

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia

Departamento de Engenharia Química

Tese de Doutorado

**Borra de café: análise da caracterização termoquímica, do processo de elutriação, secagem, peletização e da mistura com outros resíduos**

MSc. Thalyne de Almeida Ferreira Rocha

Orientador: Dr. José Teixeira Freire

São Carlos-SP

Abril, 2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia

Departamento de Engenharia Química

**Borra de café: análise da caracterização termoquímica, do processo de elutriação, secagem, peletização e da mistura com outros resíduos**

Manuscrito de defesa de tese de doutorado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos como parte dos requisitos para obtenção do título de doutora em Engenharia Química, área concentrada em Pesquisa e Desenvolvimento de Processos Químicos.

São Carlos-SP

Abril, 2023



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química

---

**Folha de Aprovação**

---

Defesa de Tese de Doutorado da candidata Thalyne de Almeida Ferreira Rocha, realizada em 27/04/2023.

**Comissão Julgadora:**

Prof. Dr. Jose Teixeira Freire (UFSCar)

Prof. Dr. Lucas Meili (UFAL)

Profa. Dra. Ariany Binda Silva Costa (UFES)

Profa. Dra. Maria do Carmo Ferreira (UFSCar)

Prof. Dr. Gustavo Dias Maia (UFSCar)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.

*À Santa Teresa de Ávila,  
autora da primeira tese que li,  
dedico.*

## **Agradecimentos**

Não foram poucas as vezes que durante esses quatro anos me percebi realmente grata, com uma consciência muito clara que recebi muito, mais do que algum dia poderia retribuir.

Gostaria de agradecer a Deus, que durante esse tempo contou comigo para coisas realmente grandes. A sempre doce Virgem Maria, que é uma mãe amável a qual recorro sem medo várias vezes. A São Josemaria Escrivá, que há 2 anos me acolheu por filha.

Aos meus pais, que cada dia vejo com mais clareza a generosidade dos seus corações, de um para o outro e para a nossa família. Ao meu querido irmão, por seu olhar ponderado e sensível à vida acadêmica. A toda a minha família, pela grande graça que é ter um lar e por ter crescido numa família grande e alegre. Aos meus amigos de Alagoas, do Centro de Secagem e da UFSCar, da Legião de Maria e do Centro Cultural Paineiras, por terem tornado os meus anos em São Carlos mais felizes.

Ao meu orientador, o grande professor Freire, pela sua generosidade e paciência, por ter confiado em mim muitas vezes e, em todas, mais do que eu mesma. Que mais do que um grande profissional, é uma grande pessoa. Com quem eu aprendi bastante sobre ser justo e leal, e mesmo assim, ter um olhar terno e humano. A professora Maria do Carmo, pela atenção e delicadeza, por quem eu sempre me senti acompanhada academicamente durante o mestrado e o doutorado. Ao professor Fábio Freire pelo entusiasmo com o tema de biocombustíveis. Aos professores Carlos Argolo, Roberaldo Carvalho e Altair Marques, porque a docência deles é uma inspiração para minha. Aos professores Ariany Binda, Lucas Meili e Gustavo Maia por terem aceitado participar da avaliação deste trabalho.

Aos técnicos Edilson Milaré, Oscar da Silva, Samuel Ferro e Rômulo, por terem sido solícitos e amistosos sempre que eu precisei de suporte técnico.

Ao Centro de Secagem e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da UFSCar pela estrutura e oportunidade e a CAPES pela concessão da bolsa de doutorado e apoio financeiro (Código 001).

**Transmitir as verdades divinas às inteligências humanas.**

**Não é este, porventura, um mistério digno dos anjos?**

Francisco Fernandez Carvajal

## Resumo

Para o reaproveitamento da borra de café, esta tese tem duas linhas principais, a primeira é avaliar o comportamento de degradação térmica, elutriação, secagem, pelletização e combustão da borra de café em função da sua granulometria e a segunda, é avaliar a influência da borra de café sobre bagaço de laranja e bagaço-de-cana, a partir de misturas, na fabricação e combustão de pellets combustíveis para o reaproveitamento de ambos os resíduos. Na primeira parte, foi identificada a influência da granulometria da borra sob o comportamento de combustão por análises de TG e DrTGA, além disso, que a borra se fragmenta gerando finos quando submetida à agitação do leito fluidizado e que o aumento da velocidade do ar, da temperatura, da amplitude e da frequência vibracional (em leito vibrofluidizado) favorece a elutriação do leito, bem como a secagem desse material. Foi verificado também que a secagem da borra de café de 45 % para 0,25 % de umidade (b.u.) ocorre no primeiro período de taxa decrescente, onde as condições externas de secagem controlam o processo, e que nesse intervalo o diâmetro do particulado não tem influência significativa na cinética de secagem. Com a borra seca, foram produzidos pellets combustíveis que tiveram excelentes resultados nos ensaios de qualidade, sendo tanto melhores quanto menor o diâmetro do particulado de borra de café que os constitui, devido à maior área superficial, que causa o aumento das forças sólido-sólido. Na segunda parte, foi constatado que a borra de café tem influência positiva na qualidade mecânica e térmica dos pellets das misturas com bagaço de cana e laranja, resultando numa melhora na resistência ao transporte e ao impacto, numa menor absorção de umidade e um aumento da energia liberada nas reações de combustão. As principais conclusões desta tese foram que as melhores condições de elutriação e secagem da borra de café em leito vibrofluidizado são as que favorecem a geração de finos para a produção de pellets mais resistentes com desempenho térmico semelhante, e além disso, que a borra de café pode ser utilizada em mistura com outros resíduos, como o bagaço de cana e laranja, para a produção de pellets com melhor qualidade.

Palavras-chave: borra de café; fluidização; vibrofluidização; pellets; combustão.

## Abstract

For the reuse of the spent coffee grounds, this thesis has two main strategies, the first is to evaluate its granulometry as a function of the thermal degradation behavior, the elutriation, drying process, pelletization and the spent coffee grounds combustion. And the second is to evaluate mixtures of spent coffee grounds with orange pomace and sugarcane bagasse in the production and the combustion of pellets. In the first part, the influence of the spent coffee grounds granulometry on the combustion behavior was identified by TG and DrTGA analyses, in addition, it was observed that the spent coffee ground breaks up, producing fines when it is submitted to agitation of the fluidized bed. Furthermore, increasing the air velocity, the temperature and the vibrational amplitude and frequency (in a vibrofluidized bed) favors the elutriation as well as the drying process of this material. It was also verified that the drying process of the spent coffee grounds, from 45% to 0.25% of moisture content (w.b.), occurs in the first period of decreasing rate, where the external drying conditions control the process. Also in this time interval, the particulate diameter does not have a significant influence on the drying behavior. With the dried spent coffee grounds, pellet fuels were produced with excellent results in the quality tests. Being that, better results were obtained when smaller was the particulate diameter, due to a greater surface area that leads to an increase in solid-solid forces. In the second part, it was found that spent coffee grounds have a positive influence on the mechanical and thermal quality of pellets of both mixture, sugarcane and orange bagasse. Improving transportation and impact resistance, less moisture absorption and an increase in the energy released in combustion reactions. The main conclusions of this thesis were that the best conditions for elutriation and drying of spent coffee grounds in a vibrofluidized bed are those that favor the generation of fines, which makes more resistant pellets with similar thermal performance. Moreover, spent grounds coffee can be used in a mixture with other wastes, such as sugarcane and orange bagasse, to produce better quality pellets.

Keywords: spent coffee grounds; fluidization; vibrofluidization; pellets; combustion.

## Lista de Figuras

Figura 1 - Geração de resíduos sólidos no Brasil entre os anos de 2012 e 2020. ....	24
Figura 2 - Resíduos gerados por categoria de atividade industrial no Brasil. ..	25
Figura 3 - Sólidos elutriados no leite fluidizado em função do tempo: com e sem formação de finos. ....	33
Figura 4 - Mecanismos de atrito e na distribuição do tamanho de partículas. .	33
Figura 5 - Curva de Secagem: umidade em função do tempo.....	35
Figura 6 - Taxa de secagem em função da umidade.....	36
Figura 7 - Estados do conteúdo líquido em um aglomerado: (a) estado pendular, (b) estado funicular, (c) estado capilar, (d) estado de gota.....	38
Figura 8 - Processo de secagem e aplicações de reuso da borra de café.....	44
Figura 9 - Diagrama de Tanner - usado para indicar a autocombustão de resíduos. ....	51
Figura 10 - Imagens dos materiais utilizados para fabricação dos pellets combustíveis: (a) borra de café, (b) bagaço de cana, (c) bagaço de laranja, (d) mistura bagaço de cana e borra de café e (e) mistura bagaço de laranja e borra de café. ....	56
Figura 11 - Secador de leite vibrofluidizado. ....	58
Figura 12 - Esquema do aparato experimental balança e estufa de convecção forçada.....	59
Figura 13 - Esquema da linha de combustão. ....	60
Figura 14 - Detalhes da geometria do combustor.....	61
Figura 15 - Combustor de aço inox construído pelo Centro de Secagem.....	61
Figura 16 - Moldes de aço para pellets cilíndricos.....	68
Figura 17 - Imagem da borra bruta com distribuição granulométrica inicial. ....	70
Figura 18 - Imagens de microscópio das partículas de borra de café.....	72
Figura 19 - Curvas de TGA e DrTGA de borra de café com 236µm em atmosfera oxidativa a taxa de aquecimento de 10°C/min. ....	73
Figura 20 - Curva de DTA de borra de café com 236µm em atmosfera oxidativa a taxa de aquecimento de 10°C/min. ....	74

Figura 21 - (a) perfil da TGA e (b) DrTGA para amostras de borra de café com 236, 450 e 610 $\mu$ m em atmosfera oxidativa a taxa de aquecimento de 10°C/min. ....	75
Figura 22 - DTA para amostras de borra de café com 236, 450 e 610 $\mu$ m em atmosfera oxidativa a taxa de aquecimento de 10°C/min. ....	78
Figura 23 - Curvas de TGA e DrTGA de borra de café com 450 $\mu$ m em atmosfera inerte a taxa de aquecimento de 10°C/min. ....	79
Figura 24 - (a) perfil da TGA e (b) DrTGA para borra de café de 450 $\mu$ m em atmosfera inerte. ....	81
Figura 25 - DTA para amostras de borra de café com 450 $\mu$ m em atmosfera inerte variando a taxa de aquecimento. ....	82
Figura 26 - Curvas de Calorimetria Exploratória Diferencial em função da temperatura. ....	83
Figura 27 - Porcentagem de massa de borra de café seca elutriada do leito em função do tempo. ....	86
Figura 28 - Porcentagem de massa de borra de café seca elutriada do leito em função do tempo: influência da massa inicial do leito. ....	87
Figura 29 - Imagem de microscópio da distribuição da borra de café (a) amostra original, (b) partículas retidas no leito e (c) partículas elutriadas após a cinética de elutriação a temperatura ambiente e 0,5m/s. ....	88
Figura 30 - Distribuição granulométrica do diâmetro médio das partículas para a borra inicial, a borra retida no leito e o elutriado. ....	89
Figura 31 - Porcentagem de massa de borra de café seca elutriada do leito em função do tempo: influência da velocidade de operação. ....	90
Figura 32 - Porcentagem de massa de borra de café seca elutriada do leito em função do tempo: influência da temperatura do leito. ....	91
Figura 33 - Porcentagem de massa de borra de café seca elutriada do leito em função do tempo: influência da frequência vibracional para (a) amplitude de vibração de 0,015m e (b) 0,003m. ....	93
Figura 34 – (a) Umidade em função do tempo de secagem e (b) taxa de secagem em função da umidade da borra de café em leito fluidizado variando temperatura e velocidade do ar de secagem. ....	95
Figura 35 - Umidade e temperatura em função do tempo de secagem à (a) 70°C e 0,5m/s; (b) 70°C e 0,75m/s; (c) 80°C e 0,5m/s; (d) 80°C e 0,75m/s. ....	96

Figura 36 - (a) e (b) Umidade em função do tempo de secagem e (c) e (d) taxa de secagem em função da umidade da borra de café em leito vibrofluidizado variando amplitude e frequência de vibração a 70 °C e 0,5 m/s. ....	99
Figura 37 - (a) e (c) Umidade e (b) e (d) taxa de secagem em função do tempo de secagem da borra de café em estufa de convecção forçada a 70°C variando velocidade do ar de secagem e granulometria da amostra. ....	101
Figura 38 - Umidade adimensional em função do tempo de secagem para a borra de café em estufa de convecção forçada para as amostras de 610 e 213 µm variando a velocidade do ar. ....	102
Figura 39 - (a) borra A; (b) borra B; (c) borra C. ....	106
Figura 40 - Ensaio de combustão de um pellet individual de borra A: (a) o pellet antes de iniciar o ensaio; (b) a primeira chama sendo formada, (c) toda a superfície do pellet em processo de combustão; (d) a queima do pellet sem combustível auxiliar com chama aparente; (e) a queima no interior do pellet após a chama ser apagada e (f) as cinzas finais e o material remanescente. ....	110
Figura 41 - Ensaio de combustão de um pellet individual de borra B: (a) o pellet antes de iniciar o ensaio; (b) a primeira chama sendo formada, (c) toda a superfície do pellet em processo de combustão; (d) a queima do pellet sem combustível auxiliar com chama aparente; (e) a queima no interior do pellet após a chama ser apagada e (f) as cinzas finais e o material remanescente. ....	111
Figura 42 - Ensaio de combustão de um pellet individual de borra C: (a) o pellet imediatamente antes de iniciar o ensaio; (b) a primeira chama sendo formada, (c) toda a superfície do pellet em processo de combustão; (d) a queima do pellet sem combustível auxiliar com chama aparente; (e) a queima no interior do pellet após a chama ser apagada e (f) as cinzas finais e o material remanescente. ....	111
Figura 43 - (a) perfil da TGA para amostras de borra de café B (BB), bagaço de laranja (BL) e bagaço de cana (BC) em atmosfera oxidativa a taxa de aquecimento de 10°C/min. ....	117
Figura 44 - Perfil DrTGA para amostras de borra de café (BB), bagaço de laranja (BL) e bagaço de cana (BC) em atmosfera oxidativa a taxa de aquecimento de 10°C/min. ....	118
Figura 45 - Perfil da DrTGA para amostras de borra de café (BB), bagaço de laranja (BL) e mistura (BB-BL) em atmosfera oxidativa a taxa de aquecimento de 10°C/min. ....	121

Figura 46 - Perfil da DrTGA para amostras de borra de café (BB), bagaço de cana (BC) e mistura (BB-BC) em atmosfera oxidativa a taxa de aquecimento de 10°C/min. ....	123
Figura 47 - (a) borra B; (b) bagaço de cana; (c) mistura 50% borra B/50% bagaço de cana; (d) mistura 50% borra B/50% bagaço de laranja; (e) bagaço de laranja. ....	124

## Lista de Tabelas

Tabela 1 - Equações de cinética de secagem. ....	39
Tabela 2 - Intervalos para o número de Biot. ....	41
Tabela 3 - Parâmetros de combustão para análise da TGA e DrTGA. ....	52
Tabela 3 - Tamanho do material utilizado para a fabricação dos pellets. ....	56
Tabela 5 - Condições operacionais dos ensaios de elutriação. ....	64
Tabela 6 - Combinações de amplitudes e frequências para ensaios de elutriação e adimensional de vibração. ....	65
Tabela 7 - Condições operacionais dos ensaios de secagem em batelada. ....	66
Tabela 8 - Dados de caracterização dimensional da borra bruta para 328 partículas. ....	71
Tabela 9 - Intervalos de temperatura de cada estágio do processo de combustão e porcentagem de umidade e cinzas calculados. ....	75
Tabela 10 - Características do processo de combustão de borra de café. ....	76
Tabela 11 - Reatividade da borra de café por estágio de combustão. ....	77
Tabela 12 - Dados de temperatura de pico ou intervalos de decomposição da pirólise da borra de café em diferentes condições: comparação com a literatura. ....	80
Tabela 13 - Intervalos de temperatura de cada estágio do processo de pirólise e conteúdo de matéria volátil da região de pirólise ativa e cinzas mais carbono fixo calculados para a borra de café de 450 µm. ....	80
Tabela 14 - Dados de dimensão do material particulado. ....	88
Tabela 15 - Dados de dimensão do material particulado: influência da temperatura. ....	92
Tabela 16 - Diâmetro médio do elutriado e retido no para o processo de elutriação em leito vibro fluidizado. ....	94
Tabela 17 - Parâmetros dos modelos de cinética de secagem e coeficientes de determinação. ....	103
Tabela 18 - Número de Biot, Difusividade efetiva e R <sup>2</sup> para as condições de secagem em estufa convectiva. ....	104
Tabela 19 - Dimensões dos pellets de borra de café produzidos. ....	106

Tabela 20 - Medidas de resistência e durabilidade dos pellets de borra de café. .....	107
Tabela 21 - Resistência à compressão dos pellets de borra de café.....	109
Tabela 22 - Características de queima dos pellets individuais. ....	112
Tabela 23 – Estimativa do calor liberado na combustão de 1 pellet de 5 g a vazão de ar de 31 L/min (desvio padrão de $\pm 7$ kJ). ....	113
Tabela 24 – Estimativa do calor liberado na combustão de 1 pellet de borra B com variação da vazão de ar (desvio padrão de $\pm 7$ kJ). ....	113
Tabela 25 - Composição elemental da borra de café B (BB), bagaço de laranja (BL) e do bagaço de cana (BC).....	116
Tabela 26 - Calor liberado pelos materiais em atmosfera oxidante obtidos por análises de DSC. ....	116
Tabela 27 - Intervalos de temperatura de cada estágio do processo de combustão e porcentagem de umidade e cinzas calculados.....	119
Tabela 28 - Dimensões dos pellets produzidos. ....	125
Tabela 29 - Medidas de resistência e durabilidade dos pellets.....	126
Tabela 30 - Resistencia a compressão para borra de café B, bagaço de cana e mistura BC/BB. ....	128
Tabela 31 - Características de queima dos pellets individuais. ....	129
Tabela 32 – Estimativa do calor liberado na combustão de 1 pellet de 5 g. ...	130

## Lista de Quadros

Quadro 1 - Estudos da aplicação da borra de café com finalidade energética.	28
Quadro 2 - Continuação do Quadro 1 - Estudos da aplicação da borra de café com finalidade energética. ....	29
Quadro 3 - Estudos de secagem da borra de café. ....	46
Quadro 4 - Continuação do Quadro 3 - Estudos de secagem da borra de café. ....	47

## Nomenclatura

A	Amplitude de vibração	m
Bi	Número de Biot	-
$c_p$	Calor específico	kJ/g
$D_{ef}$	Difusividade efetiva	m <sup>2</sup> /s
$d_p$	Diâmetro médio da partícula	μm
$d_m$	Diâmetro médio da peneira	μm
$d_s$	Diâmetro médio de Sauter	μm
f	Frequência de vibração	Hz
g	Aceleração da gravidade	m/s <sup>2</sup>
$h_m$	Coeficiente convectivo de transferência de massa	m/s
N	Número de pontos experimentais	
t	Tempo	s
X	Conteúdo de umidade	-
XR	Adimensional de umidade	-

## Subscrito

cr	Crítico
exp,i	Dado experimental i
f	Dado final
pre,i	Dado previsto i
s	Superfície
t	Dado no tempo t
u	Úmido
0	Inicial
∞	Equilíbrio

## Símbolos Gregos

Γ	Adimensional de vibração	-
---	--------------------------	---

## Abreviaturas

BB	Borra de café de diâmetro médio 400 μm
----	--

BC	Bagaço de cana-de-açúcar
BL	Bagaço de laranja
b.u.	Base úmida
DrTGA	Análise Termogravimétrica Diferencial
DSC	Calorimetria Exploratória Diferencial
TGA	Análise Termogravimétrica

## Sumário

<b>1.</b>	<b>Introdução</b>	20
<b>2.</b>	<b>Revisão Bibliográfica</b>	23
<b>2.1.</b>	<b>Resíduos Sólidos</b>	23
2.1.1.	Geração de Resíduos Sólidos	23
2.1.2.	Borra de café	26
2.1.3.	Bagaço de laranja	30
2.1.4.	Bagaço de cana	31
<b>2.2.</b>	<b>Elutriação</b>	32
<b>2.3.</b>	<b>Secagem</b>	34
2.3.1.	Fundamentos de secagem	34
2.3.2.	Secador de leito vibrofluidizado	41
2.3.3.	Secagem da borra de café	43
<b>2.4.</b>	<b>Produção de pellets combustíveis</b>	48
<b>2.5.</b>	<b>Combustão de biomassas</b>	49
<b>3.</b>	<b>Materiais e Métodos</b>	55
<b>3.1.</b>	<b>Materiais</b>	55
<b>3.2.</b>	<b>Equipamentos</b>	57
<b>3.3.</b>	<b>Métodos</b>	62
3.3.1.	Caracterizações	62
3.3.2.	Análise Elementar	62
3.3.3.	Análise granulométrica	62
3.3.4.	Análises térmicas	63
3.3.5.	Elutriação	64
3.3.6.	Secagem em leito vibrofluidizado	65
3.3.7.	Secagem em estufa de convecção forçada	66

3.3.8.	Produção e caracterização dos pellets.....	67
3.3.9.	Ensaio de combustão.....	69
<b>4.1.</b>	<b>Caracterização física</b> .....	<b>70</b>
<b>4.2.</b>	<b>Caracterização térmica da borra de café</b> .....	<b>72</b>
4.2.1.	Características de degradação térmica sob atmosfera oxidativa.....	72
4.2.2.	Características de degradação térmica sob atmosfera inerte .....	78
<b>4.3.</b>	<b>Elutriação</b> .....	<b>85</b>
4.3.1.	Mecanismos de formação de finos .....	85
4.3.2.	Influência da velocidade na elutriação.....	90
4.3.3.	Influência da temperatura na elutriação .....	91
4.3.4.	Influência das condições vibracionais do leito na elutriação .....	92
<b>4.4.</b>	<b>Secagem</b> .....	<b>95</b>
4.4.1.	Secagem da borra de café em leito fluidizado.....	95
4.4.2.	Secagem da borra de café em leito vibrofluidizado .....	98
4.4.3.	Secagem da borra de café em estufa de convecção forçada em função da granulometria .....	100
<b>4.5.</b>	<b>Produção de Pellets de borra de café</b> .....	<b>106</b>
4.5.1.	Produção e parâmetros de qualidade dos pellets de borra de café ...	106
4.5.2.	Ensaio de combustão dos pellets de borra de café .....	109
<b>4.6.</b>	<b>A influência da borra de café na caracterização e produção de pellets de bagaço de laranja e bagaço de cana-de-açúcar</b> .....	<b>115</b>
4.6.1.	Caracterização dos resíduos puros e misturas.....	115
4.6.2.	Caracterização térmica .....	117
4.6.3.	Produção e parâmetros de qualidade dos pellets de misturas .....	124
4.6.4.	Ensaio de combustão .....	129
<b>5.</b>	<b>Conclusões</b> .....	<b>132</b>
<b>6.</b>	<b>Sugestão de trabalhos futuros</b> .....	<b>135</b>
	<b>Referências Bibliográficas</b> .....	<b>136</b>

## 1. Introdução

O café é um dos mais importantes commodities agrícolas do mundo. Em 2020 a produção mundial atingiu 169 milhões de toneladas de sacas do grão<sup>1</sup>, dos quais o Brasil, maior produtor mundial, produziu cerca de 63 milhões (ICO, 2021). Aproximadamente metade da produção é encaminhada à indústria do café solúvel e a outra parte aos lares e cafeterias, em ambos os destinos se objetiva a fabricação da bebida a partir do grão. Neste processo de fabricação da bebida, a borra de café é gerada como principal resíduo (MUSSATTO *et al.*, 2011). A borra tem caráter tóxico devido à presença de cafeína, taninos e polifenóis (MUSSATTO *et al.*, 2011), sua alta carga de matéria orgânica a torna um resíduo poluente e que requer alta demanda de oxigênio para se degradar (SILVA *et al.*, 1998). Dessa forma, estes fatores inviabilizam seu descarte em aterros sanitários.

Por outro lado, a borra de café tem na sua estrutura química componentes como lignina, celulose e hemicelulose (MUSSATTO *et al.*, 2011) que caracterizam alto conteúdo de carbono na sua constituição. A borra tem poder calorífico próximo a 20 MJ/kg (KANG *et al.*, 2017), baixo teor de cinzas e alta porcentagem de matéria volátil (TSAI; LIU; HSIEH, 2012) quando seca. Tais características se assemelham à de outros resíduos agrícolas amplamente utilizados como combustíveis sólidos (JENKINS *et al.*, 1998). Neste sentido, estudos apontam a viabilidade da queima direta da borra de café na forma de pó, em pellets de borra pura e com mistura borra/serragem (KANG *et al.*, 2017; LIMOUSY *et al.*, 2015).

Para a queima direta, a borra de café é utilizada como matéria-prima a aproximadamente 25% de umidade (b.u.) (SILVA *et al.*, 1998). No entanto, a borra sai do processo de fabricação da bebida com umidade em torno de 80% (b.u.) (SILVA *et al.*, 1998). Essa umidade é reduzida até 45-38% por compressão mecânica e, em seguida, até valores mais baixos por secagem térmica (ROCHA; FERREIRA; FREIRE, 2021; EFTHYMIPOULOS *et al.*, 2018; SILVA *et al.*, 1998). Assim, a redução da umidade é um fator essencial para que o balanço térmico do processo seja alcançado e para a viabilidade da reutilização desse

---

<sup>1</sup> 1 saca de grãos de café tem 60kg.

resíduo conseqüentemente. O secador de leito fluidizado e vibrofluidizado são alternativas promissoras para secagem de resíduos de biomassa, principalmente, porque, além de secar o resíduo, permite classificar a granulometria do material devido à sua configuração. Essas características são importantes para a fabricação de pellets combustíveis porque a degradação térmica e a compactação têm dependência simultânea significativa da umidade e da distribuição granulométrica do material (PENG *et al.*, 2012). Além disso, a adição de vibração mecânica ao leito fluidizado melhora a qualidade da fluidização, a eficiência de secagem e o contato sólido-fluido (MORENO; RIOS; CALBUCURA, 2007; LAW; MUJUMDAR, 2006).

A fabricação de pellets combustíveis, a partir de biomassas, vem sendo cada dia mais utilizada, uma vez que a compactação do resíduo promove maior densidade energética, resistência e durabilidade para o material (PRADHAN; MAHAJANI; ARORA, 2018). Estudos iniciais mostram que a borra pura produz pellets combustíveis com boas qualidades de resistência (NOSEK; TUN; JUCHELKOVA, 2020) e que, quando misturado à serragem, suas características de queima são melhoradas (KANG *et al.*, 2017; LIMOUSY *et al.*, 2015). No entanto, não foram encontrados estudos que mostrem simultaneamente a influência da distribuição granulométrica da borra sobre as características de queima do pellet e sobre os parâmetros de qualidade, bem como não foram encontrados estudos que mostrem a influência da borra sobre outros resíduos lignocelulósicos, além da serragem. Por outro lado, o bagaço-de-cana e o bagaço de laranja também são resíduos de duas grandes culturas de produção com potencial de recuperação energética, de modo que a mistura desses resíduos pode ser uma alternativa promissora para o reaproveitamento de ambos.

Assim, o objetivo desta tese é avaliar como os parâmetros vibracionais e térmicos do leito vibrofluidizado influenciam no processo de elutriação e secagem da borra de café tendo em vista a recuperação energética desse resíduo por combustão. E, partindo da borra de café seca, avaliar a qualidade mecânica e o desempenho de combustão dos pellets de borra pura, em função da sua granulometria, e a influência da borra de café em misturas com bagaço de cana e bagaço de laranja a fim de promover a recuperação dos resíduos de

forma associada. Este objetivo geral foi alcançado por meio dos seguintes objetivos específicos: (i) avaliar a caracterização física e termoquímica da borra de café em função da granulometria por análises termogravimétricas; (ii) avaliar como os parâmetros de vibração mecânica do leito (frequência e amplitude), a temperatura e a velocidade do ar influenciam a elutriação e a secagem da borra de café em leito fluidizado e vibrofluidizado; (iii) identificar os mecanismos de formação de finos no leito, caso existam; (iv) avaliar como a distribuição granulométrica da borra influencia nos parâmetros de qualidade de resistência mecânica e queima dos pellets fabricados e (v) avaliar a influência da borra de café sobre bagaço de cana e bagaço de laranja para a produção de pellets combustíveis a partir de misturas.

## **2. Revisão Bibliográfica**

### **2.1. Resíduos Sólidos**

#### **2.1.1. Geração de Resíduos Sólidos**

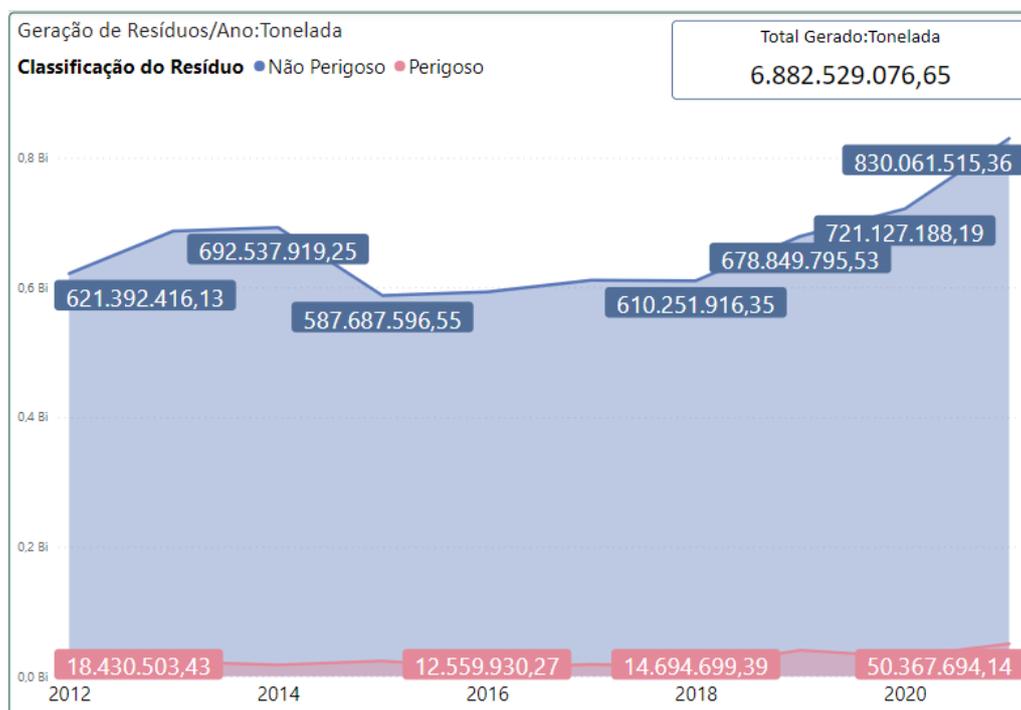
À medida que aumenta o consumo da população, aumenta também a demanda de matéria-prima e seu processamento para geração de produtos de consumo final. No entanto, o processo de transformação da matéria-prima, entre outros aspectos, inclui o consumo de energia associado ao processamento e a geração de resíduos, rejeitos do processo. Assim, o aumento da produção, de modo geral, implica no aumento de geração de resíduos, nesse sentido cada vez mais são necessárias alternativas para gerenciar a disposição desses rejeitos finais.

Existem vários tipos de resíduos, dentre eles os resíduos urbanos, resíduos do serviço de saúde, resíduos da construção civil, os resíduos industriais e outros (SINIR, 2023). E diferentes formas de tratamento e destino final conforme a sua origem e periculosidade. As atividades industriais, especificamente, geram os mais diversos tipos de resíduos com diferentes características, dependendo das atividades que os origina como o setor metalúrgico, químico, petroquímico, celulose e papel, alimentício, mineração etc. De modo geral, pode-se classificar como resíduos de processo: resíduos de operações de controle de poluição ou descontaminação, materiais adulterados, materiais e substâncias resultantes de atividades de remediação de solo contaminado, resíduos da purificação de matérias-primas e produtos, cinzas, lodos, óleos, resíduos alcalinos ou ácidos, plásticos, papel, madeira, fibras, borracha, metal, escórias, vidros e cerâmicas (PAIXÃO, 2012).

Para melhor gerenciar os resíduos sólidos gerados no Brasil, foi criado o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) em 2012, com implementação de longo prazo em todo território nacional. Desde então, estão disponíveis no site do IBAMA os dados do gerenciamento de resíduos como os da Figura 1, onde é apresentada a quantidade total de resíduos perigosos e não-perigosos gerados no Brasil por ano. Pode-se observar que em 2020, foram produzidos cerca de 0,8 bilhões de toneladas de resíduos não perigosos, a estes resíduos, o PNRS

prevê o tratamento, reutilização, reciclagem e recuperação como caminhos para o aproveitamento do resíduo antes da disposição final.

Figura 1 - Geração de resíduos sólidos no Brasil entre os anos de 2012 e 2020.

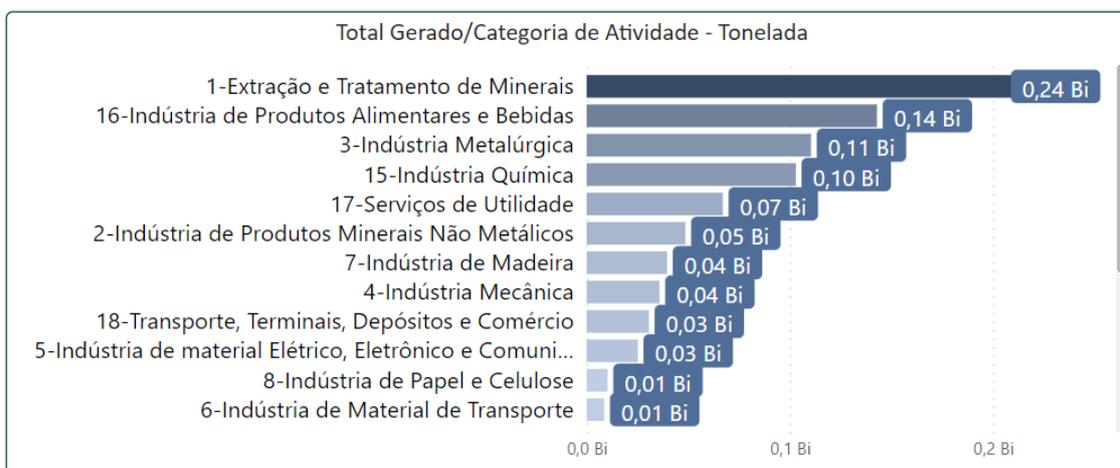


Fonte: IBAMA (2023)

Na Figura 2 são apresentadas as atividades industriais que mais geraram resíduos em 2021 no Brasil. Observa-se que a indústria de produtos alimentícios e de bebidas fica atrás somente da atividade de extração e tratamento de minerais com 0,14 e 0,24 bilhões de toneladas cada, respectivamente. Os resíduos das indústrias de alimentos, em geral, consistem principalmente dos resíduos vegetais ou animais da matéria-prima base da categoria, e de rejeitos associados ao processo industrial como resíduos dos sistemas água e resíduos dos tratamentos dos efluentes dos processos (IBAMA, 2023). Com a diversidade da natureza dos resíduos, também existem as mais variadas possibilidades de reuso, reciclagem e recuperação, tendo em vista a rentabilidade do processo, a conformidade com a legislação ambiental e os interesses inerentes à cada indústria. Uma possibilidade para reutilização dos resíduos lignocelulósicos,

muito característico das indústrias alimentícias, é o tratamento térmico desses resíduos. Com isso, é possível fazer uma significativa valorização energética do material.

Figura 2 - Resíduos gerados por categoria de atividade industrial no Brasil.



Fonte: IBAMA (2023)

O tratamento térmico de resíduos inclui a incineração, a gaseificação e a pirólise. Estes tratamentos têm três objetivos principais: a destruição dos componentes orgânicos, a redução do volume de resíduos, a serem encaminhados para a disposição final, e reaproveitar a energia calorífica contida neles, transformando-a em eletricidade ou vapor (PAIXÃO, 2012). Esta é uma prática utilizada comumente em indústrias que possuem caldeiras.

Com a finalidade de avaliar a recuperação energética de resíduos de indústrias alimentícias a borra de café foi adotada como resíduo principal, da qual foram estudados os processos anteriores à recuperação energética por combustão (elutriação, secagem e pelletização que são apresentados nesta revisão). Com o intuito ainda de avaliar a influência da borra de café sobre outros resíduos e promover o reaproveitamento térmico simultâneo foram escolhidos o bagaço de laranja e o bagaço de cana como resíduos secundários na etapa final do trabalho. O bagaço de cana foi escolhido como referência por já ser amplamente utilizado como fonte renovável de energia térmica e elétrica e o bagaço de laranja por ainda estar em fase incipiente da sua valorização

energética. Neste sentido, um panorama atual desses três resíduos é apresentado nos tópicos seguintes.

### 2.1.2. Borra de café

O café é um dos mais importantes commodities agrícolas do mundo e o Brasil, maior produtor mundial, produziu cerca de 63 milhões de sacas em 2020 (ICO, 2021). Aproximadamente metade da produção é encaminhada à indústria do café solúvel e a outra parte aos lares e cafeterias. Em ambos os processos (industrial e doméstico), a borra de café é o principal resíduo gerado (MUSSATTO *et al.*, 2011). Contudo, para a indústria do café solúvel, estima-se que são gerados 2 kg de borra de café para cada 1kg de café solúvel produzido (SILVA *et al.*, 1998), que precisa ser tratada e descartada.

Quimicamente, a borra de café tem caráter tóxico devido à presença de cafeína, taninos e polifenóis (MUSSATTO *et al.*, 2011) e tem alta carga de matéria orgânica, essas características a tornam um resíduo poluente e que requer alta demanda de oxigênio para se degradar (SILVA *et al.*, 1998), inviabilizando seu descarte direto em aterros sanitários. Por outro lado, a borra de café tem na sua estrutura química componentes como lignina, celulose e hemicelulose (MUSSATTO *et al.*, 2011) que lhe conferem alto conteúdo de carbono na sua constituição, poder calorífico próximo a 20MJ/kg (KANG *et al.*, 2017), baixo teor de cinzas e alta porcentagem de matéria volátil (TSAI; LIU; HSIEH, 2012) quando seca, que se assemelham à de outros resíduos agrícolas amplamente utilizados como combustíveis sólidos (JENKINS *et al.*, 1998).

Dadas estas características que mostram possível potencial da borra de café para a produção de energia, no Quadro 1 são apresentadas referências dos últimos anos que estudaram esta aplicação. Os estudos, em sua maioria, avaliam a borra pura, em pó, em processos de combustão e pirólise para a recuperação energética. Esses trabalhos mostram resultados de recuperação energética satisfatório em escala de laboratório e pequena escala e apontam positivamente para a viabilidade da reutilização da borra de café com esta finalidade.

São encontrados estudos também que propõem a utilização da borra de café misturada com serragem, a mistura formando um combustível sólido novo com propriedades de queima melhores (JEGUIRIM; LIMOUSY; DUTOURNIE, 2014; LIMOUSY *et al.*, 2013a, 2015). Já outros estudos propõem a utilização da borra após um processo de pelletização, visando obter maior densidade energética do material (LISOWSKI *et al.*, 2019). Embora existam estudos apresentados no Quadro 1, observa-se que não são encontrados estudos associados dos processos de elutriação, secagem, pelletização e combustão simultâneos da borra de café. Bem como, os estudos que propõem a misturas sempre tratam da composição binária borra de café e serragem, com resultados de desempenho melhorados para a borra de café, em detrimento do desempenho da serragem. Assim, ainda se encontra um vasto campo de desenvolvimento para a avaliação da influência da borra de café sobre outros resíduos no desempenho de combustão.

Quadro 1 - Estudos da aplicação da borra de café com finalidade energética.

Autor	Matéria-prima		Forma		Processo				
	Pura	Mistura	Pellet	pó	Combustão	Pirólise	Torrefação	Pelletização	Secagem
TSAI et al. 2012	x			x		x			
CHEN et al. 2012	x			x			x		
LIMOUSY et al., 2013	x	x	x		x				
TSAI et al. 2012	x			x			x		
LI et al. 2014	x			x		x			
JEGUIRIM et al. 2014	x	x	x		x	x			
LIMOUSY et al., 2015	x	x	x		x				
GÓMEZ-DE LA CRUZ et al., 2015	x			x					x
KELKAR et al., 2015	x			x		x			
KANG et al., 2017	x			x	x				x
ALLESINA et al., 2017	x	x		x	x				
LISOWSKI et al., 2019	x		x					x	

Quadro 2 - Continuação do Quadro 1 - Estudos da aplicação da borra de café com finalidade energética.

Autor	Matéria-prima		Forma		Processo				
	Pura	Mistura	Pellet	pó	Combustão	Pirólise	Torrefação	Pelletização	Secagem
VAKALIS et al., 2019	x			x		x	x		
GÓMEZ-DE LA CRUZ et al., 2020	x			x					x
TUN et al., 2020	x			x					x
FU e CHEN, 2020		x	x						x
ROCHA et al., 2021	x			x					x

### 2.1.3. Bagaço de laranja

A laranja é uma das frutas mais populares do mundo, sua produção em 2021/2022 atingiu 76,2 milhões toneladas da produção mundial, sendo o Brasil o maior produtor com cerca de 17 milhões de toneladas (CITRUSBR, 2023). Parte da produção de laranja é processada para a fabricação de suco de caixa, que em 2020/2021 rendeu cerca de 861 mil toneladas de suco (CITRUSBR, 2023), sendo que o principal resíduo desse processo é o bagaço da laranja.

O bagaço da laranja é a fração da fruta que sobra depois da extração da polpa e constitui cerca de 50% da fruta fresca (SILES *et al.*, 2016). Essa fração é constituída por pedaços da casca, caroço e a polpa remanescente, o que confere uma natureza química e fisicamente heterogênea ao material. Esse resíduo é ácido, com pH em torno de 3; tem alto conteúdo de umidade, entre 79 e 86% (b.u.) e alto conteúdo de matéria orgânica, próximo a 95% dos sólidos totais (ALVAREZ *et al.*, 2018; PERAZZINI *et al.*, 2013). Essas características dificultam o descarte desse resíduo, porém, a alta carga orgânica e o poder calorífico de 18,5 kJ/kg apontam um potencial desse resíduo para aplicações energéticas (DYJAKON *et al.*, 2019).

No entanto, o alto conteúdo de umidade é um fator relevante para a recuperação da energia térmica, como já falado para a borra de café. Para a laranja, esse ponto é ainda mais complicado, porque a água presente no bagaço da laranja está dentro de uma estrutura complexa de polissacarídeos de estruturas de pectina, que pela presença de ácidos carboxílicos e ésteres, tendem a reter água por pontes de hidrogênio formando gel (YAMAKITA; NAKASHIMA, 2018). Devido a essa característica, a redução do conteúdo de água do bagaço da laranja é feita em duas etapas: o tratamento com CaO para quebra das ligações de água associado ao desagüe mecânico e a secagem térmica (BARBOSA *et al.*, 2020).

Uma vez o resíduo seco, Vamvuka *et al.* (2012) avaliaram o processo de combustão da casca da laranja em um combustor de leito fluidizado com excesso de oxigênio. Eles obtiveram temperaturas no leito de combustão entre 800 e 850 °C, com eficiência de combustão entre 97,60 e 98,58 %, emissões de CO e NO<sub>x</sub> dentro da legislação ambiental da União Europeia e emissões de SO<sub>x</sub> nulas.

Assim, esses resultados sugerem que não só a casca da laranja, mas o bagaço da laranja como um todo é uma matéria-prima promissora para a produção de energia por combustão, com emissões dentro da legislação, no entanto estudos neste campo específico ainda são escassos.

#### 2.1.4. Bagaço de cana

O bagaço de cana é um resíduo sólido da produção de açúcar e álcool que tem por matéria-prima a cana-de-açúcar. A cana de açúcar é a maior cultura primária produzida no mundo, correspondendo a 20% da produção total em 2020 (1,9 bilhões de toneladas) (FAO, 2022). Nesse contexto, o Brasil lidera o ranking de maior produtor do mundo com uma produção de cerca de 0,7 bilhões de toneladas, seguido pela Índia e China (FAO, 2022).

Tanto na produção de açúcar quanto de álcool, inicialmente, o caldo (solução rica em açúcares) é extraído da cana por compressão ou difusão, gerando um resíduo fibroso remanescente, que chamamos de bagaço. Cada tonelada de cana processada resulta na geração de 0,3 ton de resíduo (HOFSETZ; SILVA, 2012). O bagaço de cana-de-açúcar é utilizado para a geração de vapor necessária à usina de açúcar e à destilaria de álcool, e para geração de energia elétrica. De modo que, diferente da borra de café e do bagaço de laranja, a incorporação da recuperação energética do bagaço já é totalmente implementada ao processo.

O bagaço de cana é um composto lignocelulósico que tem composição média de 42,2% celulose, 27,3% hemicelulose, 2,6% lignina, 5,6% extratos, 2,8% de cinzas e poder calorífico de em torno de 18,1 MJ/kg com umidade próxima a 50% (b.u.), essas características lhe conferem boas qualidades de biocombustível (ROCHA *et al.*, 2015). Além disso, o bagaço de cana pode ser estocado por longo tempo em forma de pellets que melhoram sua densidade energética e uniformidade (DE PALMA *et al.*, 2019).

Assim, como o bagaço de cana é um resíduo sólido de uma indústria alimentícia que é amplamente utilizado como fonte renovável de energia térmica e elétrica, por isso ele foi considerado como referência em relação à borra de

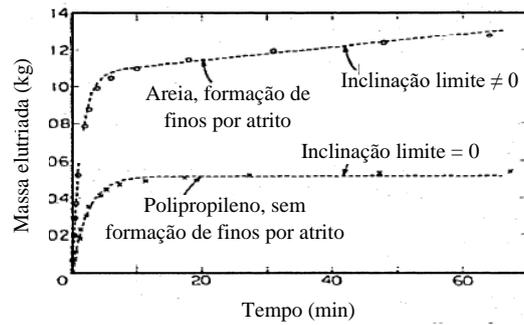
café e ao bagaço de laranja, que ainda estão em fase inicial da sua reutilização com fins energéticos. Para os objetivos dessa tese, foi adotada a borra de café como resíduo principal e por isso apenas dela foram estudados os processos que antecedem à combustão: elutriação, secagem e pelletização. Em uma segunda parte, foi avaliado a influência da borra de café quando misturada com bagaço de laranja e de cana nos processos de pelletização e combustão. Deste modo, os tópicos seguintes tratam dos processos de elutriação e secagem em seus fundamentos e com aplicação apenas para a borra de café especificamente.

## **2.2. Elutriação**

A elutriação das partículas acontece quando a velocidade do gás para movimentação completa do leito de sólidos de ampla distribuição granulométrica (como é o caso da borra de café) excede a velocidade terminal das partículas menores do sólido, resultando no seu arraste. Deste modo, o processo de elutriação é particularmente importante na avaliação de leitos de secagem fluidizado, em que ar quente pode arrastar o particulado fino modificando a dinâmica interna do leito.

Na Figura 3 é apresentado o gráfico clássico para descrever processos de elutriação, a massa elutriada (de areia e polipropileno) em função do tempo de operação. Colakyan e Levenspiel (1984) observaram que quando não há geração de finos por atrito dentro do leito a massa elutriada torna-se constante depois de certo tempo de ensaio, e que quando há uma geração contínua de sólido a curva tende a ser crescente. De modo que, na Figura 3 pode ser identificado que durante a elutriação da areia há geração de finos por ser um sólido friável, enquanto que na elutriação do polipropileno não.

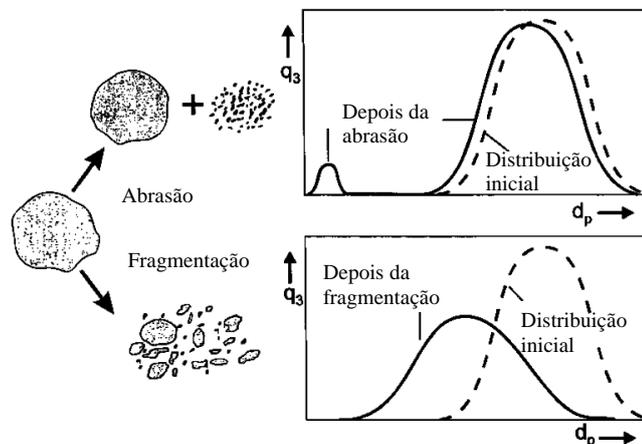
Figura 3 - Sólidos elutriados no leito fluidizado em função do tempo: com e sem formação de finos.



Fonte: Adaptada de Colakyan e Levenspiel (1984)

A geração de finos dentro do leito pode ocorrer por diferentes mecanismos, desde a abrasão pura até a fragmentação total. No mecanismo de abrasão as asperezas mais acentuadas da partícula são removidas pelos choques das partículas entre si, das partículas e a parede e da movimentação causada pela passagem do ar. Assim, a abrasão gera elutriados muito finos e pouco altera a distribuição do particulado inicial. Já no mecanismo fragmentação a partícula se quebra em partículas menores, resultando no aumento do número de partículas no leito e distribuição de tamanho mais amplo. A influência desses dois mecanismos na distribuição de partículas é apresentada no esquema da Figura 4.

Figura 4 - Mecanismos de atrito e na distribuição do tamanho de partículas.



Fonte: Wen-Ching Yang (2003)

A presença ou a geração de finos pode acarretar eventuais problemas em um leito de secagem. Como, por exemplo, o aumento dos custos de operação por causa da necessidade de equipamentos posteriores para prevenir a poluição do ar e dificuldades no controle do processo (CHANG *et al.*, 2005). Além disso, a elutriação das partículas finas também pode modificar as características de fluidização do leito (COLAKYAN; LEVENSPIEL, 1984) e influenciar os parâmetros de qualidade dos pellets combustíveis produzidos a partir das partículas elutriadas, bem como suas características de combustão. Neste contexto, existe uma considerável literatura correlacionando a constante de elutriação com parâmetros de operação como temperatura e velocidade do ar, diâmetro e densidade de partículas para diversos materiais para o leito fluidizado convencional (CHANG *et al.*, 2005) com a finalidade de melhorar condições de controle do processo. No entanto, não são claras como as modificações feitas ao leito, como a imposição de vibração mecânica pelas variações de amplitude e frequências vibracionais, afetam a elutriação das partículas e os mecanismos de geração de finos. E, se tratando de leito fluidizados de biomassa, é necessário investigar como essas modificações alteram as características do material particulado, influenciando as etapas posteriores de pelletização e combustão.

## **2.3. Secagem**

### **2.3.1. Fundamentos de secagem**

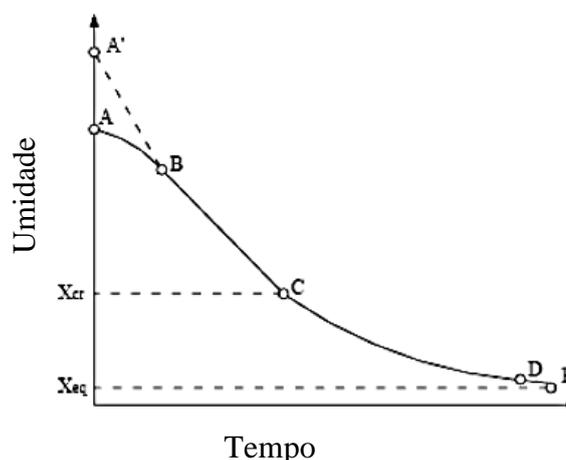
Secagem, de maneira geral, é a remoção de água (ou outro líquido) existente em um material sólido. No entanto, a rigor, processos de secagem, propriamente ditos, são apenas aqueles que envolvem retirada de uma quantidade de água relativamente pequena pela transferência simultânea de calor e massa (STRUMILLO; KUDRA, 1986).

O comportamento de secagem de um determinado material pode ser descrito pela medida da perda de umidade em função do tempo, a qual chamamos de cinética de secagem (Figura 5), ou pela taxa de secagem em função do tempo (Figura 6). Estas curvas, mostram analogamente três períodos característicos dos processos gerais de secagem. O período de A-B ou A'-B é chamado de período de secagem inicial e consiste na estabilização da

temperatura do material úmido com a temperatura do ar de secagem. Quando o ar de secagem é mais quente que sólido tem-se o comportamento descrito por A-B, na Figura 6, uma curva crescente. Se o ar de secagem está a uma temperatura inferior então esse período passa a ser decrescente, simbolizado por A'-B.

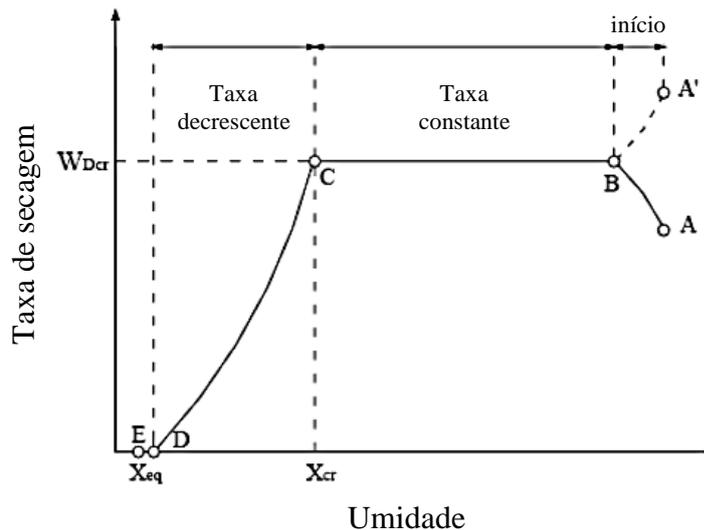
Posteriormente ao período de estabilização, toda a superfície externa do sólido está saturada de água, então a secagem ocorre pela a evaporação do líquido puro, de modo que o coeficiente angular da reta B-C da Figura 5 corresponde à taxa de evaporação constante da Figura 6. Este intervalo é chamado de período de taxa constante. Onde a temperatura do sólido atinge a temperatura de bulbo úmido (se não houver condução direta ou radiação), a massa de água retirada da superfície do sólido pelo agente secante é substituída pela água do interior do sólido e o mecanismo do deslocamento do líquido varia acentuadamente com a estrutura do sólido. Nos sólidos com espaços vazios mais abertos, possivelmente o movimento será controlado pela tensão superficial e pelas forças de gravidade no interior do sólido; já nos sólidos com estrutura fibrosa ou amorfa, o movimento do líquido deverá ocorrer por difusão (STRUMILLO; KUDRA, 1986). Se o sólido não é poroso, neste período, o líquido evaporado é apenas o líquido que recobre a superfície. E é importante destacar também que, nesta situação, a taxa de secagem é totalmente controlada pelas condições externas de secagem, assim o aumento de temperatura ou velocidade do ar de secagem provocam conseqüentemente um aumento da taxa de secagem.

Figura 5 - Curva de Secagem: umidade em função do tempo.



Fonte: Adaptado de STRUMILLO e KUDRA, 1986.

Figura 6 - Taxa de secagem em função da umidade.



Fonte: Adaptado de STRUMILLO e KUDRA, 1986.

O período de secagem a taxa constante termina no ponto C, que é denominado ponto de umidade crítica do sólido ( $X_{cr}$ ). Neste ponto a umidade do sólido é o mínimo possível para suprir a totalidade da superfície, ou seja, é o mínimo possível para formar um filme contínuo de água recobrimo a área de secagem. A partir do ponto de umidade crítica a taxa de secagem passa a ser controlada pelas condições internas de transporte, que dependem do gradiente da concentração de umidade. Com isso, inicia-se o primeiro período de taxa decrescente, C-D, nesse período a superfície fica vagorosamente mais pobre em líquido porque a velocidade de transferência de líquido do interior para a superfície é menor que a da superfície para o meio externo. Até que se chega ao ponto D, quando não há mais água na superfície do sólido. Deste ponto em diante temos o segundo período de taxa decrescente, intervalo D-E. Nele o vapor que está nos níveis mais internos da amostra migra para a superfície, que não está saturada, por difusão. Este mecanismo é muito lento em comparação com a transferência convectiva. No ponto E, a umidade no equilíbrio do sólido com o meio é alcançado e a secagem cessa.

Nos períodos de taxa decrescente a taxa de secagem é controlada pelas condições internas de secagem. As condições internas de secagem designam como a estrutura interna do sólido condiciona a transferência de calor e massa

entre o sólido e o meio. Nestes casos, as condições externas devem ser ajustadas apenas para não causar dano ao material. Devido à forte dependência da estrutura do sólido, o formato dos períodos de taxa decrescentes nos gráficos de taxa de secagem em função do conteúdo de umidade pode sofrer algumas variações.

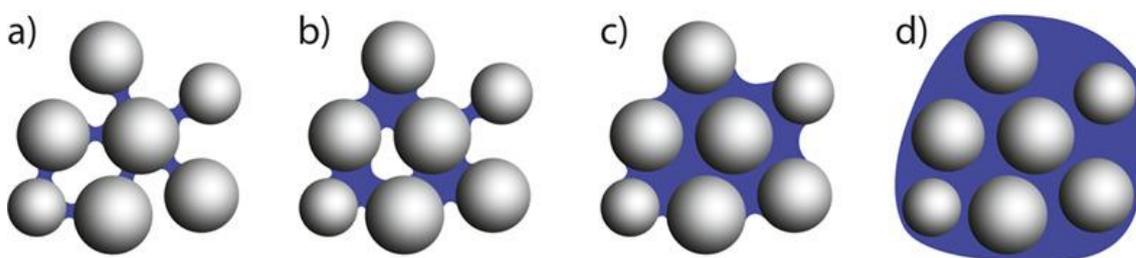
Para sólidos higroscópicos não porosos, quando o calor é fornecido, isso faz com que evapore primeiro a umidade superficial e a movimentação umidade, dentro do sólido começa a ocorrer por difusão. Do interior para a superfície, assim a umidade das camadas superiores fica muito menor do que a das camadas mais internas. Este gradiente de umidade traz consequências como o encolhimento da superfície, rachaduras e empenamentos da superfície do sólido, que dificultam ainda mais a difusão da umidade contida no interior (STRUMILLO; KUDRA, 1986).

Quando os materiais são não-higroscópicos e porosos, significa que eles têm uma estrutura porosa, porém não há água fisicamente ligada a ela. Estes materiais têm muitos capilares de diferentes dimensões. A tensão exercida pelos capilares é inversamente proporcional ao seu raio. Assim, quando a água superficial é totalmente evaporada os capilares de maiores diâmetros começam a esvaziar-se em seguida. Isto faz com que a superfície de evaporação vá migrando para o interior do sólido e área disponível para a troca de massa diminua. Assim, o primeiro período de taxa decrescente é uma reta, nele há os mecanismos similares aos da taxa constante, porém com a área superficial diminuída e a área utilizada na equação não. Neste estágio, temos que a água constitui uma fase contínua e o ar uma fase dispersa, este comportamento define o estado funicular, Figura 7 (b).

À medida que a secagem avança, um segundo ponto crítico é atingido, a partir dele a taxa de secagem não é mais uma reta. A água presente deixa de ser uma fase contínua, estando presente em partes isoladas entre partículas ou nos poros. Neste caso, o estado do líquido designa-se por estado pendular, Figura 7 (a). A taxa de secagem da água em estado pendular é independente da velocidade do ar, a secagem prossegue devido à vaporização interna e à difusão externa. Nesta etapa o calor é fornecido por condução a partir da superfície.

Já para sólidos higroscópicos porosos, uma vez vaporizada a umidade superficial, a umidade em estado funicular e pendular, resta ainda uma quantidade considerável de água ligada. Vale ressaltar neste ponto que tanto o estado funicular como o pendular são compostos de água não-ligada. A água ligada é removida por mecanismos de difusão de vapor através do sólido, esta curva decresce sem apresentar um segundo ponto crítico e é muito dependente da natureza e forma do material.

Figura 7 - Estados do conteúdo líquido em um aglomerado: (a) estado pendular, (b) estado funicular, (c) estado capilar, (d) estado de gota.



Fonte: Di Renzo et al. (2020)

### *Modelos empíricos*

Como visto, a secagem é um processo complexo e dependente dos fenômenos convectivo e difusivo para a transferência de calor e massa. Por isso modelos físicos que descrevem a umidade em função do tempo de secagem são complexos e estão sempre sujeitos a simplificações. Como é muito importante que o modelo descreva a cinética de secagem de forma eficiente, assim no lugar de modelos físicos, devido à sua complexidade, é comum adotar modelos matemáticos empíricos e semiempíricos para descrever o processo e obter melhor ajuste aos dados experimentais. Na Tabela 1 são apresentadas algumas equações clássicas utilizadas com esta finalidade. Assim, com as curvas cinética de secagem consegue-se avaliar se o transporte da umidade no material é

predominantemente convectivo ou difusivo e ajustar parâmetros do processo para que a secagem seja favorecida.

Tabela 1 - Equações de cinética de secagem.

Referência	Modelo	Equação
Lewis (LEWIS, 1921)	$X = \exp(-kt)$	(1)
Page (TULASIDAS et al., 1993)	$X = \exp(-kt^n)$	(2)
Page Modificada (OVERHULTS et al., 1973)	$X = \exp(-(kt)^n)$	(3)
Henderson e Pabis (WESTERMAN et al., 1973)	$X = a \exp(-kt)$	(4)
Logarítmica (YAĞCIOĞLU et al., 1999)	$X = a \exp(-kt) + c$	(5)
Dois termos (HENDERSON, 1974)	$X = a \exp(-k_0t) + c \exp(-k_1t)$	(6)
Midilli (MIDILLI et al., 2002)	$X = a \exp(-kt^n) + bt$	(7)

#### Modelo difusivo

O modelo difusivo é um modelo teórico da difusão de massa baseado na segunda lei de Fick, ele é amplamente utilizado para descrever a transferência de umidade do interior de diferentes materiais para a sua superfície em sistema de secagem em camada fina. Este modelo parte do princípio de conservação de massa, desconsiderando geração, em um elemento de volume infinitesimal unidirecional em um meio pseudo-homogêneo. Com essas considerações obtemos a forma simplificada da 2ª Lei de Fick como apresentada na Equação (8):

$$\frac{\partial XR}{\partial t} = D_{ef} \frac{\partial^2 XR}{\partial x^2} \quad (8)$$

onde  $XR$  é a umidade do sólido (kg água/ kg sólido),  $t$  é o tempo de secagem (s),  $D_{ef}$  é a difusividade efetiva da umidade no leito considerada constante ( $m^2.s^{-1}$ ) e  $x$  é a direção do fluxo difusivo interno de água (m).

A solução analítica da Equação (8) foi dada por Crank (1957) na Equação (9) para o transporte de massa unidimensional em uma fatia fina de espessura  $2L$  com evaporação da umidade na superfície. A solução foi obtida utilizando o método de separação das variáveis e assumindo as condições de temperatura e coeficiente de difusão como constantes, o encolhimento do leito como desprezível e as seguintes condições de contorno: que inicialmente todo o material está a mesma umidade,  $XR_0$  (condição inicial), que não há transporte de massa no centro da fatia fina (condição de contorno 1) e que há evaporação de água na superfície (condição de contorno 2).

**Condição inicial:**  $t = 0, -L \leq x \leq L, XR = XR_0$

**Condição de contorno 1:**  $t > 0, x = 0, \frac{dXR}{dx} = 0$

**Condição de contorno 2:**  $t > 0, x = L, D_{ef} \frac{dXR}{dx} = h_m(XR_\infty - XR_s)$

$$\overline{XR} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 Bi^2 \exp\left(-\alpha_n^2 D_{ef} \frac{t}{L^2}\right)}{\alpha_n^2 (\alpha_n^2 + Bi^2 + Bi)} \quad (9)$$

Onde  $h_m$  é o coeficiente convectivo de transferência de massa (m/s);  $XR_\infty$ , a umidade de equilíbrio;  $XR_s$ , a umidade na superfície e  $\alpha_n$  são as raízes positivas, tal  $\alpha_n \tan(\alpha_n) = Bi$ , onde  $Bi$  é o número de Biot. Assim, pode-se obter  $Bi$  e  $D_{ef}$  simultaneamente para os dados experimentais.

Por um lado, a  $D_{ef}$  é um parâmetro que considera todos os mecanismos efetivos presentes no processo, uma vez que, pode ser difícil a análise dos mecanismos de forma isolada. Por outro, a partir do  $Bi$  podemos inferir os mecanismos predominantes durante a secagem do material, se esses mecanismos são controlados pelas condições internas ou externas de secagem como apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Intervalos para o número de Biot.

Bi	Controle
<0,2	Condições externas
>50	Condições internas
0,2 < Bi < 50	Ambas são importantes

Fonte: STRUMILLO e KUDRA, 1986.

### 2.3.2. Secador de leito vibrofluidizado

Existem vários tipos de secadores convectivos para a secagem de materiais lignocelulósicos. Os tipos mais comuns são o tambor rotativo, secador de leito fluidizado, secador pneumático, secadores de leito fixo entre outros (PANG; MUJUMDAR, 2010; VERMA *et al.*, 2017). Os secadores de leito fluidizado apresentam a vantagem das altas taxas de transferência de calor e massa, boa mistura dos sólidos e a boa uniformidade na distribuição da temperatura no leito (LAW; MUJUMDAR, 2006). Além disso, o uso de agitadores mecânicos, pulsações e vibrações são modos de melhorar a qualidade da fluidização, o contato sólido-fluido e a eficiência térmica da secagem (MORENO; RIOS; CALBUCURA, 2007). Assim, com a adição de vibração mecânica ao leito pode-se obter menores velocidades de mínima fluidização, maior eficiência energética e menor arraste de finos (LAW; MUJUMDAR, 2006).

O secador de leito fluidizado com a adição de vibração mecânica é chamado de secador vibrofluidizado. A modificação da vibração do leito é feita pelos ajustes de amplitude (A) e frequência (f) de vibração, que por sua vez influenciam na dinâmica do leito (DALEFFE; FREIRE, 2004). A relação entre a aceleração vibracional média e a aceleração gravitacional é dada pelo adimensional de vibração ( $\Gamma$ ), o principal parâmetro utilizado para descrever o comportamento do leito (BRATU; JINESCU, 1971), como dado pela equação (10).

$$\Gamma = \frac{A (2\pi f)^2}{g} \quad (10)$$

O adimensional de vibração é, fisicamente, a razão entre a aceleração média vibracional no sistema e a aceleração gravitacional ( $g$ ). Dessa forma, a escolha do adimensional de vibração tem influência direta no comportamento dinâmico do leito de secagem (PAKOWSKI; MUJUNDAR; STRUMILLO, 1984). Nesta tese será adotada a classificação de Daleffe (2005), que para qualquer adimensional de vibração tem-se:

- Leito vibrado: é o leito de material particulado sujeito à vibração vertical sem escoamento de ar;
- Leito vibrofluidizado: leito de material particulado sujeito à vibração vertical com escoamento de ar;

Até Daleffe e Freire (2004),  $\Gamma$  era utilizado como parâmetro único e universal para caracterizar a vibração imposta ao leito, no entanto, comportamentos fluidodinâmicos diferentes foram obtidos para o mesmo adimensional de vibração composto por amplitudes e frequências vibracionais diferentes. De modo, que para um mesmo  $\Gamma$ , quando operando com altas amplitudes e baixas frequências, ocorria uma expansão do leito de partículas, e já operando com baixas amplitudes e altas frequências, o leito se compactava.

Posteriormente, Meili (2009) identificou que o comportamento fluidodinâmico distinto para o mesmo adimensional de vibração, verificado por Daleffe (2005) em ensaios fluidodinâmicos, se reproduzia em ensaios de secagem de pastas (água, lodo de esgoto, leite desnatado e carbonato de cálcio), operando em regime contínuo. E essa variação no comportamento dinâmico do leito teve influências distintas em cada pasta analisada, de acordo com as suas características reológicas. Para entender melhor a interferência dos parâmetros vibracionais no processo de secagem, Costa (2017) utilizou duas amplitudes ( $A=0,003$  e  $0,015m$ ) combinadas com frequências entre 100 e 1100 RPM. Com isso, verificou que para valores similares de  $\Gamma$ , o aumento da amplitude resulta em condições mais favoráveis para a produção do leite em pó.

Rocha (2019) avaliou o processo de secagem de particulado sólido (borra de café) com características reológicas distintas dos materiais estudados anteriormente operando em regime contínuo. Foi verificada a influência da variação da combinação de amplitude e frequência de vibração sob a secagem

também desse tipo de particulado, além da influência da vibração do leito sob o sistema de alimentação. Neste sistema, foi encontrado um ponto ótimo de secagem para a borra de café em termos de diâmetro do pó, umidade e produção, dada a influência do adimensional de vibração sob o comportamento de secagem e sob o sistema de alimentação com finalidade térmica. No entanto, viu-se a necessidade de um estudo mais aprofundado do comportamento de secagem da borra em leito vibrofluidizado em batelada, afim de aprimorar o conhecimento do comportamento desse material em leito sujeito à vibração. Essa necessidade foi justificada, uma vez que não foram encontrados estudos na literatura de como a composição do adimensional de vibração influencia o diâmetro do pó seco produzido.

### 2.3.3. Secagem da borra de café

A borra de café, como já citada no tópico de resíduo sólido, é um material lignocelulósico, de alta umidade, resíduo da fabricação da bebida do café. Devido à dificuldade de descarte desse material, inúmeros trabalhos são encontrados na literatura para o seu reuso que vão desde para ração animal, utilização como fertilizantes, para extração de compostos fenólicos, até produção de energia por combustão direta, pirólise, ou produção de H<sub>2</sub> por biodigestão<sup>2</sup>. Na Figura 8 é apresentado um esquema das rotas dessas diversas aplicações. Pode-se notar, que devido à alta umidade que a borra sai do processo, cerca de 80% (b.u.), uma etapa em comum aos processos de todas as aplicações é a redução de umidade desse material. O que evidencia a importância do estudo da etapa de secagem para viabilidade da aplicação nas etapas seguintes.

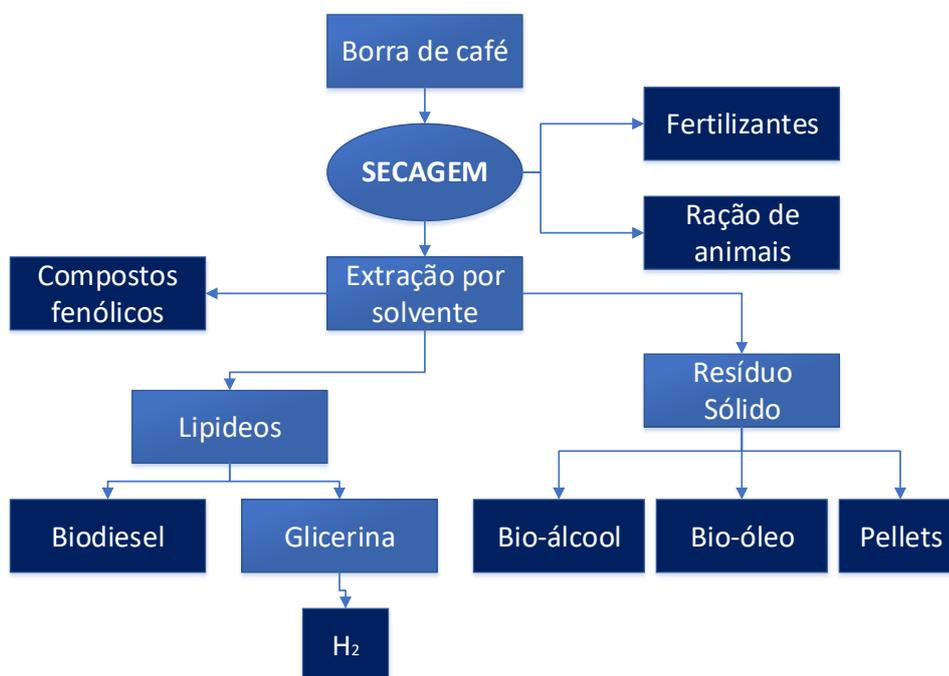
É comum para biomassas com mais de 50% de umidade (b.u.) que antes da secagem térmica seja feita uma etapa de pré-secagem por ação de forças mecânicas (VERMA *et al.*, 2017). No caso da borra de café, por desagüe mecânico a umidade pode ser reduzida até 45-38% b.u. (EFTHYMIPOULOS *et al.*, 2018; ROCHA; FERREIRA; FREIRE, 2021), esta redução da umidade tem importante impacto econômico, uma vez que o desagüe por via mecânica tem

---

<sup>2</sup> Referências para essas aplicações citadas podem ser encontradas em ROCHA; FERREIRA; FREIRE, 2021.

menor custo energético que a secagem por via térmica (LAURILA; HAVIMO; LAUHANEN, 2014). No desague mecânico da borra é retirada o excesso de água não ligada (EFTHYMIPOULOS *et al.*, 2018), posteriormente com a secagem térmica se obtém umidades ainda menores.

Figura 8 - Processo de secagem e aplicações de reuso da borra de café.



Na secagem térmica da borra de café tem-se duas principais finalidades: a redução de umidade e a definição do tamanho de partícula, visto que essas características são importantes para a fabricação de pellets combustíveis por influenciarem simultaneamente a recuperação energética da degradação térmica e a compactação (PENG *et al.*, 2012). Neste sentido, o secador de leito fluidizado é uma alternativa bastante adequada, uma vez que é comumente utilizado para a secagem de outros resíduos lignocelulósicos com bons resultados (YI *et al.*, 2019) e porque permite a classificação das partículas a partir de modificações das condições do processo (WANG; WANG; ZHANG, 2019).

No Quadro 3 são apresentados os estudos encontrados disponíveis na literatura que tratam especificamente da etapa de secagem da borra de café. Todos os estudos apresentados, exceto o de Rocha; Ferreira; Freire (2021),

tratam de cinética de secagem em batelada, desde secagem ao ar livre com 6 dias de duração até secagem em secador solar em 9h. A maioria dos estudos tratam da borra em pó com granulometria variável, entre 1,6 a 2500  $\mu\text{m}$  e o estudo de Fu e Chen (2020), se diferencia neste sentido, por avaliar a cinética de secagem da borra comprimida em briquetes de 5 mm de espessura e 40mm de diâmetro em micro-ondas. Entre os estudos que calcularam a  $D_{ef}$ , elas são próximas entre si, na ordem de grandeza de  $10^{-9}$   $\text{m}^2/\text{s}$ . Embora a maioria dos trabalhos tenham especificado o tamanho do particulado utilizado, nenhum se deteve em analisar a influência do diâmetro do material no comportamento de secagem, além disso observa-se a necessidade do aprofundamento dos estudos de secagem da borra de café em leitos fluidizados, bem como a influência do processo de secagem nas etapas seguintes como a pelletização e a combustão.

Quadro 3 - Estudos de secagem da borra de café.

<b>Autor</b>	<b>Tamanho</b>	<b>Secador</b>	<b>Condições de secagem</b>	<b>Observações</b>
GÓMEZ-DE LA CRUZ et al., 2015	-	Túnel de vento	Temperatura do ar: 100, 150, 200 e 250 °C Espessura camada: 50,10, 15 e 20mm Velocidade do ar: 1m/s	$D_{ef}$ : entre $1,29 \cdot 10^{-9}$ e $28,8 \cdot 10^{-9}$ m/s (modelo difusivo) $E_a$ : entre 12,29 e 16,87 kJ/mol
KANG et al., 2017	Pó entre 100 e 500 $\mu$ m	-	Ar livre: Espessura da camada: 6 e 11mm	Tempo de secagem: 2,5 e 5,5 dias
TUN et al., 2020	Pó entre 1,6 e 1600 $\mu$ m	Estufa	8h de secagem, temperaturas de 75, 90 e 105°C e velocidade de 0,2 a 0,5 m/s	Secador obteve menor tempo de secagem em relação a secagem ao ar livre
		Secador Solar	9h de secagem, temperaturas de 47°C e velocidade de 0,5 - 0,9 m/s	As propriedades foram melhor preservadas no secador solar
FU; CHEN, 2020	Briquetes com 5mm de espessura e 40mm de diâmetro	-	Ar livre: 1-4 dias de secagem, temperatura média $27 \pm 5^\circ\text{C}$ e velocidade de 5m/s	(Espessura da camada: 1,25, 2,5 e 4 cm)
		Micro-ondas	Potência: 119 - 700W Aditivos 10%: Cloreto de sódio, sulfato de sódio e linhito	$D_{ef}$ (Borra crua): entre $1,09 \cdot 10^{-9}$ e $1,81 \cdot 10^{-8}$ m <sup>2</sup> /s Os aditivos (exceto o linhito) diminuíram a $E_a$ , melhorando a secagem.

Quadro 4 - Continuação do Quadro 3 - Estudos de secagem da borra de café.

Autor	Tamanho	Secador	Condições de secagem	Observações
GÓMEZ-DE LA CRUZ et al., 2021	Pó ente 100 e 2500 $\mu\text{m}$	Túnel de vento	Temperatura do ar: 100, 150, 200 e 250 °C Espessura camada: 50, 10, 15 e 20mm velocidade do ar: 1m/s	Taxa de secagem: $2,26 \cdot 10^5$ e $1,722 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ $D_{\text{ef}}$ : entre $1,79 \cdot 10^{-9}$ e $29,1 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$ (método simplificado)
ROCHA et al., 2021	ds=362 $\mu\text{m}$	Secador vibrofluidizado Operando no contínuo	Temperatura do ar: 50, 60 e 70 °C Velocidade do ar: 1, 1,25 e 1,5 m/s Adimensional de vibração: 0 e 4 (A=0,003 e 0,015mm)	Condições ótimas de secagem. Umidade: 22% e ds = 370mm a 70 °C e 1,5m/s Adimensional de vibração: 4 (A=0,015mm)

## 2.4. Produção de pellets combustíveis

Combustíveis na forma de pellets são principalmente produzidos de resíduos de madeira por causa do grande volume e da baixa densidade do material (BERGSTRÖM *et al.*, 2008). A compactação da biomassa promove um aumento da densidade específica e da uniformidade, facilitando o manuseio, a estocagem e a qualidade da queima (BERGSTRÖM *et al.*, 2008). O tipo da biomassa, o tamanho das partículas, a umidade, a composição do material e os parâmetros da máquina de produção de pellets são apontados como os fatores que mais afetam a qualidade do pellet (PRADHAN; MAHAJANI; ARORA, 2018). Esforços na melhoria da qualidade dos pellets são concentrados nos parâmetros de durabilidade e degradação biológica. A durabilidade está associada a resistência à absorção da água e à resistência mecânica, sendo a resistência mecânica, por sua vez, caracterizada pela resistência ao esmagamento e à formação de poeira (BERGMAN, 2005). Já a degradação biológica está relacionada com a capacidade do material de propiciar o crescimento de fungos e atividade microbiana, mesmo depois dos processos de secagem e pelletização (BERGMAN, 2005).

Investigações recentes vêm analisando a produção de pellets combustíveis de borra de café pura e misturas com serragem. Foi observado por LISOWSKI *et al.* (2019) que, para pellets produzidos a partir de borra pura (com tamanho uniforme) a umidade e altura da matriz dos pellets são os parâmetros que influenciam significativamente as características mecânicas. Por outro lado, foi observado também que apesar da boa resistência mecânica e do maior poder calorífico da borra de café, pellets fabricados a partir da mistura borra/serragem, na proporção de 1:1, obtêm maior recuperação de energia e menores emissões de particulado em ensaios de combustão do que pellets de borra pura (LIMOUSY *et al.*, 2013a). Isto acontece provavelmente pela estrutura mais heterogênea do pellet borra/serragem e por interações mutuas geradas entre componentes (JEGUIRIM; LIMOUSY; DUTOURNIE, 2014). Em um estudo semelhante, ALLESINA *et al.* (2017) reportam um aumento de 37,7% para 41,2% da eficiência de combustão em caldeira quando são utilizados pellets de mistura borra/serragem, também na proporção 1:1, em vez de pellets de serragem pura. No entanto, não foram encontrados estudos que analisem a influência da

granulometria da borra de café, simultaneamente, na resistência mecânica, degradação biológica e na combustão dos pellets. Também, não foi avaliado como a borra de café interagiria com outras biomassas além da serragem para a produção de pellets.

## 2.5. Combustão de biomassas

Para converter biomassa em diferentes tipos de produtos energéticos várias tecnologias podem ser utilizadas. Essas tecnologias são classificadas principalmente segundo as rotas de conversão termoquímica (combustão, gaseificação e pirólise) e bioquímica (digestão, fermentação e enzimática). Tratar termicamente os resíduos, que tem apelo de recuperação energética, os tornam uma fonte preferencial de energia renovável, uma vez que soluciona a questão do descarte e o novo combustível contribui para a economia de energia primária em sistemas convencionais (LOMBARDI; CARNEVALE; CORTI, 2015)

Neste sentido, o processo de combustão é amplamente utilizado para a geração de energia em processos industriais. A combustão é um fenômeno complexo que envolve sucessivas reações químicas homogêneas e heterogêneas. Para que a combustão ocorra é necessário: combustível, comburente e calor. Se algum dos três for removido, o processo de combustão se encerra e quando os três são promovidos na proporção adequada, o processo se autossustenta. O comburente utilizado na combustão de resíduo é o oxigênio presente no ar. A equação estequiométrica da reação de combustão ideal de biomassa é dada pela Equação:



Essa equação descreve apenas um processo ideal, por que não leva em conta muitos fatores reais associados aos processos de combustão, entre eles que a biomassa contém mais elementos além de carbono, hidrogênio e oxigênio, tais como enxofre, metais e sais minerais, e também não considera as inúmeras reações, que ocorrem em paralelo entre as espécies orgânicas e inorgânicas gerando cloretos, sulfatos, carbonatos e silicatos (NUNES; MATIAS; CATALÃO,

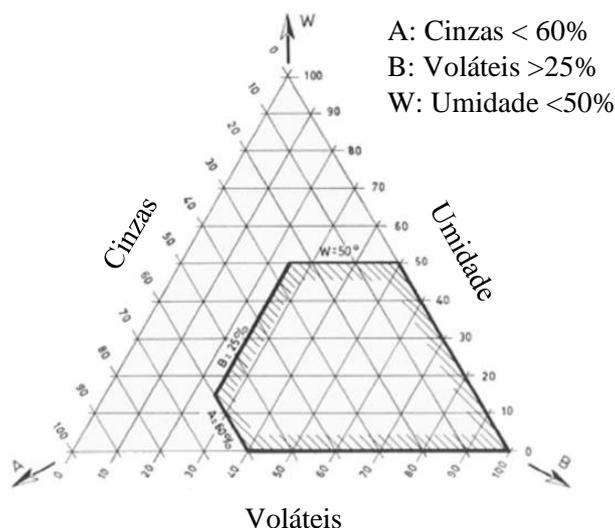
2014). No entanto, o calor liberado da combustão de biomassas pode ser muito alto, chegando a exceder a 2000 °C na temperatura da chama, dependendo do poder calorífico e da umidade do combustível, da quantidade de ar utilizada na queima e do tipo de construção da fornalha (LIMOUSY et al., 2013).

Como já mencionado, um fator que pode limitar o processo de combustão é o conteúdo de umidade do combustível, pois se o conteúdo for muito alto o combustível não reage espontaneamente (KOMILIS; KISSAS; SYMEONIDIS, 2014). Assim, a umidade do material tem influência direta na eficiência de conversão e na qualidade do produto (PANG; MUJUMDAR, 2010). Daí a preocupação com a redução da umidade da biomassa como etapa anterior ao processo de combustão (BARBOSA et al., 2020; NUNES; MATIAS; CATALÃO, 2014; HOFSETZ; SILVA, 2012). Outro fator que influencia o comportamento de combustão é o tipo e a configuração do equipamento usado para queimar os resíduos (ou seja, o combustor), sendo a maioria dos combustores de resíduos atualmente utilizados pertencentes a três famílias principais: grelha móvel/fixa, forno rotativo e leito fluidizado (LOMBARDI; CARNEVALE; CORTI, 2015).

Além disso, a composição e o tipo de resíduo de biomassa também têm forte influência sobre as reações de combustão e nem todos os resíduos fornecem um saldo de energia suficiente para sustentar o processo. Uma forma de prever a viabilidade do uso do resíduo, quanto combustível, para geração de energia por combustão é utilizando o diagrama ternário de Tanner apresentado na

Figura 9 (KOMILIS; KISSAS; SYMEONIDIS, 2014). Quando o resíduo de biomassa tem na sua composição teores de umidade menores que 50%, teores de cinzas menores que 60% e voláteis (composição de orgânicos leves) maiores que 25% em massa, uma provável zona de autocombustão pode ser identificada. Uma vez que o processo de secagem é ajustado, a borra de café, o bagaço de cana e o bagaço de laranja estão zona de autocombustão estimada pelo diagrama.

Figura 9 - Diagrama de Tanner - usado para indicar a autocombustão de resíduos.



A combustão ocorre essencialmente através das etapas de aquecimento e secagem, devolatilização, combustão de voláteis e oxidação do carbono fixo, fragmentação e abrasão. Primeiramente, a partícula ao entrar no combustor aquece até a temperatura do sistema, durante o aquecimento ocorre a evaporação da água (ao redor dos 100 °C). Nesta fase a umidade do combustível é muito importante para a estabilidade do processo. Em seguida, inicia-se a etapa de devolatilização, onde ocorre a degradação térmica dos compostos carbônicos, seguida da oxidação do carvão residual, que é a combustão propriamente dita. A composição e a quantidade de voláteis liberadas, no estágio de devolatilização, são influenciadas, entre outros fatores, pela taxa de aquecimento da partícula, pela temperatura final, pela composição (e razão C/H), pelo tamanho da partícula e pela pressão do equipamento (THUNMAN; LECKNER, 2005). A fragmentação das partículas ocorre em paralelo com a decomposição térmica e é resultado principalmente da secagem, da liberação dos materiais voláteis e da movimentação do leito. A fragmentação, de modo geral, está relacionada à oxidação da partícula, enquanto a abrasão está relacionada ao atrito entre as partículas e a parede do leito (NUNES; MATIAS; CATALÃO, 2014).

Os estágios de decomposição térmica do material podem ser avaliados em escala de laboratório por análises precisas de termogravimetrias (TGA) e calorimetria exploratória diferencial (DSC) simultaneamente. Essas técnicas permitem identificar as regiões características de decomposição do combustível, e parâmetros importantes que descrevem o processo de combustão tais como temperatura de ignição (início), de *burn-out* (fim), o tempo total de combustão e o calor liberado (WZOREK *et al.*, 2021). Os parâmetros utilizados nessa tese e suas respectivas definições e metodologias são apresentados na Tabela 3. Além disso, as informações sobre a cinética de combustão da biomassa, obtidas por TGA e DSC, são necessárias para prever com precisão o comportamento das reações, bem como para otimizar o processo de combustão dos diferentes produtos durante a decomposição (ZAPATA *et al.*, 2009).

Tabela 3 - Parâmetros de combustão para análise da TGA e DrTGA.

Parâmetro	Definição/Método	Referência
Umidade	Massa perdida entre a temperatura inicial da amostra e a temperatura final do estágio de secagem.	(CRELLING <i>et al.</i> , 1992)
Porcentagem de cinzas	Porcentagem da massa remanescente da amostra em relação à massa inicial a temperatura de 800°C.	(CRELLING <i>et al.</i> , 1992)
Temperatura de ignição	É definida como a temperatura do ponto de interseção entre a reta tangente à curva de caimento da TGA e a reta horizontal estabelecida no início da análise.	(LI <i>et al.</i> , 2006)
Temperatura de <i>burnout</i>	É a temperatura a partir da qual não há mais perda de massa na amostra nas curvas de TGA e DrTGA.	(LI <i>et al.</i> , 2006)
Temperatura de liberação de volátil	É a temperatura na qual se inicia a liberação da matéria volátil.	(LUO <i>et al.</i> , 2009)
DrTGA <sub>MÁX</sub>	É a derivada máxima da perda de massa ao longo de da análise.	(LUO <i>et al.</i> , 2009)

---

DrTGA <sub>MED</sub>	É a média das derivadas da perda de massa ao longo da análise.	(LUO <i>et al.</i> , 2009)
Índice de Ignição	<p>É a ponderação da velocidade de reação máxima em relação ao início da ignição e o tempo necessário para chegar à velocidade máxima. Índica a influência da ignição na taxa de decomposição do material. O índice de ignição (<math>D_i</math>) é definido pela equação:</p> $D_i = \frac{DrTGA_{MÁX}}{t_p t_i}$ <p>onde <math>t_p</math> é o tempo correspondente à <math>DrTGA_{MÁX}</math> e <math>t_i</math> o tempo correspondente à temperatura de ignição.</p> <p>O índice de combustão (<math>S_i</math>) é utilizado para avaliar o comportamento de combustão de biomassas, de modo que, quanto maior o <math>S_i</math>, maior a atividade de combustão. <math>S_i</math> é definido pela equação:</p>	(LI <i>et al.</i> , 2006)
Índice de combustão	$S_i = \frac{DrTGA_{MÁX} DrTGA_{MED}}{T_p^2 T_B}$ <p>onde <math>T_p</math> é a temperatura do pico máximo da DrTGA e <math>T_B</math> a temperatura de burnout.</p> <p>Está associada a velocidade de reação e é definido para cada evento térmico pela equação:</p>	(LUO <i>et al.</i> , 2009)
Reatividade	$R_i = \frac{DrTGA_{MÁX}}{T_p}$	(GHETTI; RICCA; ANGELINI, 1996)

---

De maneira geral, para resíduos lignocelulósicos, o estágio de aquecimento e secagem ocorre aproximadamente a 100°C, o estágio de decomposição das frações mais leves e pesadas entre 150 e 400 °C e a combustão do carbono fixo entre 400 e 600 °C. Esse comportamento térmico pode ser explicado pela decomposição térmica da celulose, hemicelulose e lignina que são os principais componentes dos resíduos agrícolas com apelo energético (WZOREK *et al.*, 2021). No entanto, a compreensão dos fenômenos térmicos envolvidos em cada resíduo especificamente, bem como suas nuances

é fundamental para a implementação de sistemas de recuperação de energia por combustão de grande porte no futuro.

Com base em toda a revisão da literatura apresentada foi observado a grande possibilidade do reaproveitamento da borra de café para a geração de energia térmica por combustão. Tendo em vista a limitação que o processo de secagem representa para a viabilidade dessa aplicação e importância da distribuição granulométrica do particulado em todas as operações que envolvem este processo, este trabalho avaliou sequencialmente as etapas de elutriação, secagem, pelletização e combustão da borra de café buscando integrá-las e avaliando a influência de uma na outra.

### **3. Materiais e Métodos**

#### **3.1. Materiais**

Foram utilizados três tipos de resíduos: borra de café, bagaço de laranja e bagaço de cana de açúcar. Na primeira parte da tese foi utilizada apenas a borra de café, que foi recolhida 3 vezes por semana de uma máquina de café do departamento e imediatamente seca em estufa convencional a 105°C por 24h. O material seco foi armazenado em sacos plásticos vedados à temperatura ambiente até a utilização. Este material foi utilizado nas etapas de caracterização física e térmica, elutriação e secagem. Para a caracterização física e térmica e os ensaios de elutriação foi utilizada borra seca. Para os ensaios de secagem, a borra foi reumidificada 12h antes de cada ensaio pela adição de água destilada, a 45% de umidade em base úmida, e armazenada na geladeira a aproximadamente 4 °C em um recipiente fechado. A umidade de 45% foi escolhida por ter sido a menor umidade obtida no processo de compressão mecânica, que antecede a secagem térmica, por ROCHA et al. (2021).

Na segunda parte, os três resíduos foram avaliados simultaneamente e a borra de café utilizada foi o resíduo gerado no preparo convencional do café da marca Três Corações®. Este resíduo foi seco em estufa por 24h a 105°C, e em seguida dividido em três frações por peneiramento (A, B e C), com o objetivo de classificar as partículas com maior semelhança possível. O bagaço de cana utilizado foi resíduo do processo de fabricação de açúcar e álcool da Usina São Martinho - SP, este material foi armazenado em sacos plásticos fechados sem nenhum pré-tratamento, no entanto foram utilizadas apenas as frações de partículas com diâmetros médios inferiores a 1000 µm. O bagaço da laranja pêra foi obtido a partir da extração convencional para o preparo do suco. O bagaço foi triturado em um liquidificador industrial, modelo Metalúrgica 7000 Light, antes de ser submetido à secagem em uma estufa com circulação e renovação de ar a 105 °C por um período de 24 horas. Estes três resíduos foram utilizados nas etapas de caracterização física e térmica, para a fabricação de pellets combustíveis e nos ensaios de combustão. A partir desses três materiais foram ainda feitas duas misturas binárias na proporção mássica de 50%-50% com a finalidade de verificar a influência da borra de café sob o bagaço de cana e o bagaço de laranja. Foi escolhida a borra B por ter granulometria intermediária.

Dados destes materiais são apresentados na Tabela 4 e as imagens, na Figura 10.

Tabela 4 - Tamanho do material utilizado para a fabricação dos pellets.

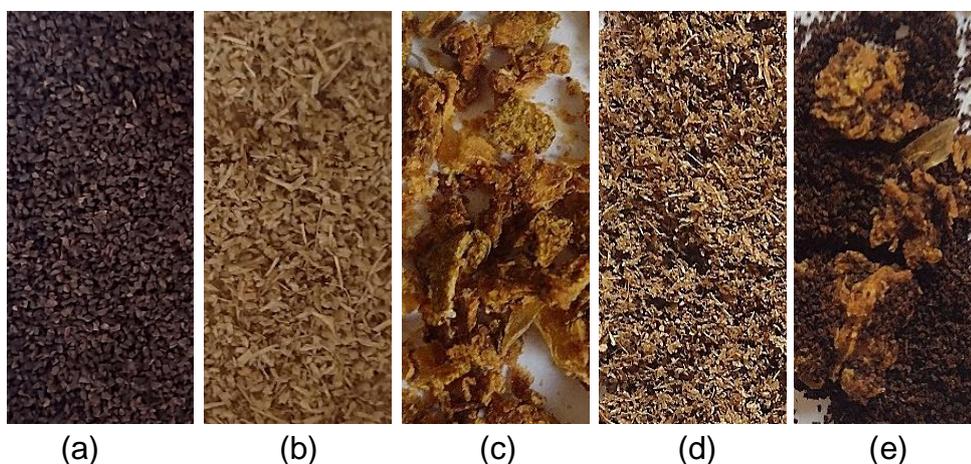
<b>Materiais puros</b>	Tamanho de partícula
Borra A	$d_m = 550 \mu\text{m}$
Borra B	$d_m = 400 \mu\text{m}$
Borra C	$d_m = 225 \mu\text{m}$
Bagaço de cana	$d < 1000\mu\text{m}$
Bagaço de laranja	$d_s = 2641 \mu\text{m}$

<b>Misturas</b>
Borra B + Bagaço de laranja
Borra B + Bagaço de cana

Fonte: Autor, 2023.

Figura 10 - Imagens dos materiais utilizados para fabricação dos pellets combustíveis: (a) borra de café, (b) bagaço de cana, (c) bagaço de laranja, (d) mistura bagaço de cana e borra de café e (e) mistura bagaço de laranja e borra de café.



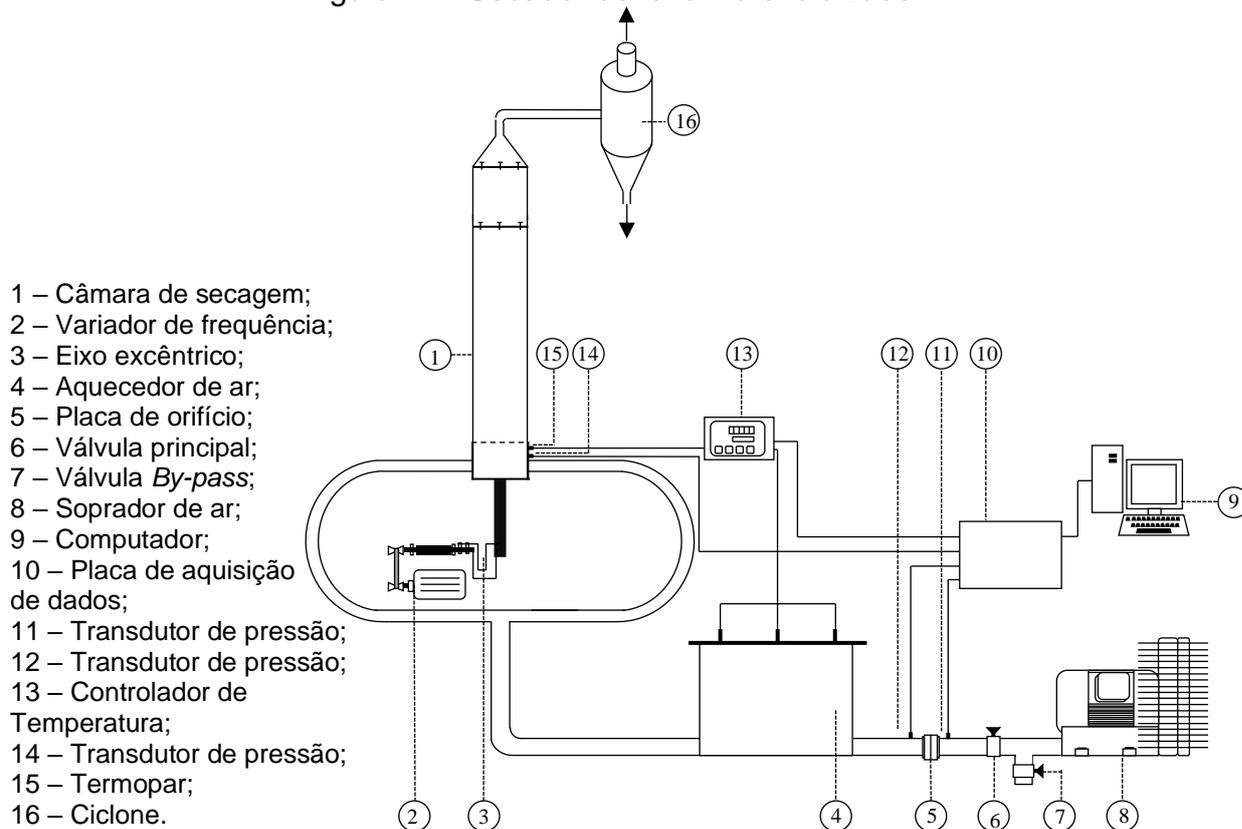
Fonte: Autor, 2023.

## 3.2. Equipamentos

### 3.2.1. Secador

Na Figura 11 é apresentado o leito vibrofluidizado do Centro de Secagem DEQ/UFSCar que foi utilizado para os ensaios de secagem e elutriação. A alimentação de ar nesta unidade experimental ocorre através de um soprador marca IBRAM (8), com 4 CV de potência, o ajuste da vazão é feito por uma válvula by-pass. A vazão do ar é calculada pela queda de pressão dada pela placa de orifício (5), calibrada usando o tubo de Venturi como padrão ( $Q = 0,65569\sqrt{\Delta h}$ ). A temperatura do ar injetado no sistema é mantida constante pelos controladores de temperatura (13) ligados às resistências elétricas do aquecedor (4). O ar aquecido entra no secador por duas entradas na base do leito (abaixo da placa distribuidora) em contracorrente. A placa distribuidora tem espessura de  $2 \times 10^{-3}$  m com furos de  $0,3 \times 10^{-3}$  m de diâmetro, que resulta em uma área de aproximadamente 50% livre para a passagem do ar, a fim de que ele seja distribuído homogeneamente. O leito do secador (1) é limitado por uma câmara de vidro de 0,114m de diâmetro, 0,500m de altura e 0,003m de espessura com dois termopares do tipo J (15) com bainha de 0,005m para monitorar a temperatura. As vibrações são impostas ao leito por uma haste ligada ao eixo excêntrico (3), que converte o movimento rotacional produzido pelo motor WEG de 0,5HP para o movimento senoidal vertical na câmara de vidro. O motor possui um variador de velocidade Ringcogne modelo RXM-750 (2) que permite modificar a frequência monitorada pelo tacômetro eletrônico digital Ophtho Tako TO404. A amplitude de vibração pode ser ajustada manualmente no próprio mecanismo excêntrico. O sistema vibracional é posicionado em uma base independente da mesa para evitar que as vibrações exercidas pelo motor influenciem o leito.

Figura 11 - Secador de leito vibrofluidizado.

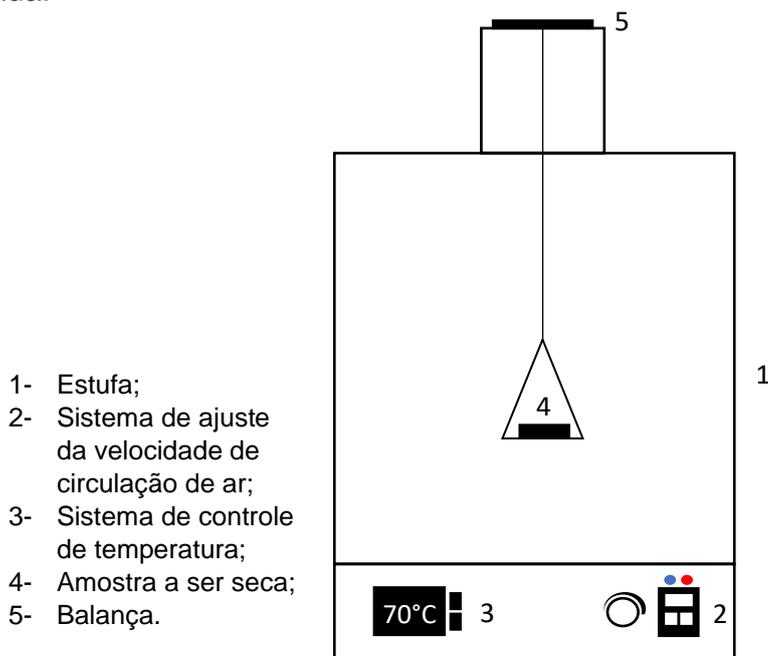


Fonte: Autor, 2023.

### 3.2.2. Estufa de Convecção Forçada

Para os ensaios de cinética de secagem em estufa foi utilizada a estufa de circulação e renovação de ar da TECNAL, modelo TE-394/1, com a balança eletrônica digital (Model BP 3100S, Satorius, Germany) acoplada na parte superior, como apresentado na Figura 12. A estufa permite o controle da temperatura e da velocidade do ar e possui aberturas laterais para a renovação de ar circulado no seu interior. A vazão de ar pode ser medida com um anemômetro digital modelo LCA 6000 e ajustada no sistema de controle do painel frontal. A amostra a ser seca é colocada no prato inferior da balança posicionado no centro da estufa, a variação de massa é lida no visor da balança e o tempo medido com o auxílio de um cronômetro.

Figura 12 - Esquema do aparato experimental balança e estufa de convecção forçada.



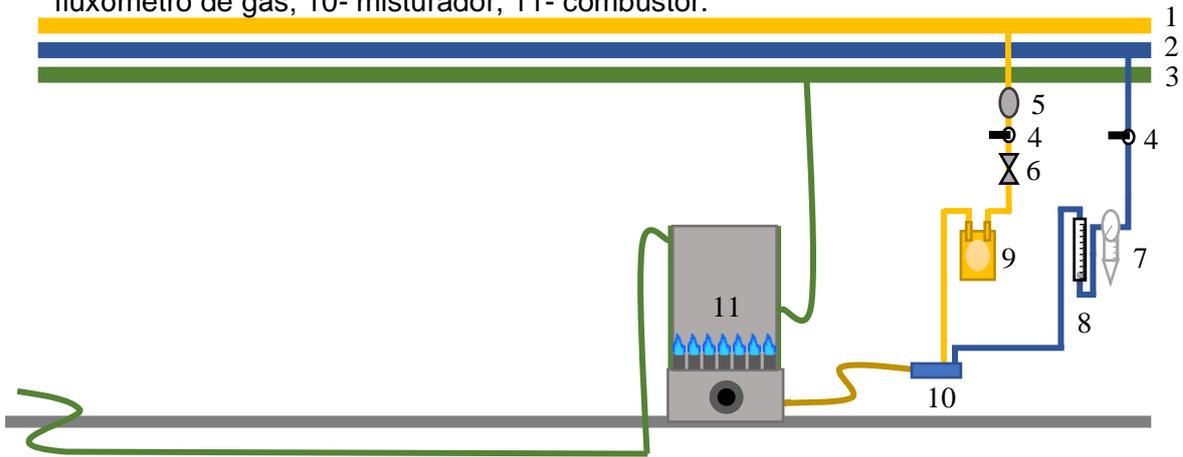
Fonte: Autor, 2023.

### 3.2.3. Combustor

Na Figura 13 é apresentada a linha de combustão utilizada para os ensaios de queima dos biocombustíveis. O combustor de leito fluidizado (11) é alimentado pela rede de rede de gás liquefeito de petróleo (GLP) (1) e da rede de ar comprimido (2) do Departamento de Engenharia Química da UFSCar. O GLP ao sair da rede passa por um regulador de pressão de 1,5 kgf (5) para diminuir e estabilizar a pressão com que o gás entra no combustor; então segue por uma válvula de  $\frac{1}{4}$  (4), que funciona como válvula de emergência, caso o gás precise ser fechado rapidamente; depois passa por uma válvula agulha para o ajuste fino da vazão do gás e, por fim, por um fluxômetro (9) para medição do volume de gás. O ar comprimido, por sua vez, passa por uma válvula de  $\frac{1}{4}$  (4), segue para um filtro de linha (7) que regula a pressão e elimina a água líquida (que pode vir na rede) e por um rotâmetro (8) de ar que mede a vazão de ar alimentado. O ar e o GLP se encontram no misturador (10) e alimentam a câmara inferior de combustor, a mistura é da câmara distribuída em aspersores onde há a formação da chama. O combustor é encamisado (3) e a temperatura de entrada, de saída e vazão da água são medidas.

Figura 13 - Esquema da linha de combustão.

1- Linha de GLP, 2- linha de ar comprimido, 3- linha de água, 4- válvula ¼, 5- regulador de pressão 1,5 kgf, 6- válvula agulha; 7- filtro de linha, 8- rotâmetro, 9- fluxômetro de gás; 10- misturador, 11- combustor.

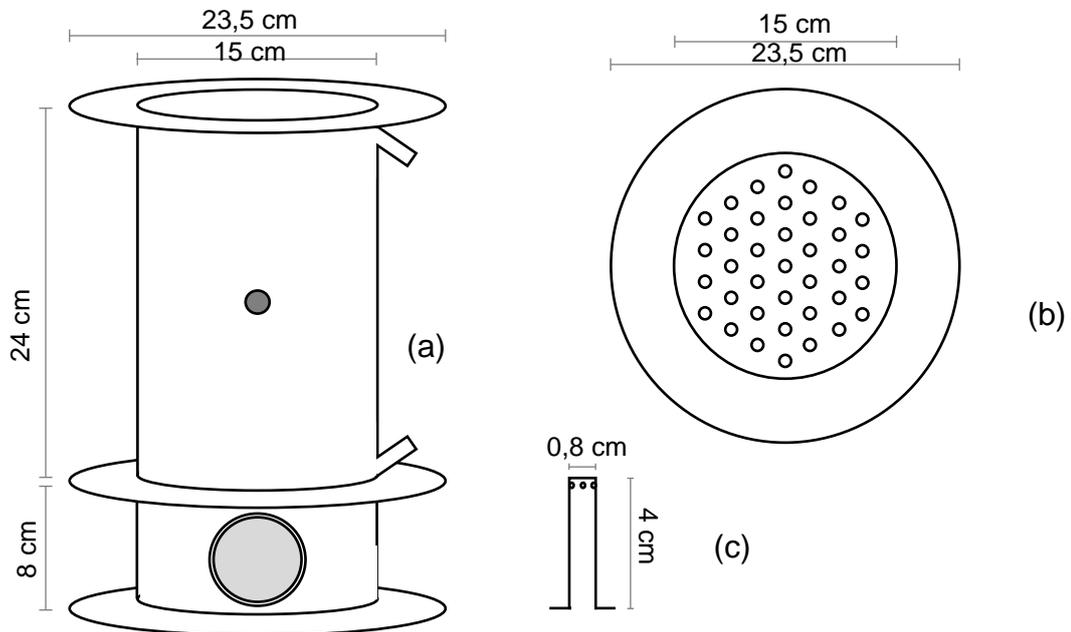


Fonte: Autor, 2023.

O combustor foi construído em aço inox, com formato cilíndrico de diâmetro interno de 15 cm e espessura de 1mm, com dois compartimentos como o esquema apresentado na Figura 14(a). O compartimento inferior tem 8 cm de comprimento e funciona como uma câmara de mistura dos gases, ao chegar na câmara, o gás expande rapidamente, quase adiabaticamente, reduzindo a temperatura. O compartimento inferior possui uma válvula de segurança de 5,5 cm de diâmetro interno, formada pelo encaixe de uma manta de silicone de 2 mm de espessura entre duas peças circulares de inox ligadas à câmara. A válvula de segurança entra em funcionamento em caso de aumento da pressão ou super aquecimento da câmara superior, rompendo o silicone e aliviando a pressão na câmara inferior onde não há combustão. A câmara inferior é ligada à superior por um pleno com bicos aspersores distribuídos em arranjo triangular, Figura 14(b). Com o arranjo triangular se obteve maior densidade de aspersores no pleno. Os aspersores medem 4 cm de altura e 0,8 cm de diâmetro e cada um tem 6 furos de 1 mm distribuídos equidistantes na sua circunferência, como apresentado na Figura 14(c). A câmara superior tem 24 cm de comprimento e é propriamente onde ocorre a combustão. Por ser formada por dois tubos concêntricos, tem-se um camisa ao redor do leito de combustão, os bicos laterais de 3 cm de comprimento servem para a entrada e saída de água da camisa. No centro do leito de combustão foi acoplado o sistema de ignição elétrica formado

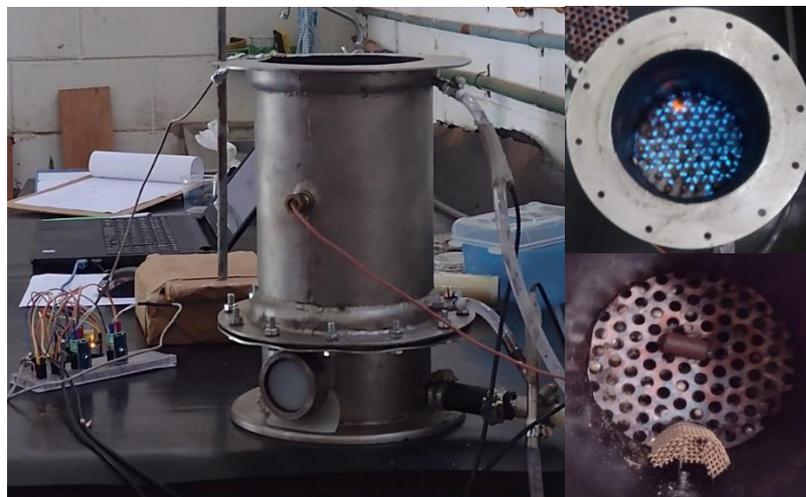
por uma vela de 3,5 cm revestida de porcelana, o terminal da vela foi prolongado 8 cm para baixo até o topo do aspersor para que a centelha fosse disparada próxima a saída do gás. Para os ensaios de queima do pellet foi colocada uma grade acima dos aspersores como suporte. A Figura 15 apresenta a imagem do combustor.

Figura 14 - Detalhes da geometria do combustor.



Fonte: Autor, 2023.

Figura 15 - Combustor de aço inox construído pelo Centro de Secagem.



Fonte: Autor, 2023.

### 3.3. Métodos

#### 3.3.1. Caracterizações

Nos subtópicos seguintes são apresentadas as caracterizações físicas e térmicas utilizadas para a borra de café, bagaço de cana e bagaço de laranja analisados e suas respectivas metodologias.

#### 3.3.2. Análise Elementar

Foram realizadas microanálises de CNHS para determinação da composição dos elementos de C, N, H e S dos resíduos estudados: borra de café, bagaço de cana e bagaço de laranja. Os ensaios foram realizados no equipamento Fisons – EA1108 da CE Instruments utilizando o software EAGER 200 pela Central Analítica do Departamento de Química da UFSCar em duplicata.

#### 3.3.3. Análise granulométrica

Para análise granulométrica das amostras de borra de café duas metodologias foram utilizadas. Na primeira o diâmetro médio de partícula foi determinado por ensaios de peneiramento, utilizando as peneiras de mesh 18, 25, 35, 45, 60, 80, 120 e 270 da ASTM sob a amplitude de vibração de 1,5mm por 15min em um sistema de peneiras vibratórias. Na segunda, imagens das partículas foram obtidas pelo *Digital Microscope Eletronic Magnifier* e analisadas no software *Image pro plus 7*. No software foi utilizada a ferramenta *measure* para as principais medidas dos objetos da imagem:

- diâmetro mínimo: é comprimento da linha mais curta que une dois pontos do contorno do objeto passando pelo seu centroide.
- diâmetro médio: é calculado pela média dos comprimentos medidos em intervalos de dois graus que passam pelo centroide.
- diâmetro máximo: é comprimento da linha mais longa que une dois pontos do contorno do objeto passando pelo seu centroide.
- perímetro: é o comprimento do contorno do objeto.

- área: é a área projetada em um plano paralelo a partícula.
- aspecto: é a razão entre o eixo maior e o eixo menor da elipse equivalente ao objeto.

### 3.3.4. Análises térmicas

Todos os materiais foram submetidos às análises de calorimetria exploratória diferencial, análises termogravimétricas e diferencial térmica. Para as análises de calorimetria exploratória diferencial (DSC) foi utilizado o equipamento DSC-50 (Shimadzu) a razão de aquecimento de 10 °C/min entre 40 e 540°C em atmosfera de inerte (Nitrogênio a 30mL/min) e oxidante. A massa de amostra inicial foi de 6-8 g e foi adotado cadinho de alumina como referência. As análises termogravimétricas e diferencial térmica foram conduzidas no equipamento DTG-60H (Shimadzu) a uma taxa de aquecimento de 10°C/min da temperatura ambiente até 1000°C. As massas iniciais das amostras foram de aproximadamente 10mg. Os ensaios foram executados sob escoamento de 50mL/min de nitrogênio ou ar, atmosferas inerte ou oxidante, respectivamente. Apenas para a pirólise foi avaliada a variação da taxa de aquecimento entre 10 e 40 °C/min. Como respostas foram obtidos os perfis da TGA (análise termogravimétrica), DrTGA (termogravimetria derivada) e DTA (análise diferencial térmica). Para análise do processo de combustão foram adotados os parâmetros definidos e apresentados na Tabela 3.

Para a análise teórica do comportamento das misturas binárias foi feita a comparação da curva de DrTGA obtida experimentalmente na termobalança com resultados obtidos considerando a mistura dos resíduos como uma mistura ideal. Para a determinação da DrTGA teórica foram utilizadas as curvas de cada um dos três resíduos individualmente. A DrTGA teórica para a mistura de borra de café com bagaço de cana foi determinada através da Equação (12), enquanto a DrTGA teórica para a mistura de borra de café e bagaço de laranja foi determinada através da Equação (13).

$$(DrTGA)_{borra/cana} = 0,5(DrTGA)_{borra} + 0,5(DrTGA)_{cana} \quad (12)$$

$$(DrTGA)_{borra/laranja} = 0,5(DrTGA)_{borra} + 0,5(DrTGA)_{laranja} \quad (13)$$

### 3.3.5. Elutriação

Os experimentos de elutriação foram conduzidos no leito fluidizado e no vibrofluidizado em batelada a partir da metodologia descrita por Colakyan e Levenspiel (1984). Foram utilizados 0,100 e 0,250 kg de borra seca por ensaio e coletada a massa elutriada em intervalos de tempo preestabelecidos, durante 120min. Os parâmetros foram combinados como apresentados na Tabela 5 e definidos a partir de testes preliminares que levaram em consideração o tamanho do equipamento e quantidade de resíduo utilizada por ensaio. Para os ensaios com temperaturas de 70 e 80°C, o leito foi estabilizado com o seguinte procedimento: o leito foi ligado, a temperatura e a velocidade de operação foram ajustadas, a partir do momento que estas entravam em estado estacionário esperava-se cerca de 1h para iniciar o experimento. As combinações de amplitude e frequência vibracional, bem como o adimensional de vibração são apresentados na Tabela 6, escolhidos de acordo com testes preliminares e norteados pelos trabalhos de Costa (2017); Daleffe (2005) e Meili (2009).

Tabela 5 - Condições operacionais dos ensaios de elutriação.

Massa (g)	Temperatura (°C)	Velocidade (m/s)	Amplitude (m)	Frequência (RPM)
100	Ambiente	0,5	0,000	0
250	Ambiente	0,5	0,000	0
250	70	0,5	0,000	0
250	80	0,5	0,000	0
250	70	0,75	0,000	0
250	70	0,5	0,015	200
250	70	0,5	0,015	300
250	70	0,5	0,015	400
250	70	0,5	0,003	200
250	70	0,5	0,003	300
250	70	0,5	0,003	400

Tabela 6 - Combinações de amplitudes e frequências para ensaios de elutriação e adimensional de vibração.

A (m)	f (RPM)	$\Gamma$ (-)
0	0	0,00
0,003	200	0,13
	300	0,30
	400	0,54
0,015	200	0,67
	300	1,51
	400	2,68

### 3.3.6. Secagem em leito vibrofluidizado

Os experimentos de secagem foram conduzidos em regime batelada buscando avaliar como os parâmetros de vibração mecânica do leito (frequência e amplitude do leito), a temperatura e a velocidade do ar afetam a umidade. Para os ensaios em batelada em leito vibrofluidizado foram utilizadas as condições operacionais apresentadas na Tabela 7, semelhantes aos ensaios de elutriações, exceto pela condição de temperatura ambiente, que não foi utilizada na secagem. Foram umidificadas 250g de borra seca 12h antes do experimento para umidade de 45% (b.u) por adição de água. Para a estabilização do leito de secagem foi adotado o seguinte procedimento: o leito foi ligado, a temperatura e a velocidade operação foram ajustadas, a partir do momento que estas entravam em estado estacionário esperava-se cerca de 1h para iniciar o experimento. Durante o ensaio foram coletadas amostras em intervalos de tempo específicos do interior do leito, dessas amostras foi aferida a umidade por gravimetria, pelo método de 24h na estufa a 105°C. Todos os ensaios foram realizados em tempo total de 120min.

Tabela 7 - Condições operacionais dos ensaios de secagem em batelada.

Temperatura (°C)	Velocidade (m/s)	Amplitude (m)	Frequência (RPM)
70	0,5	0,000	0
70	0,75	0,000	0
80	0,5	0,000	0
80	0,75	0,000	0
70	0,5	0,015	200
70	0,5	0,015	400
70	0,5	0,003	200
70	0,5	0,003	400

### 3.3.7. Secagem em estufa de convecção forçada

Com o objetivo de avaliar a influência do tamanho de partícula sob o comportamento de secagem, foram realizados ensaios de cinética de secagem da borra de café em estufa de circulação forçada (Figura 12, pág. 59), com renovação do ar para borra com diâmetro médio de 610, 450, 236 e 213  $\mu\text{m}$ . Os dados de massa foram coletados em intervalos de tempos pré-determinados na balança acoplada à estufa. Os ensaios foram realizados com amostras de aproximadamente 8,5 g a 45% (b.u.) com espessura de 1cm. As condições operacionais adotadas foram a temperatura de 70°C e velocidades de circulação de ar de 0,22 e 0,48 m/s, respectivamente. A velocidade de 0,48m/s foi escolhida por ser a velocidade mais próxima a 0,5m/s, que foi a velocidade que melhor favoreceu os experimentos de elutriação e a velocidade de 0,22m/s foi escolhida com a finalidade de verificar a influência da variação de velocidade sob o comportamento de secagem dos materiais com diferentes granulometrias. Os experimentos foram realizados em triplicata, totalizando 24 experimentos.

Com os dados de massa fornecidos pela balança, a umidade adimensional  $XR = f(t)$  foi calculada de acordo com a definição:

$$XR = \frac{X_t - X_f}{X_0 - X_f} \quad (14)$$

Onde  $X_t$  é a umidade da amostra no tempo  $t$ ,  $X_f$  é a umidade final do ensaio e  $X_0$  é a umidade inicial da amostra.

Foi avaliado o ajuste das equações empíricas (1), (2) e (3) de cinética de secagem apresentadas na Tabela 1 e, para avaliar a qualidade do ajuste, foram utilizados os coeficientes de determinação  $R^2$  e RSME (*root mean square error*), Equações (15) e (16), onde  $XR_{pre,i}$  é a umidade prevista pela equação,  $XR_{exp,i}$  é a umidade obtida experimentalmente,  $\overline{XR}$  é a umidade média e  $N$  é quantidade de pontos experimentais. Com a umidade adimensional foi também calculada a taxa de secagem para cada intervalo de tempo. E para o cálculo do número de Biot mássico e da difusividade efetiva foi utilizada a solução analítica de Crank (1957) de acordo com a Equação (9).

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (XR_{pre,i} - \overline{XR})^2}{\sum_{i=1}^N (XR_{exp,i} - \overline{XR})^2} \quad (15)$$

$$RMSE = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (XR_{pre,i} - XR_{exp,i})^2 \right]^{1/2} \quad (16)$$

### 3.3.8. Produção e caracterização dos pellets

Os pellets foram produzidos um a um por compactação em uma prensa hidráulica SIWA que atinge até 16tonf. Para moldar o formato do pellet foi utilizada uma matriz de molde de aço, que é apresentada na Figura 16. A partir de testes preliminares, foi definido 5g de massa e 6tonf carga de pressão como suficientes para a formação dos pellets. Assim, as 5g de biomassa eram pesadas e colocadas, com auxílio de um funil, na matriz de molde e, em seguida, compactada a 6tf na prensa hidráulica. Foram produzidos pellets dos resíduos puros: três granulometrias distintas de borra de café, bagaço de laranja e bagaço

de cana e das misturas: borra de café - bagaço de laranja e borra de café - bagaço de cana, ambas as misturas na proporção de 1:1.

Figura 16 - Moldes de aço para pellets cilíndricos.



Fonte: Autor, 2023.

Os pellets produzidos foram caracterizados pelo seu tamanho, resistência mecânica e absorção de água, como descrito nos tópicos seguintes, adaptados de (KALIYAN; VANCE MOREY, 2009):

- Tamanho: as dimensões dos pellets (diâmetro e comprimento) foram medidas com um paquímetro digital convencional.
- Índice de durabilidade (PDI): foi calculado como a razão entre a massa anterior e posterior de 1 pellet submetido à movimentação dentro de uma panela rotativa a 34 RPM por 10 min.
- Durabilidade: cada pellet foi solto de uma altura de 1,85 m individualmente, uma única vez, e a durabilidade calculada, em porcentagem, pela diferença de massa do pellet antes e depois da queda, independentemente se o pellet se partiu em pedaços ou não.
- Índice de Resistência à impacto: cada pellet foi solto de uma altura de 1,85 m até que se partissem ou no máximo até quatro vezes. E o índice de resistência à impacto (IRI) foi calculado como  $IRI = (100 \times N)/n$ , onde N é o número de quedas e n o número de pedaços após N quedas.

- Absorção de água: cada pellet foi imerso completamente em um béquer contendo 80mL de água por 10s. A quantidade de água absorvida foi verificada por diferença de massa.
- Resistência à compressão: os ensaios foram realizados com o pellet no sentido horizontal até a sua ruptura em uma máquina universal para ensaios de resistência à compressão modelo 5969R da Instron com uma célula de carga de 5000 N a velocidade de 10 mm/min.

### 3.3.9. Ensaios de combustão

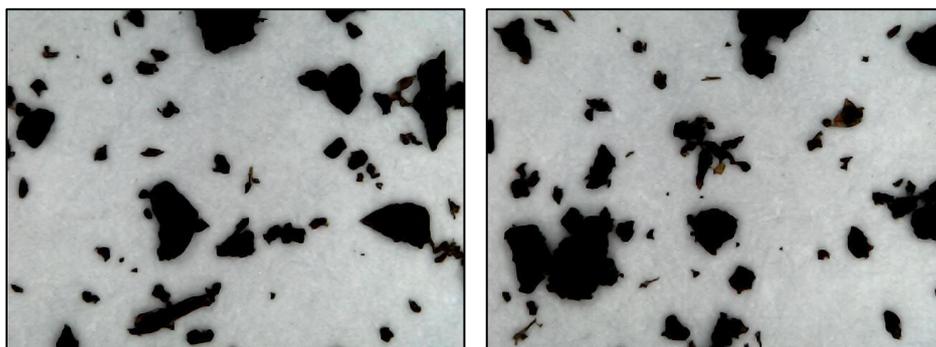
Os ensaios de combustão foram realizados no equipamento apresentado nas Figura 13 e Figura 15, com um aparato de filmagem. Para a realização dos ensaios, um pellet era alocado no centro do combustor, a câmera de filmagem ligada, então eram ajustadas a vazão de ar e a vazão de GLP e a centelha de ignição. O combustor era aceso 11s após o gás ser aberto e o sistema de ignição ligado. O sistema era mantido assim por 3min e 30s (tempo encontrado nos ensaios preliminares como suficiente para que todos os resíduos entrassem em ignição), então a vazão de GLP era desligada e a queima do pellet era avaliada. Foram utilizadas as vazões de ar de 31 e 44 L/min. Ao final do experimento com o auxílio da filmagem eram identificados os tempos em que a primeira chama no resíduo era formada (quando a ignição do biocombustível ocorre); em que inicia a combustão em toda a superfície do pellet; o tempo de duração da queima do pellet sem combustível auxiliar com chama aparente e o tempo da queima no interior do pellet após a chama ser apagada, além disso eram contabilizadas as cinzas finais e o material remanescente.

## 4. Resultados e Discussões

### 4.1. Caracterização física

A caracterização física da borra foi feita a partir de imagens de microscópio. Duas das 10 imagens feitas para a borra crua que foi utilizada nos experimentos são apresentadas na Figura 17. Pode ser identificado visualmente a ampla distribuição granulométrica, a heterogeneidade das partículas e a irregularidade do formato. Para mensurar essas características foram adotadas medidas de: área, aspecto, diâmetro máximo, diâmetro mínimo, diâmetro médio e perímetro, pela análise das imagens no software *Image Pro Plus 7*.

Figura 17 - Imagem da borra bruta com distribuição granulométrica inicial.



Fonte: Autor, 2023.

Os dados dessa caracterização são apresentados na Tabela 8, onde se observa uma ampla variação em todos os parâmetros adotados. Os dados médios foram obtidos das 328 partículas contadas pelo *Image Pro Plus 7* a partir das 10 fotos selecionadas. A média dos diâmetros médios das 328 foi de  $246 \pm 221 \mu\text{m}$ , que variou entre o diâmetro mínimo de  $12 \mu\text{m}$  e o máximo de  $2355 \mu\text{m}$ , justificando o desvio padrão ser semelhante ao valor da média das medidas. Essa alta variação é refletida também nos dados de área e perímetro. A medida do aspecto foi adotada para verificar o quanto que se poderia aproximar as partículas de borra para uma partícula esférica (na esfera, o aspecto =1). As menores partículas possuem aspecto mais próximo a 1, as maiores se

distanciam. O amplo intervalo, entre 1 e 11, caracteriza a heterogeneidade do formato do particulado.

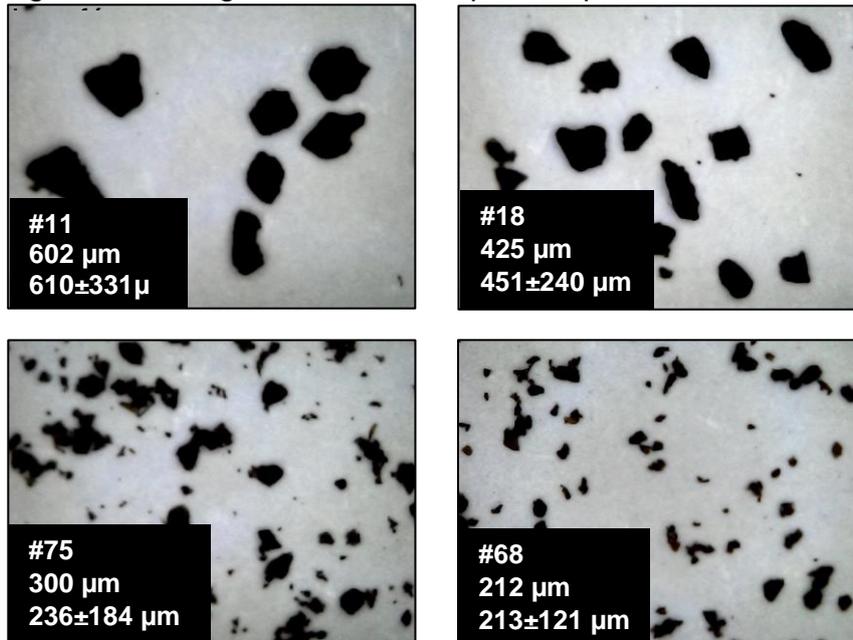
Tabela 8 - Dados de caracterização dimensional da borra bruta para 328 partículas.

Estatística	Área (mm <sup>2</sup> )	Aspecto -	Diâmetro máximo (µm)	Diâmetro mínimo (µm)	Diâmetro médio (µm)	Perímetro (µm)
Mínimo	0,001	1,021	-	12	-	65
Máximo	1,438	11,465	2355	-	-	11684
Média	0,095	1,886	-	-	246	1063
Desvio padrão	0,172	1,004	-	-	221	1269

Fonte: Autor, 2023.

Na Figura 18 são apresentadas as imagens para 4 granulometrias de partículas pré-selecionadas. Na legenda de cada figura é descrita a quantidade de objetos identificada pelo software (número precedido pelo símbolo: #), o diâmetro médio obtido pela média das aberturas das peneiras onde o material ficou retido e o diâmetro médio e desvio padrão calculados pela ferramenta *measure* do *Image Pro Plus 7*. Pode-se observar que o diâmetro médio obtido pela análise de imagem está em concordância com o obtido pela análise granulométrica nas peneiras na mesma faixa granulométrica, e esse dado deu suporte ao uso da metodologia de análise de imagem do microscópio para a avaliação do diâmetro do pó dos tópicos seguintes. Foi verificado a redução do desvio padrão das partículas dos grupos em relação à borra bruta. Isto se deve justamente à redução da amplitude de tamanhos contabilizados.

Figura 18 - Imagens de microscópio das partículas de borra



Fonte: Autor, 2023.

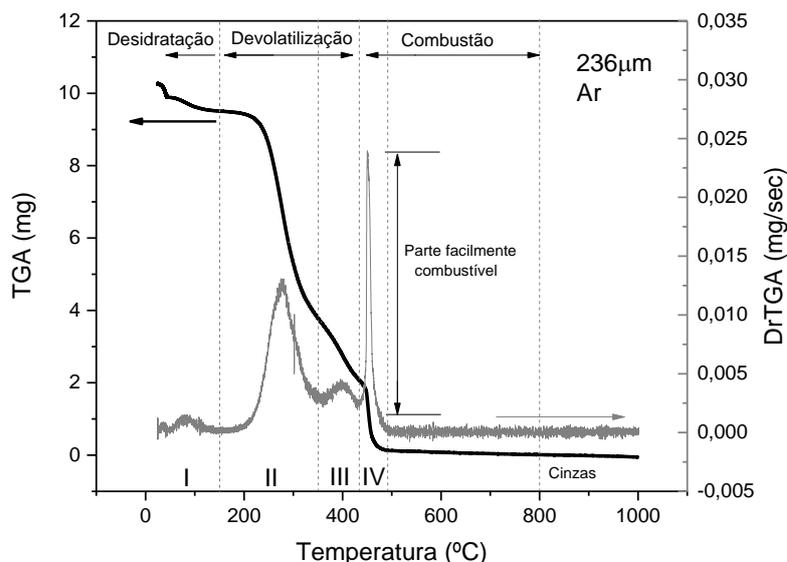
## 4.2. Caracterização térmica da borra de café

Nesse tópico são apresentados os principais resultados da decomposição térmica da borra de café em atmosfera oxidante e inerte e calculado os principais parâmetros do processo oxidativo em função da granulometria. Esses resultados descrevem o comportamento térmico da borra de café e direcionam o tratamento da borra para os tópicos seguintes.

### 4.2.1. Características de degradação térmica sob atmosfera oxidativa

As curvas de perda de massa (TGA) e taxa de perda de massa (DrTGA) em função da temperatura, à taxa de aquecimento de  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$  para amostra de borra de café com diâmetro médio de partícula de  $236 \mu\text{m}$  são apresentadas na Figura 19. São observados 4 estágios de perda de massa: um de evaporação da umidade, dois de devolatilização oxidativa dos componentes e o último atribuído à combustão do carvão.

Figura 19 - Curvas de TGA e DrTGA de borra de café com 236 $\mu$ m em atmosfera oxidativa a taxa de aquecimento de 10°C/min.

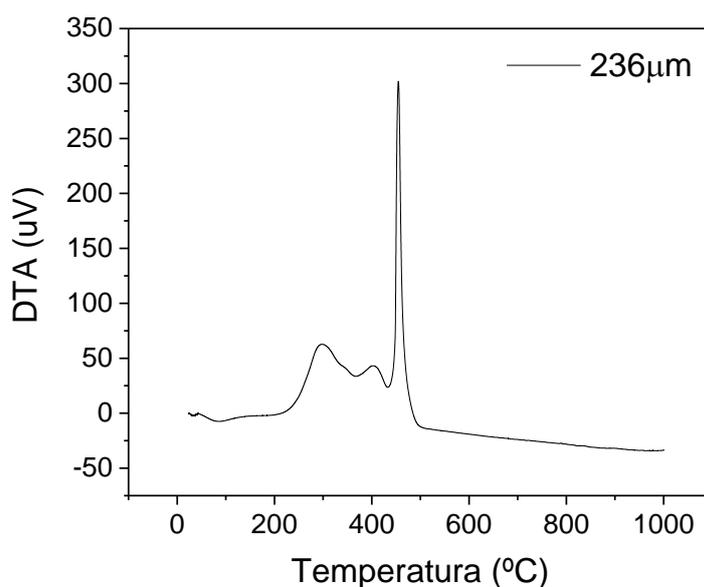


Fonte: Autor, 2023.

O estágio I é atribuído à volatilização das moléculas leves e principalmente à evaporação da água, entre as temperaturas de 25 e 152°C associado ao primeiro pico da curva de DrTGA. Neste intervalo houve uma perda de massa da amostra de aproximadamente 7,44%, que pode ser adotado como a umidade contida no material. O estágio II encontra-se entre 185 e 360°C, neste estágio inicia-se a degradação térmica dos principais componentes desta biomassa: hemicelulose, celulose e lignina. O pico máximo deste estágio está a 278°C, que é uma temperatura intermediária entre o primeiro pico da degradação da hemicelulose (251°C) e celulose (296°C) isoladamente (ÓRFÃO; ANTUNES; FIGUEIREDO, 1999). Neste estágio também há o início da leve devolatilização da lignina a partir de aproximadamente 186°C (VAMVUKA; SFAKIOTAKIS, 2011). Em seguida, tem-se o estágio III, entre 360 e 430°C, que é caracterizado como o segundo pico da região de volatilização, a 396°C. Neste estágio a degradação térmica simultânea de lignina e da hemicelulose são completadas, visto que, quando analisadas individualmente, o pico da DrTGA da lignina ocorre a 389 °C e o segundo da hemicelulose a 401°C (ÓRFÃO; ANTUNES; FIGUEIREDO, 1999). O estágio IV, por sua vez, está associado à combustão propriamente dita do carvão formado após as etapas anteriores. Este fenômeno

ocorre em uma pequena faixa de temperatura, 430-496°C, podendo ser identificado na curva de DTA como o ponto de maior liberação de energia (Figura 20). Após esse pico, a massa remanescente passa por um processo de combustão residual, leve e gradual, que se estende até 800°C. O conteúdo de cinzas foi de 0,12%, a baixa porcentagem significa a queima praticamente completa do material analisado.

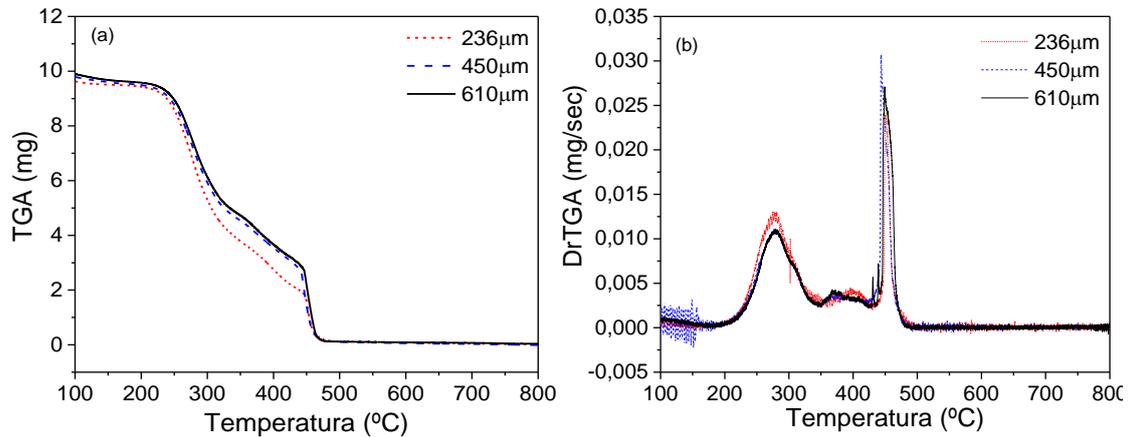
Figura 20 - Curva de DTA de borra de café com 236µm em atmosfera oxidativa a taxa de aquecimento de 10°C/min.



Fonte: Autor, 2023.

Na Figura 21 são apresentadas as curvas de TGA e DrTGA para borra de café de 236, 450 e 610µm em atmosfera oxidativa a taxa de aquecimento de 10°C/min. Pode-se observar o perfil de decomposição térmica bastante semelhante, assim como a sobreposição dos picos da DrTGA entre as três granulometrias. Na região da decomposição térmica dos principais componentes do material, estágios II e III, nota-se que a taxa de decomposição foi mais rápida quanto menor o diâmetro de partícula. Provavelmente a maior área superficial da amostra favorece as reações neste intervalo, sendo particularmente melhor observado na amostra de 236µm.

Figura 21 - (a) perfil da TGA e (b) DrTGA para amostras de borra de café com 236, 450 e 610 $\mu$ m em atmosfera oxidativa a taxa de aquecimento de 10°C/min.



Fonte: Autor, 2023.

Na Tabela 9 são identificados os intervalos de temperatura de cada estágio e a umidade e cinzas calculados para as três granulometrias. Todos estes parâmetros foram próximos entre si, não sendo observada nenhuma tendência específica. Isto sugere a homogeneidade da constituição química do material, independentemente do tamanho de partícula na faixa adotada.

Tabela 9 - Intervalos de temperatura de cada estágio do processo de combustão e porcentagem de umidade e cinzas calculados.

	<b>Estágio I</b>	<b>Estágio II</b>	<b>Estágio III</b>	<b>Estágio IV</b>	<b>Umidade</b>	<b>Cinzas</b>
dp ( $\mu$ m)	Secagem (°C)	Devol. (°C)	Devol. (°C)	Combustão (°C)	% (b.u)	%
236	25-152	182-360	360-430	430-496	7,44	0,12
450	25-185	207-351	351-428	428-489	7,84	0
610	25-180	190-350	350-426	426-491	6,15	0,38

Fonte: Autor, 2023.

Apesar de não ter sido verificada variação significativa nos estágios de combustão em função do tamanho da partícula, os parâmetros de combustão como temperatura de ignição, burnout e liberação de voláteis, bem como o índice de ignição e combustão são apresentados, para constatação, na Tabela 10. A temperatura de ignição deste trabalho está entre os encontrados por Jeguirim et al. (2014) e Gómez-de la Cruz et al. (2015), 200 e 250 °C, respectivamente; para borra de café sem especificação da granulometria. Observa-se também que a temperatura de ignição apresentou um aumento de 5 °C com o aumento de 450 para 610µm. O aumento na temperatura de ignição com o aumento do tamanho de partícula, nesta mesma grandeza, também foi encontrado por Kizgut e Yilmaz, (2004) em análises de TGA de combustão de carvão entre 75 e 250µm, onde foi verificada a influência do diâmetro de partícula no processo de combustão. Já a temperatura de queima completa apresentou uma leve diminuição com o aumento do tamanho de partícula, comportamento diferente do apresentado por Kizgut e Yilmaz, (2004) e Vamvuka e Sfakiotakis (2011), que verificaram o aumento da temperatura de burnout com aumento do tamanho de partícula. Essas tendências não se refletem nos índices de ignição e combustão, onde as partículas de tamanho intermediário obtiveram melhor performance. Isso se deve, ao fato de ambos os índices terem levado em conta a taxa de perda de massa máxima, que foi maior na DrTGA da amostra de 450µm (Figura 21 (b)).

Tabela 10 - Características do processo de combustão de borra de café.

dp (µm)	Temperatura (°C)			Índice de ignição (mg/s <sup>3</sup> )	Índice de combustão (mg) <sup>2</sup> /(s <sup>2</sup> °C <sup>3</sup> )
	ignição	burnout	liberação voláteis		
236	235	504	174	2,68E-09	1,28E-12
450	235	500	164	3,97E-09	2,48E-12
610	240	488	180	3,48E-09	1,43E-12

Fonte: Autor, 2023.

Na Tabela 11 são apresentadas as reatividades por estágio que podem explicar a melhor performance do índice de combustão das partículas de

tamanho intermediário. De acordo com a Tabela 11, quanto menor o tamanho das partículas maior foi a reatividade obtida nos estágios de decomposição, II e III, corroborando com o que foi examinado na análise da Figura 21. Já para o estágio IV, a amostra de 450µm apresentou maior reatividade e a amostra de menor granulometria, a menor reatividade. Provavelmente a amostra de 236 µm obteve menor massa de carvão formada para entrar em combustão após os estágios II e III diminuindo assim a sua reatividade. E a amostra de 610 µm, por ser a de maior tamanho, teve menor área superficial disponível para reação. O que fez com que, no estágio IV, amostra de 450 µm apresentasse melhor desempenho em termos de velocidade de reação. Assim, o tamanho intermediário oferece, no caso, a melhor combinação em termos de volume e área superficial para a combustão e formação de C para a reatividade.

Tabela 11 - Reatividade da borra de café por estágio de combustão.

dp (µm)	Reatividade (mg/s°C)		
	Estágio II	Estágio III	Estágio IV
236	4,68E-05	1,11E-05	5,11E-05
450	4,05E-05	0,98E-05	6,91E-05
610	3,95E-05	1,04E-05	6,01E-05

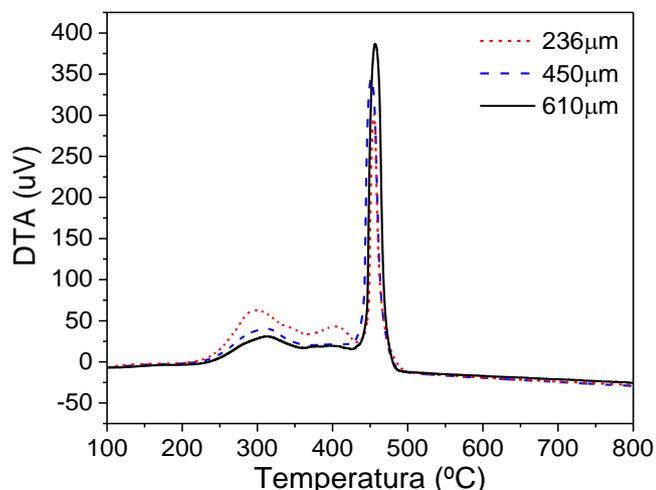
Fonte: Autor, 2023.

Ao analisar as curvas de DTA, Figura 22, são identificados três picos de eventos exotérmicos, que por sua vez estão associados aos estágios II, III e IV, nesta ordem. Nota-se que nos estágios II e III, quanto menor o diâmetro do material, maior a energia térmica dissipada. Já no estágio IV de combustão, maior quantidade de energia foi liberada quanto maior o diâmetro da partícula, provavelmente a taxa de reação intermediária associada à maior quantidade de massa remanescente possibilitou maior dissipação térmica.

Pode-se verificar a partir desta caracterização térmica de combustão que o diâmetro de partícula exerce influência sobre o processo. Os estágios de

decomposição térmica II e III são favorecidos pelo menor diâmetro de partícula em termos de temperatura de ignição, velocidade de reação e dissipação de energia. Já no estágio de combustão, IV, as maiores partículas tiveram melhor performance. A de 450  $\mu\text{m}$  em termos de velocidade de reação e a 610  $\mu\text{m}$ , em dissipação térmica e temperatura de burnout. Vale ressaltar que análise apresentada não leva em consideração a heterogeneidade relacionada a safra, ao solo, a variação da constituição química das partículas, tipo de processamento, inerentes ao particulado de origem orgânica.

Figura 22 - DTA para amostras de borra de café com 236, 450 e 610  $\mu\text{m}$  em atmosfera oxidativa a taxa de aquecimento de  $10^\circ\text{C}/\text{min}$ .



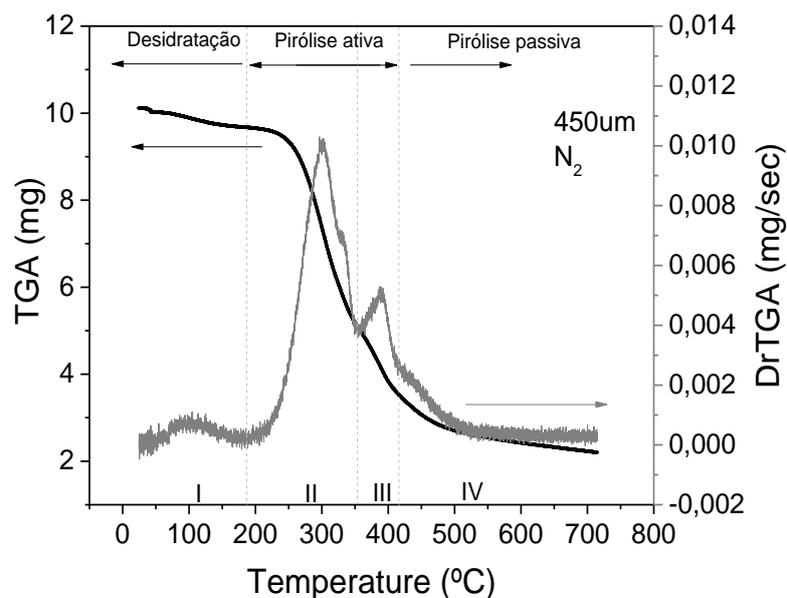
Fonte: Autor, 2023.

#### 4.2.2. Características de degradação térmica sob atmosfera inerte

As curvas TGA e DrTGA em função da temperatura à taxa de aquecimento de  $10^\circ\text{C}/\text{min}$  são apresentadas na Figura 23 para a partícula de 450  $\mu\text{m}$ . O comportamento de ambas as curvas é típico de biomassa lignocelulósica em atmosfera inerte, três regiões são identificadas: a evaporação de água (desidratação), a zona de devolatização (pirólise ativa) e a formação do carvão (pirólise passiva). A região de evaporação de água, estágio I, é observada ao redor de 100  $^\circ\text{C}$  até aproximadamente 180  $^\circ\text{C}$ , um intervalo comum de

evaporação de água ligada. A zona de devolatização é caracterizada pela decomposição térmica dos principais componentes da biomassa nos estágios II e III. Nesta região as temperaturas de pico de 300, 340 e 390 °C são identificadas, as quais podem ser atribuídas à decomposição da hemicelulose, celulose e lignina, respectivamente (LI; STREZOV; KAN, 2014; TSAI; LIU, 2013), conforme apresentados na Tabela 12, estes dados estão de acordo com os presentes na literatura. Vale ressaltar que pouca variação entre os dados foi encontrada mesmo com a modificação da rampa de aquecimento e tipo de gás inerte utilizado. Além disso, verificou-se a semelhança com os intervalos apresentados na Tabela 9 para decomposição térmica por combustão, indicando a decomposição dos mesmos componentes só que por outra rota termoquímica. Após a zona pirólise ativa, a perda de massa se torna muito lenta, há ainda uma leve degradação da lignina e a formação do carvão, esta é observada a partir de 408 °C, estágio IV.

Figura 23 - Curvas de TGA e DrTGA de borra de café com 450µm em atmosfera inerte a taxa de aquecimento de 10°C/min.



Fonte: Autor, 2023.

Tabela 12 - Dados de temperatura de pico ou intervalos de decomposição da pirólise da borra de café em diferentes condições: comparação com a literatura.

Autor	Rampa Aque. (°C/min)	Gás inerte	Evaporação de água (°C)	Intervalo ou pico de decomposição (°C)		
				Hemi.	Celul.	Lign.
Chen; Lu; Tsai (2012)	20	Nitrogênio	27-227	227-300	300-400	-
Tsai; Liu (2013)	10	Nitrogênio	50-150	227-300	300-397	-
Li; Strezov; Kan (2014)	10 60	Argônio Argônio	30-150 50-170	300 330	335 360	390 425
Jeguirim; Limousy; Dutournie (2014)	5	Nitrogênio	-	264	355	-
Fermoso; Mašek (2018)	10	Nitrogênio	50-125	310	350	400
<b>Este trabalho (450µm)</b>	<b>10</b>	<b>Nitrogênio</b>	<b>25-180</b>	<b>300</b>	<b>340</b>	<b>390</b>

Fonte: Autor, 2023.

Os 4 estágios do processo de pirólise para a borra de 450 µm, já descritos, a porcentagem de voláteis e conteúdo de cinzas mais carbono fixo são identificados e apresentados na Tabela 13. O conteúdo de cinzas e carbono fixo neste trabalho foi calculada a 800 °C e pode dar indícios do rendimento em processos de pirólise.

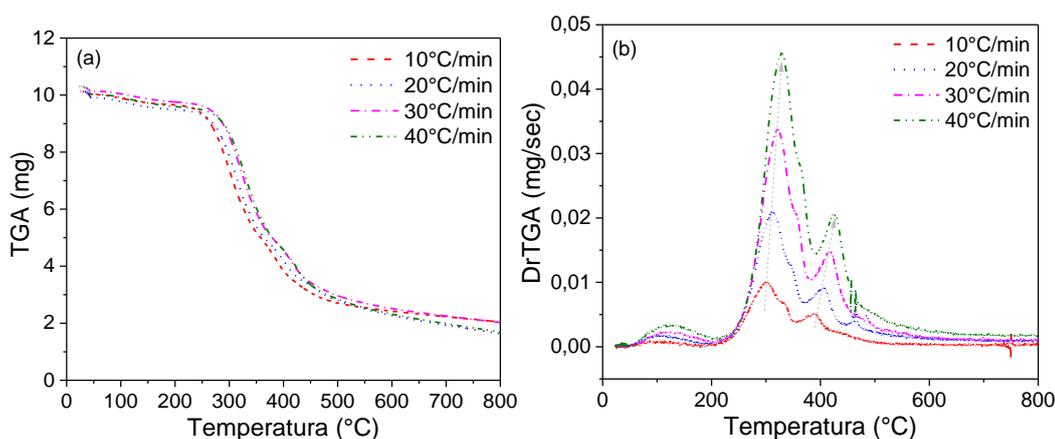
Tabela 13 - Intervalos de temperatura de cada estágio do processo de pirólise e conteúdo de matéria volátil da região de pirólise ativa e cinzas mais carbono fixo calculados para a borra de café de 450 µm.

Estágio I	Estágio II	Estágio III	Estágio IV	Voláteis	Cinzas + CF
Secagem (°C)	Pirólise ativa (°C)	Pirólise ativa (°C)	Pirólise passiva (°C)	(%)	(%)
25-188	188-355	355-408	408-1000	59,35	20,13

Fonte: Autor, 2023.

Na Figura 24 são apresentados os perfis de TGA e DrTGA para essa amostra com a taxa de aquecimento variando entre 10 e 40°C/min para análise do efeito da variação da taxa de aquecimento sobre o comportamento térmico da pirólise. Os principais efeitos observados foram o aumento da intensidade dos picos de decomposição, bem como o leve deslocamento positivo dos picos (identificados na Tabela 12) com o aumento da taxa de aquecimento. Isso significa que o aumento da taxa de aquecimento promove o aumento da temperatura e da velocidade de reação da decomposição da hemicelulose, celulose e lignina da borra de café. O deslocamento da temperatura de pico já era esperado, porque tendo as biomassas no geral baixa condutividade térmica, o aumento da taxa de aquecimento leva a menor difusão de calor na amostra, gerando um atraso no início das reações (LI; STREZOV; KAN, 2014).

Figura 24 - (a) perfil da TGA e (b) DrTGA para borra de café de 450 µm em atmosfera inerte.

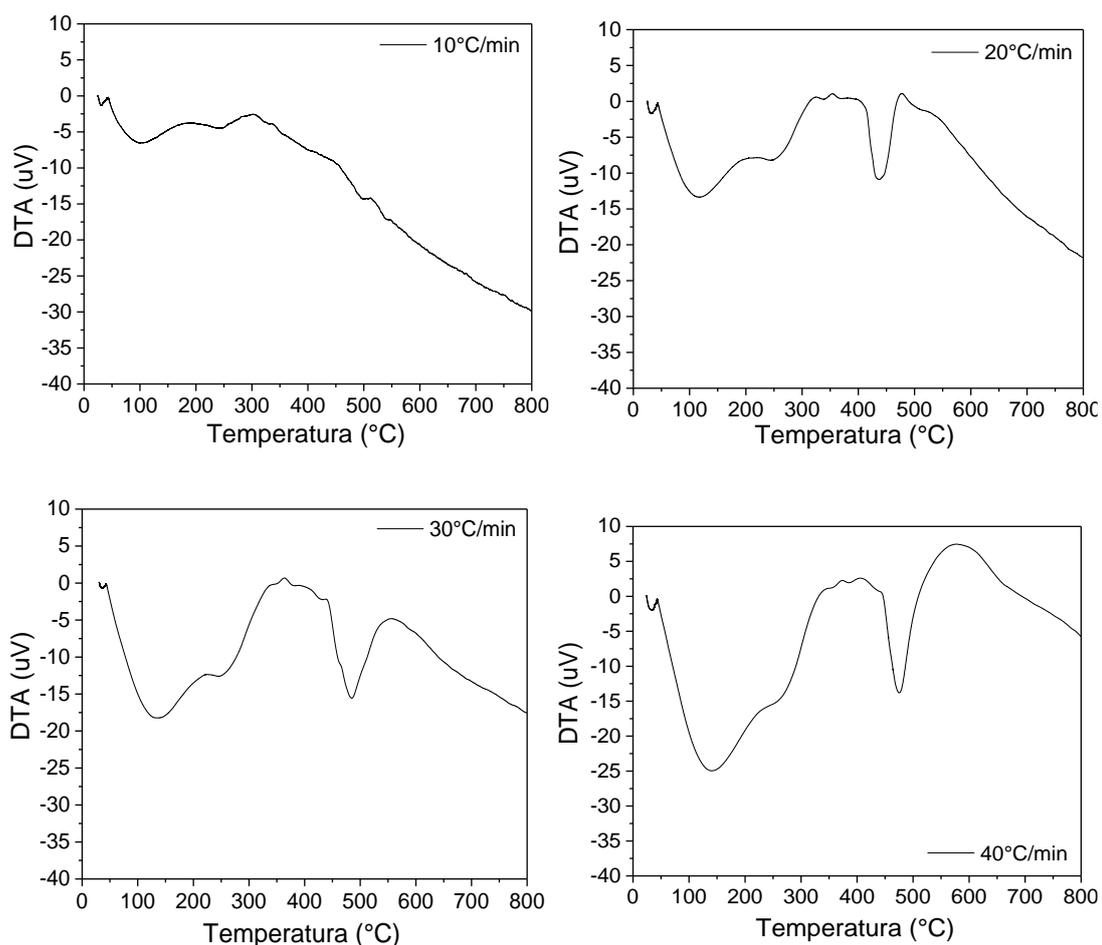


Fonte: Autor, 2023.

Na Figura 25 são apresentadas as curvas de DTA para as amostras de borra de café com 450 µm em atmosfera inerte com variação da taxa de aquecimento entre 10 e 40 °C/min. O aumento da taxa de aquecimento torna os eventos térmicos mais intensos, pode-se observar os picos endotérmicos de evaporação da água e decomposição da hemicelulose, celulose e lignina. Nota-se também que a 10 °C/min a curva de DTA teve bastante suavidade em relação

às demais taxas de aquecimento, isso acontece porque à menor taxa de aquecimento os eventos térmicos acontecem mais lentamente e passam se a sobrepor. Vale destacar especificamente que a degradação térmica da lignina ocorre de forma tão prolongada a essa taxa de aquecimento que o pico desse evento térmico (entre 400 e 500 °C) não é visto de forma tão evidente quanto nas outras taxas.

Figura 25 - DTA para amostras de borra de café com 450µm em atmosfera inerte variando a taxa de aquecimento.

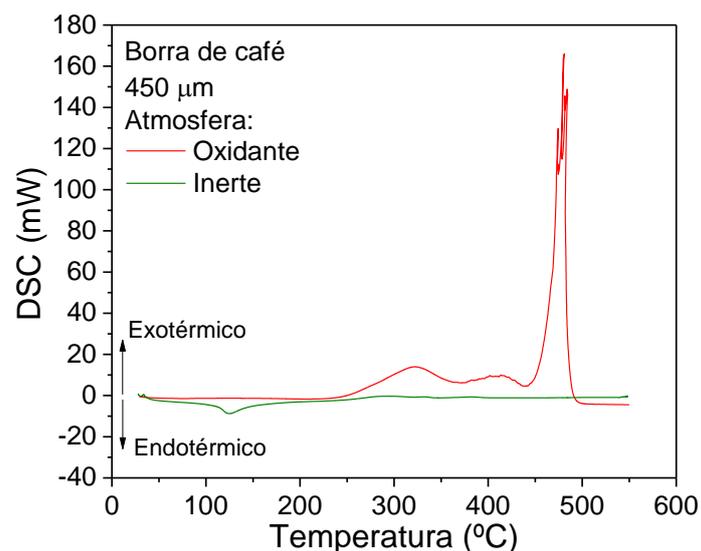


Fonte: Autor, 2023.

Para contrapor os efeitos térmicos descritos para processos de combustão e pirólise simultaneamente, na Figura 26 são apresentadas as curvas de DSC em função da temperatura em atmosfera inerte e oxidante para a borra

de café de 450  $\mu\text{m}$ , ambas com a taxa de aquecimento de 10  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ . Em uma análise detalhada, os intervalos de temperatura de evaporação de água e decomposição térmica da hemicelulose, celulose e lignina são semelhantes aos já descritos e discutidos para as curvas de TGA e DTA. Porém, observa-se que as reações exotérmicas de combustão da atmosfera oxidante liberam significativamente mais energia do que absorvem as reações endotérmicas de pirólise da atmosfera inerte. Essa comparação direta entre os dois processos não foi encontrada na literatura, porque, embora, alguns estudos tratem do comportamento térmico da borra de café em processos de pirólise isoladamente (CHEN; LU; TSAI, 2012; KELKAR *et al.*, 2015; LI; STREZOV; KAN, 2014), outros similares não tratam do comportamento térmico em processos de combustão (KANG *et al.*, 2017).

Figura 26 - Curvas de Calorimetria Exploratória Diferencial em função da temperatura.



Fonte: Autor, 2023.

Essa análise, pode ser apoiada também na avaliação simultânea dos dados de Tsai *et al.* (2012) para o processo de pirólise e Kang *et al.* (2017) para

o processo de combustão. Kang *et al.* (2017), ao avaliar as características a combustão da borra de café em uma caldeira de pequena escala, utilizaram a borra com 10% de umidade com poder calorífico de 20 MJ/kg. Por outro lado, Tsai *et al.* (2012), ao avaliar as condições do processo de pirólise, utilizaram borra de café com 11,5% de umidade e poder calorífico de 23,5 MJ/kg. As melhores condições indicadas por Tsai *et al.* (2012) é o tratamento térmico a 400 °C que gera uma produção de 38,6% (da massa inicial de borra) de biocarvão com poder calorífico de 31,9 MJ/kg. No entanto, o aumento do poder calorífico do biocarvão não é suficientemente para compensar a perda de massa inerente ao processo de pirólise. Assim, há 38% menos de energia total disponível na queima do bio-carvão produzidos por Tsai *et al.* (2012) do que para a queima direta uma mesma quantidade por Kang *et al.* (2017).

Esta caracterização, além de descrever o comportamento térmico de degradação da borra de café, indica as principais características das potencialidades do uso desse resíduo para processos de combustão e pirólise, suportando e complementando os dados da literatura. Com essa avaliação, e tendo em vista, a maior quantidade calor liberada em atmosfera oxidante em relação à absorvida em atmosfera inerte e a influência do diâmetro do pó observada em cada estágio de combustão, o tópico seguinte tratada do processo de formação e arraste de finos em leitos fluidizados e vibrofluidizados voltado para processos de secagem visando a aplicação da borra de café para a geração de energia por combustão na forma de pellets.

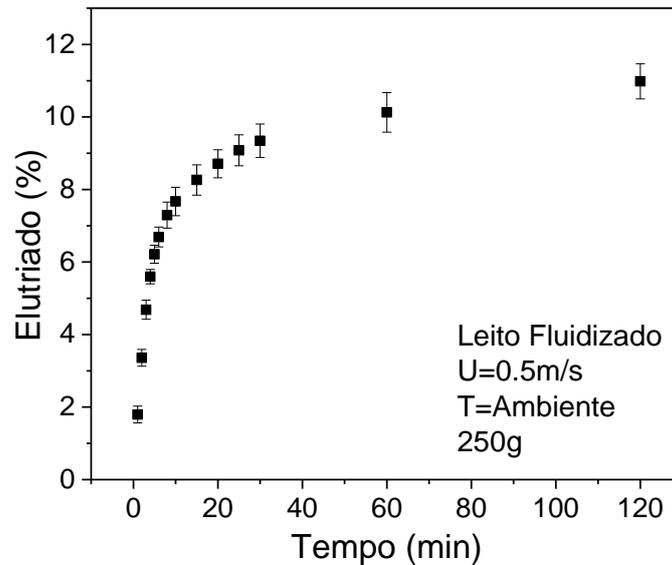
### 4.3. Elutriação

A formação e o arraste de partículas finas por processos de elutriação podem interferir o comportamento dinâmico em leitos de secagem e modificar a distribuição granulométrica do resíduo seco. A variação da granulometria do material, por sua vez, pode influenciar os parâmetros de qualidade dos pellets combustíveis e as características de combustão. Assim, para melhor compreensão de como o atrito entre as partículas e as condições operacionais em leitos de secagem afetam a distribuição do material particulado, neste tópico, é avaliado o processo de elutriação de borra de café em leito fluidizado e vibrofluidizado. Optou-se por fazer essa análise independente do processo de secagem e anterior a ele, para que na avaliação da secagem da borra de café (tópico seguinte), a influência da elutriação dos finos pudesse ser considerada. Para isso, a princípio, foi avaliado se a própria dinâmica do leito fluidizado promove mecanismos de geração de particulado finos modificando a distribuição granulométrica do material, e em seguida, foi investigado como as condições de velocidade e temperatura do ar, além de, amplitude e frequência de vibração influenciam a produção e o diâmetro de partícula do elutriado.

#### 4.3.1. Mecanismos de formação de finos

Na Figura 27 é apresentada a cinética de elutriação de borra de café seca de granulometria original com  $d_s=362 \mu\text{m}$  em leito fluidizado. Podemos observar que a porcentagem de elutriado acumulativa cresce continuamente em função do tempo, não entrando em um patamar de estabilidade. Este tipo de curva característica foi identificada por Colakyan e Levenspiel (1984) como típica de materiais em que, durante o processo de fluidização, há geração de finos (Figura 3, página 33). Pode-se observar que em duas horas de ensaio foi elutriado aproximadamente 11% de massa do leito inicial, sendo cerca de 8% elutriada nos primeiros 10 minutos. Vale ressaltar a boa reprodutibilidade dos ensaios que resultou no desvio padrão próximo a 5% para os maiores tempos.

Figura 27 - Porcentagem de massa de borra de café seca elutriada do leito em função do tempo.

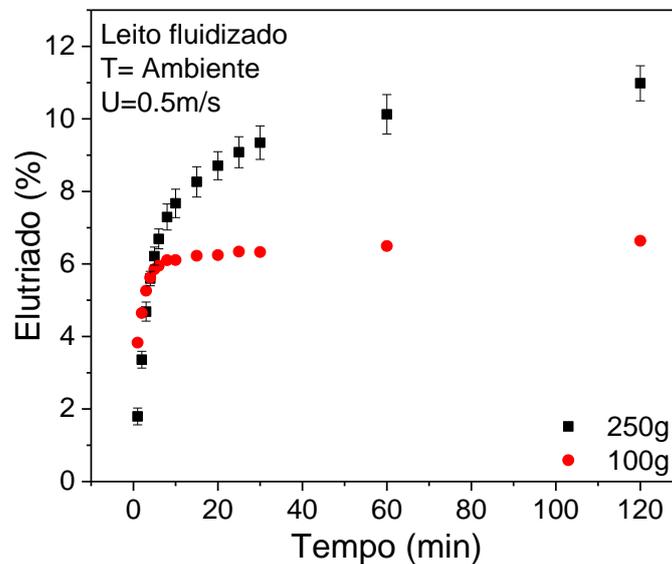


Fonte: Autor, 2023.

Para fins de comparação e para o ajuste da massa de operação do leito, a Figura 28 apresenta a cinética de elutriação da borra seca em leito fluidizado com massas iniciais distintas, 100 e 250 g, respectivamente. A elutriação acumulativa contínua não foi observada para o leito de 100 g de massa inicial. Este entrou em um patamar estável próximo a 6% depois de 6 min de ensaio. A não formação ou a formação imperceptível de finos pode ter sido causada porque a redução da massa reduz a taxa de atrito entre as partículas, diminuindo a formação de finos por fragmentação e/ou abrasão e também porque com menos massa, o ar percola mais facilmente o leito diminuindo o arraste de partículas. Esse mesmo efeito da influência da quantidade de massa inicial do leito fluidizado na formação de finos foi também avaliado por Lee et al. (1993) para partículas de cal com diferentes granulometrias (sendo ambas maiores que as partículas de borra de café utilizadas neste trabalho). Os autores identificaram um aumento da taxa de atrito com o aumento da massa do leito até um ponto crítico, após este ponto crítico o aumento da massa do leito não influencia mais na formação de finos para o cal. Para a borra de café observou-se que ao utilizar

a massa entre 100 e 250 g existe influência da quantidade de massa no leito na taxa de atrito das partículas, apenas para a maior massa.

Figura 28 - Porcentagem de massa de borra de café seca elutriada do leito em função do tempo: influência da massa inicial do leito.

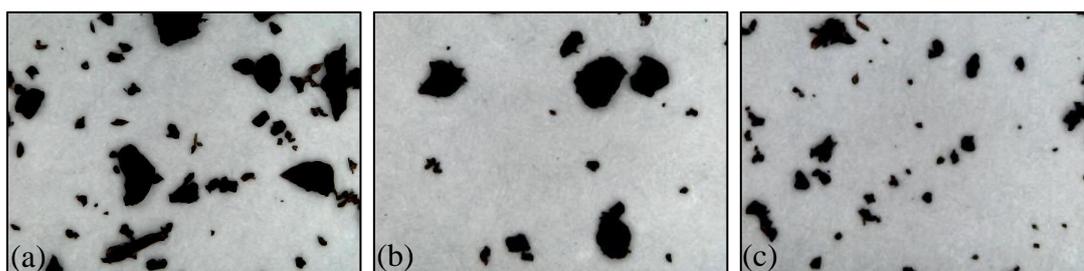


Fonte: Autor, 2023.

Para o leito de 250 g, além do formato da curva de cinética de elutriação indicar a geração de particulado durante o processo, indícios da geração de finos também podem ser identificados pela análise de imagem do material. Na Figura 29 são apresentadas imagens do material particulado da borra de café obtidas para cada etapa do processo de elutriação do leito seco: a borra inicial (distribuição da amostra original), a borra que fica retida no leito após o fim do processo (aproximadamente 90% da massa inicial) e a borra elutriada. A caracterização física dessas amostras é apresentada na Tabela 14. Pode-se observar que na amostra de borra inicial, o maior diâmetro máximo de uma partícula é aproximadamente o dobro do maior diâmetro máximo do pó elutriado. Além disso, é observado também que nem no leito, nem no elutriado são encontradas partículas próximas a essas dimensões das partículas maiores da amostra inicial, sugerindo assim a fragmentação, pelo menos, parcial dessas. O

menor diâmetro mínimo possui dimensão próxima em todos os casos. Já a média dos diâmetros médios das partículas retidas no leito e da borra inicial são bem próximas, apesar da retirada de parte dos finos no elutriado. O diâmetro médio do elutriado é significativamente menor, como esperado.

Figura 29 - Imagem de microscópio da distribuição da borra de café (a) amostra original, (b) partículas retidas no leito e (c) partículas elutriadas após a cinética de elutriação a temperatura ambiente e 0,5m/s.



Fonte: Autor, 2023.

Tabela 14 - Dados de dimensão do material particulado.

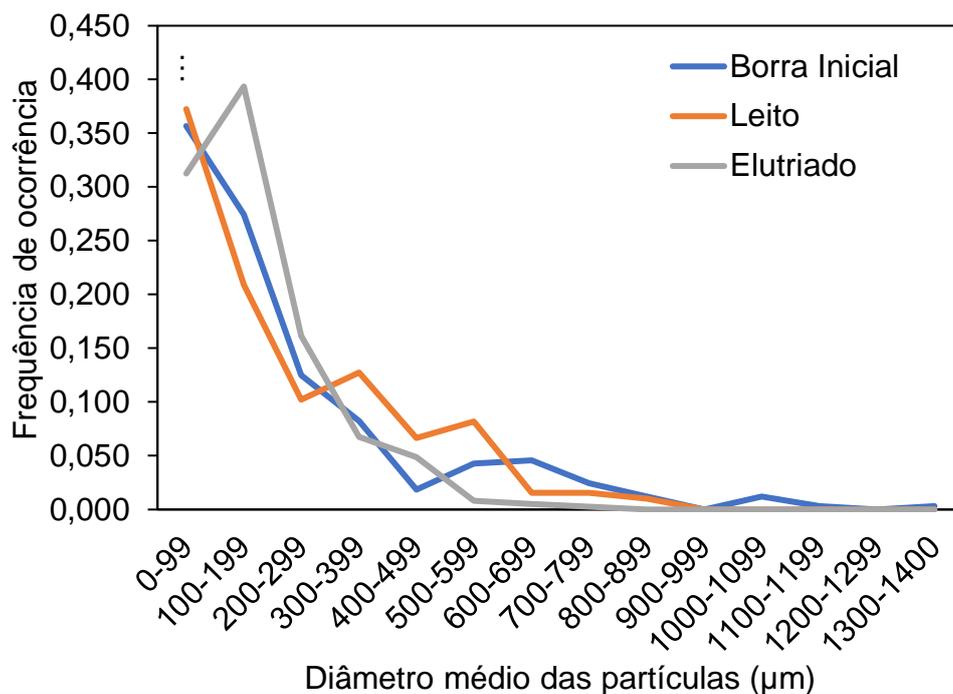
Material	Diâmetro máximo ( $\mu\text{m}$ )	Diâmetro mínimo ( $\mu\text{m}$ )	Diâm. médio $\pm$ dp ( $\mu\text{m}$ )	Área $\pm$ dp ( $\text{mm}^2$ )	Aspecto
Inicial	2355	12	$246 \pm 36$	$0,095 \pm 0,017$	$1,9 \pm 0,2$
Leito	1318	16	$253 \pm 62$	$0,083 \pm 0,026$	$1,8 \pm 0,3$
Elutriado	1167	12	$172 \pm 19$	$0,036 \pm 0,009$	$1,8 \pm 0,3$

Fonte: Autor, 2023.

Na Figura 30 são apresentadas as distribuições granulométricas das amostras de borra inicial, retida no leito e elutriada. Observa-se a ampla variação granulométrica da borra inicial, a alta porcentagem de partículas de menores diâmetros na borra elutriada e uma distribuição intermediária para o particulado retido no leito. A formação de finos foi avaliada por balanço global de finos, de modo que foi identificada a presença de 12% a mais de partículas com diâmetro médio menor que 500  $\mu\text{m}$  entre as amostras de saída (leito e elutriado) do que

as presentes na amostra de borra inicial. Esses 12% de finos podem ser oriundos das partículas entre 900 e 1400  $\mu\text{m}$  presentes apenas na amostra inicial. Além disso, a provável inexistência de partículas maiores que 900  $\mu\text{m}$  nas outras duas amostras, sugere a atuação do mecanismo de fragmentação na formação de finos no interior do leito, em detrimento ao mecanismo de formação de finos por abrasão. O mecanismo de formação de finos por abrasão pode ser avaliado pela medida de aspecto das partículas da Tabela 14. A pequena redução do aspecto entre a amostra inicial e o elutriado e no leito apontam para um suave arredondamento das partículas (perda de pontas), mas levando em conta o desvio padrão da medida essa variação não é significativa. Esse dado corrobora a hipótese de que a formação de finos por fragmentação é mais provável para este material nas condições de operação adotadas. É particularmente importante, porque o diâmetro do material pode influenciar o comportamento de secagem, a qualidade do pellet combustível e o comportamento de combustão.

Figura 30 - Distribuição granulométrica do diâmetro médio das partículas para a borra inicial, a borra retida no leito e o elutriado.



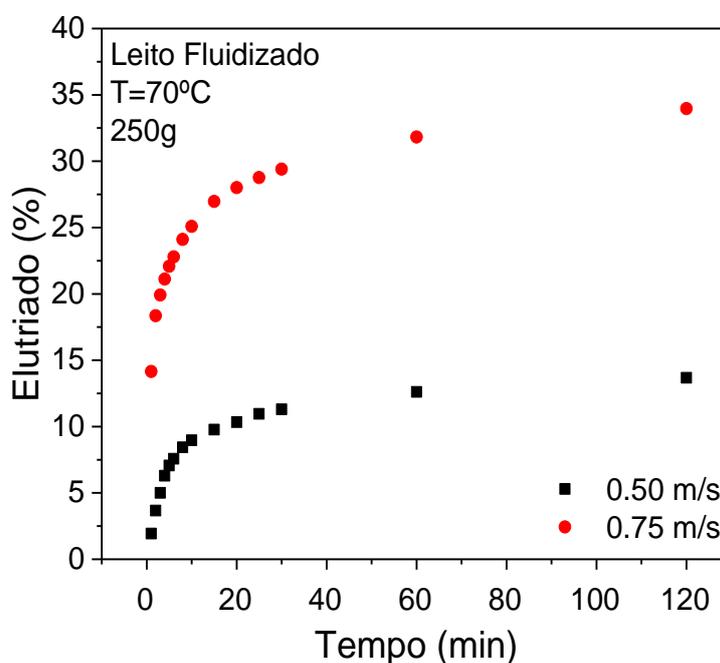
Fonte: Autor, 2023.

Neste subtópico foi verificada a formação finos da borra de café no leito fluidizado, nos subtópicos seguintes é analisado como velocidade e a temperatura do ar de secagem e as condições vibracionais também podem afetar a distribuição granulométrica do material, bem como sua classificação.

#### 4.3.2. Influência da velocidade na elutriação

Na Figura 31 é apresentada a cinética de elutriação para as velocidades de operação de 0,5 e 0,75 m/s respectivamente. O aumento da velocidade de operação acarretou o aumento de massa elutriada, como esperado. Isso porque, com o aumento da velocidade do ar, partículas maiores de borra são arrastadas (ROCHA, 2019). À velocidade de 0,75 m/s aproximadamente 35% do leito foi elutriado. Essa velocidade já corresponde à perdas significativas de massa no leito decorrente do processo de elutriação, por isso para os testes seguintes foi adotada a velocidade de 0,5 m/s. Mas em ambas as velocidades, a curva crescente, característica da formação de finos dentro do leito, foi identificada.

Figura 31 - Porcentagem de massa de borra de café seca elutriada do leito em função do tempo: influência da velocidade de operação.

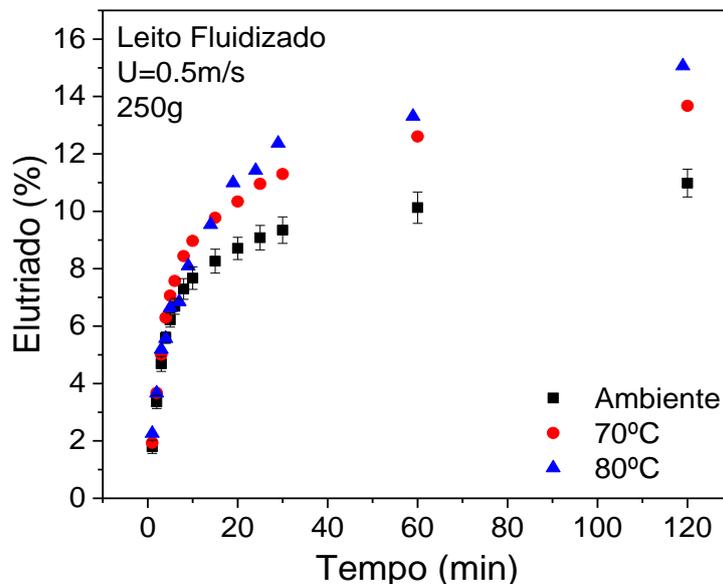


Fonte: Autor, 2023.

#### 4.3.3. Influência da temperatura na elutriação

Na Figura 32 é apresentada a cinética de elutriação da borra de café em três temperaturas diferentes (ambiente: aproximadamente 22 °C, 70 °C e 80 °C). Pode-se observar que a porcentagem de elutriado do leito aumenta à medida que a temperatura também aumenta, chegando à elutriação de 15% no leito a 80 °C. A influência da temperatura na elutriação está relacionada as propriedades do material e às condições do processo, sendo para a borra um fator que favorece a elutriação. Esse comportamento difere de outros resultados encontrados na literatura como para cal ou lodo de esgoto fazendo a mesma análise em leito fluidizados, onde o aumento da temperatura de operação diminuiu a formação de finos, favorecendo o aglomerado de partículas no leito (LEE et al., 1993; CHANG et al., 2005). Para a borra, provavelmente o aumento da temperatura do leito faz com que aumentem as propriedades de solidez (“hardness”) da borra, isso leva a um aumento do atrito térmico, que ocasiona a maior produção de elutriado. Além disso, a viscosidade do ar aumenta com o aumento da temperatura, o que favorece o arraste.

Figura 32 - Porcentagem de massa de borra de café seca elutriada do leito em função do tempo: influência da temperatura do leito.



Fonte: Autor, 2023.

Apesar do aumento de temperatura no leito da borra favorecer a porcentagem de partículas elutriadas, a temperatura de operação parece não ter influência sob o diâmetro de partícula, tanto do particulado retido no leito quando do elutriado. Essas informações podem ser observadas a partir dos dados apresentados na Tabela 15, onde verifica-se que o diâmetro médio, a área e o aspecto das partículas são próximos entre si.

Tabela 15 - Dados de dimensão do material particulado: influência da temperatura.

Material	Temperatura (°C)	Diâmetro médio (µm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Aspecto (-)
Elutriado	Ambiente	172±19	0,036±0,009	1,8±0,1
	70	170±30	0,036±0,009	1,7±0,1
	80	139±23	0,023±0,006	1,9±0,3
Leito	Ambiente	253±62	0,083±0,026	1,8±0,0
	70	276±97	0,131±0,064	1,8±0,3
	80	220±67	0,071±0,034	1,8±0,8

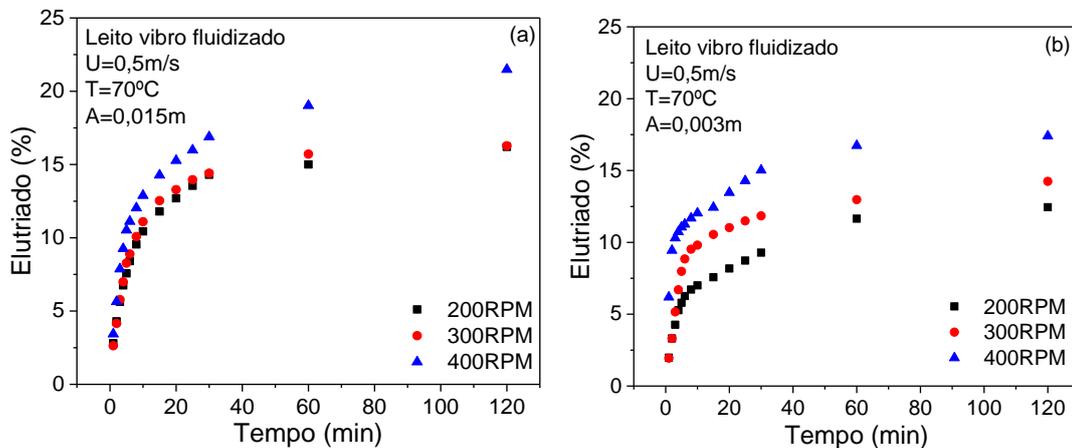
Fonte: Autor, 2023.

#### 4.3.4. Influência das condições vibracionais do leito na elutriação

Na Figura 33 é apresentada a cinética de elutriação em leito vibrofluidizado de borra seca com variações da amplitude e da frequência vibracional. A adição de vibração favoreceu a taxa de elutriação do leito para todas as combinações de amplitude e frequências testadas quando comparado com o leito sem vibração (vide Figura 32 com a Figura 33). Pode-se observar entre as configurações vibracionais que o aumento da frequência para uma dada amplitude, assim como o aumento da amplitude para uma dada frequência aumentam a porcentagem de massa elutriada do leito. Sendo cerca de 22% de massa do leito perdida pelo *underflow* do ciclone nas maiores amplitude e frequência, A=0,015 m e f=400 RPM. O aumento da amplitude e frequência de vibração aumenta o adimensional de vibração, isso significa fisicamente que mais energia está sendo fornecida ao leito (DALEFFE; FREIRE, 2004). Para este

estudo, tendo em vista o particulado seco, esta energia vibracional acrescida favoreceu a elutrição de maior porcentagem de massa.

Figura 33 - Porcentagem de massa de borra de café seca elutriada do leito em função do tempo: influência da frequência vibracional para (a) amplitude de vibração de 0,015m e (b) 0,003m.



Fonte: Autor, 2023.

Na Tabela 16 é apresentado o diâmetro médio para a fração elutriada e para a retida no leito. Observou-se que, apesar do aumento dos parâmetros vibracionais acarretarem maior porcentagem de massa elutriada, variações significativas no diâmetro médio do pó não foram identificadas. Dessa forma, supõe-se que o aumento da amplitude e frequência favorecem a maior formação de finos, que conseqüentemente conseguem ser arrastados pela mesma velocidade do ar. Com isso observa-se que a velocidade do ar é o principal parâmetro para a classificação da granulometria do elutriado, enquanto a temperatura, a amplitude e a frequência favorecem os mecanismos de formação de finos, mas não de arrasto de partículas maiores.

Tabela 16 - Diâmetro médio do elutriado e retido no para o processo de elutriação em leito vibro fluidizado.

	Frequência (RPM)	Diâmetro médio ( $\mu\text{m}$ )	
		A=0,015m	A=0,003m
Elutriado	200	138 $\pm$ 17	121 $\pm$ 23
	300	115 $\pm$ 15	126 $\pm$ 22
	400	138 $\pm$ 27	109 $\pm$ 20
Leito	200	202 $\pm$ 67	188 $\pm$ 45
	300	235 $\pm$ 58	229 $\pm$ 97
	400	184 $\pm$ 63	226 $\pm$ 62

Fonte: Autor, 2023.

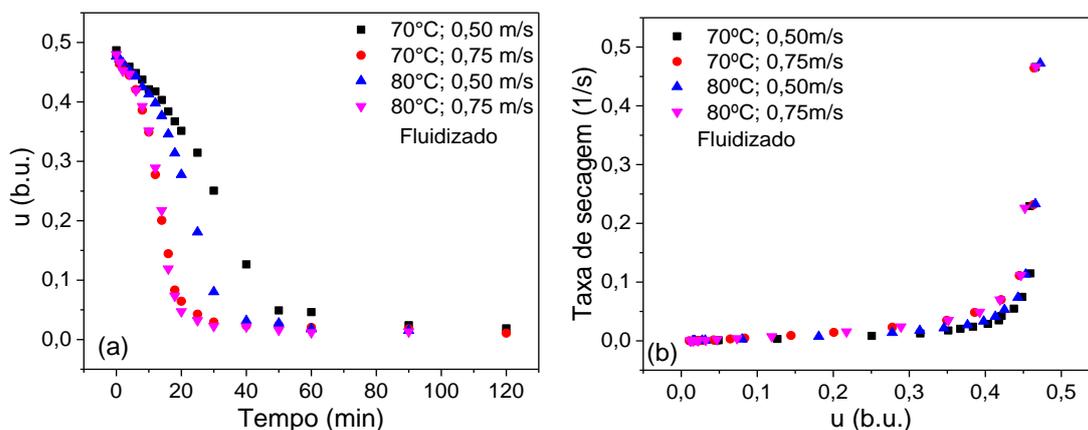
Assim, a constatação da formação de finos pela agitação do leito, aumento da temperatura e parâmetros vibracionais é um dado importante a ser levado em conta nas etapas de processamento da borra de café para a produção de energia térmica. Uma vez, que o diâmetro do material pode influenciar o comportamento de secagem, a qualidade do pellet combustível e o comportamento de combustão. Tal constatação, pode ajudar a ajustar condições de operação de secagem que favoreçam a granulometrias específicas para as etapas posteriores.

## 4.4. Secagem

### 4.4.1. Secagem da borra de café em leito fluidizado

Após a análise da elutriação do material particulado do leito, a secagem térmica em batelada em leito fluidizado foi avaliada. Na Figura 34 são apresentados os gráficos de cinética de secagem da borra de café a 0,45 (b.u.) de umidade inicial, em (a) a umidade em base úmida em função do tempo e em (b) a taxa de secagem em função da umidade, com temperatura do leito de 70 e 80 °C e velocidade de ar de 0,5 e 0,75 m/s. Como esperado, o aumento da temperatura, para ambas as velocidades do ar de secagem, acarretou na diminuição do tempo de secagem, sendo esse comportamento mais expressivo na menor velocidade do ar. Observa-se também que para ambas as temperaturas de secagem, o aumento da velocidade do ar leva à diminuição significativa do tempo de secagem. Assim, na condição mais favorável, a 80 °C e 0,75 m/s, a borra alcança umidade inferior a 0,05 (b.u) com aproximadamente 20 min de ensaio. A 70 °C e 0,5 m/s, condições menos favoráveis, foram necessários 50 min de experimento para mesma umidade ser atingida. Na Figura 34(b) são observados os períodos de taxa de secagem decrescentes, não sendo identificado o período de taxa de secagem constante.

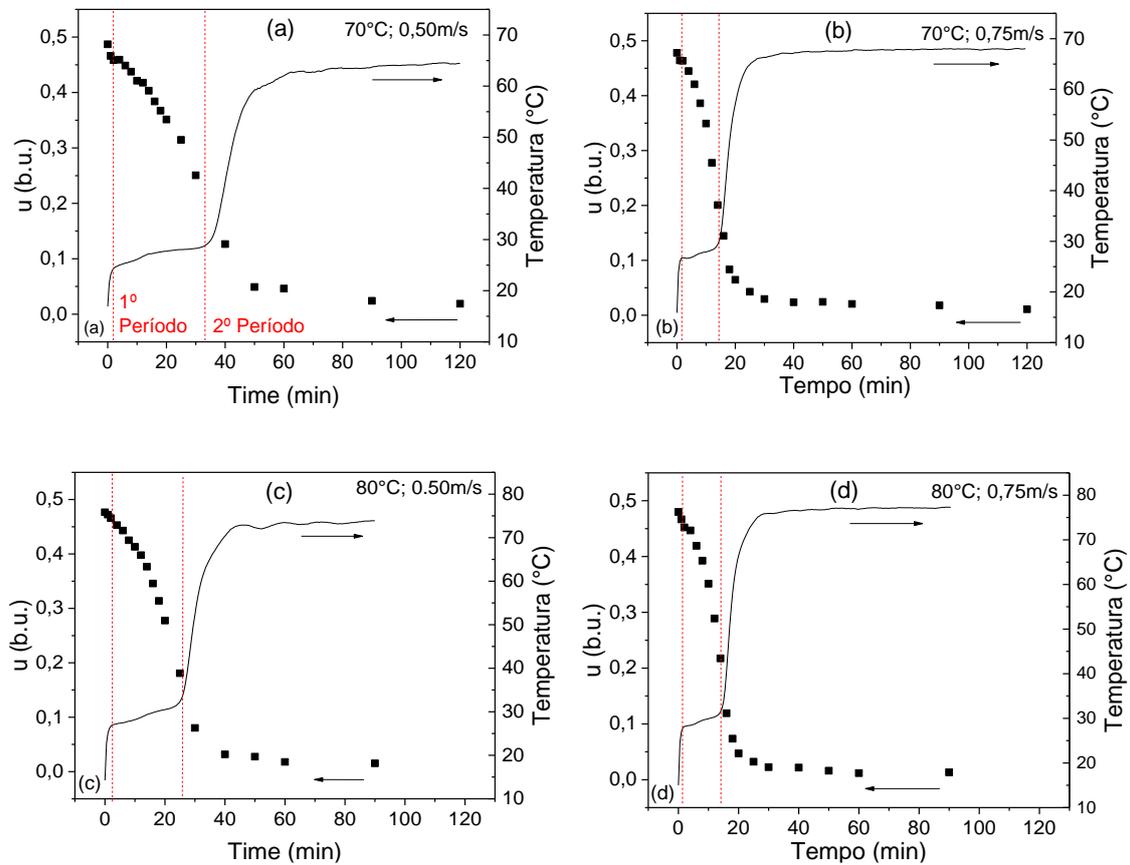
Figura 34 – (a) Umidade em função do tempo de secagem e (b) taxa de secagem em função da umidade da borra de café em leito fluidizado variando temperatura e velocidade do ar de secagem.



Fonte: Autor, 2023.

Na Figura 35 são apresentadas a umidade e a temperatura do leito em função do tempo de secagem para o leito fluidizado nas 4 condições operacionais utilizadas. Observa-se que nos minutos iniciais ocorre rapidamente a estabilização da temperatura do material úmido com a temperatura do ar de secagem. Então inicia-se o primeiro período de taxa de secagem decrescente com um leve aumento da temperatura da mistura e em seguida o segundo período de taxa decrescente, com o aumento substancial da temperatura até a estabilização.

Figura 35 - Umidade e temperatura em função do tempo de secagem à (a) 70°C e 0,5m/s; (b) 70°C e 0,75m/s; (c) 80°C e 0,5m/s; (d) 80°C e 0,75m/s.



Fonte: Autor, 2023.

O período de taxa de secagem constante não é observado, isto se deve ao fato de a borra ter sido submetida aos ensaios de secagem térmica com a

umidade de 45% (b.u.) obtida após o desague mecânico (ROCHA; FERREIRA; FREIRE, 2021). Com isso, as cinéticas de secagem apresentadas na Figura 35 demonstram a hipótese de Rocha et al. (2021) de que a água livre não ligada que seria removida no período de taxa constante, e provavelmente também no início do primeiro período de taxa decrescente, foi removida por compressão mecânica. Esta remoção de água livre, que ocorre por causa da alta porosidade do leite empacotado de borra, que favorece o transporte de água por capilaridade, é essencial para que condições de fluidização adequadas sejam alcançadas na secagem (ROCHA; FERREIRA; FREIRE, 2021).

Nas Figura 35 (a) e (c), a 0,5 m/s e 70 e 80 °C, o primeiro período de taxa decrescente está de 3 a 34 e de 3 a 25 min, respectivamente. Enquanto que nas Figura 35 (b) e (d), a 0,75 m/s e 70 e 80 °C, estão em ambas entre 3 e 13 min. Neste período, as condições externas controlam a secagem e os mecanismos de transferência de calor e massa convectivo e difusivo atuam simultaneamente. A água superficial começa a secar e a migração do interior da partícula começa a ocorrer, neste período a temperatura do sólido aumenta lentamente à medida que água superficial se evapora (STRUMILLO; KUDRA, 1986).

A mudança entre o primeiro e o segundo período de taxa decrescente pode ser identificada a partir do aumento substancial da temperatura do leite. Na Figura 35, ele ocorre próximo a umidade de 0,1 (b.u.) para todos os casos, que é quando se inicia o segundo período de taxa decrescente. Neste ponto, toda a água superficial do sólido evapora, os mecanismos internos de transferência de calor e massa passam a controlar o processo de secagem e a temperatura do sólido vai aumentando até se equilibrar com a temperatura do meio (STRUMILLO; KUDRA, 1986; JIA et al., 2015).

Nota-se, comparando as figuras entre si, que o aumento da velocidade do ar de secagem teve mais efeito na mudança dos mecanismos, e conseqüentemente no tempo de secagem global, do que a variação da temperatura. Isso pode ser explicado por dois motivos. Primeiro, de que o aumento da velocidade do ar diminui a resistência às transferências de calor e massa da camada limite na superfície do material, que controla o processo no primeiro período de taxa decrescente. E, também, pelo fato de que a velocidade do ar é o fator que tem maior influência sobre a quantidade de massa elutriada

do leito. Assim, a 0,75 m/s aproximadamente 35% do leito de secagem é expelido pelo ciclone. Com a redução de massa no leito submetida à secagem, maior carga térmica evaporativa do ar de secagem fica disponível para o leito restante, favorecendo as transferências de calor e massa.

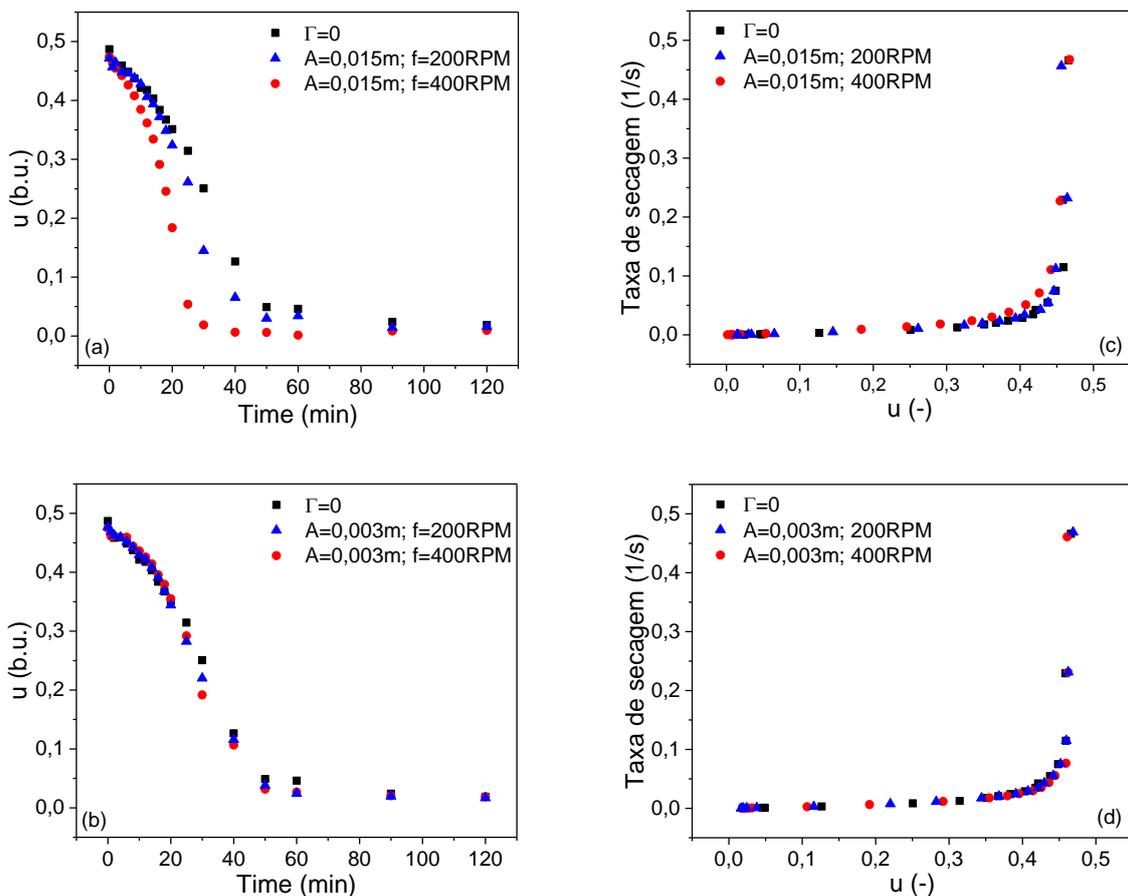
Silva et al. (1998) indicam que a umidade adequada para a queima da borra de café está entre 25 e 30% (b.u.), pois valores superiores a esses desfavorecem a eficiência de combustão nas caldeiras, e inferiores são desaconselhados pelo risco de ignição instantânea durante o manuseio e transporte do material. Tomando Silva et al. (1998) como referência, processos de secagem em leitos fluidizados podem ser conduzidos no primeiro período de taxa decrescente para obtenção da borra seca entre 25 e 30% (b.u.). Neste período, a secagem é dependente das condições externas, assim na escolha dos secadores, como é o caso do fluidizado, essas condições devem ser privilegiadas com o intuito de se obter melhor controle do processo.

#### 4.4.2. Secagem da borra de café em leito vibrofluidizado

Para a avaliação do efeito da vibração do leito no processo de secagem foram combinadas amplitudes vibracionais de 0,015 m e 0,003 m com as frequências de 200 e 400 RPM (correspondentes aos adimensionais de vibração: 0,13; 0,53; 0,67 e 2,68 para as respectivas combinações, conforme apresentado na Tabela 6, página 65). Na Figura 36 são apresentadas em (a) a umidade em função do tempo e em (b) a taxa de secagem em função do tempo. Em todas as condições, o leito vibrofluidizado favoreceu a secagem em relação ao leito fluidizado (sem vibração), diminuindo o seu tempo. Isso acontece porque a vibração mecânica do leito fornece maior energia ao processo, e em alguns casos essa energia pode servir para aumentar o contato sólido-fluido e melhorar a mistura do material com o meio (MEILI et al., 2012). Além disso, as condições vibracionais adicionadas favorecem o aumento da taxa de elutriação, e como já explicado, isso aumenta carga evaporativa disponível para a borra restante. Para as curvas das taxas de secagem, o período de taxa constante não foi identificado e os dois períodos de taxa decrescente são observados, assim como para a secagem em leito fluidizado.

Para o leito vibrofluidizado com a  $A= 0,015\text{ m}$  e  $f= 400\text{ RPM}$  à  $70^\circ\text{C}$  no tempo de secagem de 20 min, a borra obteve umidade de aproximadamente 0,18 (b.u.). No mesmo tempo de secagem no leito fluidizado, a umidade do material foi de 0,27 (b.u.) à  $80^\circ\text{C}$ , Figura 35, para a mesma velocidade do ar de secagem de 0,5 m/s. Verifica-se então, que a adição de vibração mecânica, não só compensou a diminuição de  $10^\circ\text{C}$  de temperatura como resultou em umidade ainda inferior à do leito fluidizado, neste caso, justificando a maior eficiência energética desse secador, com a maior amplitude de vibração. Nesta comparação, a secagem foi mais rápida no leito vibrofluidizado do que no fluidizado, em detrimento de um maior arraste de finos, de 21,5% e 15%, respectivamente.

Figura 36 - (a) e (b) Umidade em função do tempo de secagem e (c) e (d) taxa de secagem em função da umidade da borra de café em leito vibrofluidizado variando amplitude e frequência de vibração a  $70^\circ\text{C}$  e 0,5 m/s.



Fonte: Autor, 2023.

Foi observado que tanto o aumento da amplitude quanto da frequência vibracional favorece a diminuição do tempo de secagem nestes intervalos pelo consequente aumento da energia adicionada ao leito. Na amplitude de 0,015 m, o aumento da frequência acentua mais a diminuição do tempo de secagem do que na amplitude 0,003 m. Esses resultados mostram que, nas menores amplitudes de vibração, o comportamento do leito vibrofluidizado tende a se aproximar do fluidizado, por ter menor adimensional de vibração, enquanto que nas maiores amplitudes tende a se afastar. Além disso, esses resultados para secagem em batelada da borra de café concordam com os de elutriação, de modo que as condições que promovem maior produção de finos favorecem a secagem das partículas retidas no interior do leito.

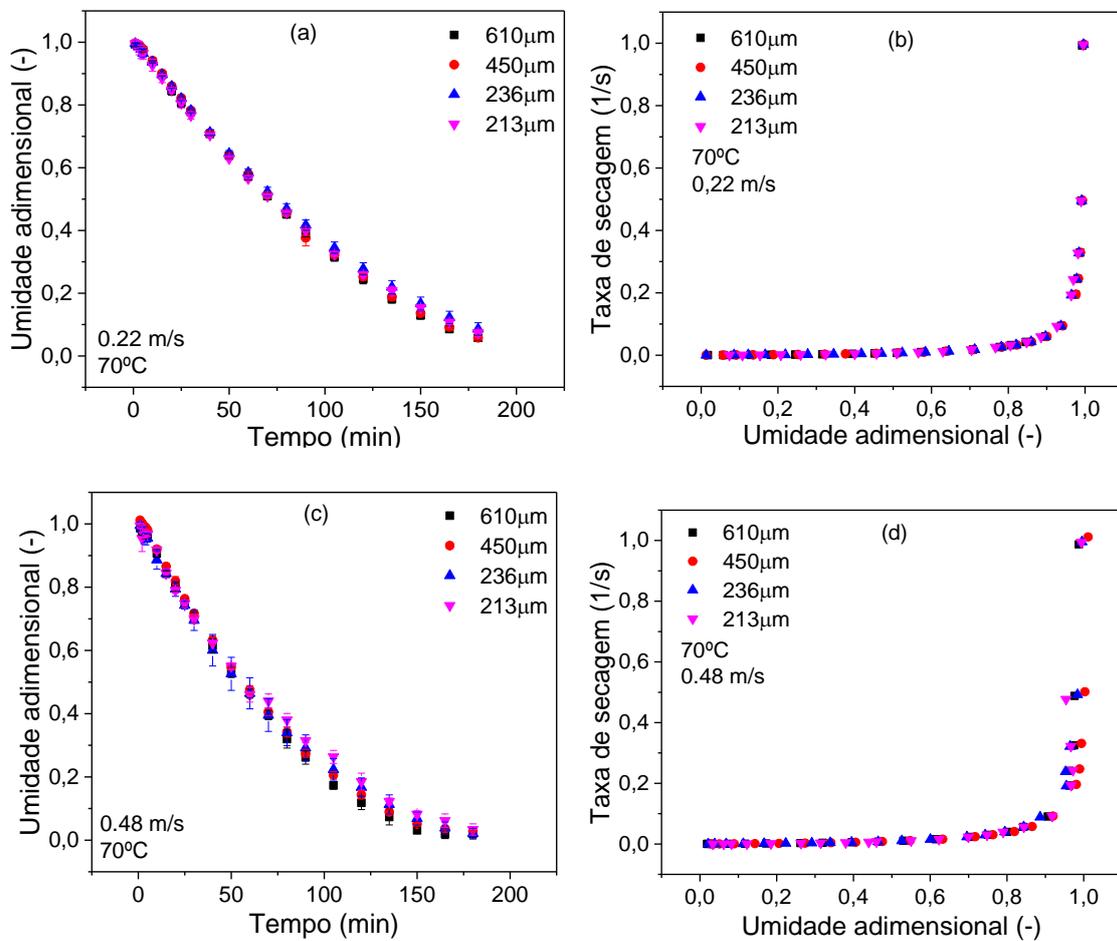
#### 4.4.3. Secagem da borra de café em estufa de convecção forçada em função da granulometria

Para melhor entendimento da relação do comportamento de secagem da borra em função da granulometria do material, ensaios de secagem em estufa com convecção forçada foram realizados em duas velocidades do ar de secagem a 70 °C para 4 frações granulométricas distintas. A umidade e a taxa de secagem em função do tempo são apresentadas na Figura 37. Observa-se o decaimento da umidade em função do tempo e o rápido decréscimo da taxa de secagem em função da umidade do material, como esperado. Observa-se também a sobreposição dos pontos das frações no intervalo de desvio padrão, não sendo identificada uma tendência clara de variação do comportamento cinético em função da granulometria do material. Nota-se apenas que o aumento da velocidade do ar provocou um aumento no distanciamento das curvas entre si, promovendo redução do tempo de secagem.

Na Figura 38 é apresentada a mesma cinética de secagem da Figura 37, só que com a supressão das granulometrias de borra intermediárias. Pode-se observar que a 0,22 m/s, na menor velocidade do ar, variações significativas de comportamento da secagem da borra não são identificadas. Provavelmente isso se deve a lenta velocidade do ar que favorece mecanismos difusivos de transferência interna de calor e massa (PICKLES, 2003). Com o aumento da

velocidade do ar de secagem de 0,22 m/s para 0,48 m/s diferenças no comportamento da curva de secagem são observadas após 60 min de ensaio. Nota-se que há um descolamento entre as duas curvas na etapa final de secagem, a borra com o diâmetro médio de 610  $\mu\text{m}$ , embora tenha maior tamanho, seca mais rapidamente do que a de 213  $\mu\text{m}$ . Esse fenômeno pode estar associado ao fato de que a borra de menor diâmetro tem maior área superficial, isso faz com que a água presente esteja sob ação de forças superficiais mais fortes (ALTHAUS, et al., 2012) e a retirada desta água por convecção torna-se mais difícil.

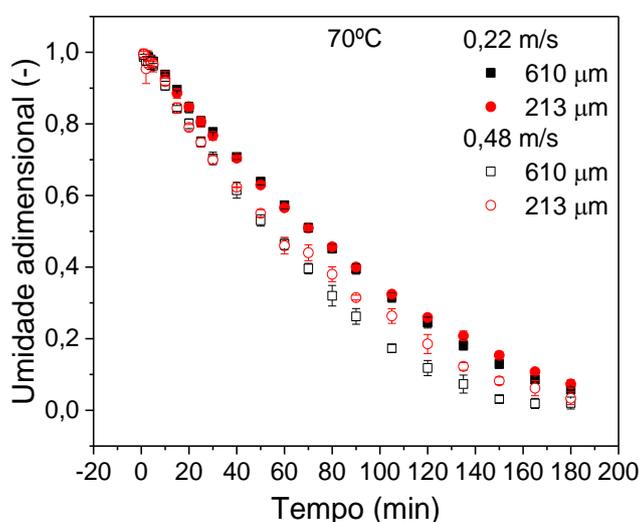
Figura 37 - (a) e (c) Umidade e (b) e (d) taxa de secagem em função do tempo de secagem da borra de café em estufa de convecção forçada a 70°C variando velocidade do ar de secagem e granulometria da amostra.



Fonte: Autor, 2023.

O menor diâmetro de partículas de borra de café também favorece a maior coesividade das partículas úmidas entre si (MASSARO SOUSA; FERREIRA, 2019), criando um leito de secagem mais empacotado do que o das partículas maiores. O leito mais compactado dificulta a migração de umidade final por difusão no estágio final da secagem, onde as condições internas controlam o processo. Neste sentido, o leito vibrofluidizado mostra uma significativa vantagem em relação a outros leitos de secagem, uma vez que a vibração mecânica do leito promove maior choque entre as partículas, que causa a quebra de aglomerados diminui o empacotamento (LAW; MUJUMDAR, 2006).

Figura 38 - Umidade adimensional em função do tempo de secagem para a borra de café em estufa de convecção forçada para as amostras de 610 e 213  $\mu\text{m}$  variando a velocidade do ar.



Fonte: Autor, 2023.

Outro aspecto importante observado da cinética de secagem em estufa é que a diferença no comportamento de secagem com a variação da granulometria foi observada apenas para umidades adimensionais inferiores a 0,4, que equivale a aproximadamente 0,18 (b.u.). No entanto, umidades inferiores a 0,25 (b.u.) não são recomendadas para combustão em caldeiras pelo risco de ignição instantânea (SILVA *et al.*, 1998). Sendo assim, provavelmente a variação do tamanho da partícula não tem influência significativa até 0,25 (b.u.) do primeiro

período de taxa decrescente da secagem nos leitos fluidizado e vibrofluidizado, que é onde se alcança a umidade adequada para queima.

Para representar as curvas de cinética de secagem, as equações empíricas clássicas de Page, Lewis e Page modificado foram ajustados aos dados por análise regressão linear. Os critérios como coeficiente de determinação,  $R^2$  e raiz do erro quadrático médio, RMSE, foram utilizados para verificar a qualidade do ajuste. Na Tabela 17 são apresentados os parâmetros ajustados e os critérios de verificação. O modelo que apresentou o melhor resultado de ajuste foi o de Page modificado, com valor médio entre todos os ensaios de  $R^2$  e RMSE de 0,9945 e 0,0153, respectivamente.

Tabela 17 - Parâmetros dos modelos de cinética de secagem e coeficientes de determinação.

Modelo	Velocidade (m/s)	dm ( $\mu\text{m}$ )	Parâmetros do modelo		Coeficientes de determinação	
			k	n	RSME	$R^2$
Lewis	0,22	610	0,0107	-	0,0462	0,8087
		450	0,0106	-	0,0478	0,7975
		236	0,0101	-	0,0397	0,8288
		213	0,0104	-	0,0351	0,8232
	0,48	610	0,0143	-	0,0451	0,8344
		450	0,0135	-	0,4648	0,8093
		236	0,0137	-	0,0306	0,8842
		213	0,0129	-	0,0316	0,8910
Page	0,22	610	0,0025	1,3156	0,0016	0,9324
		450	0,0021	1,3242	0,0132	0,9360
		236	0,0031	1,2587	0,0129	0,9376
		213	0,0037	1,2296	0,0131	0,9505
	0,48	610	0,0042	1,2871	0,0180	0,9384
		450	0,0036	1,3071	0,0133	0,9227
		236	0,0065	1,1739	0,0150	0,9343
		213	0,0064	1,1615	0,0195	0,9353
Page modificada	0,22	610	0,0109	1,3071	0,0156	0,9983
		450	0,0187	1,3254	0,0132	0,9947
		236	0,0103	1,2605	0,0129	0,9972
		213	0,0107	1,2304	0,0134	1,0031
	0,48	610	0,0143	1,2857	0,0185	0,9981
		450	0,0137	1,3072	0,0136	0,9770
		236	0,0138	1,1722	0,0153	0,9933
		213	0,0130	1,1618	0,0199	0,9942

Fonte: Autor, 2023.

Na Tabela 18 são apresentados os valores do número de Biot mássico, difusividade efetiva e coeficiente de determinação do ajuste ( $R^2$ ) calculados a partir da equação (9). Observa-se que em todas as condições foi obtido um  $R^2$  superior a 0,98, isto implica em um bom ajuste do modelo para o cálculo da difusividade aos dados experimentais. Foi encontrado que o número de Bi é menor que 0,2 em todas as condições, indicando que as condições externas de secagem controlam o processo (STRUMILLO e KUDRA, 1986). O fato de as condições externas controlarem o processo, é identificado também pelo aumento da difusividade efetiva calculada com o aumento da velocidade do ar. Isto significa que a resistência à transferência de massa na camada limite é maior que a resistência à migração de umidade interna, de modo que o processo de secagem é controlado pela resistência da camada limite (STRUMILLO e KUDRA, 1986). A dependência das condições externas de secagem da borra é esperada, tendo em vista as características do material como a alta porosidade e o pequeno diâmetro de partícula (ROCHA; FERREIRA; FREIRE, 2021).

Tabela 18 - Número de Biot, Difusividade efetiva e  $R^2$  para as condições de secagem em estufa convectiva.

Velocidade (m/s)	$d_p$ ( $\mu\text{m}$ )	Bi	$D_{\text{eff}}$	$R^2$
0,22	610	0,103	1,96E-07	0,986
	450	0,104	1,96E-07	0,986
	236	0,103	1,84E-07	0,989
	213	0,102	1,89E-07	0,990
0,48	610	0,103	2,61E-07	0,987
	450	0,104	2,52E-07	0,990
	236	0,102	2,46E-07	0,993
	213	0,102	2,31E-07	0,992

Fonte: Autor, 2023.

Dessa forma, verificou-se que o aumento da temperatura, amplitude e frequência vibracional, ao mesmo tempo que promove maior geração e arraste de finos, favorece menores tempos de secagem para o material de maior granulometria remanescente no leito. Assim a secagem da borra de café em leito

fluidizado e vibrofluidizado, devido a sua ampla granulometria, levará à classificação das partículas. Tendo em vista que o processo de secagem é controlado pelas condições externas, essas podem ser ajustadas para assegurar melhores condições de secagem com o diâmetro do material particulado mais adequado. Ou, por outro lado, esses parâmetros podem ser usados para a separação do material de acordo com a sua aplicação, tendo em vista que as menores partículas têm melhor desempenho de queima na região de devolatização e as maiores, na região de combustão propriamente. Nesta tese, especificamente, espera-se obter condições de elutriação e secagem que favoreçam a produção e a qualidade de pellets combustíveis de borra de café para a queima, que será tratado no tópico seguinte.

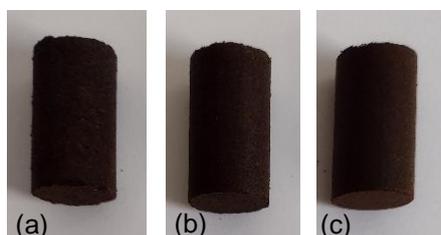
#### 4.5. Produção de Pellets de borra de café

Após a caracterização da borra de café do aspecto das degradações térmicas e do comportamento de elutriação e secagem, foram escolhidas três frações granulométricas de borra seca de 550, 400 e 225  $\mu\text{m}$ , chamadas de A, B e C, respectivamente, para a produção de pellets por prensagem. Nesta seção são apresentadas as características dos pellets produzidos e analisada a influência do diâmetro do pó nos parâmetros de qualidade dos mesmos. Além disso, é avaliado o desempenho desses materiais em ensaios de combustão.

##### 4.5.1. Produção e parâmetros de qualidade dos pellets de borra de café

Os pellets produzidos na prensa hidráulica de borra de café são apresentados na Figura 39 e as suas dimensões apresentadas na Tabela 19. Todos obtiveram comprimento de aproximadamente 2,7 cm e diâmetro de 1,5 cm com baixo desvio padrão, que mostra a boa reprodutibilidade da metodologia utilizada para a fabricação dos pellets. O diâmetro do pellet foi limitado pela estrutura do molde, porém a altura está diretamente relacionada a força de pressão aplicada, que foi escolhida baseada em testes preliminares.

Figura 39 - (a) borra A; (b) borra B; (c) borra C.



Fonte: Autor, 2023.

Tabela 19 - Dimensões dos pellets de borra de café produzidos.

Material	Comprimento (cm)	Diâmetro (cm)
Borra A	$2,7 \pm 0,00$	$1,50 \pm 0,00$
Borra B	$2,7 \pm 0,04$	$1,50 \pm 0,00$
Borra C	$2,8 \pm 0,07$	$1,50 \pm 0,00$

Fonte: Autor, 2023.

Na Tabela 20 são apresentados os quatro parâmetros escolhidos para caracterizar os pellets fabricados com borra de café quando à sua qualidade: o índice de durabilidade dos pellets (PDI), a durabilidade, o índice de resistência a impacto (IRI) e a água absorvida. A metodologia experimental de cada parâmetro foi apresentada na seção 3.3.8 Produção e caracterização dos pellets, página 67. O PDI é baseado na diferença de massa do pellet antes de depois de ser submetido agitação constante, de modo que quanto maior o PDI menos massa o pellet perdeu durante a simulação de transporte. Podemos observar que foram obtidos valores de PDI muitos próximos a 100% para os três pellets de borra de café, sendo tanto melhor quanto menor o diâmetro médio das partículas que o compõem. Dessa forma, foi observado que a menor granulometria favoreceu a agregação das partículas entre si e conseqüentemente houve menor perda de massa do material por desgaste. Isso acontece provavelmente porque a maior área superficial, das partículas de menores tamanhos, torna mais forte as forças de ligação sólido-sólido entre elas.

Tabela 20 - Medidas de resistência e durabilidade dos pellets de borra de café.

Material	PDI (%)	Durabilidade (%)	IRI (-)	Água Absorvida (g de água)
Borra A (550 µm)	97,76 ± 0,10	99,61 ± 0,14	78 ± 16	0,17 ± 0,01
Borra B (400 µm)	98,90 ± 0,08	99,83 ± 0,09	400 ± 0	0,22 ± 0,07
Borra C (225 µm)	99,60 ± 0,10	99,90 ± 0,02	400 ± 0	0,18 ± 0,00

Fonte: Autor, 2023.

O segundo parâmetro analisado, chamado apenas de durabilidade, também é baseado na diferença de massa, porém enquanto o PDI é relacionado a resistência do pellet à abrasão do transporte, a durabilidade está relacionada a resistência do pellet à impactos. Esse parâmetro é medido pela diferença de massa após uma única queda do pellet de uma altura pré-estabelecida, podendo o pellet se partir em pedaços ou não. Observou-se, então, que todos as amostras obtiveram excelentes respostas a queda, nenhuma se quebrou e pouquíssimo material foi perdido. Assim como o PDI, a durabilidade aumentou com a

diminuição do tamanho de partículas que constituem o pellet, provavelmente pelos mesmos motivos.

Para levar em consideração a capacidade do pellet de resistir às quedas sucessivas sem quebrar foi utilizado o índice de resistência à impacto (IRI). Neste teste, um índice maior que 200 significa uma boa resistência e 50 é o mínimo índice aceitável para o uso do pellet em escala industrial (RICHARDSON, 1990). Observa-se que todos os pellets obtiveram IRI satisfatórios, no entanto os pellets produzidos a partir da borra A, de maior granulometria, ficou muito próximo ao limite inferior do parâmetro. Com duas ou três quedas o pellet de borra A se partiu em 3 pedaços, enquanto os pellets de borras B e C, após as 4 quedas não se quebrou, o que explica o valor inferior do IRI do pellet de borra A. Também nesse índice pode-se identificar a influência do diâmetro do material na qualidade do pellet, sendo verificado que boa resistência a impactos sucessivos só é alcançada para pellets constituídos de partículas com diâmetros médios inferiores a 400  $\mu\text{m}$ . Na Tabela 20 também são apresentados, na última coluna, a quantidade de gramas de água absorvida quando o pellet foi submerso em água. Neste ensaio os três pellets produzidos de borra de café tiveram excelente desempenho, a alta agregação e as forças envolvidas nas ligações sólido-sólido desse material se mostraram resistentes a entrada de água no corpo de prova.

Tendo em vista que os pellets de borra de café passaram em todos os testes iniciais de qualidade, estes foram avaliados com relação à sua resistência à impacto contínuo (resistência a compressão). A resistência à compressão é a força máxima que o pellet suporta antes de se rachar ou quebrar (KALIYAN; VANCE MOREY, 2009) e é particularmente importante para avaliação do transporte industrial do pellet, por exemplo, em um parafuso helicoidal. Os resultados da força de compressão máxima dos pellets de borra de café são apresentados na Tabela 21. Foi observado que quanto menor o diâmetro médio das partículas que constituíam o pellet de borra pura, maior a resistência à compressão. Observou-se também que esse aumento foi significativo entre as medidas, e que esses valores estão dentro do esperado para pellets de tamanho semelhante (RICHARDSON, 1990).

Por tanto, foi verificado que o tamanho das partículas que constituem os pellets de borra de café tem influência direta e significativa nos parâmetros de qualidade dos mesmos. Assim, as condições do processo de secagem que influenciam a elutriação e formação de finos no leito podem ser escolhidas de modo a favorecer a qualidade dos pellets de borra de café, o que significa pellets mais resistentes ao transporte, ao impacto e deterioração.

Tabela 21 - Resistência à compressão dos pellets de borra de café.

Material	Resistência a Compressão (N)	
	média	desvio padrão
Borra de café A	104,45	16
Borra de café B	171,98	18
Borra de café C	282,03	37

Fonte: Autor, 2023.

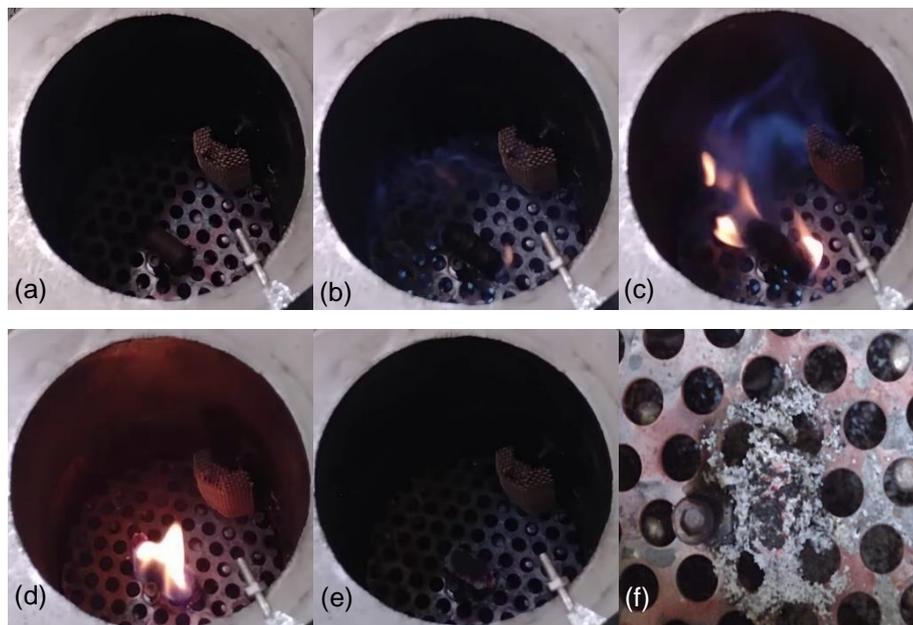
Dessa forma, para as condições operacionais utilizadas neste estudo experimental, a secagem nas maiores temperatura, amplitude e frequência vibracional e menor velocidade do ar proporcionam maior quantidade de finos. Exceto a menor velocidade do ar, as outras três condições proporcionam também melhores desempenho de secagem no particulado remanescente no leito. Uma vez que os finos são formados durante o processo de secagem, todo material pode voltar a ser misturado em etapa posterior, assim se obtém borra seca com uma fração de finos superior à do material inicial para fabricação de pellets mais resistentes com melhores parâmetros de qualidade.

#### 4.5.2. Ensaio de combustão dos pellets de borra de café

Os ensaios de combustão seguiram para os pellets de borra A, B, C, nos quais foi avaliado o comportamento de queima de cada pellet individualmente como apresentado nas Figura 40, Figura 41 e Figura 42. Nas figuras observa-se em (a) o pellet imediatamente antes de iniciar o ensaio; em (b) a primeira chama sendo formada, quando a ignição do biocombustível ocorre; em (c) toda a superfície do pellet já em processo de combustão; em (d) a queima do pellet sem

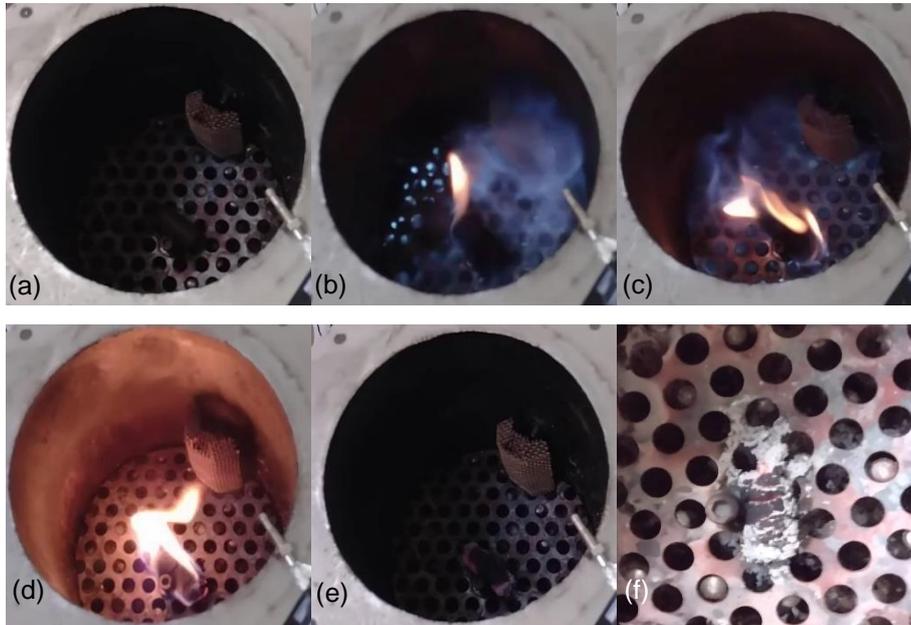
combustível auxiliar com chama aparente; em (e) a queima no interior do pellet após a chama ser apagada e em (f) as cinzas finais e o material remanescente. Visualmente não foram identificadas variações significativas do comportamento de combustão dos resíduos entre si como variação na cor e tamanho da chama. No entanto, foi observada uma variação consistente na estrutura e no formato das cinzas remanescentes ao fim do processo. Na queima dos pellets de borra de café quanto menor a granulometria do material menos desintegradas estavam as cinzas.

Figura 40 - Ensaio de combustão de um pellet individual de borra A: (a) o pellet antes de iniciar o ensaio; (b) a primeira chama sendo formada, (c) toda a superfície do pellet em processo de combustão; (d) a queima do pellet sem combustível auxiliar com chama aparente; (e) a queima no interior do pellet após a chama ser apagada e (f) as cinzas finais e o material remanescente.



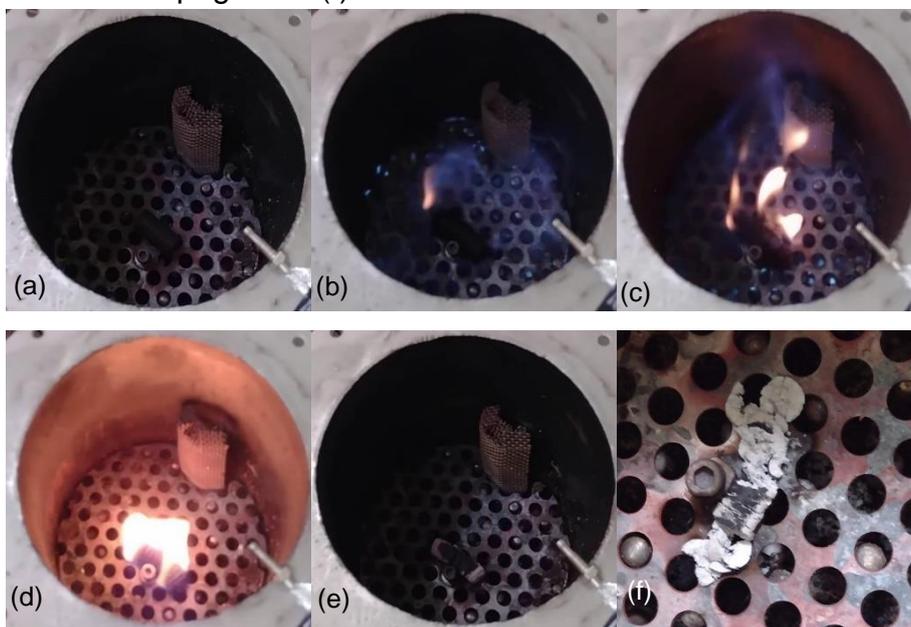
Fonte: Autor, 2023.

Figura 41 - Ensaio de combustão de um pellet individual de borra B: (a) o pellet antes de iniciar o ensaio; (b) a primeira chama sendo formada, (c) toda a superfície do pellet em processo de combustão; (d) a queima do pellet sem combustível auxiliar com chama aparente; (e) a queima no interior do pellet após a chama ser apagada e (f) as cinzas finais e o material remanescente.



Fonte: Autor, 2023.

Figura 42 - Ensaio de combustão de um pellet individual de borra C: (a) o pellet imediatamente antes de iniciar o ensaio; (b) a primeira chama sendo formada, (c) toda a superfície do pellet em processo de combustão; (d) a queima do pellet sem combustível auxiliar com chama aparente; (e) a queima no interior do pellet após a chama ser apagada e (f) as cinzas finais e o material remanescente.



Fonte: Autor, 2023.

Na Tabela 22 são apresentados os tempos característicos dos fenômenos de queima dos pellets de borra de café. O pellet A foi o que levou mais tempo para entrar em ignição, os pellets B e C levaram tempos iguais, que pode estar associado ao fato das maiores partículas terem menor velocidade de reação nas etapas iniciais de devolatilização como apresentado no tópico 4.2.1. Por outro lado, os três tiveram o mesmo tempo de combustão com chama, levando à consideração provável, de que nas condições estudadas, o diâmetro do pó não teve influência significativa na capacidade do resíduo de sustentar o seu próprio processo de queima com chama aparente quando compactado. O tempo de combustão com chama é particularmente importante porque é onde maior quantidade calor por tempo é liberada. Ao avaliarmos a queima interna dos pellets, foi identificado que quanto menor a granulometria do material maior o tempo de combustão de interna. Provavelmente isso aconteceu pela maior dificuldade da difusão de calor e massa no seu interior, que propiciaram reações de combustão mais lentas. Para os pellets das 3 granulometrias foram obtidos conteúdos de cinzas muito próximos entre si (entre 10 e 15%), que indica que aproximadamente a mesma quantidade de massa foi consumida nos três ensaios, variando apenas o tempo total. Assim, o consumo de massa de borra por tempo foi maior quanto maior o diâmetro do particulado.

Tabela 22 - Características de queima dos pellets individuais.

Queima dos pellets	Tempo para o início da primeira chama	Tempo de combustão com chama	Tempo de combustão interna
Borra de café A	2min e 07s	3min e 09s	15min e 45s
Borra de café B	1min e 48s	3min e 08s	16min e 15s
Borra de café C	1min e 48s	3min e 08s	18min e 47s

Fonte: Autor, 2023.

Na Tabela 23 é apresentado uma estimativa de calor liberado pelo pellet em seu processo de queima calculado pela variação de massa no processo de combustão e pelo poder calorífico da borra de café estimado por Rocha; Ferreira;

Freire (2021). Foi observado que maior calor foi liberado quanto menor o tamanho da partícula que constitui o pellet, em função de ter sido obtido, nesses casos, menor conteúdo de cinzas remanescente. No entanto, essas diferenças não são significativas levando em consideração o desvio padrão da medida.

Tabela 23 – Estimativa do calor liberado na combustão de 1 pellet de 5 g a vazão de ar de 31 L/min (desvio padrão de  $\pm 7$  kJ).

Pellet	Calor liberado (kJ)
Borra de café A	102,21
Borra de café B	108,69
Borra de café C	109,46

Fonte: Autor, 2023.

Na Tabela 24 são apresentados os dados de estimativa de calor liberado pelo pellet de tamanho intermediário, borra B, submetido ao processo de combustão com maior disponibilidade de oxigênio. Diferente do que se esperava, o aumento da vazão de oxigênio não provocou variações significativas na quantidade de cinzas remanescente e no calor liberado pela combustão do pellet, indicando que os ensaios anteriores foram feitos em condições de excesso de ar, não sendo a disponibilidade de oxigênio um limitante nas reações de combustão dos ensaios aqui apresentados.

Tabela 24 – Estimativa do calor liberado na combustão de 1 pellet de borra B com variação da vazão de ar (desvio padrão de  $\pm 7$  kJ).

Vazão de ar (L/min)	Calor liberado (kJ)
31	108,7
44	114,0

Fonte: Autor, 2023.

Pode-se verificar que os efeitos de tamanho de partícula da borra de café identificados nos ensaios de TGA em atmosfera oxidante não se reproduziram exatamente nos ensaios de combustão dos pellets individuais, indicando que o processo de compactação promove maior homogeneidade nas condições de queima. Foi identificado também que as variações no tamanho do grão só são mais significativas a partir de 500  $\mu\text{m}$ , onde se obtém reações de queima mais rápidas, porém com menor liberação de calor. Assim, esses resultados apontam que os finos gerados no processo de secagem têm apenas uma leve influência no aumento da liberação de energia nas reações de combustão, e que esta, por sua vez, está mais associada a quantidade de massa de combustível disponível para queima. No entanto há implicações diretas dos finos na qualidade mecânica do pellet produzido. De modo que, os processos podem ser conduzidos para a geração de mais finos na etapa de secagem para a produção de pellets mais resistentes com desempenho de queima muito similar.

#### **4.6. A influência da borra de café na caracterização e produção de pellets de bagaço de laranja e bagaço de cana-de-açúcar**

Tendo em vista, o desempenho na qualidade e na combustão dos pellets de borra de café, objetivou-se avaliar a influência desse material seco sob os resíduos bagaço de cana-de-açúcar e bagaço de laranja com a finalidade de produção de energia térmica. Para isso avaliou-se a composição elemental de cada resíduo individualmente e o comportamento térmico do resíduo puro e de misturas através de análises de TG e DSC. E por fim, foram também avaliadas a influência da borra sob os aspectos da resistência mecânica da produção de pellets combustíveis desses resíduos e o seu desempenho em ensaios de combustão.

##### **4.6.1. Caracterização dos resíduos puros e misturas**

Nesta etapa da Tese foram utilizadas a borra de café B com  $d_m$  de 400  $\mu\text{m}$ ; bagaço de cana com diâmetro médio inferior a 1000  $\mu\text{m}$ ; bagaço de laranja com diâmetro de sauter ( $d_s$ ) de 2641  $\mu\text{m}$ ; mistura de 50%-50% em massa borra de café B - bagaço de laranja e mistura de 50%-50% em massa borra de café B - bagaço de cana. Para a avaliação da composição elemental dos materiais e o comportamento térmico das misturas foi escolhida a borra B como referência. Uma vez que o material de granulometria intermediária apresentou melhores índices de desempenho como avaliado no tópico 4.2.1 Características de degradação térmica sob atmosfera oxidativa e resultados intermediários, porém muito satisfatórios, para os ensaios de qualidade dos pellets apresentados no tópico 4.5.1 Produção e parâmetros de qualidade dos pellets.

Deste modo, na Tabela 25 são apresentadas as composições elementais dos resíduos puros da borra de café B (BB), bagaço de laranja (BL) e bagaço de cana (BC). Observa-se que para os três resíduos a composição de carbono, hidrogênio e nitrogênio varia entre 43-16%; 4-11% e 0,4-1,7%, respectivamente. A %C e %H estão dentro do esperado para biomassas com apelo energético que é entre 30-60% para o carbono e 5-6% para hidrogênio (JEGUIRIM; LIMOUSY; DUTOURNIE, 2014; JENKINS *et al.*, 1998; KHAN *et al.*, 2009). Já a composição de nitrogênio e enxofre é esperado que seja abaixo de 1%, uma vez que esses

elementos nas reações paralelas em processos de combustão resultam na produção de gases tóxicos (NO<sub>x</sub> e SO<sub>x</sub>). Para as amostras analisadas, conteúdo de enxofre significativo não foi identificado e o conteúdo de nitrogênio foi maior que 1% apenas para a borra de café, que por sua vez está associado ao elevado conteúdo de proteína presente neste resíduo (MUSSATTO *et al.*, 2011).

Tabela 25 - Composição elemental da borra de café B (BB), bagaço de laranja (BL) e do bagaço de cana (BC).

	%C		%H		%N		%S	
	média	desvio	média	desvio	média	desvio	média	desvio
BB	43,32	0,01	9,675	0,005	1,715	0,005	0	0
BL	46,135	0,005	4,745	0,015	0,475	0,005	0	0
BC	40,235	0,015	10,88	0,04	0,45	0,01	0	0

Fonte: Autor, 2023.

Na Tabela 26 são apresentados os valores de calor liberado dos matérias puros e das misturas em atmosfera oxidante obtidos por análises de DSC. Observa-se que o bagaço de cana, que é amplamente utilizado como biocombustível sólido, tem calor liberado inferior à borra de café e ao bagaço de laranja. Pode-se identificar também que a mistura da borra de café com os outros dois resíduos geram um novo material com calor específico melhorado em relação ao bagaço de cana e laranja puros. É válido ressaltar também, que o calor teórico das misturas BB/BL e BB/BC (calculado pela média dos calores experimentais dos materiais puros) tem um erro de 10 % e 2 %, respectivamente, para menos em relação ao calor experimental das misturas.

Tabela 26 - Calor liberado pelos materiais em atmosfera oxidante obtidos por análises de DSC.

Calor liberado nas reações (kJ/g)				
BB	BL	BC	BB/BL	BB/BC
6,41	4,47	3,84	6,11	5,02

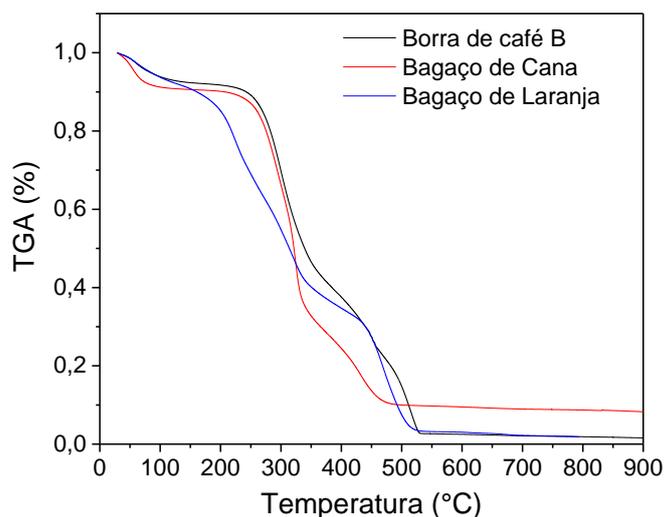
\*erro da medida de ± 0,40

Fonte: Autor, 2023.

#### 4.6.2. Caracterização térmica

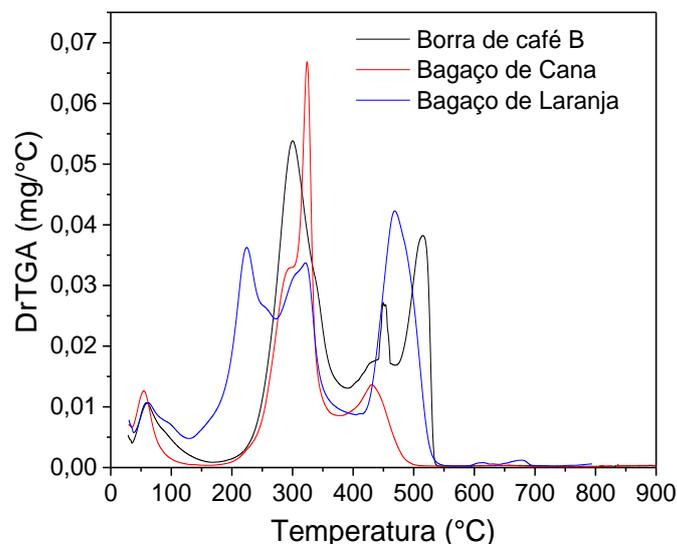
Para a melhor compreensão da interação desses resíduos entre si, foi primeiro avaliado o comportamento térmico dos resíduos em atmosfera oxidante individualmente pelas curvas de perda de massa (TGA) e taxa de perda de massa (DrTGA) em função da temperatura, à taxa de aquecimento de 10 °C/min como apresentados na Figura 43 e na Figura 44. Para os três resíduos, foram observados tanto nos gráficos de TGA, quanto de DrTGA, 4 estágios de perda de massa: um de evaporação da umidade, dois de devolatilização oxidativa dos componentes e o último atribuído à combustão do carvão formado. Pode-se observar que a BB e o BL foram completamente consumidos na cinética de degradação térmica, enquanto que o BC apresentou matéria residual, não consumida após 600°C.

Figura 43 - (a) perfil da TGA para amostras de borra de café B (BB), bagaço de laranja (BL) e bagaço de cana (BC) em atmosfera oxidativa a taxa de aquecimento de 10°C/min.



Fonte: Autor, 2023.

Figura 44 - Perfil DrTGA para amostras de borra de café (BB), bagaço de laranja (BL) e bagaço de cana (BC) em atmosfera oxidativa a taxa de aquecimento de 10°C/min.



Fonte: Autor, 2023.

Os intervalos de temperatura referentes a cada estágio para os três resíduos são apresentados na Tabela 27. O estágio I é atribuído à volatilização das moléculas leves e principalmente a evaporação da água, associado ao primeiro pico da curva de DrTGA para os três resíduos. Neste intervalo houve uma perda de massa da amostra de aproximadamente 7,84% para a borra de café, 7,96% para o bagaço de laranja e 9,40% para o bagaço de cana, esses dados foram adotados como a umidade contida no material. O bagaço de cana apresentou maior umidade entre as amostras por ter sido o único resíduo que não foi seco em estufa antes da TGA. O estágio II, devolatilização, encontra-se na faixa inicial de 128-167 °C até a final de 271-390 °C, analisando os três resíduos simultaneamente. Neste estágio, inicia-se a degradação térmica dos principais componentes destas biomassas: hemicelulose, celulose e lignina. O pico máximo deste estágio varia conforme o resíduo.

O primeiro pico da degradação da hemicelulose é 251°C e celulose 296°C quando analisada a decomposição térmica desses materiais isoladamente (ÓRFÃO, ANTUNES, FIGUEIREDO, 1999). Observa-se então que a decomposição desses materiais apareceu nas faixas de temperaturas

esperadas. Neste estágio também há o início de uma pequena devolatilização da lignina a partir de aproximadamente 186°C (VAMVUKA; SFAKIOTAKIS, 2011). Em seguida, tem-se o estágio III, onde a degradação térmica simultânea de lignina e da hemicelulose são completadas (ÓRFÃO; ANTUNES; FIGUEIREDO, 1999).

Tabela 27 - Intervalos de temperatura de cada estágio do processo de combustão e porcentagem de umidade e cinzas calculados

	<b>Estágio I</b> Secagem (°C)	<b>Estágio II</b> Devolatilização (°C)	<b>Estágio III</b> Combustão (°C)	<b>Estágio IV</b> Combustão (°C)	<b>Umidade</b> % (b.u)	<b>Cinzas</b> %
BB	38-167	167-390	390-471	471-541	7,84	1,88
BL	38-128	128-271	271-408	408-552	7,96	1,85
BC	38-150	150-380		380-543	9,40	8,70

O estágio IV, por sua vez, está associado à combustão do carvão formado após as etapas anteriores. Este fenômeno ocorreu entre 380-552°C. Após esse pico, a massa remanescente passa por um processo de combustão residual, que se estendeu até 800°C. O conteúdo de cinzas foi de aproximadamente de 1,9 % para o BB e BL, essa baixa porcentagem significa a queima praticamente completa do material. Como analisado na curva de TGA, o BC apresentou 8,70% de massa residual remanescente após a queima, sendo entre os resíduos o que tem maior formação de cinzas.

Observou-se que para a região de devolatilização (estágios II e III) as reações de quebra das moléculas ocorreram mais rapidamente para o bagaço de cana, borra de café e bagaço de laranja, nessa ordem. Já na região de combustão (estágio IV) as taxas de reação se dão: bagaço de laranja, borra de café e bagaço de cana. O bagaço de cana, por ter melhor desempenho na região de devolatilização, chegou com menos massa disponível para queima na região de combustão, provavelmente por isso que as taxas de reação nesta região são menores. Por outro lado, o bagaço de laranja apresentou comportamento

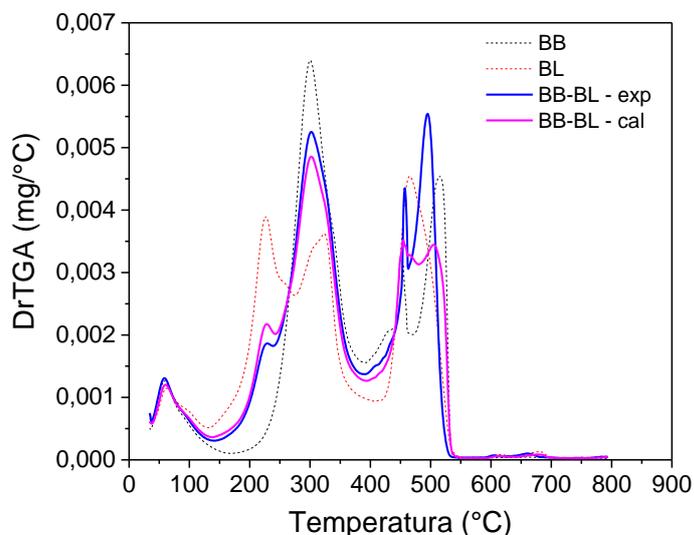
inverso, tendo menor desempenho nas regiões de devolatilização, chegando à região de combustão com mais massa disponível para queima, obtendo então nessa região maiores taxas de reação. Por sua vez, a borra de café apresentou comportamento intermediário entre os dois outros resíduos nas três regiões, tendo assim taxas menos discrepantes.

#### *Mistura borra de café e bagaço de laranja*

A Figura 45 apresenta as curvas de termogravimetria diferencial experimental e teórica para a mistura binária de 50% de borra de café e 50% de bagaço de laranja (BB-BL), juntamente com as curvas de DrTGA experimentais dos dois resíduos individualmente. A curva *BB-BL - cal* foi calculada de acordo com a equação (13), apresentada na página 63. Através destes resultados, pode-se observar a influência de cada um dos componentes sobre a decomposição térmica da mistura, bem como as interações físico-químicas entre os resíduos.

No primeiro estágio da decomposição térmica, a secagem, observou-se que os dois resíduos puros e a mistura apresentaram comportamento semelhantes. Nos estágios II, III e IV, observou-se que a decomposição térmica da mistura binária teve influência da contribuição de cada um dos resíduos individuais. O estágio II corresponde ao pico entre as temperaturas de aproximadamente 150 e 400°C. O início desta etapa de devolatilização para a mistura se deu a uma temperatura superior ao bagaço de laranja (128 °C) e inferior à borra de café (167 °C) devido ao primeiro pico da decomposição da hemicelulose e pela presença de lignina. A presença destes materiais pode ser identificada através de uma pequena perturbação a aproximadamente 225 °C, influenciado por um pico acentuado na mesma temperatura para a decomposição do bagaço de laranja puro. No ponto de máximo para a devolatilização, observou-se uma maior influência da presença da borra de café, cuja decomposição apresentou um pico acentuado a 300 °C.

Figura 45 - Perfil da DrTGA para amostras de borra de café (BB), bagaço de laranja (BL) e mistura (BB-BL) em atmosfera oxidativa a taxa de aquecimento de 10°C/min.



Fonte: Autor, 2023.

No primeiro período da devolatilização da mistura, observou-se que a DrTGA experimental e a DrTGA teórica, equações (12) e (13), apresentaram comportamentos semelhantes, com pequenas diferenças entre si. No primeiro e segundo pico da etapa de devolatilização o DrTGA calculado superestimou e subestimou, respectivamente, o DrTGA experimental. Estes resultados indicam que a interação físico-química entre os resíduos, nesta etapa, foi muito pequena.

O estágio III da decomposição térmica da mistura entre bagaço de laranja e a borra se deu em temperaturas entre 390 e 460 °C. Foi identificado que este estágio foi influenciado principalmente pela combustão do bagaço da laranja, que apresentou um aumento acentuado nesta faixa de temperatura com um ponto de máximo em 457 °C. No entanto, o fim devolatilização da lignina e da hemicelulose associadas a borra de café provocou uma queda acentuada na taxa de decomposição térmica da mistura, tão logo esta tenha alcançado seu valor máximo para esta etapa. O pico apresentado para a DrTGA experimental neste estágio foi mais acentuado e correspondeu a um intervalo menor de temperaturas em comparação à DrTGA teórico, indicando que a interação físico-

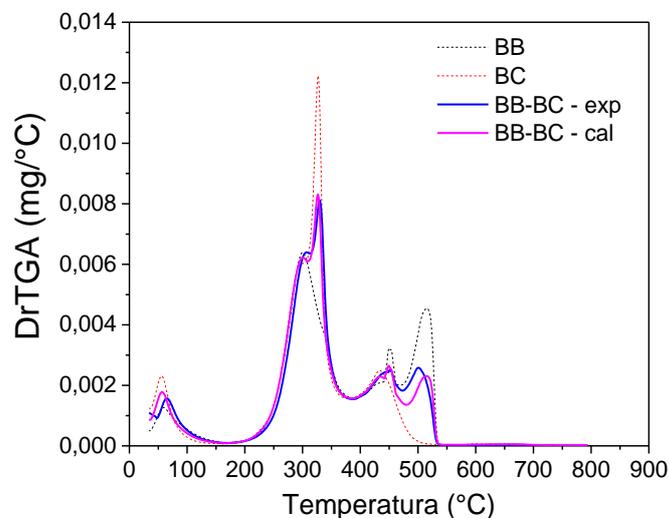
química entre os resíduos favoreceu o aumento da taxa de reação neste estágio significativamente.

O estágio IV da decomposição térmica da mistura, em que ocorre a combustão do material, foi observado na faixa de temperaturas entre 460 °C e 525 °C. Nesta etapa foi observada a maior taxa de decomposição térmica da mistura ao longo de todo o processo, havendo a combustão completa da borra de café e do restante do bagaço de laranja. Na etapa de combustão foi observada a maior influência das interações físico-químicas entre a borra de café e o bagaço de laranja, uma vez que o pico foi mais acentuado em comparação com o comportamento da DrTGA de cada um dos resíduos puros. Esses dados indicam que a mistura borra de café - bagaço de laranja tem o processo de combustão mais eficiente, uma vez que a combustão termina a uma temperatura inferior, e maiores taxas de reação são alcançadas na etapa final. Além disso, a interação entre os resíduos não afetou o teor de cinzas, 1,86%.

#### *Mistura borra de café e bagaço de cana*

A Figura 46 apresenta as curvas de termogravimetria diferencial experimental e teórico para a mistura binária de 50% de borra de café e 50% de bagaço de cana, juntamente com as curvas de DrTGA para os dois resíduos puros. A curva *BB-BC - cal* foi calculada de acordo com a equação (12), apresentada na página 63. No estágio I da decomposição térmica houve uma pequena diferença entre os comportamentos experimental e teórico devido à maior umidade inicial do bagaço de cana. O estágio II se encontra na faixa de temperaturas de 160 a 375 °C. Até uma temperatura de 300 °C, os comportamentos da DrTGA de todos os materiais foram semelhantes. No entanto, a partir desta temperatura, o formato da DrTGA dos resíduos apresentou diferenças entre si, enquanto para a borra de café foi observada a diminuição na taxa de decomposição térmica, para o bagaço de cana foi observado um aumento, pois a volatilização dos componentes do bagaço de cana é favorecida, neste intervalo. Estas diferenças foram responsáveis por um pico menos pronunciado em 325 °C para a mistura binária. Mas vale ressaltar, o comportamento idêntico entre as curvas experimentais e teóricas para a mistura.

Figura 46 - Perfil da DrTGA para amostras de borra de café (BB), bagaço de cana (BC) e mistura (BB-BC) em atmosfera oxidativa a taxa de aquecimento de 10°C/min.



Fonte: Autor, 2023.

O estágio III, ou segunda etapa da devolatilização, da mistura binária dos resíduos ocorreu entre as temperaturas de 375 a 475 °C. Nesta etapa da decomposição térmica, o pico da curva DrTGA da mistura é pouco pronunciado, uma vez que a maior parte da devolatilização da borra de café acontece principalmente em temperaturas menores. Ademais, nesta faixa de temperaturas acontece a combustão do bagaço de cana. No estágio IV, que corresponde à combustão do resíduo e se situa na faixa de temperaturas de 475 a 540 °C, observou-se um pico pouco pronunciado na curva de DrTGA. Nesta faixa de temperatura o bagaço de cana já foi completamente decomposto, restando somente o carvão da borra de café. O teor de cinzas da mistura após a combustão foi de 6,75%.

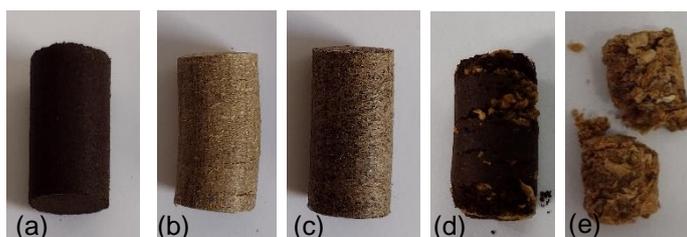
Para a mistura binária de borra de café e bagaço de cana, observou uma proximidade entre as curvas de DrTGA experimental e teórica, com exceção do estágio IV, onde as taxas de decomposição obtidas experimentalmente foram superiores às calculadas. Este seria um indicativo de que as interações físico-químicas entre a borra e bagaço afetaram somente a etapa final de combustão da mistura, tendo pouca influência nas etapas iniciais de secagem e

devolatilização. No entanto, a mistura borra de café e bagaço de cana não apresenta contribuição sinérgica entre os materiais que faça com que a mistura tenha desempenho melhor do que os resíduos individuais, como visto para a mistura borra de café e bagaço de laranja. Em termos de velocidade de reação, a mistura borra de café e bagaço de cana melhora o desempenho de combustão do bagaço de cana puro ao custo da redução do desempenho de queima da borra de café pura na etapa final.

#### 4.6.3. Produção e parâmetros de qualidade dos pellets de misturas

Os pellets produzidos na prensa hidráulica de borra de café B, bagaço de cana, bagaço de laranja e misturas são apresentados na Figura 47 e as suas dimensões apresentadas na Tabela 28. Todos obtiveram comprimento entre 2,7 e 3,1 cm e diâmetro de 1,5 cm. A variação do comprimento está relacionada a densidade bulk compactada do material sendo a da borra maior que do bagaço de cana e do bagaço de laranja. Para pellet 100% bagaço de cana, optou-se por trabalhar com a granulometria menor que 1000  $\mu\text{m}$ , a fim de obter um pellet em condições de compactação semelhantes à borra pura para fins de comparação. Já para o pellet de 100% BL, não se conseguiu obter um pellet compactado e firme para os experimentos seguintes. Mesmo após compactação, o pellet se desmanchava com o movimento de transporte (Figura 47(e)). No entanto, vale ressaltar que com a mistura BB/BL obteve-se a formação do pellet, apresentado na Figura 47(d).

Figura 47 - (a) borra B; (b) bagaço de cana; (c) mistura 50% borra B/50% bagaço de cana; (d) mistura 50% borra B/50% bagaço de laranja; (e) bagaço de laranja.



Fonte: Autor, 2023.

Tabela 28 - Dimensões dos pellets produzidos.

Material	Comprimento (cm)	diâmetro (cm)
Borra B	2,7 ± 0,04	1,50 ± 0,00
Bagaço de Cana	3,1 ± 0,02	1,50 ± 0,00
Bagaço de Cana + Borra B	3,1 ± 0,00	1,50 ± 0,00
Bagaço de Laranja + Borra B	3,1 ± 0,08	1,50 ± 0,00

Fonte: Autor, 2023.

Na Tabela 29 são apresentados os mesmos índices de qualidade escolhidos para caracterizar os pellets de borra pura apresentados na metodologia, tópico 3.3.8 Produção e caracterização dos pellets, página 67, e nos resultados, tópico 4.5.1 Produção e parâmetros de qualidade dos pellets de borra de café, página 106. Para o PDI, observou-se que o pellet de borra de café pura foi o que obteve maior PDI, sendo o melhor resíduo em termos de agregação. Em seguida foi verificado que o pellet produzido a partir da mistura borra/bagaço de laranja obteve o pior PDI, isso era esperado devido à dificuldade da compactação do resíduo de laranja seco entre si. No entanto, a mistura com a borra melhorou a compactação desse resíduo, que só perdeu aproximadamente 10% de massa no teste de resistência ao transporte (PDI = 90,77%), esse resultado é satisfatório quando comparado ao PDI de outras biomassas (KALIYAN; VANCE MOREY, 2009), neste caso houve uma constatação clara que a borra de café melhora o desempenho da qualidade do pellet de bagaço de laranja. Esse fato, é particularmente importante por causa dos efeitos sinérgicos identificados no tópico anterior para a combustão da mistura desses dois resíduos. Já para o bagaço de cana foi observado experimentalmente uma boa compactação, que se refletiu em um PDI alto e a adição da borra ao bagaço favoreceu ainda mais esse índice.

O segundo parâmetro analisado foi a durabilidade, que também é baseado na diferença de massa, e está relacionado a resistência do pellet à impactos. Observou-se, então, para esse parâmetro, que todas as amostras

obtiveram excelentes respostas as quedas e pouquíssimo material foi perdido (no caso de ambas as misturas, apesar da quebra).

Tabela 29 - Medidas de resistência e durabilidade dos pellets.

Material	PDI (%)	Durabilidade (%)	IRI (-)	Água Absorvida (g de água)
Borra B (400 µm)	98,09 ± 0,08	99,83 ± 0,09	400 ± 0	0,22 ± 0,07
Bagaço de Cana	97,49 ± 1,11	99,82 ± 0,01	128 ± 70	4,72 ± 3,14
BC/BB	98,03 ± 0,05	99,64 ± 0,19	67 ± 23	0,65 ± 0,02
BL/BB	87,75 ± 6,86	94,55 ± 3,58	42 ± 12	1,11 ± 0,58

Fonte: Autor, 2023.

Assim, para levar em consideração a capacidade do pellet de resistir as quedas sucessivas sem quebrar foi utilizado o índice de resistência a impacto (IRI). Os melhores resultados foram o da borra de café que não se quebrou após 4 sucessivas quedas, seguido do bagaço de cana, que só se quebrou após a terceira ou quarta queda. Os pellets produzidos a partir de misturas foram os que tiveram pior IRI, mostrando uma facilidade de quebra do material por impacto. No caso da mistura BC/BB, a agregação foi menor do que a dos resíduos puros nos seus pellets individuais, diminuindo assim o índice de resistência a impacto. Já no caso da mistura BL/BB, o pellet quebrou sempre na primeira queda, mostrando a sua fragilidade. Para esse teste, o índice maior que 200 significa uma boa resistência e 50 é o menor índice aceitável para o transporte do pellet em escala industrial (RICHARDSON, 1990). Com isso, a mistura BL/BB, que obteve IRI de 42, apesar dos resultados promissores de velocidade de reação de combustão, não foi considerada nas análises seguintes (teste de compressão contínua e combustão). Neste sentido, esta avaliação inicial do BL mostra que mais esforços são necessários para se alcançar condições adequadas de compactação mínima para o pellet desse resíduo. A falta de resistência a impactos pode estar relacionada à heterogeneidade do material, uma vez que o bagaço de laranja é o mais heterogêneo dos resíduos avaliados; a grande

granulometria utilizada para simular o resíduo industrial e ao pré-tratamento com cal, que atua no desague mecânico para a redução de umidade. A adição de cal ao BL faz com que a água retida nos polissacarídeos de cadeia de pectina por pontes de hidrogênio seja liberada, quebrando as estruturas químicas que naturalmente atuam como ligantes (BARBOSA *et al.*, 2020) e poderiam promover a estruturação do pellet. Assim, para uma melhora da qualidade do pellet de BL seria necessário um ajuste na concentração de cal usado no desague mecânico antes da secagem térmica do bagaço e possivelmente a redução do tamanho granulométrico do resíduo.

Na Tabela 29 também são apresentados, na última coluna, a quantidade de gramas de água absorvida quando o pellet é submerso em água. Neste ensaio o melhor resultado obtido foi para o pellet de borra de café pura, uma vez que, como já explicado, a alta agregação e as forças envolvidas nas ligações sólido-sólido desse material se mostraram resistentes a entrada de água no corpo de prova. Já o pellet de bagaço de cana, que apresentou bons resultados nos outros parâmetros, neste apresentou uma grande vulnerabilidade à absorção de água, chegando, inclusive, a massa água absorvida ser próxima a massa do pellet inicial. Esse teste está relacionado a suscetibilidade do material à absorção de umidade e, conseqüentemente, a sua deterioração. Observa-se, neste sentido, nos pellets compostos por misturas, que a borra de café agiu melhorando o desempenho do material que a acompanha, dificultando a absorção de umidade.

Os resultados da força de compressão máxima dos pellets de borra de café, bagaço de cana e misturas são apresentados na Tabela 30. Foi observado que o pellet de bagaço de cana foi o que suportou maior resistência a compressão antes de se rachar ou quebrar. O desempenho do pellet de bagaço de cana pura foi quase seis vezes maior do que a resistência a compressão para o pellet de borra de café C (vide Tabela 21, página 109). O segundo melhor resultado foi o da mistura BC/BB, onde houve uma significativa redução da resistência em relação ao BC puro, mas melhora em relação a BB.

Tabela 30 - Resistencia a compressão para borra de café B, bagaço de cana e mistura BC/BB.

Material	Resistência a Compressão (N)	
	média	desvio padrão
Borra de café B	171,98	18
Bagaço de Cana	1647,00	67
BC/BB	400,8	43

Fonte: Autor, 2023.

Verificou-se também que a borra de café tem uma influência positiva nos índices relacionados a perda de massa por desgaste (PDI e durabilidade) e a absorção de água sob o bagaço-de-cana. Esse efeito relacionado ao fato de que a combustão da mistura BB/BC ocorre com a contribuição individual de cada resíduo, e quase que sem efeitos sinérgicos, indicam que a borra de café pode ser misturada ao bagaço-de-cana para melhorar esses aspectos mecânicos dos pellets, sem influenciar significativamente as suas características de queima. A mesma análise pode ser feita no sentido contrário, onde o bagaço-de-cana pode ser misturado a borra para melhorar a resistência da compressão contínua desta última.

Além disso, foi verificado que as forças de ligação sólido-sólido das partículas de borra de café têm maior resistência ao transporte (PDI), à impactos (durabilidade e IRI) e a absorção de água do que as das partículas de bagaço-de-cana e bagaço de laranja entre si. Em todos os casos, a mistura promoveu um novo pellet com características intermediárias entre os dois resíduos, exceto quando se trata da resistência a impactos. Neste caso, a mistura dos matérias de formato, tamanho e composição distintas gera um pellet com características mais heterogêneas, que tem mais pontos sensíveis à quebra, esse fator é detectado pelo IRI. De modo que, o IRI foi o único parâmetro que teve desempenho inferior da mistura do que dos respectivos pellets de materiais puros. Este parâmetro junto com os anteriores mostra que as misturas de resíduos podem ser utilizadas (e otimizadas), de modo a ajustar a qualidade mecânica dos pellets combustíveis de acordo com a necessidade de transporte no processo ou armazenamento.

#### 4.6.4. Ensaio de combustão

Para os ensaios de combustão seguiram os pellets de borra B, bagaço de cana e mistura BC/BB. Inicialmente foi avaliado o comportamento de queima de cada pellet individualmente analogamente ao apresentado para a borra de café. Visualmente não foram identificadas variações significativas do comportamento de combustão dos resíduos entre si como variação na cor e tamanho da chama. No entanto, foi observada uma variação consistente na estrutura e no formato das cinzas remanescentes ao fim do processo. Na queima dos pellets de bagaço de cana puro e a mistura BC/BB as cinzas remanescentes conservaram sua estrutura cilíndrica do pellet e o de borra B não.

Na Tabela 31 são apresentados os tempos característicos dos fenômenos de queima dos resíduos: tempo para o início da primeira chama, de autocombustão e de combustão interna. Para o tempo de início da primeira chama, que está associado ao tempo necessário de fornecimento de calor para o combustível entrar em ignição, foi observado que o bagaço de cana foi resíduo que levou mais tempo, seguido da borra de café. Para esta característica, foi observado ainda que a mistura borra B - bagaço de cana obteve o menor tempo para o início da primeira chama, com 1 min e 32 s. A partir dos dados de DrTGA (Figura 46, página 123) seria de se esperar tempos de ignição muito próximos entre si para os três pellets, uma vez que os dois resíduos têm temperatura de ignição próximas a 250 °C. Com isso, verificou-se que o modo de compactação dos resíduos influencia na quantidade energia fornecida para o início da queima e que a compactação da mistura BB/BC favoreceu a ignição do biocombustível em relação aos resíduos puros.

Tabela 31 - Características de queima dos pellets individuais.

Queima dos pellets	Tempo para o início da primeira chama	Tempo de autocombustão	Tempo de combustão interna
Borra de café B	1min e 48s	3min e 08s	16min e 15s
Bagaço de cana	1min e 57s	2min e 41s	15min e 03s
BC/BB	1min e 32s	2min e 16s	18min e 04s

Fonte: Autor, 2023.

Para o tempo de autocombustão, foi verificado que o do BC é menor do que o da BB. Esse efeito pode ser explicado pelas maiores taxas de reações do BC na região de devolatilização, a menores temperaturas (vide Figura 46, página 123), e do maior conteúdo de cinzas. Assim maior quantidade de massa é consumida em menos tempo. Já o pellet composto pela mistura foi o que apresentou menor tempo de autocombustão, o que não era esperado a partir dos ensaios de DrTGA, que indicavam comportamento intermediário. Em virtude do menor tempo de autocombustão, o pellet da mistura foi o que apresentou maior tempo de combustão interna. De modo análogo ao atribuído ao tempo da primeira chama, para o tempo de autocombustão e combustão interna, pode-se verificar que a forma de compactação dos resíduos distintos misturados influenciou o comportamento de queima.

Na Tabela 32 são apresentados o calor de combustão liberado pelo pellet, calculado pela variação de massa e poder calorífico (ROCHA *et al.*, 2015; ROCHA; FERREIRA; FREIRE, 2021). O pellet de bagaço de cana foi o que teve menor calor liberado na queima, em função de ser o resíduo que tem menor poder calorífico e maior porcentagem de cinzas. Com isso desempenho do pellet BC/BB, em termos de energia, foi melhorado em relação ao pellet de bagaço de cana puro.

Tabela 32 – Estimativa do calor liberado na combustão de 1 pellet de 5 g.

Pellet	Calor liberado (kJ)
Borra de café B	108,69
Bagaço de cana	65,11
BC/BB	89,39

Fonte: Autor, 2023.

Com esses resultados pode-se constatar como a borra de café afeta o bagaço de laranja e bagaço de cana, em termos térmicos, de velocidade de reações de combustão e calor liberado, e mecanicamente, em termos dos parâmetros de qualidade dos pellets produzidos. Em quase todos os casos, a borra de café atuou potencializando a qualidade térmica e mecânica dos outros

dois resíduos lhes conferindo maior energia térmica, maior resistência mecânica e menor capacidade de absorção de água. Trabalhos neste sentido não são encontrados na literatura atual, e abre espaço para desenvolvimento de tecnologia de cooperação entre empresas geradoras de resíduos distintos, bem como para mais estudos da influência da borra sobre outros resíduos, que sozinhos não são economicamente viáveis para a produção de energia.

## 5. Conclusões

Para a borra de café, tendo em vista os resultados encontrados e discutidos nesta tese, foram obtidas as seguintes conclusões.

A partir da caracterização térmica, TGA e DrTGA, foi identificado que o diâmetro de partícula influencia as principais características das reações de combustão desse resíduo, sendo assim um fator importante para ajuste dos parâmetros de operação de queima do resíduo não compactado. Foi identificado que o estágio que envolve a devolatilização dos componentes é favorecido pelo menor diâmetro de partícula em termos de temperatura de ignição e velocidade de reação. E as maiores partículas favorecem melhor dissipação térmica e temperatura de burnout.

Considerando que o tamanho do particulado influencia a secagem, a pelletização e a combustão, foi identificado, nos ensaios de elutriação, a formação de finos pelo mecanismo de fragmentação quando a borra de café está sujeita à fluidização. Neste caso, houve uma geração de aproximadamente 12% de partículas com diâmetro inferior a 500  $\mu\text{m}$ , apenas pela passagem de ar no leito e choque entre partículas. A geração de finos foi favorecida pelo aumento da temperatura de operação e das condições vibracionais (amplitude e frequência).

Para a secagem da borra de café em batelada em leito fluidizado e vibrofluidizado, nas condições adotadas, o aumento da temperatura e velocidade do ar e amplitude e frequência de vibração levam a maior diminuição da umidade da borra com o tempo. Essas condições também favorecem maior taxa de elutriação, assim maior carga evaporativa fica disponível para secagem da borra retida no leito. Foi encontrado que cerca de 80% da umidade do material é perdido no primeiro período de taxa decrescente, onde as condições de 25-30% de umidade, adequadas para a queima do resíduo, são alcançadas. Com o estudo cinético da secagem da borra em estufa, foi identificado que o tamanho do particulado não tem influência no comportamento de secagem no intervalo de umidade de interesse. Além disso, foi calculado  $Bi < 0,2$ , que indica que o processo de secagem convectiva da borra é controlado pelas condições

externas de secagem, e explica a redução do tempo de secagem dos leitos fluidizados e vibrofluidizados.

Com a borra seca foram produzidos pellets combustíveis com partículas de 550, 400 e 225  $\mu\text{m}$ , que apresentaram excelentes parâmetros de qualidade (PDI, durabilidade, IRI, absorção de água e resistência à compressão), tanto melhores quanto menor o tamanho de partícula. Isso acontece porque as menores partículas têm maior área superficial, o que aumenta as forças superficiais sólido-sólido, melhorando a resistência do pellet. Nos ensaios de queima foi verificado que os pellets de partículas de 550  $\mu\text{m}$  tiveram maior velocidade de reação, provavelmente pela maior facilidade da difusão de calor e massa para o seu interior. E que o calor liberado pelas partículas foi muito próximo entre si, sendo principalmente dependente da quantidade de massa disponível para queima não do tamanho de partícula o qual o pellet é constituído.

Foi constatado, por fim, que a borra de café pode atuar potencializando a qualidade térmica e mecânica de pellets constituídos de misturas com bagaço de cana e laranja. Na mistura com o bagaço de laranja foi constatado que as velocidades de reação na etapa de combustão são maiores do que da borra ou bagaço de laranja puros, e que a borra melhora significativamente a qualidade mecânica desses pellets, embora estudos das condições ideais para a pelletização do bagaço de laranja puro ainda devam ser investigados. Já na mistura com o bagaço de cana, efeitos sinérgicos na velocidade de reação de combustão da mistura dos resíduos não foram significativamente observados, porém a borra de café melhorou o PDI, a resistência a absorção de água e a energia liberada dos pellets compostos pela mistura BC/BB em relação aos pellets de bagaço de cana puro.

De modo geral, pode-se concluir, que a secagem da borra de café em leitos fluidizados e vibrofluidizados promove a formação de particulado finos, que melhoram significativamente os parâmetros de qualidade mecânica dos pellets combustíveis desse resíduo. Além disso, que a borra de café pode atuar como um resíduo auxiliar na produção de pellets combustíveis de bagaço cana-de-açúcar e bagaço de laranja, melhorando sua resistência mecânica e desempenho energético.

Tendo em vista que o Brasil é um país essencialmente agrícola e a implementação do plano nacional de gerenciamento de resíduos sólidos, abre-se a possibilidade do reaproveitamento dos mais variados resíduos lignocelulósicos para a geração de energia térmica. Este trabalho avançou no estudo do reaproveitamento da borra de café, obtendo bons resultados no que se refere a qualidade do pellet e sua liberação de energia e abriu a discussão sobre a reutilizações dos resíduos de forma associada aproveitando possíveis efeitos sinérgicos para obter melhor desempenho na recuperação energética simultânea. Nesse sentido ainda muitos resíduos podem ser estudados individualmente e em misturas como a palha do arroz, bagaço de malte, resíduos da indústria do papel e celulose, solos de turfa e outros bem como as suas respectivas misturas.

## **6. Sugestão de trabalhos futuros**

Como este trabalho se alicerçou em teses, dissertações e outros trabalhos científicos, e como ainda há muito que pesquisado, sugere-se os seguintes estudos para trabalhos futuros:

- Avaliar a secagem da borra de café em secador de leito pneumático e rotativo.
- Pesquisar sobre dos fatores que geram a desagregação do pellet de bagaço de laranja, uma vez que esse resíduo tem muito potencial energético.
- Analisar o processo de combustão dos resíduos e misturas dessa tese em leito espesso de combustão com registro da temperatura do leito e os gases emitidos.
- Investigar a composição química das cinzas dos resíduos após combustão.
- Analisar o gás de exaustão da combustão desses resíduos, bem como tecnologias de lavagem e filtração.

## Referências Bibliográficas

ALLESINA, Giulio *et al.* Spent coffee grounds as heat source for coffee roasting plants : Experimental validation and case study. **Applied Thermal Engineering**, v. 126, p. 730–736, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.07.202>.

ALTHAUS, Tim O.; WINDHAB, Erich J.; SCHEUBLE, Nathalie. Effect of pendular liquid bridges on the flow behavior of wet powders. **Powder Technology**, v. 217, p. 599–606, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2011.11.026>.

ALVAREZ, Jon *et al.* Valorization of citrus wastes by fast pyrolysis in a conical spouted bed reactor. **Fuel**, v. 224, p. 111–120, 2018.

BARBOSA, Ana M. *et al.* Alternative drying of orange bagasse in vibrofluidized bed for use in combustion. **Chemical Engineering and Processing - Process Intensification**, v. 152, 2020.

BERGMAN, P. C. A. **Combined torrefaction and pelletisation The TOP process**. 2005.

BERGSTRÖM, Dan *et al.* Effects of raw material particle size distribution on the characteristics of Scots pine sawdust fuel pellets. **Fuel Processing Technology**, v. 89, n. 12, p. 1324–1329, 2008.

BRATU, E.; JINESCU, G. I. Effect of vertical vibrations on the pressure drop in a fluidised layer. **British Chemical Engineering**, v. 16, n. 8, p. 691–695, 1971.

CHANG, Yu-min *et al.* Elutriation characteristics of fine particles from bubbling fluidized bed incineration for sludge cake treatment. **West Management**, v. 25, p. 249–263, 2005.

CHEN, Wei-hsin; LU, Ke-miao; TSAI, Chi-ming. An experimental analysis on property and structure variations of agricultural wastes undergoing torrefaction. **Applied Energy**, v. 100, p. 318–325, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.05.056>.

CITRUSBR. **Produção de suco**. 2023. Disponível em: <https://citrusbr.com/estatisticas/producao-de-suco/>. Acesso em: 22 jan. 2023.

COLAKYAN, M; LEVENSPIEL, O. from Fluidized Beds. **Powder Technology**, v. 38, p. 223–232, 1984.

COSTA, Ariany Binda Silva. **ANÁLISE DO DESEMPENHO DO LEITO VIBROFLUIDIZADO NA SECAGEM DE PASTA**. 2017. 118 f. Teses de Doutorado - Universidade Federal de São Carlos, 2017.

CRANK, J. The Mathematics of Diffusion. **Journal of the American Chemical Society**, v. 79, n. 5, p. 1267–1268, 1957.

CRELLING, John C. *et al.* Combustion characteristics of selected whole coals and macerals. **Fuel**, v. 71, n. 2, p. 151–158, 1992.

DALEFFE, RV. **Contribuições para a análise do comportamento fluidodinâmico de um leito vibrofluidizado**. 2005. 1–369 f. Tese de doutorado - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2005. Disponível em: <http://200.136.241.2:8080/jspui/handle/1/733>.

DALEFFE, R. v.; FREIRE, J. T. Analysis of the fluid-dynamic behavior of fluidized and vibrofluidized bed containing glycerol. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 21, n. 1, p. 35–46, 2004.

DE PALMA, Kelly Roberta *et al.* Pyrolysis and Combustion Kinetic Study and Complementary Study of Ash Fusibility Behavior of Sugarcane Bagasse, Sugarcane Straw, and Their Pellets - Case Study of Agro-Industrial Residues. **Energy and Fuels**, v. 33, n. 4, p. 3227–3238, 2019.

DI RENZO, Alberto; PICARELLI, Giada; DI MAIO, Francesco P. Numerical Investigation of Funicular Liquid Bridge Interactions Between Spherical Particles. **Chemical Engineering and Technology**, v. 43, n. 5, p. 830–837, 2020.

DYJAKON, Arkadiusz; NOSZCZYK, Tomasz; SMĘDZIK, Martyna. The influence of torrefaction temperature on hydrophobic properties of waste biomass from food processing. **Energies**, v. 12, n. 24, 2019.

EFTHYMIOPOULOS, Ioannis *et al.* Integrated strategies for water removal and lipid extraction from coffee industry residues. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 29, n. October 2017, p. 26–35, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2018.06.016>.

FAO. **World Food and Agriculture – Statistical Yearbook 2022**: FAO, 2022. *E-book*. Disponível em: <http://www.fao.org/documents/card/en/c/cc2211en>.

FERMOSO, Javier; MAŠEK, Ondřej. Thermochemical decomposition of coffee ground residues by TG-MS : A kinetic study. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 130, n. October 2017, p. 358–367, 2018.

FU, B. A.; CHEN, M. Q. Microwave drying performance of spent coffee grounds briquette coupled with mineral additives. **Drying Technology**, v. 38, n. 15, p. 2094–2101, 2020a.

FU, B. A.; CHEN, M. Q. Microwave drying performance of spent coffee grounds briquette coupled with mineral additives. **Drying Technology**, v. 38, n. 15, p. 2094–2101, 2020b.

GHETTI, Paolo; RICCA, Leandro; ANGELINI, Luciana. Thermal analysis of biomass and corresponding pyrolysis products. **Fuel**, v. 75, n. 5, p. 565–573, 1996.

GÓMEZ-DE LA CRUZ, Francisco J. *et al.* A vital stage in the large-scale production of biofuels from spent coffee grounds: The drying kinetics. **Fuel**

**Processing Technology**, v. 130, n. C, p. 188–196, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.10.012>.

GÓMEZ-DE LA CRUZ, Francisco J. *et al.* Experimental studies on mass transfer during convective drying of spent coffee grounds generated in the soluble coffee industry. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, n. 0123456789, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09600-3>.

GÓMEZ-DE LA CRUZ, Francisco J. *et al.* Experimental studies on mass transfer during convective drying of spent coffee grounds generated in the soluble coffee industry. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 145, n. 1, p. 97–107, 2021.

HENDERSON, S M. Progress in Developing the Thin Layer Drying Equation. p. 1–3, 1974.

HOFSETZ, Kelly; SILVA, Maria Aparecida. Brazilian sugarcane bagasse: Energy and non-energy consumption. **Biomass and Bioenergy**, v. 46, p. 564–573, 2012.

IBAMA. **Painel da geração de resíduos no Brasil**. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/emissoes-e-residuos/residuos/>.

ICO: INTERNATIONAL COFFEE ORGANIZATION. **World coffee production**. 2021. Disponível em: <http://www.ico.org/prices/po-production.pdf>.

JEGUIRIM, M.; LIMOUSY, L.; DUTOURNIE, P. Pyrolysis kinetics and physicochemical properties of agropellets produced from spent ground coffee blended with conventional biomass. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 92, n. 10, p. 1876–1882, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cherd.2014.04.018>.

JENKINS, B M *et al.* Combustion properties of biomass. **Fuel Processing Technology**, v. 54, p. 17–46, 1998.

JIA, Dening *et al.* Fluidization and drying of biomass particles in a vibrating fluidized bed with pulsed gas flow. **Fuel Processing Technology**, [s. l.], 2015.

KALIYAN, Nalladurai; VANCE MOREY, R. Factors affecting strength and durability of densified biomass products. **Biomass and Bioenergy**, v. 33, n. 3, p. 337–359, 2009. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0961953408002146>.

KANG, Sae Byul *et al.* Characteristics of spent coffee ground as a fuel and combustion test in a small boiler (6.5 kW). **Renewable Energy**, v. 113, p. 1208–1214, 2017.

KELKAR, Shantanu *et al.* Pyrolysis of spent coffee grounds using a screw-conveyor reactor. **Fuel Processing Technology**, v. 137, p. 170–178, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.04.006>.

- KHAN, A. A. *et al.* Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies. **Fuel Processing Technology**, v. 90, n. 1, p. 21–50, 2009.
- KIZGUT, S.; YILMAZ, S. Characterization and non-isothermal decomposition kinetics of some Turkish bituminous coals by thermal analysis. **Fuel Processing Technology**, v. 85, n. 2–3, p. 103–111, 2004.
- KOMILIS, Dimitrios; KISSAS, Konstantinos; SYMEONIDIS, Avraam. Effect of organic matter and moisture on the calorific value of solid wastes: An update of the Tanner diagram. **Waste Management**, v. 34, n. 2, p. 249–255, 2014.
- LAURILA, Jussi; HAVIMO, Mikko; LAUHANEN, Risto. Compression drying of energy wood. **Fuel Processing Technology**, v. 124, p. 286–289, 2014.
- LEE, Sang Kwun *et al.* Attrition of Lime Sorbents during Fluidization in a Circulating Fluidized Bed Absorber. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 32, n. 11, p. 2758–2766, 1993.
- LEWIS, W K. The symposium on drying. 1921.
- LI, Xiang Guo *et al.* Thermogravimetric analysis of the co-combustion of the blends with high ash coal and waste tyres. **Thermochimica Acta**, v. 441, n. 1, p. 79–83, 2006.
- LI, Xiaofeng; STREZOV, Vladimir; KAN, Tao. Energy recovery potential analysis of spent coffee grounds pyrolysis products. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 110, p. 79–87, 2014. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0165237014001909>.
- LIMOUSY, L *et al.* Gaseous products and particulate matter emissions of biomass residential boiler fired with spent coffee grounds pellets. **Fuel**, v. 107, p. 323–329, 2013a. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2012.10.019>.
- LIMOUSY, L *et al.* Gaseous products and particulate matter emissions of biomass residential boiler fired with spent coffee grounds pellets. **Fuel**, v. 107, p. 323–329, 2013b. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2012.10.019>.
- LIMOUSY, Lionel *et al.* Performance and emissions characteristics of compressed spent coffee ground / wood chip logs in a residential stove. **Energy for Sustainable Development**, v. 28, p. 52–59, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.esd.2015.07.002>.
- LISOWSKI, Aleksander *et al.* Spent coffee grounds compaction process: Its effects on the strength properties of biofuel pellets. **Renewable Energy journal**, v. 142, p. 173–183, 2019.
- LOMBARDI, Lidia; CARNEVALE, Ennio; CORTI, Andrea. A review of technologies and performances of thermal treatment systems for energy recovery from waste. **Waste Management**, v. 37, p. 26–44, 2015.
- LUO, S. Y. *et al.* Experimental study on oxygen-enriched combustion of biomass micro fuel. **Energy**, v. 34, n. 11, p. 1880–1884, 2009.

MASSARO SOUSA, L; FERREIRA, M C. Spent coffee ground as a renewable source of energy : analysis of bulk powder flowability. **Particuology**, v. 43, p. 92–100, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.partic.2018.06.002>.

MEILI, Lucas. **Contribuições ao Estudo da Fluidodinâmica e da Secagem de Pastas em Leitos Fluidizado e Vibrofluidizado**. 2009. 218 f. Tese de doutorado - UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, 2009.

MEILI, LUCAS; FREIRE, FÁBIO B.; FERREIRA, MARIA DO CARMO; FREIRE, José T. Fluid Dynamics of Vibrofluidized Beds during the Transient Period of Water Evaporation and Drying of Solutions. **Chemical Engineering and Technology**, v. 35, n. 10, p. 1803–1809, 2012.

MIDILLI, A; KUCUK, H; YAPAR, Z. TECHNICAL NOTE SINGLE-LAYER DRYING. v. 20, n. 7, p. 1503–1513, 2002.

MORENO, Rogelio; RIOS, Rolando; CALBUCURA, Héctor. Batch vibrating fluid bed dryer for sawdust particles: experimental results. **Drying Technology**, v. 18, p. 37–41, 2007.

MUSSATTO, Solange I. *et al.* Production, composition, and application of coffee and its industrial residues. **Food and Bioprocess Technology**, v. 4, n. 5, p. 661–672, 2011.

NOSEK, Radovan; TUN, Maw Maw; JUCHELKOVA, Dagmar. Energy utilization of spent coffee grounds in the form of pellets. **Energies**, v. 13, n. 5, p. 1–8, 2020.

NUNES, L. J.R.; MATIAS, J. C.O.; CATALÃO, J. P.S. **Mixed biomass pellets for thermal energy production: A review of combustion models**. Elsevier Ltd, 2014.

ÓRFÃO, J. J. M.; ANTUNES, F J A; FIGUEIREDO, J L. Pyrolysis kinetics of lignocelulosic materials—three independent reactions model. **Fuel and Energy Abstracts**, v. 40, n. 5, p. 340, 1999.

OVERHULTS, D G *et al.* Drying Soybeans W i t h Heated Air. p. 112–113, 1973.

PAIXÃO, Joana Fidelis da. **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Industriais Relatório de Pesquisa**. Brasília: 2012. Disponível em: <http://www.ipea.gov.br>.

PAKOWSKI, Z.; MUJUNDAR, A. S.; STRUMILLO, C. Theory and application of vibrated beds and vibrated fluid beds for drying processes. *Em*: MUJUNDAR, A. S. (org.). **Advances in Drying**. 1. ed. New York: Hemisphere Publ. Corp., 1984. v. 3, p. 245–306.

PANG, Shusheng; MUJUMDAR, Arun S. Drying of Woody Biomass for Bioenergy : Drying Technologies and Optimization for an Integrated Bioenergy Plant. **Drying Technology**, v. 28, p. 690–701, 2010.

PENG, J H *et al.* A Study of Particle Size Effect on Biomass Torrefaction and Densification. **Energy & Fuel**, v. 26, p. 3826–3839, 2012.

PERAZZINI, H.; FREIRE, F. B.; FREIRE, J. T. Drying Kinetics Prediction of Solid Waste Using Semi-Empirical and Artificial Neural Network Models. **Chemical Engineering and Technology**, v. 36, n. 7, p. 1193–1201, 2013.

PICKLES, C. A. Drying kinetics of nickeliferous limonitic laterite ores. **Minerals Engineering**, v. 16, n. 12, p. 1327–1338, 2003.

PRADHAN, Priyabrata; MAHAJANI, Sanjay M; ARORA, Amit. Production and utilization of fuel pellets from biomass : A review. **Fuel Processing Technology**, v. 181, n. August, p. 215–232, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.09.021>.

RICHARDSON, S. R. Physical Testing of Fuel Briquettes. **Fuel Processing Technology**, v. 25, p. 89–100, 1990.

ROCHA, T. A. F. **CONTRIBUIÇÕES AO ESTUDO DA SECAGEM DA BORRA DE CAFÉ EM LEITO VIBROFLUIDIZADO**. 2019. 1–92 f. Dissertação de mestrado - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos - SP, 2019.

ROCHA, George Jackson de Moraes *et al.* Influence of mixed sugarcane bagasse samples evaluated by elemental and physical-chemical composition. **Industrial Crops and Products**, v. 64, p. 52–58, 2015.

ROCHA, Thalyne de Almeida Ferreira; FERREIRA, Maria do Carmo; FREIRE, José Teixeira. Processing spent coffee ground powders for renewable energy generation: Mechanical dewatering and thermal drying. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 146, p. 300–311, 2021.

SILES, J. A. *et al.* Integral valorisation of waste orange peel using combustion, biomethanisation and co-composting technologies. **Bioresource Technology**, v. 211, p. 173–182, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2016.03.056>.

SILVA, M. A. *et al.* The use of biomass residues in the Brazilian soluble coffee industry. **Biomass and Bioenergy**, v. 14, n. 5–6, p. 457–467, 1998.

SINIR. **Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão de Resíduos Sólidos - Tipos de resíduos**. 2023. Disponível em: <https://sinir.gov.br/informacoes/tipos-de-residuos/>. Acesso em: 22 jan. 2023.

THUNMAN, Henrik; LECKNER, Bo. Influence of size and density of fuel on combustion in a packed bed. **Proceedings of the Combustion Institute**, v. 30 II, n. 2, p. 2939–2946, 2005. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proci.2004.07.010>.

TSAI, Wen-tien; LIU, Sii-chew. Effect of temperature on thermochemical property and true density of torrefied coffee residue. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 102, p. 47–52, 2013. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0165237013000806>.

TSAI, Wen-tien; LIU, Sii-chew; HSIEH, Ching-hsiang. Preparation and fuel properties of biochars from the pyrolysis of exhausted coffee residue. **Journal of**

**Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 93, p. 63–67, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaap.2011.09.010>.

TULASIDAS, T. N.; RAGHAVAN, G. S. V.; NORRIS, E. R. Microwave and convective drying of grapes. **Transactions of the ASAE**, v. 36(6), p. 1861–1865, 1993.

TUN, Maw Maw *et al.* Spent coffee ground as renewable energy source: Evaluation of the drying processes. **Journal of Environmental Management**, v. 275, 2020.

VAKALIS, Stergios *et al.* The “coffee bin” concept: centralized collection and torrefaction of spent coffee grounds. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, p. 35473–35481, 2019.

VAMVUKA, Despina; SFAKIOTAKIS, Stelios. Combustion behaviour of biomass fuels and their blends with lignite. **Thermochimica Acta**, v. 526, n. 1–2, p. 192–199, 2011.

VAMVUKA, Despina; SFAKIOTAKIS, Stelios; KOTRONAKIS, Manolis. Fluidized bed combustion of residues from oranges’ plantations and processing. **Renewable Energy**, v. 44, p. 231–237, 2012.

VERMA, Munna *et al.* Drying of biomass for utilising in co-firing with coal and its impact on environment – A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 71, p. 732–741, 2017.

WANG, Yu; WANG, Yin-yin; ZHANG, Shu-ting. Effect of drying conditions on moisture re-adsorption and particulate matter emissions during the classification drying of coking coal. **Fuel Processing Technology**, v. 192, n. April, p. 65–74, 2019.

WEN-CHING YANG. **Handbook of fluidization and fluid-particle systems**. 1<sup>a</sup>ed. Nova York: 2003.

WESTERMAN, P W; WHITE, G M; ROSS, I J. Relative Humidity Effect on the High- Temperature Drying of Shelled Corn. 1973.

WZOREK, Małgorzata *et al.* Combustion behavior and mechanical properties of pellets derived from blends of animal manure and lignocellulosic biomass. **Journal of Environmental Management**, v. 290, 2021.

YAĞCIOĞLU, A; DEĞİRMENCİOĞLU, A; ÇAĞATAY, F. Drying Characteristics of Laurel Leaves Under Different Drying Conditions. 7th Int. **Congress on Agricultural Mechanization and Energy**, n. March, p. 565–569, 1999.

YAMAKITA, Eri; NAKASHIMA, Satoru. Water Retention of Calcium-Containing Pectin Studied by Quartz Crystal Microbalance and Infrared Spectroscopy with a Humidity Control System. research-article. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 66, n. 35, p. 9344–9352, 2018.

YI, Junpeng *et al.* Drying efficiency and product quality of biomass drying: a review. **Drying Technology**, p. 1–16, 2019.

ZAPATA, B. *et al.* Thermo-kinetics study of orange peel in air. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 98, n. 1, p. 309–315, 2009.