neste, o número de células da malha é variado até que se atinja uma condição na qual o número de células já não influencia na variável dependente que está sendo analisada.

Para a realização do teste de independência de malha, a geometria do tambor com 25% do comprimento original foi confeccionada no *software SpaceClaim*, com 22 suspensores possuindo 6,81 cm de comprimento e 3,405 cm de altura. Foi definida uma região de controle, que abrangia a área entre um suspensor e o seu subsequente, como apresentado em azul escuro na Figura 19. Esta região foi utilizada para monitorar a massa de sólidos a cada 0,1 segundos, durante os 20 segundos de simulação.

Figura 19 – Região de controle para obtenção da massa de sólidos no suspensor no teste de independência de malha.



Fonte: Autor (2023).

A malha foi confeccionada no *software Fluent* com o *Meshing mode* habilitado, sendo utilizados elementos do tipo *Poly-hexcore*. Foram utilizadas diferentes quantidades de elementos de malha, sendo elas: 143.927; 399.423; 531.832 e 799.744. Foi feito um refinamento local nas paredes do equipamento, já que nessa região estão contidos os suspensores. As simulações foram realizadas empregando-se as condições validadas anteriormente, apresentadas na Tabela 3 e utilizando-se uma velocidade de rotação de 3 rpm com 30% de preenchimento do volume do tambor com grãos de café.

Com a confecção do gráfico de massa de sólidos no suspensor em função do tempo, foi possível analisar a partir de qual quantidade a malha não influencia mais nos resultados que estão sendo gerados. Além disso, foi analisada a qualidade da malha ótima pelos parâmetros de *skewness* e razão de aspecto. O parâmetro *skewness* avalia o quão perto do ideal uma célula é, sendo desejado que este parâmetro seja próximo de zero. Já a razão de aspecto é baseada em uma relação das arestas de um mesmo elemento, sendo que o valor ideal desse critério é igual a um.

3.4 Planejamento de experimentos para suspensores com 2 segmentos

Com a metodologia numérica, a redução do tambor e a malha devidamente validadas, pode-se realizar o dimensionamento ótimo para suspensores de dois segmentos no interior da cavidade. Para este tipo de suspensor, pode-se ter a variação do comprimento, angulação entre os segmentos e até mesmo a quantidade de suspensores no tambor. Como o objetivo é manter os grãos de café próximos as paredes do equipamento,

a angulação de 90° entre os seguimentos é a mais apropriada, por resultar em um maior tempo de retenção.

Desse modo, serão variados os comprimentos dos suspensores e a sua quantidade no interior do tambor rotativo, utilizando-se de um planejamento de experimentos a três níveis. Vale ressaltar que, nesse caso, a altura do suspensor será a metade do seu comprimento, por isso esta não é considerada uma variável independente.

O comprimento máximo do suspensor foi de 7,87 cm e mínimo de 5,25 cm, sendo que esses valores estão contidos na faixa definida por Perry e Green (1997). A partir da Equação 1, obtém-se um número máximo de suspensores de 18 para o comprimento de 7,87 cm e de 28 para o comprimento de 5,25 cm. Para garantir que todos os suspensores estejam com o seu máximo carregamento, será utilizado um máximo de 14 suspensores. O planejamento a três níveis com dois fatores e duas repetições no ponto central é apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 – Variáveis independentes codificadas e na escala original utilizadas no planejamento a três níveis para análise de suspensores de dois segmentos.

Simulação n°	X1	X2
	Comprimento (cm)	N° de suspensores
1	-1 (5,25)	-1 (4)
2	-1 (5,25)	1 (14)
3	-1 (5,25)	0 (9)
4	1 (7,87)	-1 (4)
5	1 (7,87)	1 (14)
6	1 (7,87)	0 (9)
7	0 (6,56)	-1 (4)
8	0 (6,56)	1 (14)
9	0 (6,56)	0 (9)
10	0 (6,56)	0 (9)
11	0 (6,56)	0 (9)

Fonte: Autor (2023).

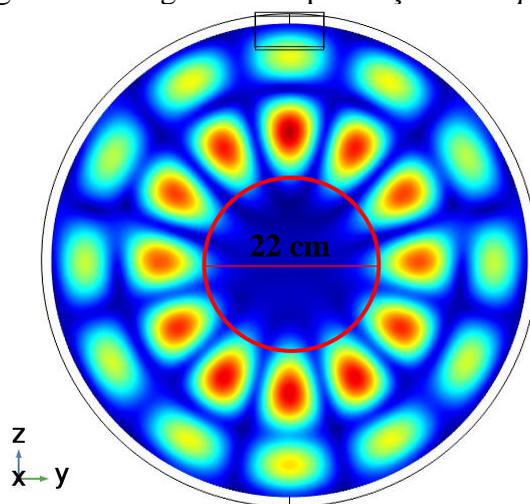
O tempo de permanência dos grãos nos suspensores, o ângulo de última descarga e a massa de grãos na região dos *hotspots* são as variáveis dependentes, ou seja, variáveis de respostas que serão analisadas.

O ângulo de última descarga é aquele no qual o suspensor é totalmente descarregado, não possuindo mais partículas no seu interior. O tempo de permanência é o tempo necessário para que o tambor alcance o ângulo de última descarga. Outro

parâmetro importante é a determinação da massa de sólidos presente na região de *hotspots*, já que esta é a região que efetivamente ocorrerá o aquecimento dos grãos.

Segundo Carvalho e Petri (2022c), existem duas camadas de *hotspots* que contornam as paredes do equipamento utilizado nesse trabalho. Portanto, foi considerado que apenas um cilindro central com 22 cm de diâmetro não estava na região de *hotspots*, conforme apresentado na Figura 20, e com a utilização da ferramenta CFD-POST, foi obtida a fração de sólidos nessa região. Considerando a massa total contida no tambor de 7,54 kg, por subtração com a massa contida no interior do cilindro com diâmetro de 22 cm, obteve-se a massa de café na região de interesse.

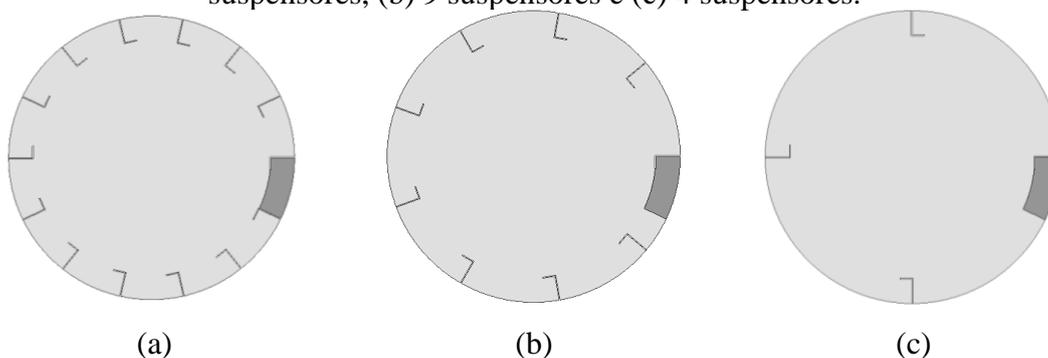
Figura 20 – Região sem a presença de *hotspots*.



Fonte: Adaptado de Carvalho e Petri (2022c).

Para obter os valores de massa de sólidos em um suspensor a cada 0,01 s, foi confeccionada, no *software SpaceClaim*, uma região de controle. Para isso, foi utilizada a área entre um suspensor e seu subsequente para o tambor com 14 suspensores, sendo a mesma região utilizada para as demais quantidades de suspensores, como mostra a Figura 21.

Figura 21 – Região de controle para obtenção da massa de sólidos no tambor com (a) 14 suspensores, (b) 9 suspensores e (c) 4 suspensores.

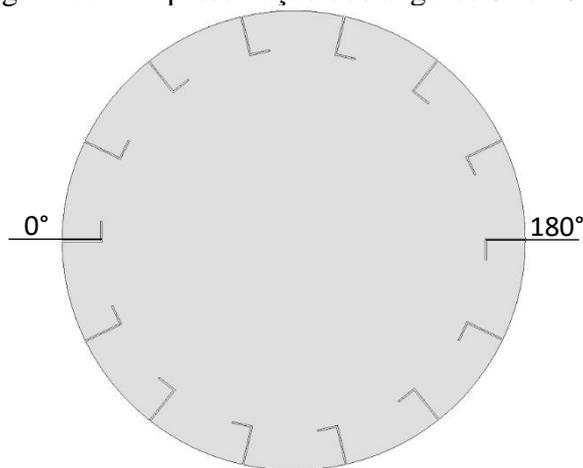


Fonte: Autor (2023).

Utilizando o *software Fluent*, foram simulados 20 segundos com uma rotação de 3 rpm, totalizando 1 volta completa do tambor. Além disso, foi utilizada uma fração de preenchimento de 30% do volume do tambor com grãos de café que tiveram suas propriedades apresentadas na Tabela 4. Além disso, nas simulações foram empregadas as condições validadas anteriormente.

Após 20 segundos de simulação, foi analisado o perfil de fração de sólidos. Com a relação da massa presente no suspensor em função do tempo, foram determinados os ângulos de primeira e última descarga além do tempo de permanência dos sólidos na região demarcada. Vale ressaltar que o ângulo 0° é alcançado quando o tambor realiza meia rotação, ou seja, após 10 segundos de simulação, como mostra a Figura 22, estando com o suspensor o mais carregado possível. Além disso, com o perfil de fração de sólidos em um plano que secciona o centro do equipamento, foi determinada a massa de café na região de *hotspots*, considerando que o mesmo perfil era observado no tambor todo.

Figura 22 – Representação dos ângulos 0° e 180° .



Fonte: Autor (2023).

3.5 Velocidade de rotação do tambor

A velocidade de rotação do tambor pode influenciar na carga de sólidos dos suspensores, impactando diretamente na secagem dos grãos. Portanto, foram propostas diferentes velocidades de rotação, sendo elas: 1, 2, 3, 5, 10, 15, 25 e 35 rpm e analisadas a massa de sólidos no suspensor em função do ângulo e a massa de café na região de *hotspots* após uma rotação completa do tambor. Na cavidade, foram inseridos 9 suspensores de 7,87 cm.

Para isso, também foi utilizada a região de controle, sendo monitorada a massa de

sólidos a cada 0,1 segundos de simulação. Foi utilizada uma fração de preenchimento de 30% de grãos de café com propriedades apresentadas na Tabela 4. Além disso, nas simulações, foram empregadas as condições validadas anteriormente. Para todas as velocidades empregadas, foi simulada uma volta completa do tambor.

3.6 Fração de preenchimento do tambor

A fração de preenchimento do tambor rotativo influencia diretamente no tempo que deverá ser empregado para a secagem dos grãos. Portanto, é importante que seja feita uma análise do comportamento dos grãos com as diferentes frações de preenchimento.

O tambor estudado foi preenchido com 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 e 90% do seu volume com grãos de café que tiveram suas propriedades apresentadas na Tabela 4. Na cavidade, foram inseridos 9 suspensores de 7,87 cm. Após as simulações foram analisados a massa de sólidos em função do ângulo, com a utilização da região de controle, os perfis de fração de preenchimento após 20 segundos de simulação e a massa de café na região de *hotspots*.

No *software Fluent* foi utilizada uma velocidade de rotação de 3 rpm, sendo utilizadas as condições validadas anteriormente. Foram simulados 20 segundos, ou seja, uma volta completa do tambor.

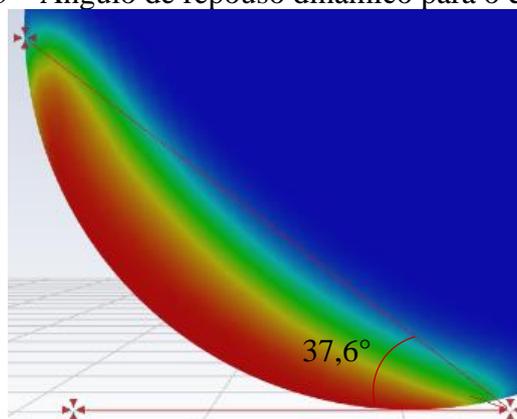
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção serão apresentados os resultados e análises da validação experimental da metodologia numérica de simulação de tambores rotativos operando com cafés, do ângulo de repouso estático de grãos de café (*Coffea Arábica L. Cv. Topázio*) e da validação da redução do comprimento do tambor. Além disso, será apresentado um estudo do projeto de suspensores de dois segmentos com ângulo reto e análise da influência da velocidade e fração de preenchimento na secagem de cafés especiais utilizando tambor rotativo com suspensores.

4.1 Validação experimental

Para a realização da validação experimental da metodologia numérica de simulação de tambores rotativos operando com cafés, aplicou-se as condições numéricas descritas na Tabela 3. Com a realização da simulação, foi obtido o ângulo de repouso dinâmico apresentado na Figura 23.

Figura 23 – Ângulo de repouso dinâmico para o café verde.



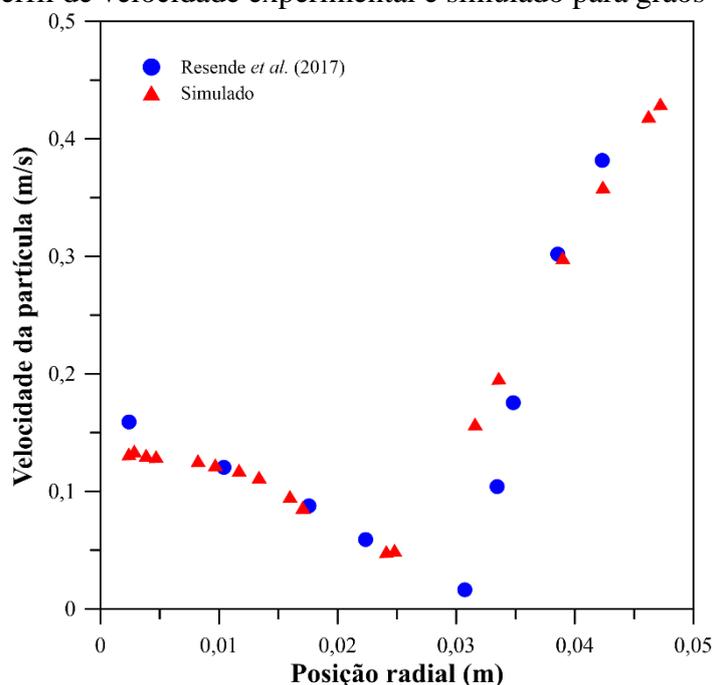
Fonte: Autor (2023).

O valor experimental obtido por Resende *et al.* (2017) foi de $37,73^\circ \pm 0,92^\circ$. Portanto, analisando o valor apresentado na Figura 23, nota-se uma igualdade entre o experimental e o simulado. Além disso, podem ser comparados os resultados experimentais desenvolvidos por Resende *et al.* (2017) e simulados do perfil de velocidade para os grãos de café verde, apresentados na Figura 24.

Analisando os resultados apresentados na Figura 24, nota-se uma proximidade entre os resultados experimentais e simulados para o perfil de velocidade. Portanto, como o ângulo de repouso dinâmico e o perfil de velocidade obtidos por meio da simulação estão em consonância com os obtidos experimentalmente por Resende *et al.* (2017), as

condições utilizadas na simulação foram validadas, podendo ser empregadas nas demais apresentadas nesse trabalho.

Figura 24 – Perfil de velocidade experimental e simulado para grãos de café verde.



Fonte: Autor (2023).

4.2 Ângulo de repouso estático

Após a aplicação da metodologia descrita na seção 3.2.1, foram obtidos os ângulos de repouso estático para os cafés úmido e seco, apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Ângulo de repouso estático para os cafés seco e úmido.

Café seco		Café úmido	
Média (°)	Desvio Padrão (°)	Média (°)	Desvio Padrão (°)
28,9	1,2	36,2	3,3

Fonte: Autor (2023).

Analisando os resultados apresentados na Tabela 6, nota-se a obtenção de diferentes medidas para os cafés seco e úmido. Portanto, para a realização das simulações desenvolvidas nesse trabalho, será utilizado um valor médio entre os apresentados, sendo de 32,55°. Isto será feito pois com a operação do tambor rotativo, será realizada a secagem do café, tendo no começo um café úmido e no fim do processo um café seco.

Saath *et al.* (2019) determinaram algumas propriedades físicas de grãos de café *Coffea Arábica L.* em função do teor de água. Para os grãos de café com pergaminho com cerca de 14,49% de umidade obtiveram um ângulo de repouso médio de 33,94° e para

grãos com 11,49% de umidade, obtiveram uma média de 33,81°. Portanto, para cafés com 13% de umidade espera-se que seja encontrado algum valor dentro desse intervalo. O valor apresentado na Tabela 6 foi inferior a esse intervalo, apresentando um valor 14,84% menor que o obtido para cafés com umidade de 0,11 (b.u.).

Para o café (*Coffea Arábica L.*) com teor de umidade de 46,01%, Saath *et al.* (2019) obtiveram um valor médio de 34,2%, sendo inferior ao apresentado na Tabela 6 para o café úmido. O erro relativo entre os valores foi de apenas 5,85%. Tanto na literatura quanto na Tabela 6, nota-se que com o aumento da umidade há também um aumento do valor do ângulo de repouso estático. Esse comportamento pode ser explicado devido a maior aderência entre as partículas quando estas estão com alto teor de umidade.

Fazendo uma média entre todos os valores obtidos por Saath *et al.* (2019), tem-se um ângulo de repouso estático de 34,53°, sendo variadas as umidades entre 46,01 e 11,45% (b.u.). O resultado é próximo da média de 32,55° obtida nesse trabalho, sendo observada uma diferença de apenas 5,73%. Essa diferença pode ter ocorrido devido as diferenças físicas entre os cafés analisados nos dois trabalhos.

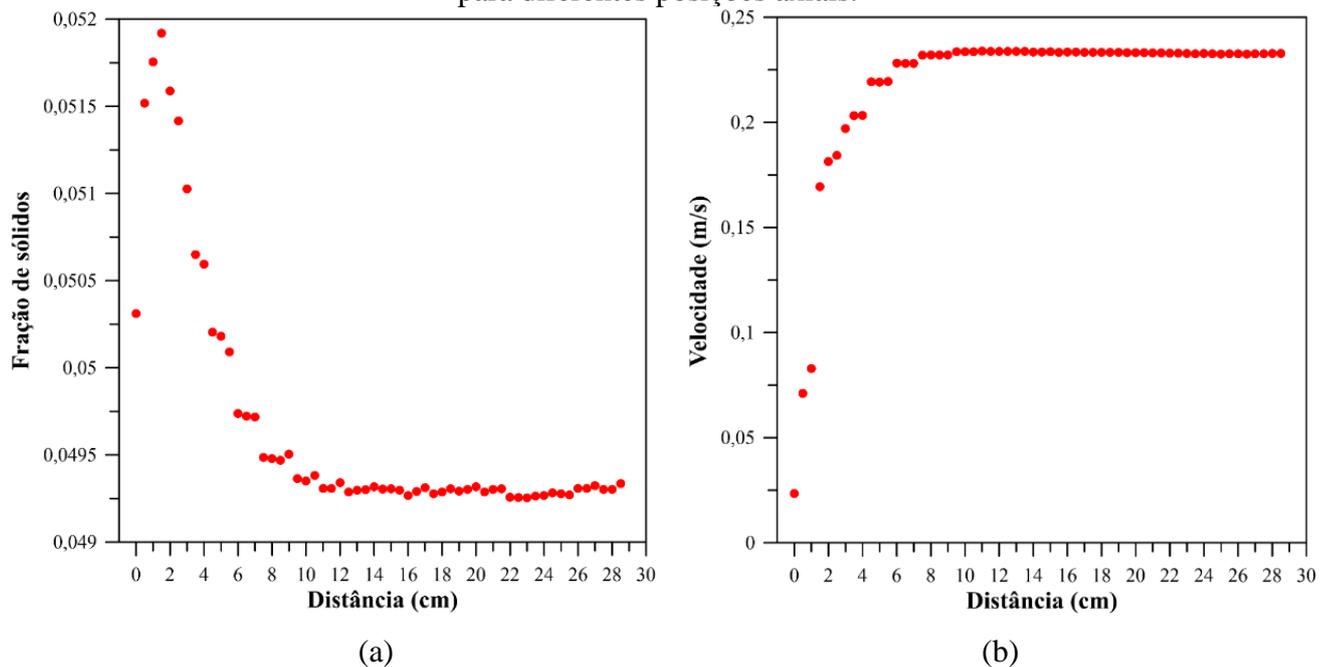
4.3 Simplificação do escoamento no eixo longitudinal do tambor

Para analisar a partir de qual posição no interior do tambor os efeitos de parede são desprezíveis, pode-se avaliar a fração de sólidos e a velocidade das partículas em diferentes posições a partir da parede até o centro do equipamento que possui 56,5 cm de comprimento, apresentadas nas Figuras 25a e 25b, respectivamente.

Analisando os resultados apresentados na Figura 25a, nota-se que a variação na fração de sólidos se torna discrepante a partir de 9 cm de distância da extremidade do tambor. Nos primeiros 7 cm de distância, nota-se uma grande variação da variável analisada, não sendo recomendado que o tambor reduzido possua menos de 14 cm, já que assim os resultados gerados poderiam estar sendo influenciados pelos efeitos de parede do equipamento.

Além disso, pela análise da Figura 25b, percebe-se que a partir de 7,5 cm de distância das paredes do equipamento, é observado uma variação desprezível na velocidade média das partículas no plano. Para valores inferiores a 5,5 cm, nota-se uma grande variação na variável analisada, não sendo recomendado que o tambor rotativo seja reduzido para comprimentos inferiores a 11 cm.

Figura 25 – Resultados da (a) fração de sólidos e (b) velocidade média das partículas para diferentes posições axiais.



Fonte: Autor (2023).

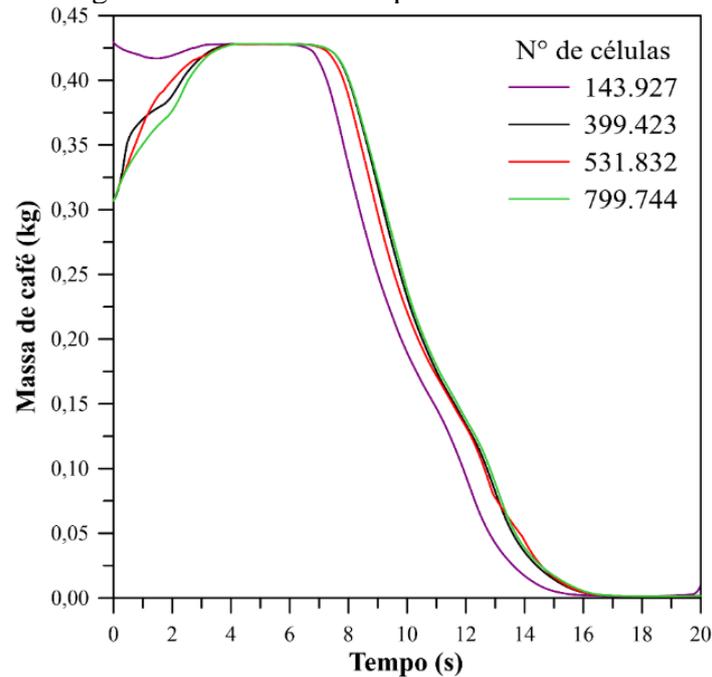
Portanto, com a análise da fração de sólidos e da velocidade média nos diferentes planos que seccionam o equipamento, pode-se utilizar o tambor rotativo com 25% do seu comprimento original, ficando então com 14,125 cm. Essa dimensão será utilizada para todas as demais simulações presentes nesse trabalho.

4.4 Teste de independência de malha

Para analisar a quantidade de células que minimizam os erros numéricos de discretização nas simulações, foi feito o teste de independência de malha, sendo analisada a massa de café em um suspensor em função do tempo, apresentado na Figura 26.

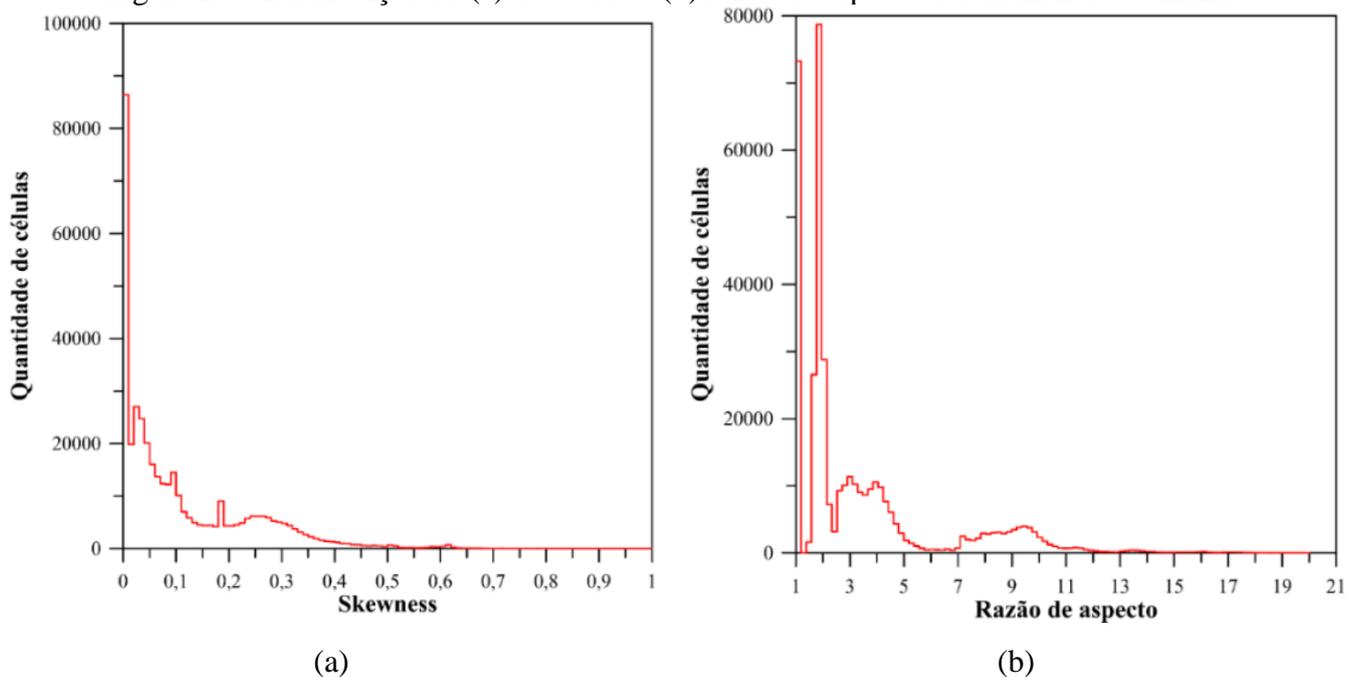
Analisando-se os resultados apresentados na Figura 26, observa-se que apenas para a menor quantidade de células (143.927), houve uma diferença considerável quando comparado com a massa de sólidos presente no suspensor para as demais quantidades. Pode-se notar que para 143.927 células, no início da simulação, de 0 a 4 segundos, há uma maior diferença em relação as demais quantidades de células analisadas, indicando que na região monitorada, a qualidade das células obtidas não foi boa.

Figura 26 – Teste de independência de malha.



Fonte: Autor (2023).

Pela análise da Figura 26, percebe-se que com 399.423 células a malha já não mais influencia nos resultados que estão sendo analisados, gerando um menor custo computacional. Para garantir que esta malha tem boa qualidade e pode ser utilizada nas demais simulações deste trabalho, podem ser analisados o *skewness* e a razão de aspecto, apresentados nas Figuras 27a e 27b, respectivamente.

Figura 27 – Distribuição do (a) *skewness* e (b) razão de aspecto dos elementos de malha.

Fonte: Autor (2023).

Analisando-se os resultados apresentados na Figura 27a, nota-se um grande pico para o *skewness* igual a zero, indicando que há muitas células que possuem esse valor. Quanto mais se aproxima de 1, menores são as quantidades de células observadas no gráfico apresentado. Fazendo uma média ponderada de todos os valores apresentados na Figura 27a, obtém-se um *skewness* próximo de 0, sendo de 0,11. Portanto, em relação ao *skewness*, a malha apresenta boa qualidade.

Pela análise da Figura 27b, também se nota altos picos no início do gráfico, indicando que há um grande número de células que apresentam razão de aspecto entre 1 e 2. Para maiores valores desse parâmetro, são encontradas poucas células. A média ponderada dos valores apresentados na Figura 27b foi de 3,36, o que indica uma boa qualidade da malha.

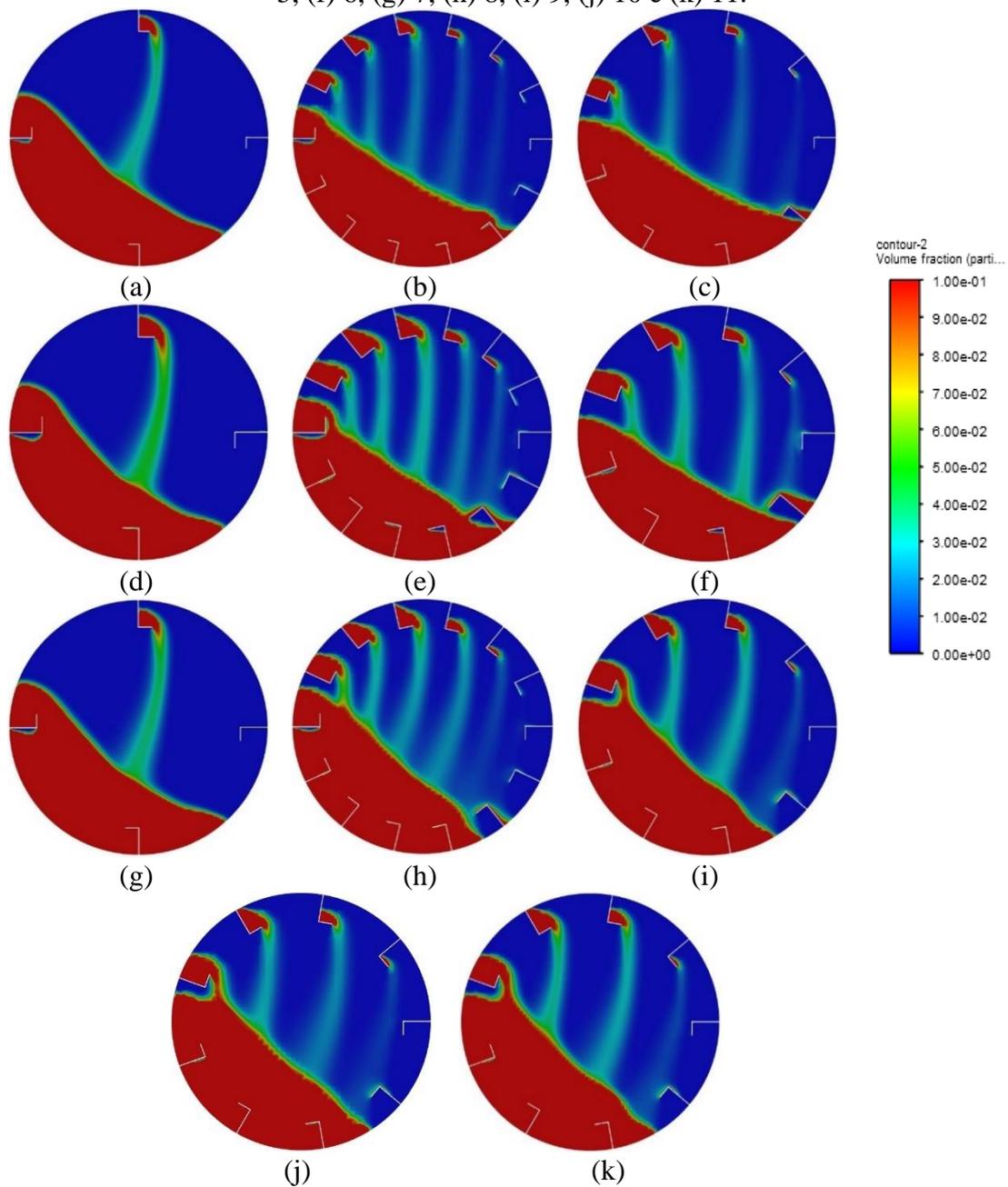
Portanto, a malha de 399.423 pode ser utilizada para as demais simulações desse trabalho, já que não influencia nos resultados que estão sendo gerados e apresenta boa qualidade.

4.5 Projeto de suspensores com dois segmentos

Após realização do planejamento de experimentos a três níveis, tendo como variáveis independentes a quantidade e o comprimento dos suspensores, foram obtidos os perfis de fração de partículas apresentados na Figura 28.

Analisando os resultados de fração de sólidos apresentado na Figura 28, nota-se que com maiores quantidades de suspensores, são formados maiores números de cortinas, aumentando a homogeneização dos grãos de café. Além disso, comparando as Figuras 28a, 28d e 28g, para suspensores com maiores comprimentos, há um aumento no carregamento de sólidos, já que na Figura 28d a cortina apresenta uma coloração mais intensa quando comparada com as cortinas formadas na Figura 28a e 28g. A mesma análise se aplica para as maiores quantidades de suspensores.

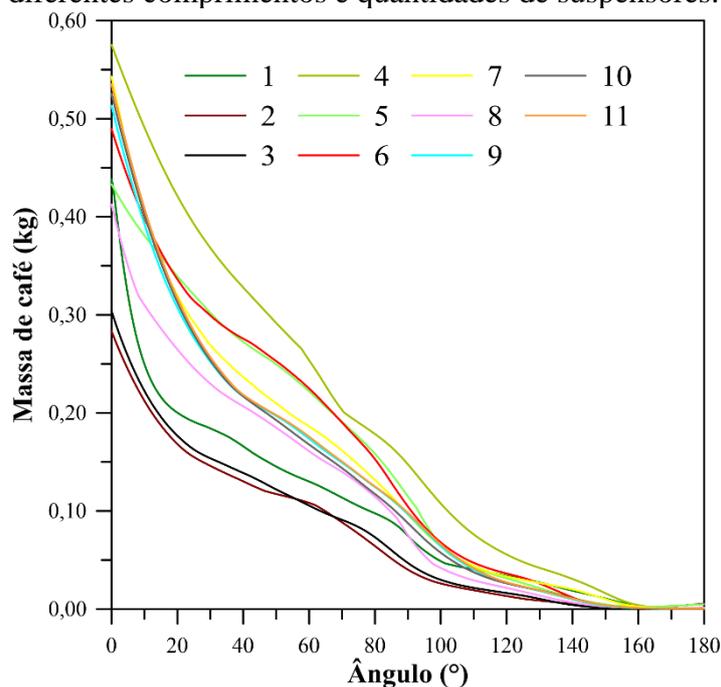
Figura 28 – Perfil de fração de sólidos para as simulações n° (a) 1, (b) 2, (c) 3, (d) 4, (e) 5, (f) 6, (g) 7, (h) 8, (i) 9, (j) 10 e (k) 11.



Fonte: Autor (2023).

Pode-se, também, analisar a massa de sólidos no suspensor em função do ângulo do tambor rotativo para os diferentes comprimentos e quantidades de suspensores, como mostrado na Figura 29.

Figura 29 - Massa de sólidos em um suspensor em função do ângulo de rotação para diferentes comprimentos e quantidades de suspensores.



Fonte: Autor (2023).

Pela análise da Figura 29, nota-se que embora o suspensor possua o mesmo comprimento, ele apresenta diferentes massas iniciais para as diferentes quantidades de suspensores, como é observado para as simulações de números 1, 2 e 3. Isso pode ser explicado devido ao grau de preenchimento do tambor estar abaixo do carregamento ideal. Para todos os comprimentos analisados, o tambor com menor quantidade de suspensores apresentou um maior carregamento inicial.

Além disso, observando-se o comportamento das curvas apresentadas na Figura 29, nota-se que para diferentes comprimentos e quantidades de suspensores são obtidas diferentes formas de descarregamentos, sendo apresentados tempos de permanência distintos. Quando aproxima do ângulo de 150°, todos os suspensores se aproximam do descarregamento total, não apresentando mais grãos de café em seu interior.

A condição com o maior comprimento de suspensor e menor quantidade (simulação 4) apresentou resultados melhores em comparação com os demais. Além de apresentar um maior carregamento inicial, teve um ângulo de última descarga elevado e um descarregamento mais demorado, o que pode ser benéfico para a secagem de cafés nessa cavidade.

Os resultados para as variáveis dependentes, sendo elas tempo de permanência e ângulo de última descarga, para o planejamento a três níveis são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Resultados do planejamento de experimentos a três níveis.

Simulação n°	Y1	Y2	Y3
	Tempo de permanência (s)	Ângulo de última descarga (°)	Massa de café na região de hotspots (kg)
1	18,97	161,46	7,519
2	18,18	147,24	7,515
3	18,02	144,36	7,520
4	19,05	162,9	7,518
5	18,83	158,94	7,510
6	18,39	151,02	7,530
7	18,87	159,66	7,514
8	18,34	150,12	7,513
9	18,44	151,92	7,518
10	18,52	153,36	7,518
11	18,53	153,54	7,519

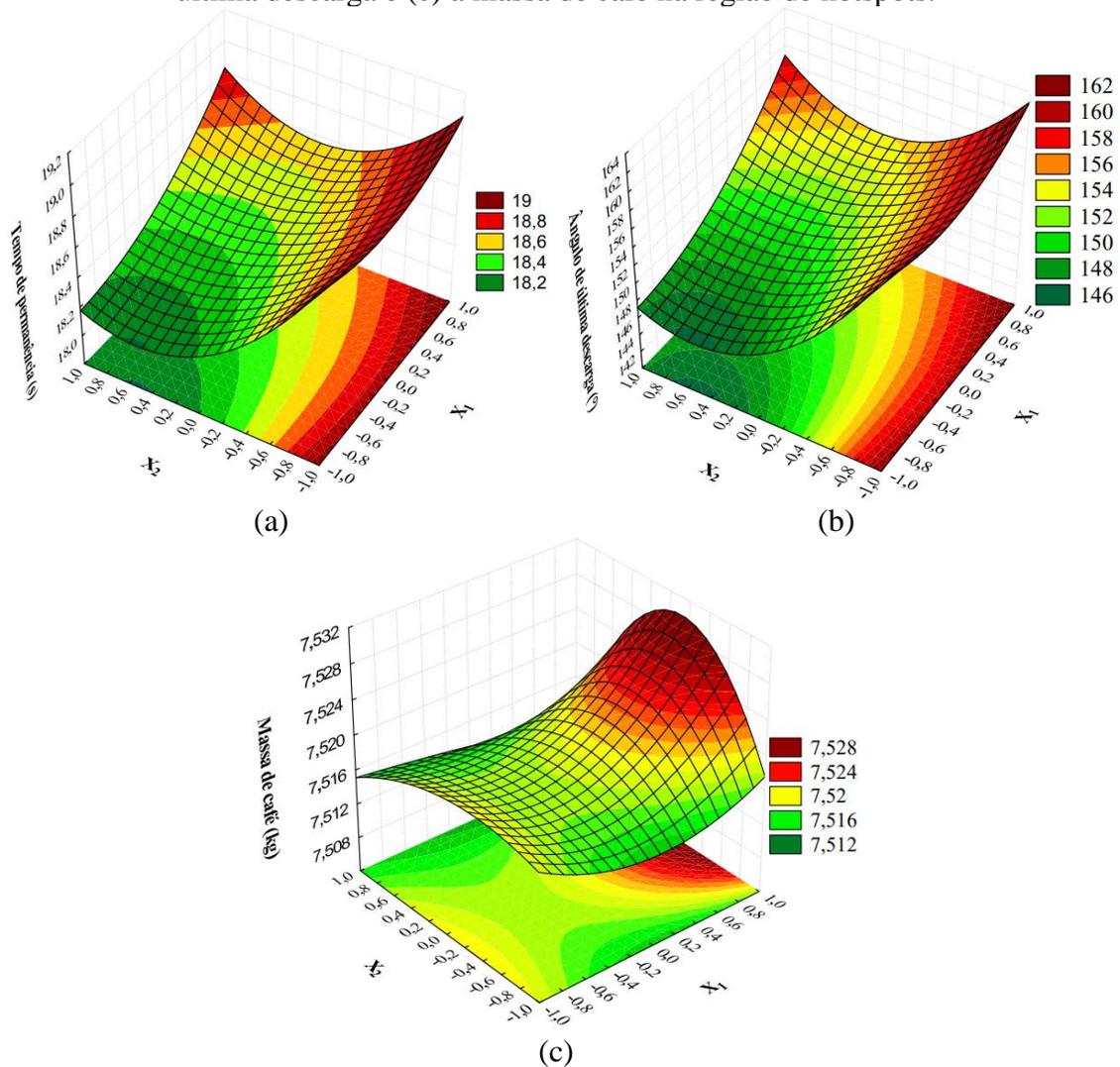
Fonte: Autor (2023).

Para uma melhor análise dos resultados apresentados na Tabela 7, as Figuras 30 a, b e c apresentam a superfície de resposta para as variáveis Y1, Y2 e Y3, descritas nas Equações 26, 27 e 28, com coeficientes de determinação de 0,991, 0,991 e 0,9997 respectivamente.

Analisando as superfícies de resposta apresentadas nas Figuras 30a e b nota-se que são observados valores de máximo quando a variável X_1 é máxima e X_2 é mínima. Ou seja, para se obter maiores tempos de permanência do café no suspensor e um maior ângulo de última descarga, devem ser utilizados o maior comprimento e a menor quantidade de suspensores proposta no planejamento. Entretanto, quando analisada a Figura 30c, nota-se valores de máximo quando X_1 é máximo e X_2 é intermediário. Portanto, para que haja uma maior quantidade de café na região de *hotspots*, deve ser utilizada uma quantidade de suspensores intermediária e o maior comprimento para eles.

Desse modo, observa-se que para todas as variáveis dependentes analisadas, a melhor condição foi obtida quando o suspensor tem o maior comprimento possível, possuindo 7,87 cm. Para a quantidade de suspensores, foram obtidos resultados divergentes. Portanto, recomenda-se que seja utilizada a condição central para essa variável independente, sendo utilizados 9 suspensores. Com isso, analisando as superfícies de respostas apresentadas nas Figuras 30 a e b, quando se utiliza 9 suspensores de 7,87 cm, obtém-se valores intermediários para as variáveis dependentes.

Figura 30 - Superfície de resposta para (a) o tempo de permanência, (b) o ângulo de última descarga e (c) a massa de café na região de hotspots.



Fonte: Autor (2023).

$$Y1 = 18,57 + 0,183x_1 - 0,257x_2 - 0,203x_2^2 + 0,142x_1x_2 + 0,11x_1^2x_2^2 \quad (26)$$

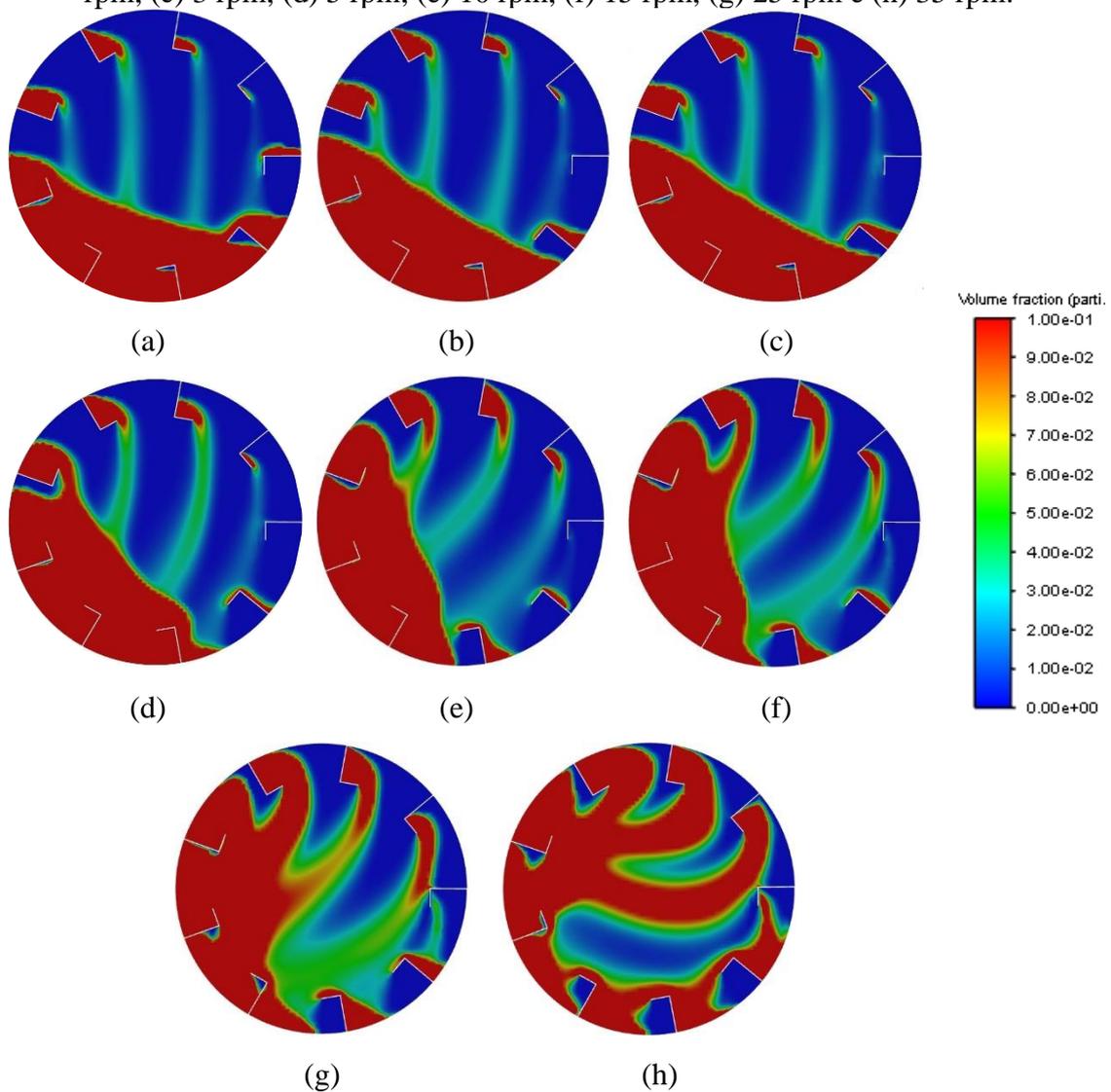
$$Y2 = 154,289 + 3,3x_1 - 4,62x_2 - 3,647x_2^2 + 2,565x_1x_2 + 1,988x_1^2x_2^2 \quad (27)$$

$$Y3 = 7,517 + 0,0007x_1 - 0,0016x_1^2 - 0,002x_2 + 0,0039x_2^2 - 0,0008x_1x_2 + 0,0033x_1x_2^2 + 0,001x_1^2x_2 - 0,0011x_1^2x_2^2 \quad (28)$$

4.6 Análise da velocidade de rotação para secagem de grãos de cafés especiais

Para análise do comportamento dos grãos no interior do equipamento, foi variada a velocidade de rotação. Com isso, foram obtidos os perfis de fração de partículas, apresentados na Figura 31.

Figura 31 – Perfil de fração de sólidos para a velocidade de rotação de (a) 1 rpm, (b) 2 rpm, (c) 3 rpm, (d) 5 rpm, (e) 10 rpm, (f) 15 rpm, (g) 25 rpm e (h) 35 rpm.



Fonte: Autor (2023).

Analisando o perfil apresentado na Figura 31a, nota-se que são encontradas partículas na parte superior do suspensor que se encontra na posição 180° . Isso faz com que mais partículas estejam na região de *hotspots* do tambor, favorecendo sua secagem. Além disso, observa-se que com o aumento da velocidade, tem-se um aumento do ângulo de repouso dinâmico dos grãos de café.

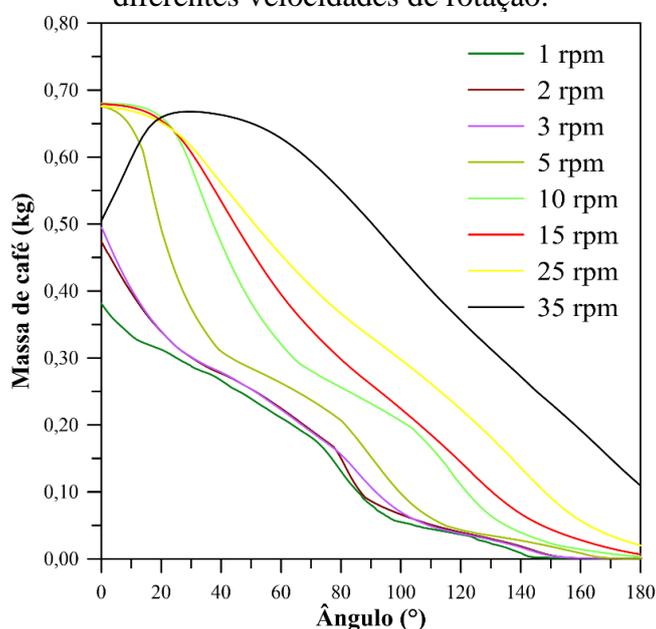
Para velocidades superiores a 5 rpm, pela análise da Figura 31, observa-se um aumento gradativo na inclinação das cortinas, observando-se um arraste dos sólidos. Este comportamento pode ser prejudicial para a secagem dos grãos, pois altas velocidades de rotação podem causar grandes impactos entre partícula-partícula ou entre partícula-parede, prejudicando a integridade dos grãos.

Além disso, a partir de 25 rpm nota-se um início do regime de centrifugação, fazendo com que os grãos fiquem aderidos a parede do equipamento. Este comportamento não é benéfico para a secagem de café pois também pode danificar a integridade dos grãos.

Pelos perfis apresentados na Figura 31, nota-se que o tambor está operando de maneira sobrecarregada, pois com todas as velocidades de rotação estudadas são observados ângulos de primeira descarga antes da posição 0°.

Pode-se, também, analisar a massa de sólidos no suspensor em função do ângulo do tambor rotativo para diferentes velocidades de rotação, como mostrado na Figura 32.

Figura 32 - Massa de sólidos em um suspensor em função do ângulo de rotação para diferentes velocidades de rotação.



Fonte: Autor (2023).

Analisando os resultados apresentados na Figura 32, nota-se que para maiores velocidades de rotação, os suspensores são completamente descarregados em maiores ângulos. Este comportamento poderia ser benéfico para a secagem dos grãos, pois os suspensores ficariam carregados por mais tempo. Entretanto, como já mencionado, a integridade do grão pode ser prejudicada em altas velocidades, ocasionando em uma baixa qualidade do café seco.

Além disso, ainda pela análise da Figura 32, nota-se um comportamento bem próximo para as velocidades de 2 e 3 rpm, sendo que para ambas as velocidades o suspensor estudado é completamente descarregado em angulações próximas a 150°. Já para a velocidade de 1 rpm, o suspensor é completamente descarregado em um ângulo de

aproximadamente 145°. Portanto, nota-se que é mais promissor que se opere com velocidades de 2 ou 3 rpm, pois assim os grãos são mantidos por mais tempo no suspensor.

Para a velocidade de 5 rpm, como observa-se na Figura 32, o suspensor é completamente descarregado com angulações próximas de 170°, sendo esta também uma velocidade que o tambor pode ser operado. Para as velocidades de rotação de 10 e 15 rpm, nota-se que o suspensor só é totalmente descarregado quando atinge 180° e para as velocidades de 25 e 35 rpm o suspensor não fica totalmente descarregado quando atinge 180°. Entretanto, segundo a literatura, o tambor destinado para a secagem de café não pode ser operado nessas velocidades (Silva *et al.*, 2008).

Por fim, pode ser analisada a massa de café na região de *hotspots* para cada uma das velocidades estudadas, apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 – Massa de café na região de *hotspots* para as velocidades de rotação estudadas.

Velocidade (rpm)	Massa de café na região de <i>hotspots</i> (kg)	Porcentagem de café fora da região de <i>hotspots</i> (%)
1	7,529	0,15
2	7,525	0,22
3	7,525	0,21
5	7,521	0,26
10	7,507	0,46
15	7,497	0,59
25	7,490	0,68
35	7,510	0,41

Fonte: Autor (2023).

Analisando os resultados apresentados na Tabela 8, nota-se que com o aumento da velocidade de rotação até 25 rpm, na maioria dos casos, ocasiona em uma menor massa de café na região desejada. Isso indica que com o aumento da velocidade, há uma maior massa de grãos nas cortinas formadas, favorecendo a homogeneização dos grãos. Para a velocidade de 35 rpm, as partículas começam a ficar mais aderidas as paredes, caracterizando o regime de centrifugação, por isso é observada uma maior massa de café na região desejada.

Além disso, observando os resultados da Tabela 8, pode-se notar que para todas as velocidades de rotação são observadas baixas porcentagens de café fora da região de

hotspots. A máxima porcentagem obtida foi de 0,68%, indicando que apenas 0,051 kg de café estavam fora da região de maior concentração das ondas eletromagnéticas.

Como velocidades acima de 5 rpm não são recomendadas para a secagem de cafés, pois podem danificar os grãos, ocasionando num sabor desagradável da bebida, pela análise da Tabela 8, é recomendado que se opere com velocidade de 1, 2 ou 3 rpm. Com estas, são observadas maiores massas de café na região desejada, diminuindo o tempo de secagem e garantindo a integridade do grão.

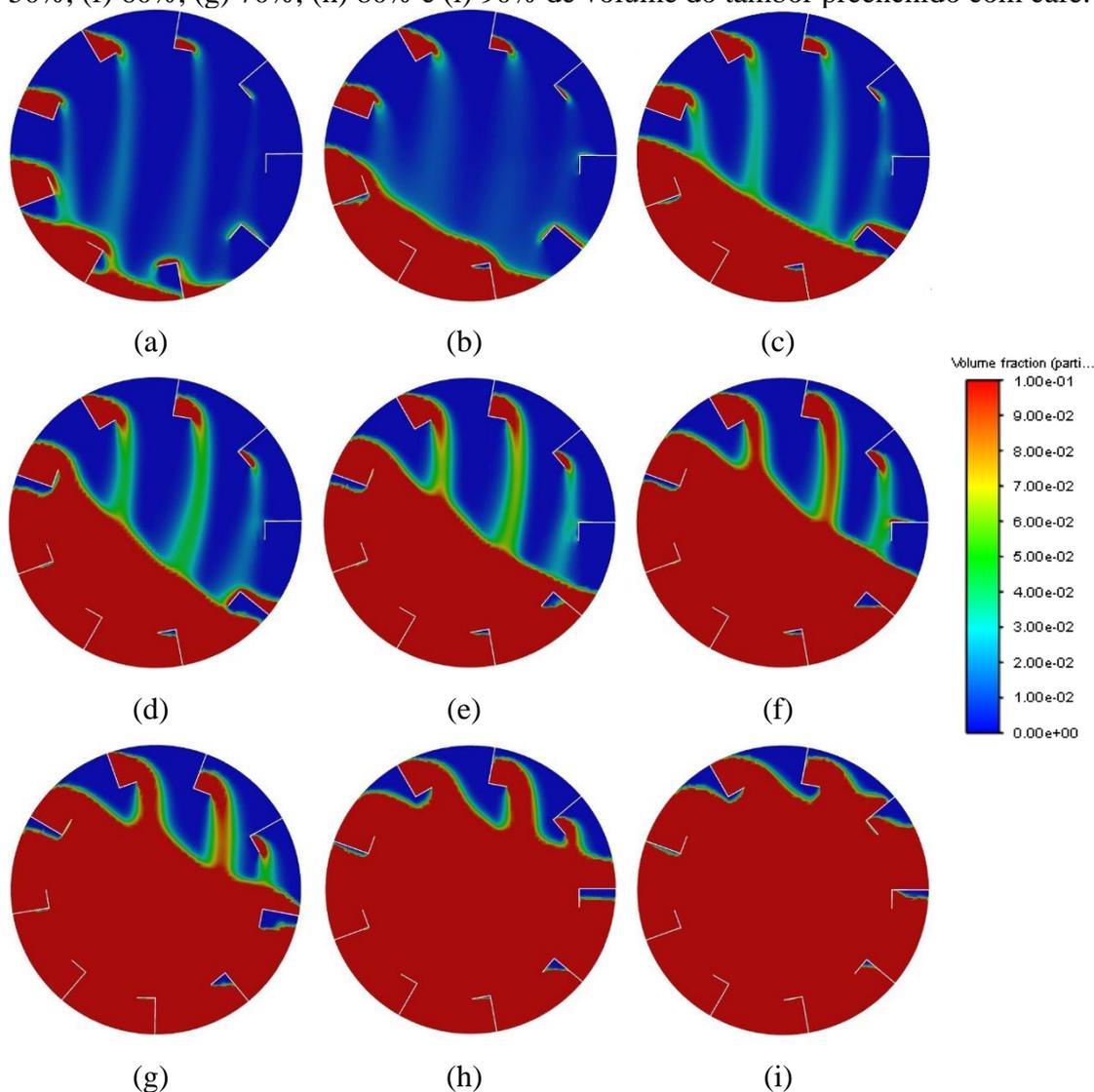
4.7 Análise da fração de preenchimento dos tambores para secagem de grãos de cafés especiais

Após a realização de 20 segundos de simulação variando a fração de preenchimento do tambor em 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 e 90% com grãos de café, foram obtidos os perfis de fração volumétrica de café apresentados na Figura 33.

A partir da análise da Figura 33, nota-se que com volumes maiores de preenchimento são observadas cortinas com maior densidade de sólidos. Além disso, percebe-se também que com todas as frações de preenchimento é observado um ângulo de primeira descarga inferior a posição 0° , indicando o sobrecarregamento do tambor.

Ainda pela análise da Figura 33, observa-se que para maiores quantidades de grãos de café no interior do tambor, há uma menor homogeneização das partículas. Com isso, a mistura dos grãos é dificultada, já que há uma grande concentração de grãos no centro do equipamento, ficando distante dos suspensores.

Figura 33 - Perfil de fração de sólidos com (a) 10%, (b) 20%, (c) 30%, (d) 40%, (e) 50%, (f) 60%, (g) 70%, (h) 80% e (i) 90% de volume do tambor preenchido com café.

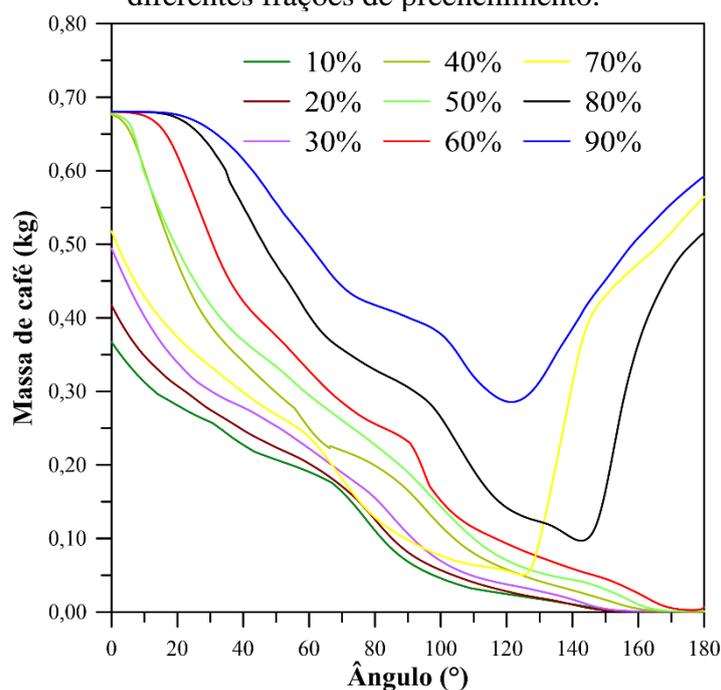


Fonte: Autor (2023).

Além disso, após a realização das simulações, pode-se também analisar a massa de café na região de controle durante os 20 segundos de rotação (180°), conforme apresentado na Figura 34.

Com a análise da Figura 34, pode-se notar que a massa de café no ângulo de 0° é variável até que se atinja 40% de preenchimento do tambor. A partir desse valor, a massa de café passa a ser constante para todas as frações de preenchimento, indicando que este é o carregamento máximo que o suspensor suporta, sendo ela em torno de 0,68 kg de café. Isso ocorre, pois, a partir da fração de preenchimento de 40% a posição 0° do suspensor está localizada na região passiva, ou seja, o suspensor se encontra junto com a massa de café que está na região inferior do tambor.

Figura 34 - Massa de sólidos em um suspensor em função do ângulo de rotação para diferentes frações de preenchimento.



Fonte: Autor (2023).

Observa-se na Figura 34 que a massa de café em função do ângulo é dependente da fração de preenchimento do tambor. Para maiores massas de café no interior do equipamento, nota-se que o suspensor carrega uma maior quantidade de café até alcançar a posição de 180°. Isso indica que para maiores frações de preenchimento são observados maiores tempos de permanência do café no suspensor.

Para as frações de preenchimento de 70, 80 e 90%, pela análise da Figura 34, nota-se que o suspensor não faz o seu completo descarregamento ao atingir 180°, voltando a ser carregado nas posições de aproximadamente 130°, 140° e 120°, respectivamente.

Por fim, pode também ser analisada a massa de café na região de hotspots, conforme apresentado na Tabela 9.

Pela análise dos resultados apresentados na Tabela 9, pode-se notar que a porcentagem de café fora da região de *hotspots* aumenta com o aumento da fração de preenchimento do tambor, exceto para as frações de 80 e 90%. Isso acontece pois, com maiores volumes de café, há uma maior quantidade de grãos que fica localizada no centro do tambor, devido a maior concentração volumétrica das cortinas e ao aumento da região passiva, como pode ser observado na Figura 33. Isto pode ser prejudicial para a secagem dos grãos, pois haverá o menor contato dos grãos com as ondas eletromagnéticas no momento da operação, diminuindo a taxa de secagem.

Tabela 9 – Massa de café na região de hotspots para as diferentes frações de preenchimento do tambor.

Fração de preenchimento (%)	Massa de café no tambor (kg)	Massa de café na região de hotspots (kg)	Porcentagem de café fora da região de hotspots (%)
10	2,514	2,512	0,07
20	5,027	5,018	0,19
30	7,541	7,524	0,22
40	10,055	9,876	1,78
50	12,568	11,991	4,59
60	15,082	13,976	7,33
70	17,596	16,091	8,55
80	20,109	18,431	8,35
90	22,623	20,931	7,48

Fonte: Autor (2023).

Portanto, para que haja uma maior eficiência do processo de secagem, é preferível que o tambor seja operado com menores quantidades de café, pois assim a quantidade de café fora da região em que há a concentração das ondas eletromagnéticas é diminuída. Entretanto, nota-se que até para frações de preenchimento maiores são observadas baixas porcentagens de café fora da região de interesse, sendo de no máximo 8,55%.

5 CONCLUSÕES

Mediante o exposto, o trabalho cumpre de forma satisfatória os seus objetivos gerais, sendo realizado o estudo da fluidodinâmica de grãos de cafés especiais em um secador micro-ondas rotativo, possibilitando o projeto das dimensões e quantidade ótima de suspensores no secador. Além disso, foi feito o estudo da influência da velocidade de rotação e fração de preenchimento do tambor para avaliar a dinâmica das partículas durante a operação do tambor.

Foi possível fazer a validação experimental da metodologia numérica de simulação de tambores rotativos operando com cafés por meio da comparação de resultados experimentais desenvolvidos por Resende *et al.* (2017) e simulados.

Conclui-se que o ângulo de repouso estático para cafés (*Coffea Arábica L.*) varia com a umidade do grão. Cafés com umidades de 46% e 13% apresentaram ângulos de repouso de 36,2° e 28,9°, respectivamente.

Para diminuir os custos computacionais gerados nas simulações, conclui-se que para comprimentos superiores a 25% do comprimento original do tambor os efeitos de parede não são relevantes. Portanto, pode ser utilizado um tambor de 14,125 cm de comprimento e 62,98 cm de diâmetro para as demais simulações.

Concluiu-se que para amenizar os erros de discretização associados à simulação, devem ser utilizados no mínimo 399.423 células. Com esse valor, a malha apresenta um *skewness* de 0,11 e uma razão de aspecto de 3,36, indicando uma malha de boa qualidade.

Para suspensores de dois segmentos, foi possível concluir que tanto o comprimento quanto a quantidade de suspensores influenciam na dinâmica de partículas no interior do tambor. Para que sejam garantidos altos tempo de permanência, ângulo de última descarga e elevada massa de café na região de *hotspots*, devem ser utilizados 9 suspensores de 7,87 cm de comprimento e 3,935 cm de altura.

Conclui-se, também que a velocidade de rotação do tambor influencia na dinâmica de escoamento no interior da cavidade. Para garantir uma boa mistura dos grãos e manter sua integridade é recomendado que não se opere o equipamento com velocidades de rotação superiores a 5 rpm. Portanto, deve-se utilizar velocidades de rotação de 1, 2 ou 3 rpm.

A fim de garantir uma alta eficiência do processo de secagem, conclui-se que o tambor rotativo deve ser operado com menores quantidades de café, pois assim diminuiria

a massa de café fora da região de *hotspots*. Portanto, devem ser utilizadas frações de preenchimento entre 10 e 50%.

Com isso, conclui-se que a utilização da ferramenta CFD foi bastante eficaz, pois permitiu que fosse projetado um equipamento que pode ser utilizado no âmbito semi-industrial, devido a boa homogeneização que fornecerá para os grãos, gerando um baixo custo operacional.

5.1 Sugestão para trabalhos futuros

Para trabalhos futuros, sugere-se que:

- Seja realizado um estudo da dinâmica de partículas no interior do tambor rotativo sem a presença de suspensores.
- Seja empregada a abordagem Lagrangeana para uma análise mais detalhada do comportamento dos grãos no interior do tambor.

6 REFERÊNCIAS

- ABIC-Associação Brasileira da Indústria de Café. ABIC divulga dados de consumo de café no Brasil. Disponível em: <https://estatisticas.abic.com.br/estatisticas/indicadores-da-industria/indicadores-da-industria-de-cafe-2022/>. Acesso em: 04 abr. 2023.
- 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.
- ALVES, G. E., ISQUEIRO, E. P., BORÉM, F. M., SIQUEIRA, V. C., OLIVEIRA, P. D., ANDRADE, E. T. Cinética de secagem de café natural para diferentes temperaturas e baixa umidade relativa. *Coffee Science*, Lavras, v. 8, n. 2, p. 238-247, 2013.
- AMARAL, R. Simulação da secagem de café utilizando a fluidodinâmica computacional, Dissertação de mestrado, 44 p., Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2017.
- BICALHO, I. C.; DUARTE, C. R.; SILVÉRIO, B. C.; BARROZO, M. A. S. Estudo experimental e de simulação da fluidodinâmica em secadores rotatórios com cascadeamento, *Horizonte Científico*, v. 4, p.1-30, 2010.
- 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.
- BORÉM, F. M., CORADI, P. C., SAATH, R., OLIVEIRA, J. A. Qualidade do café natural e despolpado após secagem em terreiro e com altas temperaturas, *Ciênc. agrotec.*, Lavras, v. 32, n. 5, p. 1609-1615, 2008.
- BRANDÃO, R. J. Estudo da segregação de material granular em tambor rotatório empregando a abordagem numérica lagrangeana. Dissertação de mestrado. 107 p., Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.
- CARNEIRO, C. M. Processo produtivo do café: torrefação e qualidade. Trabalho de conclusão de curso. 36 p. Uberlândia/MG, 2021.
- CARVALHO, A. J. B, PETRI, I. J. Avaliação dos Métodos de Criação e Otimização de Malhas Tridimensionais Aplicadas à Simulação de Placas de Orifício. *Revista Científica do ITPAC*, Araguaína, v.14, n.1, p. 50-62, 2021.
- CARVALHO, A. J. B, PETRI, I. J. (a) 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*

- de Sistemas Particulados, 2022, Uberlândia. Anais eletrônicos... Campinas, Galoá, 2022.
- CARVALHO, A. J. B, PETRI, I. J. (b) 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. (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, E. C. Secagem Industrial, São Paulo: Blucher, 2007.
- COSTA, F. O.; ALVARENGA, T. F.; MESQUITA, T. V. C.; PETRI, I. J. Hybrid drying of pulped arabica coffee cherry beans (*Coffea arabica* L. cv. Catuai) using a hexagonal microwave dryer designed by numerical simulations. *Journal of Food Process Engineering*, v. 44, n. 5, 2021.
- ÇENGEL, Y.A., GHAJAR, A.J. Heat and Mass Transfer: Fundamentals & Applications. McGraw-Hill: New York, 924 p., 2011.
- DELELE, M. A., WEIGLER, F., e MELLMANN, J. Advances in the application of a rotary dryer for drying of agricultural products: a review. *Drying Technology*, v. 33, nº 5, p. 541–558, 2014.
- DING, J.; GIDASPOW, D. A Bubbling Fluidization Model Using Kinetic Theory of Granular Flow, *AIChE Journal*, v. 36, p. 523-538, 1990.
- DUARTE, C.R. Estudo experimental e de simulação da fluidodinâmica e recobrimento em leite de jorro. 194 p. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.
- FERNANDES, N. J. Estudo da fluidodinâmica e de secagem de um secador rotatório da indústria de fertilizantes, 109 p., Dissertação de Mestrado, UFU, Uberlândia/MG, 2008.
- FILHO, A. F. LACERDA, SILVA, J. S. Secagem de café em combinação. *Revista Brasileira De Engenharia Agrícola E Ambiental*, v. 10, nº 3, p. 671–678, 2006.
- FREIRE, L. L. P., PETRI, I. J., Caracterização das propriedades físicas do *Coffea Arabica* L. Cv. *Topázio*. In: Anais da I Semana de Engenharia Química, 2022, Lavras.
- GEROMEL, L. B. & FREITAS, I. R. Aplicação da energia de micro-ondas para secagem da banana nanica (*Musa acuminata'dwarf cavendish'*) submetida ao processo de osmose. *Colloquium Exactarum*, v. 12, n. 1, p.1–10, 2020.

- GIDASPOW, D., BEZBURUAH, R., DING, J., Hydrodynamics of circulating fluidized beds, kinetic theory approach in fluidization, Proceedings of the 7th Engineering Foundation Conference on Fluidization, p. 75, 1992.
- GIOMO, G. S., RAZERA, L. F., GALLO, P. B. Beneficiamento e qualidade de sementes de café arábica. *Bragantia*, v. 63, n. 2, p. 291-297, 2004.
- EL HALAL, S. L. M. Composição, processamento e qualidade do café. 2017.
- HARRINGTON, J.F. Seed storage and longevity. In: Kozłowski, T.T. (Ed.) *Seed biology: insects, and seed collection, storage, testing, and certification*. v.3. New York: Academic Press, p.145-245, 1972.
- HELDMAN, D. R., HARTEL, R. W., *Principles of Food Processing*, Chapman & Hall, p. 1-218, 2000.
- HUANG, An-Ni; KAO, Wei-Chun; KUO, Hsiu-Po. Numerical studies of particle segregation in a rotating drum based on Eulerian continuum approach, *Advanced Powder Technol.*, v. 24, p. 364-372, 2013.
- 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.
- 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.
- KINGSTON, H. M.; WALTER, P. J.; CHALK, S.; LORENTZEN, E.; LINK, D. Environmental Microwave Sample Preparation: Fundamentals, Methods, and Applications. In: Kingston, H. M., S. J. Haswell (Eds.), *Microwave-Enhanced Chemistry: Fundamentals, Sample Preparation, and Applications*, Washington, DC: American Chemical Society, v. 8, p. 233-349, 1997.
- KRZYZANOWSKY, F. C.; FRANÇA NETO, J. B.; HENNING, A. A. Relatos dos testes de vigor disponíveis as grandes culturas. *Informativo ABRATES*, Brasília, v. 1, n. 2, p. 15-50, mar. 1991.
- LEE, A. Modelling the solids transport phenomena within flighted rotary dryers. 284 p. PhD thesis, James Cook University, 2008.
- LOPEZ, D. P. P; Simulação computacional de CFD de um pequeno trocador de calor de casco e tubo. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal da Integração Latino-americana, Foz do Iguaçu, 2017.

- LUN, C. K. K., SAVAGE S. B., D. J. JEFFREY, CHEPURNIY, N., Kinetic theories for granular flow: inelastic particles in couette flow and slightly inelastic particles in a general flow field. *J. Fluid Mech*, v. 140, p. 223–256, 1984.
- MAI, I. Utilizando um forno de microondas e um disco rígido de computador como laboratório de física. Dissertação (mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 143 p., 2008.
- MAITELLI, C. W. C. P., Simulação do escoamento monofásico em um estágio de uma bomba centrífuga utilizando técnicas de Fluidodinâmica Computacional. PPGCEP/UFRN - Natal - RN, 155 p. (dissertação de doutorado), 2010.
- 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.
- MESQUITA, C. M. de; REZENDE, J. E. de; CARVALHO, J. S.; FABRI JÚNIOR, M. A.; MORAES, N. C.; DIAS, P. T.; CARVALHO, R. M. de; ARAÚJO, W. G. de. *Manual do café: colheita e preparo (Coffea arábica L.)*. Belo Horizonte: EMATER-MG, 2016.
- MORAES, D. P., BIZZI, C. A., NÓBREGA, J.A., FLORES, E. M. M., NOGUEIRA A. R. A., BARIN, J. S., MESKO, M.F. Preparo de amostras assistido por radiação micro-ondas. In: F.J. Krug, F.R.P. Rocha (Eds.), *Métodos de Preparo de Amostras para Análise Elementar*. São Paulo: EditSBQ, p. 313-383, 2019.
- NEAS, E. D.; COLLINS, M. J. *Microwave Heating: Theoretical Concepts and Equipment Design*. In: Kingston, H. M., L. B. Jassie (Eds.), *Introduction to Microwave Sample Preparation: Theory and Practice*, Washington: American Chemical Society, p. 7-32, 1988.
- NASCIMENTO, S. M.; CAMPOS, G. A. S.; LIMA, D. M.; ÁVILA, L. F. G.; BARROZO, M. A. S.; DUARTE, C. R. Estudo experimental e de simulação CFD da dinâmica de partículas em tambores rotatórios com suspensores, In: *Anais do XX COBEQ - Congresso Brasileiro de Engenharia Química*, p. 1-8, Florianópolis – SC, 2014.
- 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.

- NETO, J. C. B.; SILVA, C. E. M. C.; PAULA, P. J. S.; COSTA, M. R. M. F.; NUCCI, E. R. Fluidodinâmica computacional aplicada a secagem do morango em secadores solar e micro-ondas. *Brazilian Journal of Development*, v. 5, n. 10, 2019.
- OLIVEIRA, P.D. de. Aspectos ultraestruturais e fisiológicos associados à qualidade da bebida de café arábica submetido a diferentes métodos de processamento e secagem, 108p., Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.
- PECORARO, E., DAVOLOS, M. R., JAFELICCI, M. Adaptações em forno de microondas doméstico para utilização em laboratório. *Química Nova*, v. 20, n. 1, p. 89-92, 1997.
- PERRY, R.H.; GREEN, D.W.; *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, 7th ed., McGraw-Hill, New York, 1997.
- PETRI, I. J. Descontaminação de cascalhos de perfuração utilizando um secador micro-ondas semi-industrial em regime contínuo. Dissertação (Doutorado), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.
- PIMENTA, C. J.; COSTA, L.; CHAGAS, S. J. de R. Peso, acidez, sólidos solúveis, açúcares e compostos fenólicos em café (*Coffea arabica* L.), colhidos em diferentes estádios de maturação. *Revista Brasileira de Armazenamentos*, Viçosa, n. 1, p. 23-30, 2000.
- PINHALENSE, SRE. Disponível em: <https://pinhalense.com.br/cafe/secagem/secadores/sre/>. Acesso em: 06 mai. 2023.
- PORTELLA, J. A.; EICHELBERGER, L. Secagem de grãos, Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2001.
- PRETE, C. E. C. Condutividade elétrica do exsudato de grãos de café (*coffea arabica* L.) e sua relação com a qualidade da bebida, 125 p., Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 1992.
- RABELLO, A. A., GOMES, F. C. O., MACHADO, A. M. R., GUIRLANDA, C. P. Estudo comparativo de processos de secagem de café em diferentes intervalos de exposição por micro-ondas. *Brazilian Journal of Development*, v. 8, n. 11, 71347–71355, 2022.
- REVOL, D. BRIENS, C. L., CHABAGNO, J. M., *The Design of Flights in Rotary Dryers*, *Powder Technology*, v.121, p. 230-238, 2001.

- RESENDE, O., ARCANJO, R. V., SIQUEIRA, V. C., RODRIGUES, S., Modelagem matemática para a secagem de clones de café (*Coffea canephora* Pierre) em terreiro de concreto. *Acta Scientiarum. Agronomy*, v. 31, n. 2, 189–196, 2009.
- RESENDE, I. A, MACHADO, M. V. C., DUARTE, C. R., BARROZO, M. A. S. An experimental analysis of coffee beans dynamics in a rotary drum, *The Canadian Journal Of Chemical Engineering*, v. 9999, 2017.
- REZENDE, J. E. Série Tecnológica Cafeicultura Preparo do Café: Via Seca e Via Úmida. Belo Horizonte: EMATER-MG, 2017.
- RIBEIRO, D. M.; BORÉM, F. M.; ANDRADE, E. T.; ROSA, S. D. V. F. Taxa de redução de água do café cereja descascado em função da temperatura da massa, fluxo de ar e período de pré-secagem. *Revista Brasileira de Armazenamento, Viçosa. Especial Café*, n. 7, p. 94-107, 2003.
- SAATH, R., TONON, K. C., RODRIGUEIRO, G. R. O., PEREIRA, J. T. S., Propriedades Físicas da massa granular dos cafés em função do teor de água dos grãos, *AGROFIB*, v.1, p. 95-107, 2019.
- SAEMAN, W. C.; MITCHELL, T. R. Jr. Analysis of rotary dryer and cooler performance. *Chem. Eng. Progress*. v. 50, p. 467-475, 1954.
- SCHAEFFER, D. G., Instability in the Evolution Equations Describing Incompressible Granular Flow. *J. Diff.* p. 19–50, 1987.
- SANTOS, D.A. Contribuições ao estudo da fluidodinâmica em leito de jorro- Estudos experimentais e de simulação via CFD. 106 p. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 106 p., 2011.
- SANTOS, D. A.; PETRI, I. J; DUARTE, C. R.; BARROZO, M. A. S. Experimental and CFD study of the hydrodynamic behavior in a rotating drum. *Powder Technology*, v. 250, 52–62, 2013.
- SANTOS, D. A. Estudo experimental e numérico da dinâmica de partículas em um tambor rotatório. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, 2015.
- SILVA, J. S.; AFONSO, A. D. L; DONZELLES, S. M.; NOGUEIRA, R. M. Secagem e secadores. Viçosa: Aprenda Fácil. p.109-146, 2008.
- SILVA, F. A., GONÇALVES, L. A. G., DAMIANI, C., GONÇALVES, M. Á. B., SOARES JÚNIOR, M. S., MARSAIOLI JÚNIOR, A. Estabilidade oxidativa de amêndoas de noz macadâmia secas por micro-ondas com ar quente. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 41, n. 2, p. 286–292, 2011.

- SILVA, F. R. G. B. da. Aplicação da fluidodinâmica computacional no estudo da secagem do farelo de soja em leito fluidizado. 2012.
- SILVA, J. de S.; LOPES, R. P.; VITOR, D. G.; DONZELES, S. M. L. Secador rotativo intermitente: projeto, construção e uso. Brasília: Embrapa, 2014.
- SindiCafé-MG – Sindicato da Indústria de Café do Estado de Minas Gerais. Disponível em: <http://sindicafe-mg.com.br/cafe-no-mundo>. Acesso em: 04 abr. 2023.
- SIQUEIRA, H. H, ABREU, C. M. P. Composição físico-química e qualidade do café submetido a dois tipos de torração e com diferentes formas de processamento, Ciênc. agrotec., Lavras, v. 30, n. 1, p. 112-117, 2006.
- SOUSA, A. P. M., CAMPOS, A. R. N., MACEDO, A. D. B., DANTAS, D. L., SILVA, A. P. F., COSTA, J. D., SANTANA, R. A. C. Modelagem Matemática da Secagem de Resíduo de Acerola em Forno de Micro-ondas. Brazilian Journal of Animal and Environmental Research, Curitiba, v. 3, n. 3, p. 1797-1806, 2020.
- 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.
- SOUZA, M. A. S. de, Aplicação de análise CFD em perfis aeronáuticos. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade de Taubaté, 41p., 2017.
- STROSKI P. N. O que são guias de ondas? ElectricalLibrary.com, 2018. Disponível em: <https://www.electricalibrary.com/2018/07/20/o-que-sao-guias-de-onda/>. Acesso em: 30 mar. 2023.
- SUNKARA, K.R.; HERZ, F.; SPECHT, E.; MELLMANN, J. Influence of flight design on the particle distribution of a flighted rotating drum. Chemical Engineering Science. v.90, p.101–109, 2013.
- VELEZ-PIEDRAHITA, S., CIRO-VELASQUEZ, H., OSORIO-SARAZ, J. LARGO-AVILA, E. Estudo do efeito da geometria de um secador solar típico para café com CFD. Rev. ing. univ. Medellín, v.18, n.35, p.149-161, 2019.
- VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The finite volume method. 2. ed. England: Pearson Education Limited, 2007.
- VIEIRA, J. S. Estudo de Propagação de Onda Eletromagnética em Estrutura Geológica Estratificada. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

VIEIRA, K. H., LIMA, F. R., MELO, R., PEREIRA, K. C., OLIVEIRA, C. D., MENDES, C. F., PINTO, N, A, V, D, SPUZA, P. M. Caracterização da farinha de semente de abóbora obtida por secagem em micro-ondas e estufa, *Brazilian Journal of Development*, v. 7, nº 3, p. 22267–22283, 2021.

WHITE, F. M., *Mêcnica dos Fluidos*, 6ª ed., Porto Alegre: AMGH, 2010.