

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS AGROVETERINÁRIA – CAV
MESTRADO DE ENGENHARIA FLORESTAL**

MARLON FILIPPE SANTOS DA SILVA

**QUALIDADE DE *PELLETS* DE *Pinus* TORREFADOS COM DIFERENTES
TEMPOS E TEMPERATURAS EM TORREFADOR PILOTO DE TAMBOR.**

LAGES

2023

MARLON FILIPPE SANTOS DA SILVA

**QUALIDADE DE *PELLETS* DE *Pinus* TORREFADOS COM DIFERENTES
TEMPOS E TEMPERATURAS EM TORREFADOR PILOTO ROTATIVO.**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal do Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Florestal, área de concentração em Produção Florestal e Tecnologia da Madeira.

Orientadora: Prof.^a Dra. Martha Andreia Brand

Co-orientador: Prof. Dr. Matheus Fontanelle Pereira

LAGES

2023

FICHA CATALOGRÁFICA

Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da
Biblioteca Setorial do CAV/UEDESC,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Silva, Marlon Filippe Santos da
QUALIDADE DE PELLETS DE Pinus TORREFADOS
COM DIFERENTES TEMPOS E TEMPERATURAS EM
TORREFADOR PILOTO DE TAMBOR. / Marlon Filippe
Santos da Silva. -- 2023.
101 p.

Orientadora: Martha Andreia Brand
Coorientador: Matheus Fontanelle Pereira
Dissertação (mestrado) -- Universidade do Estado de Santa
Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de
Pós-Graduação , Lages, 2023.

1. Torrefação de *pellets*. 2. Torrefação oxidativa. 3. Tambor
rotativo. 4. Temperatura de torrefação. 5. Tempo de torrefação.
I. Brand, Martha Andreia. II.
Pereira, Matheus Fontanelle. III. Universidade do Estado de
Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa
de Pós-Graduação . IV. Título.

MARLON FILIPPE SANTOS DA SILVA

**QUALIDADE DE *PELLETS* DE *Pinus* TORREFADOS COM DIFERENTES
TEMPOS E TEMPERATURAS EM TORREFADOR PILOTO ROTATIVO.**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal do Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Florestal, área de concentração em Produção Florestal e Tecnologia da Madeira.

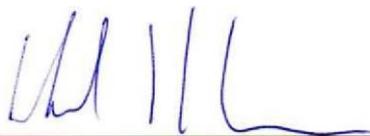
BANCA EXAMINADORA



Prof.ª Dra. Martha Andreia Brand

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA - UDESC

Membros:



Prof. Dr. Rafael Santiago Floriani Pereira

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina - IFSC



Prof. Dr. Thiago de Paula Protásio
Universidade Federal Rural da Amazônia

Lages, 31 de Julho de 2023

DEDICATÓRIA

Dedico com muito amor e carinho este trabalho aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus e, toda espiritualidade qual acredito e carrego dentro do meu ser, a fé fortifica, alimenta a alma e nos conduz a propósitos inimagináveis, sem o suprassumo vital de toda existência não há obra, não há amor e não há caridade.

Agradeço aos meus pais, sem dúvida não mediram esforços e acreditaram muito mais que eu nesta conquista, aqui juntos chegamos, e onde mais poderemos ir?

A minha amada companheira de jornada, meu porto seguro e minha fortaleza, te agradeço pelo incentivo, por estar presente e ser presença.

Ao meu filho amado, dividimos tempo entre escrita de dissertação, tratamento para cura de viroses e trocas de fraldas, você é minha fonte de inspiração.

A minha orientadora Martha Andreia Brand, quanto me ensinastes ao longo deste tempo. Agradeço a paciência, os ensinamentos, toda sua dedicação e principalmente pela oportunidade de trabalharmos juntos.

A técnica Juliana Dias Siqueira, por toda dedicação e companheirismo ao longo deste trabalho.

Ao Ariton Araldi, incentivador e criador da inspiração deste trabalho, sou honrado em trabalhar contigo, sou grato por toda sua dedicação e companheirismo.

Ao Prof. Dr. Matheus Fontanelle Pereira, por incentivar e estimular, querer fazer a diferença, por ensinar e aprender junto desde o início deste projeto. Com certeza, ainda continuaremos trabalhando.

A minha banca orientadora, Prof. Dr. Thiago de Paula Protásio e Prof. Dr. Rafael Santiago Floriani Pereira, pelas contribuições e disponibilidade em contribuir com este trabalho.

Ao corpo docente, do Programa de Mestrado em Engenharia Florestal da UDESC – Lages, pelos ensinamentos, pelo entusiasmo e dedicação em repassar seus conhecimentos.

Ao IFSC campus Lages, pelo incentivo que oferecem aos servidores em buscar capacitação. Agradeço a toda estrutura e condições fornecidas para a realização deste trabalho.

RESUMO

A peletização da madeira já provou cientificamente ser um processo eficiente para o incremento na qualidade da biomassa para geração de energia. A partir daí, uma estratégia para a melhoria física e química dos *pellets* é o pré-tratamento da biomassa por meio da torrefação, buscando melhorar algumas características como o teor de umidade, que favorece sua biodegradabilidade e redução da higroscopicidade que dificulta o armazenamento deste biocombustível. Assim, o objetivo deste trabalho foi determinar os parâmetros mais adequados para torrefação de *pellets* de madeira de *Pinus*, utilizando um torrefador por tambor rotativo. Para isso foi utilizado um torrefador protótipo de pequena escala, desenvolvido por Araldi (2022). As configurações de operação foram: movimentação dos *pellets* por tamboreamento; fonte de aquecimento por gás GLP e ventilação com ar atmosférico, que determinaram a temperatura de trabalho. Foram utilizadas duas variáveis de análise: 02 tempos de residência (30 e 60 minutos) e 02 temperaturas de torrefação (225°C e 285°C). Duas taxas de aquecimento foram utilizadas (15,5°C/min e 18,5°C/min), pois o controle do equipamento é manual. Além disso, foi realizada a torrefação dos *pellets* em termobalança gravimétrica, com os mesmos parâmetros de ensaio do torrefador, para comparação dos resultados. Para verificar os efeitos físicos e químicos do processo de torrefação, os *pellets* de *Pinus* foram avaliados quanto as suas propriedades físicas, químicas e energéticas antes e após ao tratamento térmico. Também foram realizados ensaios para determinar a higroscopicidade dos *pellets* e seu comportamento frente a degradação térmica. Os resultados no torrefador piloto de tambor rotativo e na termobalança gravimétrica, foram diferentes entre si. Os resultados indicaram que, as propriedades físicas foram mais afetadas pelo tratamento térmico no tambor rotativo, principalmente em função da temperatura, do que na termobalança. Já a composição química e energética, foi afetada de forma mais significativa na torrefação em termobalança, do que no torrefador de tambor rotativo. Tanto a temperatura, quanto o tempo de residência, influenciaram os resultados das torrefações em ambos os equipamentos. Entretanto, o parâmetro que melhor representou as características desejadas em *pellets* de *Pinus* torrefados, foi o tratamento à 285°C por 30 minutos de residência, em ambos os equipamentos. O processo de torrefação, no torrefador piloto de tambor rotativo tornou a dimensão dos *pellets* mais homogêneas. Com relação a umidade de equilíbrio, o comportamento

higroscópico do efeito da torrefação foi similar em ambos os equipamentos. O torrefador de tambor rotativo, possui potencial para o tratamento térmico de *pellets* de *Pinus*. Porém, recomenda-se a continuidade nos estudos do protótipo, concentrando-se nas melhorias necessárias visando à otimização das propriedades energéticas dos *pellets* torrefados.

Palavras-chave: Torrefação de *pellets*; Torrefação oxidativa; Tambor rotativo; Temperatura de torrefação; Tempo de residência.

ABSTRACT

Wood pelletization has already scientifically proven to be an efficient process for increasing the quality of biomass for energy generation. From then on a strategy for the physical and chemical improvement of pellets is the treatment of biomass through torrefaction, seeking to improve some characteristics such as moisture content, which favors its biodegradability and reduction of hygroscopicity that makes the storage of this biofuel difficult. The objective of this work was to determine the most suitable parameters for torrefaction Pine wood pellets, using a rotating-drum roaster. For this a small-scale prototype roaster, developed by Araldi (2022), was used. The operating configurations were: movement of pellets by rotary drum, GLP gas heating source and ventilation with atmospheric air, which determined the working temperature. Two analysis variables were used: 02 residence times (30 and 60 minutes) and 02 torrefaction temperatures (225°C and 285°C). Two heating rates were used (15,5°C/min and 18,5°C/min) because manual control of equipment. The pellets were torrefaction in a gravimetric thermobalance, with the same torrefaction test parameters to compare the results. To verify the physical and chemical effects of the torrefaction process, the Pine pellets were evaluated for their physical, chemical and energetic before and after heat treatment. Tests were also carried out to determine the hygroscopicity of the pellets and their behavior thermal degradation. The results in the rotating-drum pilot torrefaction and in the gravimetric thermobalance were different from each other. The results indicated that the physical Properties were more affected by the heat treatment in the rotating-drum, mainly as a function of temperature than in the thermobalance. The chemical and energetic composition was affected more significantly in thermobalance roasting than in the rotary-drum roaster. Both temperature and residence time influenced the roasting results in both equipment. The parameter that best represented the desired characteristics in roasted Pine pellets was the treatment at 285°C for 30 minutes of residence, in both equipments. The roasting process in the rotating-drum pilot roaster made the size of the pellets more homogeneous. Regarding equilibrium humidity, the hygroscopic behavior of the roasting effect was similar in both equipment. The rotary-drum torrefaction has potential for the heat treatment of Pine pellets. It is recommended that prototype studies continue, focusing on the necessary improvements aimed at optimizing the energetic properties of torrefied pellets

Keywords: Pellet roasting, Oxidative roasting, Rotating-drum, Roasting temperature, Residence time.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Classificação e tipos de torrefação.....	26
Figura 2. Tipos de reatores de torrefação.	32
Figura 3. Maravalha de Pinus taeda preparada para a produção dos pellets.	40
Figura 4. Matriz plana da peletizadora piloto laboratorial.	41
Figura 5. Protótipo de torrefação montado e em teste.	42
Figura 6. Protótipo de torrefação, resumo do princípio operacional.	43
Figura 7. Estrutura organizacional de execução do teste prático do protótipo de torrefação.	45
Figura 8. Tela instalada no tambor do torrefador para impedir a saída dos pellets durante o processo de torrefação em torrefador piloto rotativo.	46
Figura 9. Carbonização total dos pellets do tratamento T4 PP – 60 – 285, ocasionando geração de finos de material carbonizado.....	47
Figura 10. Variação da temperatura e tempo de torrefação durante a torrefação de pellets de Pinus.	48
Figura 11. Coloração dos pellets in natura x torrefados pelo Processo de Tambor Rotativo.	49
Figura 12. Pellets em placas de Petri para ensaio de higroscopicidade.	54
Figura 13. Ensaio de durabilidade mecânica de pellets de Pinus em diferentes tempos e temperaturas de torrefação.	55
Figura 14. Pellets torrefados em balança termogravimétrica, dispostos em placas de Pétri para ensaio de higroscopicidade.	58
Figura 15. Parâmetros para avaliação da variação de temperatura e perda de massa.	61
Figura 16. Curvas de perda de massa dos <i>pellets</i> torrefados em balança termogravimétrica com diferentes tempos e temperaturas.	62
Figura 17. Distribuição da massa individual de pellets antes e após a torrefação em torrefador piloto de tambor.	66
Figura 18. Diâmetro dos pellets antes e depois do processo de torrefação em termobalança gravimétrica.	69
Figura 19. Comprimento dos pellets antes e depois o processo de torrefação em termobalança gravimétrica.	69

Figura 20. Variação de umidade dos pellets torrefados, em torrefador piloto (a) e em termobalança gravimétrica (b), mantidos em câmara climatizada até estabilização da umidade.....	74
Figura 21. Sobreposição das curvas de estabilização do teor de umidade em câmara climatizada de pellets torrefados em torrefador piloto de tambor e termobalança gravimétrica, em diferentes tempos e temperaturas de torrefação.	76
Figura 22. Variação da composição química imediata dos pellets torrefados em torrefador piloto de tambor e em termobalança gravimétrica.	80
Figura 23. Densidade energética unitária de pellets torrefados em diferentes sistemas de torrefação, e em função do tempo e temperatura de torrefação.	83
Figura 24. Degradação térmica dos pellets torrefados em torrefador piloto de tambor, em função da temperatura e tempo de residência.	84
Figura 25. Degradação térmica dos pellets torrefados em balança termogravimétrica, em função da temperatura e tempo de residência.	86
Figura 26. Variações nos parâmetros de degradação térmica entre o torrefador piloto de tambor e a termobalança gravimétrica.	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Comparação da torrefação não oxidativa e torrefação oxidativa.....	28
Tabela 2 Condições operacionais dos processos de pirólise.....	38
Tabela 3. Parâmetros médios de peletização para fabricação de pellets de Pinus taeda em peletizadora piloto com matriz plana.	42
Tabela 4. Delineamento experimental do processo de torrefação de pellets de Pinus em torrefador piloto de tambor.	46
Tabela 5. Temperatura ambiente no início e temperaturas médias registradas no processo de torrefação, obtidos no torrefador piloto de tambor rotativo.	48
Tabela 6. Comparativo entre o consumo e custo de gás GLP, para torrefação de pellets de Pinus em protótipo de torrefador de Tambor rotativo.....	50
Tabela 7. Análises das propriedades físicas e energéticas realizadas nos pellets de Pinus antes e após o processo de torrefação.	51
Tabela 8. Delineamento experimental do processo de torrefação de pellets de Pinus em termobalança gravimétrica.	57
Tabela 9. Número de amostras para cada propriedade analisada.....	59
Tabela 10. Variações de temperatura e perda de massa ao longo da torrefação de pellets em termobalança gravimétrica, em função da temperatura e tempo de residência.....	61
Tabela 11. Perda de massa na torrefação em torrefador piloto de tambor e em termobalança gravimétrica.	65
Tabela 12. Dimensões e, densidade unitária dos pellets de Pinus torrefados em torrefador piloto de tambor, em função do tempo e temperatura de torrefação.	67
Tabela 13. Dimensões dos pellets de Pinus antes e após torrefação em Termobalança gravimétrica, em função do tempo e temperatura de torrefação.....	68
Tabela 14. Volume e densidade da unidade dos pellets de Pinus torrefados em Termobalança gravimétrica, em função do tempo e temperatura de torrefação.	70
Tabela 15. Umidade de equilíbrio (base úmida) dos pellets torrefados em diferentes tempos e temperaturas.	72
Tabela 16. Propriedades físicas dos pellets antes e após o processo de torrefação, em torrefador piloto de tambor, em função do tempo e temperatura de torrefação. .	77
Tabela 17. Composição química imediata dos pellets antes e após o processo de torrefação, em função do tempo e temperatura de torrefação.	78

Tabela 18. Propriedades energéticas dos pellets antes e após o processo de torrefação, em função do tempo e temperatura de torrefação.	81
Tabela 19. Comportamento da degradação térmica dos pellets torrefados em torrefador piloto de tambor, em função do tempo de temperatura de torrefação.	84
Tabela 20. Comportamento da degradação térmica dos pellets torrefados em termobalança gravimétrica, em função do tempo de temperatura de torrefação.	85
Tabela 21. Comparativo entre os efeitos Físico-químicos, ocasionados pela torrefação de pellets de Pinus, em torrefador piloto de tambor e termobalança gravimétrica. ...	88

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM	American Society for Testing and Materials
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DTG	Termogravimetria derivada
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
HTC	Carbonização hidrotérmica
NBR	Normas Brasileiras
PCS	Poder Calorífico Superior
RPM	Rotações por minuto
SPV	secagem em pressão de vapor
SVS	Secagem com vapor superaquecido
TG	Termobalança gravimétrica
TGA	Análise termogravimétrica

LISTA DE SÍMBOLOS

CH ₄	Metano
cm ³	Centímetro cúbico
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
CV	Coeficiente de variação
g	Gramas
GHz	Gigahertz
h	Horas
H ₂	Hidrogênio
Hz	Hertz
Kcal/Kg	Quilocaloria por Quilograma
Kcal/m ³	Quilocaloria por Metro cúbico
min	Minutos
mm	Milímetros
°C	Grau Celsius
s	Segundos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	OBJETIVOS	22
1.1.1	Objetivo geral.....	22
1.1.2	Objetivos específicos.....	22
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1	<i>Pellet</i> DE <i>PINUS</i> X PROCESSO DE TORREFAÇÃO.....	23
2.2	TORREFAÇÃO.....	24
2.2.1	O Processo de torrefação	24
2.2.2	Métodos de torrefação	26
2.2.2.1	Torrefação à seco (Dry).....	26
2.2.2.2	Torrefação úmida (Wet).....	29
2.2.2.3	Torrefação à vapor (Steam).....	31
2.2.3	Tipos de equipamentos para torrefação.....	32
2.2.3.1	Tambor rotativo.....	33
2.2.4	Parâmetros da torrefação	35
2.2.4.1	Temperatura.....	35
2.2.4.2	Tempo de residência.....	36
2.2.4.3	Taxa de aquecimento	37
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	40
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	60
4.1	AVALIAÇÃO DA REPLICAÇÃO DA TORREFAÇÃO REALIZADA NO TORREFADOR PILOTO DE TAMBOR EM TERMOBALANÇA GRAVIMÉTRICA	60
4.2	EFEITO DA TEMPERATURA E DO TEMPO DE RESIDÊNCIA NA QUALIDADE DOS <i>PELLETS</i> TORREFADOS EM TORREFADOR PILOTO DE TAMBOR E EM TERMOBALANÇA GRAVIMÉTRICA	63
5	CONCLUSÕES	89
5.1	AVALIAÇÃO DA REPLICAÇÃO DA TORREFAÇÃO REALIZADA NO TORREFADOR PILOTO DE TAMBOR EM TERMOBALANÇA GRAVIMÉTRICA.....	89
5.2	EFEITO DA TEMPERATURA E DO TEMPO DE RESIDÊNCIA NA QUALIDADE DOS <i>PELLETS</i> TORREFADOS EM TORREFADOR PILOTO DE TAMBOR E EM TERMOBALANÇA GRAVIMÉTRICA	89

5.2.1	Quanto às dimensões e perda de massa	89
5.2.2	Quanto a adsorção de água e umidade de equilíbrio	90
5.2.3	Quanto as propriedades físicas e energéticas dos <i>pellets</i>	91
5.2.4	Quanto à degradação térmica	92
5.3	AVALIAÇÃO FINAL DO EFEITO DAS TEMPERATURAS E TEMPOS DE RESIDÊNCIA NA TORREFAÇÃO DE <i>PELLETS</i> DE MADEIRA DE <i>PINUS</i> EM TORREFADOR PILOTO DE TAMBOR	92
6	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	94
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95

1 INTRODUÇÃO

A matriz energética mundial é baseada no consumo de várias fontes de energia que acompanham o crescimento e desenvolvimento da sociedade na qual vivemos. No Brasil, segundo os dados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2022), 51,6% das fontes de energia são provenientes de energia não renovável. Ainda assim, a matriz energética brasileira é mais renovável que a mundial, que apresenta 85% do consumo de fontes não renováveis. As fontes não renováveis têm causado grandes impactos na transformação social, por várias questões. Sua utilização gera pautas e debates em fóruns internacionais.

Os estudos da biomassa para geração de energia são muito relevantes. Dados apresentados pela (EPE, 2022) com relação a geração de energia na matriz mundial, apresentam a biomassa com uma proporção de apenas 9,8%. Porém, ainda bem acima de outras fontes renováveis, o que demonstra uma tendência do mercado, na utilização da biomassa como principal diversificação para geração de energia. Este cenário anseia por pesquisas para o melhoramento da biomassa. Seu potencial comercial é bastante atrativo, além de derivar de fonte renovável.

Razões de ambientais e econômicas, levam ao que Brito (2007) apresentou em seu trabalho, destacando que a diminuição da oferta de combustíveis fósseis, que representam a maior proporção da matriz energética, leva ao aumento do preço da energia; além da insegurança ambiental. Estes, são fatores que instigam e trazem notoriedade às pesquisas de fontes alternativas, que tenham capacidade de suprir o déficit energético.

O Brasil apresenta características favoráveis para a produção de florestas plantadas. O clima, o solo, entre outros fatores incentivam o plantio e melhoria de manejo destas florestas, fator que influencia diretamente no crescimento e emprego tecnológico das empresas deste ramo. Diversos autores possuem estudos na área da biomassa, motivados pelas oportunidades de aproveitamento dos seus recursos e, diversidade, tanto o material acima do solo, como abaixo, nas suas formações de fuste, toco, galhos, cascas, sementes, raízes, lenho. Todo este material tem potencial energético (COSTA *et al.*, 2019).

No entanto, a biomassa *in natura* possui características que necessitam ser melhoradas, com propósito de se obter um combustível mais eficiente. Sua baixa densidade, alta umidade, variação granulométrica, são fatores que dificultam transporte, armazenamento e, até mesmo a combustão, viabilizando assim os tratamentos físico-químicos que melhorem estas características.

Tratar a biomassa por meio da peletização melhora suas características físicas, e ao incrementar aí o processo de torrefação, pode-se maximizar as propriedades químicas e energéticas do produto.

O processo de torrefação é uma pirólise parcial, com controle de tempo e temperatura. Seu processo agrega várias características interessantes ao produto final, o qual se torna composto em sua maioria por lignina e celulose (BERGMAN *et al.*, 2005). O produto sólido de uma biomassa torrefada com maior concentração de lignina, torna-se com maior densidade energética em comparação com de menor concentração de lignina (NHUCHHEN; BASU e ACHARYA 2014). Em temperaturas superiores a 250°C, a hemicelulose se decompõe em voláteis, pelo efeito da degradação, gerando um produto sólido com alto teor de carbono (LAM *et al.*, 2011).

A torrefação é um método simples de tratamento térmico, e é frequentemente utilizado em recursos de fontes naturais, para melhorar suas características térmicas. Este tratamento térmico, consiste em submeter os materiais lignocelulósicos a baixas temperaturas com ausência de oxigênio, resultando deste processo termoquímico a degradação de parte das hemiceluloses e permite concentração do carbono, aumentando, assim, o poder calorífico do combustível (PROTÁSIO *et al.*, 2015). Os parâmetros de tempo e temperatura são os mais importantes para o processo de torrefação, sendo o processo mais influenciado pela temperatura (SINGH *et al.*, 2019). Para se obter um material de pirólise parcial é necessário controlar a temperatura abaixo de 300°C, com tempo de residência apropriado, de forma que o material aqueça com homogeneidade, se tornando um combustível sólido. O procedimento deve ter condições suficientes para aumentar a quantidade de carbono fixo, porém, sem que se atinja o ponto de produção do carvão vegetal (BERGMAN *et al.*, 2005; ACHARYA *et al.*, 2012; KOTA *et al.*, 2022; PIERSA *et al.*, 2022).

Este método, pode ser inclusive empregado na formação de fontes de energia para pequenas escalas, sendo este sistema não mais em ambiente inerte e sim com influência de oxigênio contido no ar atmosférico, o que consiste no objeto deste trabalho.

Assim, o trabalho propõe dar continuidade à pesquisa de Araldi (2022), utilizando seu protótipo para torrefação de biomassa visando à geração de energia. Mesmo a torrefação sendo um processo simples em sua forma, controlar a temperatura, que é um dos principais parâmetros, se torna um desafio em torrefadores desenvolvidos para pequena escala, principalmente considerando o controle manual do processo.

Os resultados preliminares obtidos por Araldi (2022) indicaram que a torrefação de *pellets* no torrefador piloto de tambor tornou as dimensões dos *pellets* mais homogêneas, sendo que o aumento da temperatura de torrefação reduziu o diâmetro e densidade unitária dos *pellets*. A torrefação diminuiu a higroscopicidade dos *pellets*, com o aumento da temperatura de torrefação dos *pellets*. A torrefação não aumentou o poder calorífico dos *pellets* e reduziu a densidade energética destes, principalmente por sua influência nas dimensões dos *pellets*. A composição química imediata dos *pellets* foi alterada pela torrefação. Além disso, este tratamento térmico afetou o comportamento da degradação térmica dos *pellets*, tanto em termos de temperatura, massa remanescente em cada etapa da perda de massa e também nas temperaturas de maior velocidade de perda de massa. De forma geral, as propriedades físicas dos *pellets* e o comportamento térmico de degradação foram afetados de forma mais intensa que o potencial energético deste biocombustível.

No entanto, estes resultados apesar de já darem um indicativo da eficiência do equipamento, precisam ser confirmados por ensaios mais exaustivos, que também contribuirão para ajustar o controle e automação do equipamento. Neste contexto, a problemática de pesquisa que se coloca é: Quais são as temperaturas e tempos de residência que melhorarão a qualidade energética do *pellet* de madeira de *Pinus*, em um torrefador piloto de tambor?

Assim, com base nos resultados obtidos por Araldi (2022), novos parâmetros de tempo e temperatura serão utilizados, no intuito de responder as questões de pesquisa, as hipóteses levantadas, com base nas variáveis de controle mais importantes são que:

1 – Maior temperatura contribuirá de forma mais significativa para a melhoria da qualidade física, energética e térmica dos *pellets* de *Pinus*.

2 – Maior tempo de residência contribuirá de forma mais significativa para a melhoria da qualidade física, energética e térmica dos *pellets* de *Pinus*.

Portanto, espera-se, com a realização deste trabalho contribuir diretamente com os avanços tecnológicos na área de bioenergia. Os testes aprofundados no torrefador piloto, proporcionarão resultados que auxiliarão nos ajustes necessários do equipamento, para que futuramente, este processo seja viável em uso para pequenas escalas, impulsionando o setor econômico por meio do beneficiamento de resíduos florestais, oportunizando mais um meio de destinação desta biomassa, assim como possibilidade de diversificação da geração de energia.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Determinar os parâmetros mais adequados para torrefação de *pellets* de madeira de *Pinus*, utilizando um torrefador rotativo de tambor, de pequena escala.

1.1.2 Objetivos específicos

- Verificar o efeito do tempo de torrefação sobre a qualidade física e energética de *pellets* de madeira de *Pinus*;
- Verificar o efeito da temperatura de torrefação sobre a qualidade física e energética de *pellets* de madeira de *Pinus*.
- Comparar a eficiência de torrefação do torrefador piloto de tambor com a torrefação em termobalança gravimétrica.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PELLET DE *Pinus* X PROCESSO DE TORREFAÇÃO

Os *pellets* são originados da compactação da biomassa vegetal, por meio do emprego de pressão. Sua destinação atualmente tem bastante versatilidade comercial, disponível para vários fins, tanto para aquecimento residencial, quanto a utilização em processos industriais. Desde o início de sua utilização, seu objetivo principal é a geração de energia térmica, tanto para a geração de calor como vapor (REIS *et al.*, 2015).

Apesar do incremento na qualidade energética, os *pellets* mantêm algumas das características da biomassa que os originou, como baixo poder calorífico em relação aos combustíveis não renováveis e a alta higroscopicidade, propriedades não desejáveis para a geração de energia térmica. Uma forma de amenizar esses problemas é realizar a torrefação (LAM *et al.*, 2012).

Os *pellets* torrefados podem ser obtidos por meio de duas rotas. A primeira consiste em torrefar as partículas e produzir *pellets* e a segunda produzir *pellets* e em seguida submetê-los à torrefação (PENG *et al.*, 2015). Na torrefação pós-peletização, os *pellets* devem ter alta resistência mecânica para que suportem o processo sem se desintegrar e gerar finos, considerando que os equipamentos mantêm a biomassa em constante movimentação. Essa rota envolve menor custo do processo de produção e, dispensa o condicionamento com vapor para facilitar a peletização (GHIASI *et al.*, 2014).

Nos estudos de MAGALHÃES *et al.* (2018), a torrefação com temperaturas de 210°C, 250°C e 290°C e os tempos de 10, 20 e 30 minutos promoveu mudanças significativas nas propriedades químicas do *Pellets* de *Pinus* sp, principalmente nas temperaturas de 250°C e 290°C. O equipamento utilizado pelos autores, foi um reator do tipo parafuso (rosca sem fim). A torrefação aumentou proporcionalmente o teor de carbono em detrimento da redução de oxigênio, aumentou a estabilidade térmica e aumentou proporcionalmente o teor de lignina, pela redução das hemiceluloses. Isso melhorou a qualidade energética da biomassa e a tornou um combustível mais competitivo quando comparado aos combustíveis fósseis.

PROTÁSIO *et al.* (2015), também observaram que a torrefação de *pellets* de *Pinus* a 220°C e 250°C, em um forno mufla, aumentou o poder calorífico superior e reduziu o teor de umidade dos compactados torrefados. Contudo, o ganho em valor calórico foi inferior à perda de massa dos *pellets* após a torrefação, reduzindo assim a densidade energética dos *pellets*. Além disso, os autores enfatizaram a necessidade de novas pesquisas sobre torrefação de *pellets* com *Pinus sp.* e demais biomassas lignocelulósicas em faixas mais amplas de temperatura e tempo de residência, visando determinar parâmetros que otimizem a densidade energética dos biocombustíveis sólidos granulados.

PENG *et al.* (2015), da mesma forma, enfatizaram que há informações limitadas de pesquisas sistemáticas relatadas na literatura sobre o desempenho de *pellets* torrefados preparados seguindo o caminho: compactação seguida da torrefação. Tendo em vista que, a torrefação de *pellets*, apresenta baixa perda de peso de (20 a 30%) no processo de torrefação, em comparação com mais de 60% de perda de peso no processo de carbonização para produção de biocarvão.

2.2 TORREFAÇÃO

2.2.1 O Processo de torrefação

A torrefação é um processo de tratamento térmico, também conhecida por pirólise lenta e parcial, pois opera entre a faixa de temperatura de 200°C a 300°C, de tal modo que não carbonize totalmente a biomassa. Esta faixa de temperatura trata parcialmente o material, não havendo decomposição total do produto torreficado. Este processo de conversão térmica é muito utilizado na indústria de grãos, principalmente café, assim como bioenergia (SILVA, 2013; REIS *et al.*, 2017; ÁLVAREZ *et al.*, 2018; KOTA *et al.*, 2022).

O emprego desta técnica na biomassa, busca principalmente que ocorra a degradação das hemiceluloses, responsáveis, em grande parte, pela adsorção de água pela biomassa, sendo efetuado o processo de torrefação em atmosfera inerte, com ausência de oxigênio (PRINS *et al.*, 2006).

Pelo processo de torrefação, segundo Prins *et al.* (2006), a utilização do tratamento térmico na biomassa resulta em aumento da densidade energética e diminuição da umidade. A estrutura da biomassa durante o processo de torrefação, sofre uma mudança física, química e energética, caracterizando um material mais hidrofóbico e quebradiço (PIERSA *et al.*, 2022).

O processo de torrefação é simples, mas ainda possui alguns desafios. O processo é efetuado em atmosfera inerte ou com controle de oxigênio, e os fatores que influenciam na operação do sistema são a temperatura, tempo de residência e taxa de aquecimento. O processo em ambientes controlados, facilita a obtenção de um material homogêneo com boas características (CARNEIRO-JUNIOR, 2022).

O resultado de uma boa torrefação é a obtenção de um material intermediário entre a biomassa e o carvão, com baixa umidade, pequenas frações de compostos com baixo poder calorífico, e com a obtenção de alto rendimento energético (LUENGO *et al.*, 2006).

A torrefação visa a melhoria da qualidade do combustível de biomassa, para torna-lo mais adequado ao processo de conversão termoquímico em relação a biomassa bruta. Segundo Kota *et al.* (2022), as reações que ocorrem durante a torrefação para obter estas características, são: secagem, desvolatilização, desoxigenação, despolimerização e carbonização.

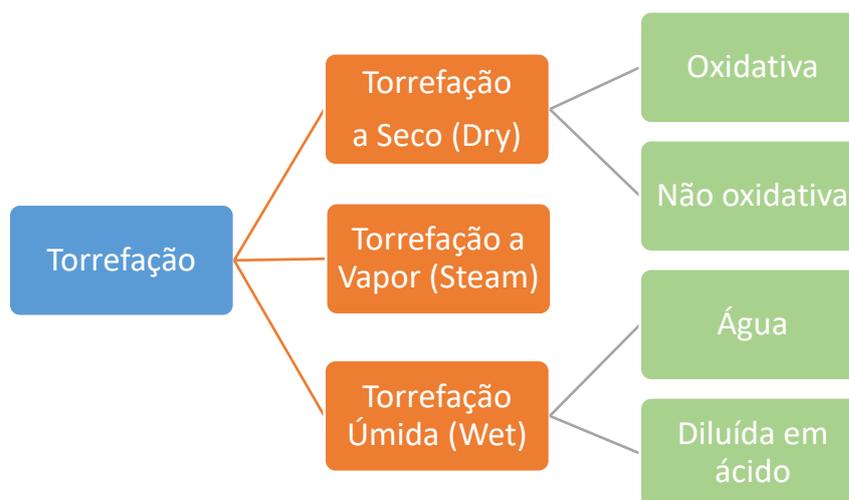
Nas reações de carbonização, a taxa de aquecimento geralmente é mantida baixa, mas a biomassa é aquecida a temperatura mais altas. Este ajuste busca através da torrefação, promover na biomassa uma alta densidade energética, sem que chegue esta biomassa em estado de carvão (DHUNGANA; BASU e DUTTA, 2012). O produto final rico em carbono, busca eliminar os inconvenientes do material bruto, principalmente, umidade elevada, poder calorífico deficiente à demais fontes de combustíveis e concentração de voláteis. A biomassa torrefada tem a possibilidade de ser utilizada em briquetagem, peletização, gaseificação e plantas de co-combustão para geração de energia térmica (BRIDGEMAN *et al.*, 2010).

2.2.2 Métodos de torrefação

Pesquisadores de todo o mundo, estão explorando o processo de torrefação em várias condições operacionais e configurações de reatores, para melhorar sua viabilidade prática, estimulados pelo futuro próspero da biomassa, através dos avanços tecnológicos empregados neste sistema de pré-tratamento (KOTA *et al.*, 2022).

Basicamente, a torrefação é classificada em três métodos aplicados, torrefação seca, torrefação úmida e torrefação a vapor, sendo a torrefação seca, ainda classificada por oxidativa e não oxidativa, e a torrefação úmida com água ou ácidos diluídos (CHEN *et al.*, 2021; CARNEIRO-JUNIOR, 2022). O fluxograma da Figura 1, mostra a classificação e tipos de torrefação.

Figura 1. Classificação e tipos de torrefação.



Fonte: Adaptado de: CHEN *et al.* (2021)

2.2.2.1 Torrefação à seco (Dry).

O conceito de torrefação a seco (DT) veio do processo de produção de café, atribuindo algumas melhorias para a moagem do grão de café. Por isso, o processo de torrefação é conhecido como secagem em alta temperatura (não tão utilizado) e, principalmente por pirólise leve (BACH e SKREIBERG, 2016). Para este tipo de

torrefação, a operação é executada na faixa de temperatura de 200°C a 300°C, por um tempo de residência de 30 a 60 minutos, podendo este processo, estar em condições operacionais com controle de oxigênio ou atmosfera inerte. Geralmente, o gás nitrogênio é usado como gás de arraste para fornecer uma atmosfera inerte, assim como o gás hélio e argônio. No entanto, a utilização do dióxido de carbono tem sido uma alternativa neste tipo de torrefação, principalmente pelo seu custo comparado ao nitrogênio e respeito ao meio ambiente.

Em alguns estudos, têm-se testado a interação do oxigênio e o ar atmosférico como gás de arraste. Quando o oxigênio está presente no processo de torrefação, a taxa de resposta de aquecimento é mais rápida, através do processo exotérmico durante a degradação térmica da biomassa (MUSHTAQ; MAT e ANI, 2014; YANG *et al.*, 2017; LOKMIT *et al.*, 2023).

Ao utilizar gás de arraste, percebe-se que não há necessidade de remover o nitrogênio, fator que minimiza os custos operacionais simplificando o sistema (PIERSA *et al.*, 2022). As qualidades de combustível da biomassa, torrefadas por um gás de varredura com baixas concentrações de oxigênio, são semelhantes às da biomassa torrefadas com nitrogênio. A torrefação oxidativa tem uma maior taxa de reação, devido a presença de oxigênio, e as reações exotérmicas que ocorrem durante a degradação térmica da biomassa (CHEN *et al.*, 2013).

As pesquisas de (DT) expandem-se, visando entender o comportamento da torrefação com a utilização de gases mais baratos (gases de combustão) e, gases com alguma concentração de oxigênio, ao mesmo tempo, buscando neste processo a torrefação mais rápida. Esta ação é atingida quando há oxigênio presente no processo, seja pelo ar atmosférico, gás de arraste ou incorporado a mistura de gás de combustão (BACH e SKREIBERG, 2016). A (Tabela 1) apresenta um comparativo sobre os principais aspectos da torrefação oxidativa e não oxidativa. No entanto, é importante ressaltar que a torrefação oxidativa, obtém menor rendimento de sólidos em comparação com a torrefação não oxidativa.

O gasto energético para conversão de biomassa bruta para torrefada também é de análise relevante. Ao se trabalhar com biomassa <10% de umidade, o consumo de energia se torna favorável ao processo, fato totalmente oposto quando se trabalha com biomassas em percentuais mais altos de umidade, situação, qual o consumo de energia para conversão é muito elevado, por este motivo se aplica o sistema oxidativo para acelerar o processo (KUO; WU e CHEN, 2014; BACH e SKREIBERG, 2016).

Tabela 1. Comparação da torrefação não oxidativa e torrefação oxidativa.

Torrefação Não Oxidante	Torrefação Oxidante
Vantagens	
<ul style="list-style-type: none"> • Alto rendimento de sólidos e energéticos • Fácil controle de temperatura 	<ul style="list-style-type: none"> • Menor custo de operação • Menor fornecimento de calor • Taxa de reação mais rápida
Desvantagens	
<ul style="list-style-type: none"> • Maior necessidade de calor • Taxa de reação mais baixa • N₂ deve ser separado do ar 	<ul style="list-style-type: none"> • Menor rendimento de sólidos e energético* • Mais difícil no controle de temperatura

*Quando considerada a torrefação em temperaturas mais elevadas.

Fonte: CHEN *et al.* (2021)

Chen *et al.* (2021), observaram o decréscimo do poder calorífico da biomassa torrefada sob uma temperatura de 300°C, com aumento da concentração de oxigênio durante a torrefação.

Conforme aumenta a temperatura durante o processo de torrefação, ocorrem diferentes estágios de perda de massa. A massa inicial é perdida após 100°C, devido a vaporização da umidade presente na biomassa. Com o aumento da temperatura ocorre a carbonização e desvolatilização da hemicelulose, quando a temperatura atinge acima de 200°C (PELAEZ-SAMANIEGO *et al.*, 2013). Os estudos de Wen *et al.* (2014), consideraram que a temperatura de desvolatilização das hemiceluloses está na faixa de 200 a 235°C. Nestas temperaturas, o processo também é conhecido por torrefação leve. Por outro lado, a torrefação realizada com temperaturas superiores, na faixa de 275 à 300°C é chamada de torrefação severa. Neste processo ocorre uma reação química de despolimerização da celulose, hemiceluloses e lignina (HILL; GRIGSBY e HALL, 2013).

A degradação das hemiceluloses aumenta o poder calorífico do produto torrefado. Em contrapartida, o produto também se torna mais quebradiço, em comparação da biomassa bruta, efeito dado pela carbonização da celulose (JOSHI *et*

al., 2015). Outro resultado da degradação da hemicelulose durante o processo, faz com que a natureza da biomassa se torne de hidrofílica para hidrofóbica (BERGMAN *et al.*, 2005).

A torrefação à seco é a tecnologia mais aplicada em escala comercial (RIBEIRO *et al.*, 2018). A maioria dos sistemas de torrefação, se baseiam no conceito de aplicação dos reatores já existentes, destinados à outras finalidades principalmente de secagem (KIEL, 2011), necessitando apenas ajustes técnicos conceituais, melhorando o sistema para aplicação direta na torrefação da biomassa.

No sistema oxidativo, é utilizado gás de combustão nos queimadores, sendo viável o reuso dos gases gerados pela torrefação, por retroalimentação nos queimadores, os gases gerados neste processo são em sua maioria: hidrogênio (H₂), dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO) e hidrocarbonetos como metano (CH₄) (BERGMAN *et al.*, 2005); sendo uma forma viável de economizar o gás de alimentação, melhorando o processo economicamente.

2.2.2.2 Torrefação úmida (Wet).

A torrefação úmida pode ser realizada em água subcrítica, em temperaturas que variam de 180°C a 260°C, produzindo três produtos principais: gás, produtos químicos aquosos e combustível sólido (PIERSA *et al.*, 2022).

O processo de torrefação úmida, também é conhecido como carbonização hidrotérmica (HTC), ou simplesmente torrefação hidrotérmica. O processo segue por uma conversão termoquímica na biomassa, podendo alcançar 250Mpa de pressão (BACH *et al.*, 2013). Uma característica interessante, é que, o tempo de residência pode variar extremamente, variando de minutos para dias. Os dados mais precisos são encontrados de 1 a 72 horas de torrefação (KHAN *et al.*, 2019).

A água subcrítica na forma líquida contém boas características, que são consideradas melhores se comparadas ao vapor (KHAN *et al.*, 2019). A água subcrítica é encontrada abaixo do ponto da sua temperatura crítica de 374°C com pressão de 22,1 Mpa (CARNEIRO-JUNIOR, 2022).

A torrefação úmida é considerada não tóxica, que é um fator bem significativo influenciando para os avanços das pesquisas deste processo, além de apresentar

custos mais baixos se comparados ao processo à seco, por possuir uma estrutura mais simples (ACHARYA e DUTTA, 2016). A não toxicidade do processo se observa pela simplicidade dos materiais envolvidos, o sistema é abastecido com água, biomassa e um gás inerte, sendo necessária a utilização de água destilada. Porém, é necessário ter atenção com o resultante na saída, qual a resultante nesta situação é a água composta por traços de compostos alcalinos, o que é considerado um passivo ambiental, caso o descarte for inadequado. Durante a reação, a temperatura e pressão são controladas, operando ambas em estabilidade. A saída do processo é composta por um produto sólido torrefeito, composto por água, ácidos voláteis, açúcar e gases, principalmente na forma de CO₂ (LUCIAN e FIORI, 2017).

Segundo Carneiro-Junior (2022), este processo é especialmente mais útil para biomassas contendo elevada umidade, normalmente acima de 50% (em base úmida), já que as amostras são misturadas com água antes da reação de hidrotratamento. O ideal é que a biomassa seja misturada com água suficiente, para submergir totalmente a biomassa sólida, em que a proporção seja aproximadamente, biomassa seca/água de 1:6 (ACHARYA *et al.*, 2015). Sendo assim, já que a biomassa neste caso é misturada com água, não se faz necessário a pré-secagem do material.

A grande vantagem deste processo é a utilização de biomassa úmida e extremamente úmida, situação não possível no processo à seco, sendo que uma das problemáticas da biomassa é a umidade. Outro aspecto interessante, é que as temperaturas não precisam ser tão elevadas, inclusive o tempo de residência mais curto, comparando com o processo à seco, tendo o mesmo rendimento em volume, com melhor rendimento energético, maior poder calorífico superior (PCS) e melhor hidrofobia (CARNEIRO-JUNIOR, 2022). No entanto, algumas dificuldades na engenharia desta tecnologia precisam ser resolvidas para se obter um processo comercialmente aceitável (LUCIAN e FIORI, 2017).

O sistema de torrefação úmida é promissor, embora ainda existam desafios no sistema quanto ao pré-tratamento à base de líquidos iônicos, como o custo para produzi-lo em escala elevada, e a necessidade de reciclá-los em um processo produtivo (MORA-PALE *et al.*, 2011). Porém, em nível de eficiência, o sistema HTC tem desempenhando melhores resultados se comparado as demais torrefações, os resultados obtidos em alguns trabalhos provam a eficiência deste meio de tratamento térmico (MARTINEZ *et al.*, 2021; ERCAN; ALPER e UCAR 2023) Avaliando do ponto de vista econômico, a produção de líquidos iônicos, indicam que pelo menos alguns

líquidos iônicos podem ser competitivos em comparação com solventes orgânicos convencionais, deixando de ser um impedimento do seu uso, para tratamento de materiais lignocelulósicos (GEORGE, *et al.*, 2015).

2.2.2.3 Torrefação à vapor (Steam).

O processo de torrefação à vapor, opera em altas temperaturas e altas pressões, necessários para torrefar a biomassa (BRACHI *et al.*, 2018). A utilização da torrefação à vapor, vem sendo estudada com grande ênfase, por se tratar de uma alternativa altamente tecnológica e com grandes vantagens operacionais, superiores quando comparadas aos demais processos de torrefação (CARNEIRO-JUNIOR, 2022).

A torrefação à vapor ocorre pelo mecanismo de explosão do vapor na presença de vapor saturado, esta explosão ocorre pela saída rápida de vapor do sistema. Neste sistema é introduzido vapor de alta temperatura e alta pressão em uma câmara vedada, a matéria prima da câmara é o material lignocelulósico, operado na faixa de temperatura de 200°C a 260°C, em tempo de residência de 5 a 10 minutos (KUDO *et al.*, 2019). A pressão no sistema é liberada rapidamente, ocasionando separação do material lignocelulósico, separando as fibras e um pouco da matéria prima total, sem causar grandes perdas (MABEE *et al.*, 2006). Durante a explosão do vapor, os voláteis de baixo peso molecular são removidos, aumentando o poder calorífico e teor de carbono, diminuindo o tamanho médio das partículas, a densidade aparente e umidade de equilíbrio (LAM *et al.*, 2011).

Utilizando o processo de torrefação à vapor, é possível atingir algumas vantagens, como aumento do poder calorífico, hidrofobicidade e teor de carbono em baixas temperaturas, com redução do tempo de residência, em comparação a torrefação à seco (LAM *et al.*, 2011). A elasticidade e resistência mecânica dos *pellets* tratados também é constatado. Outra vantagem do processo, é que não há necessidade de utilização de gases de combustão ou nitrogênio.

2.2.3 Tipos de equipamentos para torrefação

Buscando a melhoria das características da biomassa, muitas tecnologias se desenvolveram ao longo do tempo para este fim, plantas piloto e industriais com diferentes conceitos. Alguns projetos adaptados de outros setores principalmente de grãos, e outros exclusivos voltados diretamente à biomassa. Serão aqui apresentados alguns aspectos conceituais de modelos testados e empregados em escala industrial, como forma de apresentar as diferentes tecnologias que estão operando no segmento da torrefação de biomassa (KOTA *et al.*, 2022).

Os reatores possuem características operacionais distintas com prós e contras, conforme a tecnologia empregada na construção, definindo o grau de operacionalidade por alguns fatores, como: facilidade de operar, estabilizar parâmetros de controle, manejo do fluxo de material de entrada e saída, custo e dificuldade construtiva (PIERSA *et al.*, 2022).

Comercialmente as tecnologias voltadas ao mercado, diferenciam-se por seus reatores, em alguns trabalhos tratados como câmaras, agrupados basicamente pela forma como misturam a matéria prima e o mecanismo de troca de calor. A Figura 2 apresenta as tecnologias empregadas à torrefação de biomassa, classificados por grupos, baseados em como ocorre a transferência de calor.

Figura 2. Tipos de reatores de torrefação.



Fonte: Adaptado de: DHUNGANA; BASU e DUTTA (2012)

O sistema de aquecimento pode ser direto ou indireto. No aquecimento direto, a energia é transferida por meio de aquecimento em contato direto com a matéria prima. No aquecimento indireto, a aplicação de aquecimento de modo indireto separa

o meio de aquecimento da biomassa por uma barreira condutiva, como paredes de metal (KIZUKA *et al.*, 2019). Outro meio de aquecimento da biomassa é por micro-ondas a uma frequência de 2,4 GHz. Esta frequência força as moléculas de biomassa a oscilarem na frequência ressonante e induz atrito e aquecimento (NATARAJAN, *et al.*, 2018).

2.2.3.1 Tambor rotativo

O sistema por tambor rotativo possui baixa complexidade de construção e operação, assim como a transposição de escala, sendo possível sua utilização em variadas escalas com a finalidade de torrefar diversificados produtos (CARNEIRO-JUNIOR, 2022).

Este sistema, utiliza um tambor como meio de dissipar o calor para torrefação, comumente sob o efeito de uma atmosfera inerte. A tecnologia é amplamente utilizada em uma variedade de configurações de plantas (PIERSA *et al.*, 2022).

A torrefação por tambor rotativo utiliza um reator em formato cilíndrico, esta tecnologia permite que a operação seja contínua pelo tempo pré-determinado de operação, sendo fornecido de forma direta ou indireta o calor necessário para a torrefação. O processo mais utilizado é a aplicação do calor de forma direta ao reator. O reator absorve o calor e repassa ao material que está sendo torrefado, somando-se com os gases quentes que passam através do reator. No processo de aquecimento direto, a biomassa é colocada em contato direto com um condutor de calor gasoso, podendo ser gases de combustão, gases recirculados ou vapor superaquecido. Aqui o aquecimento é principalmente por convecção, tendo como característica o aquecimento rápido e uniforme. O tamanho do tambor é um fator limitante operacional ao quantitativo de material que será torrefado, pois a área de transferência de calor é limitada (DHUNGANA; BASU e DUTTA, 2012; PIERSA *et al.*, 2022).

A rotação do processo pode ser ajustada por meio de controle de velocidade. Em alguns modelos pode ser realizado a inclinação na direção do eixo longitudinal do reator, conforme a necessidade de direcionamento do material dentro do tambor. Uma grande vantagem desta tecnologia é a uniformidade no aquecimento dos *pellets* durante o processo de torrefação (CARNEIRO-JUNIOR, 2022).

Com relação à inovação tecnológica, os reatores por tambor rotativo são caracterizados por um nível médio de inovação. Esta característica se origina pelo fato desta técnica ser empregada em diversos setores industriais ao longo do tempo, considerado assim, um sistema já bem conhecido. Os esforços do emprego tecnológico estão mais voltados aos outros processos de torrefação, atrelados aos estudos de transferência de calor, este sistema de transferência é considerado descomplicado aos reatores por tambor rotativo. Em comparação com outros processos, o método de mistura e transferência de calor são bastante básicos (DHUNGANA; BASU e DUTTA, 2012; PIERSA *et al.*, 2022).

Por sua simplicidade, é possível lidar com uma ampla gama de tamanhos e tipos de biomassa. Quando o reator é aquecido de forma indireta, o calor é trocado entre a fonte de calor e a biomassa através de uma superfície quente. Por este sistema, o tambor rotativo por aquecimento indireto executa uma degradação térmica de baixa intensidade, consecutivamente, gerando bastante gases pela queima dos voláteis. De forma positiva, o sistema possibilita a recuperação dos gases gerados pela queima dos voláteis pelo sistema de retro-alimentação, tornando o reator termicamente autossuficiente. Por outro lado, o aquecimento pode não ser uniforme na matéria prima (DHUNGANA; BASU e DUTTA, 2012).

Kota *et al.* (2022), indicam que reatores do tipo tambor rotativo, são mais adequados para secagem de biomassa com transferência uniforme de calor e mistura limitada de biomassa. Contando com a vantagem da flexibilidade de alimentação da biomassa em qualquer tamanho possível. Citam como desvantagem, as limitações no controle de temperatura e baixas taxas de transferência de calor.

O reator de tambor rotativo, tem uma boa vantagem na atribuição de mistura da biomassa. Contando com auxílio de aletas para misturar o material ao realizar a rotação do tambor, consegue-se homogeneidade no processo de torrefação. Porém, o atrito entre a biomassa e a parede do reator leva a formação de poeira e finos (KOTA *et al.*, 2022).

2.2.4 Parâmetros da torrefação

2.2.4.1 Temperatura.

Entre todas as variáveis do processo de torrefação, a temperatura é o parâmetro mais significativo, pois afeta predominantemente a taxa de reação, contribuindo diretamente ao rendimento final da biomassa torrefada. A biomassa processada em torrefador, apresenta uniformidade em suas propriedades em comparação a biomassa crua, e o aumento da temperatura favorece esta característica (THENGANE *et al.*, 2022). A capacidade de retenção de umidade da biomassa, diminui com a introdução da temperatura de torrefação, inclusive quanto maior a temperatura de torrefação, maior o calor de combustão do gás volátil residual, liberado durante este processo (ACHARYA *et al.*, 2012).

Tanto a temperatura quanto o tempo de residência no processo de torrefação, devem ser controlados com precisão, para garantir maior eficiência energética do processo de conversão de biomassa. Com base na temperatura, os processos convencionais de torrefação de biomassa podem ser classificados em três grupos: torrefação suave (200°C – 235°C), torrefação moderada (235°C – 275°C) e torrefação severa (275°C – 300°C) (CHEN e KUO, 2010; CARNEIRO-JUNIOR, 2022; KOTA *et al.*, 2022).

No processo de torrefação suave, a umidade e os voláteis leves são liberados. Avaliando os componentes da biomassa, as hemiceluloses são os mais ativos em relação a celulose e lignina. Assim, as hemiceluloses são degradadas termicamente até certo ponto durante a torrefação suave, enquanto a celulose e a lignina são apenas levemente ou pouco afetadas (YANG *et al.*, 2006; CARNEIRO-JUNIOR, 2022).

Em torrefação severa, as hemiceluloses são quase esgotadas durante o processo e a celulose degradada termicamente em grande quantidade (YANG *et al.*, 2006). Devido a remoção substancial de hemiceluloses e celulose da biomassa neste processo de torrefação, o peso e o rendimento energético da biomassa geralmente diminuem, embora a densidade energética do combustível seja aumentada. Assim, à medida que a temperatura aumenta o percentual do teor de cinzas e o percentual do

carbono fixo também aumentam, ocorrendo o esperado fenômeno de torrefação (CARNEIRO-JUNIOR, 2022).

Durante a torrefação a maioria dos voláteis são retidos, diferente do processo que ocorre com o carvão. Por isto, recomenda-se que a elevada degradação térmica seja evitada durante a torrefação. A temperatura de torrefação tem uma influência significativa na análise imediata da biomassa, especialmente nos teores de material volátil e carbono fixo, enquanto o tempo de torrefação tem menor impacto nas composições com relação à temperatura (CARNEIRO-JUNIOR, 2022).

Os estudos apresentados por Piersa *et al.* (2022) concluem, que não há uma escolha óbvia de reator de torrefação, por conta da amplitude que as tecnologias oferecem e ao mesmo tempo estão em desenvolvimento. No quesito temperatura, os reatores que apresentam melhor controle de temperatura são: Tambor rotativo e leito móvel.

2.2.4.2 Tempo de residência.

O tempo de residência nos torrefadores é, geralmente, definido como o tempo gasto para executar o tratamento térmico na matéria-prima sólida, em temperatura entre 200°C a 300°C, e normalmente este processo varia entre 10 e 60 minutos em média (THENGANE *et al.*, 2022). Comparado à combustão, gaseificação e pirólise convencional, o tempo de residência de torrefação é quase uma ordem de grandeza maior para se chegar à formação de carvão, relacionando tempo x temperatura de carbonização (DI BLASI, 2009).

O tempo de residência, varia também sobre a influência do modelo de reator utilizado para torrefação, cada tecnologia possui sua particularidade, como aspectos de capacidade de carga, meio de abastecimento, leito seco ou fluidizado. O meio de acionamento que movimenta a biomassa, também tem influência no tempo de torrefação. Para um reator tipo rosca sem fim, o que influencia é a rotação da rosca, enquanto para um reator de correia transportadora, o controle é pela velocidade da correia, no tambor rotativo a influência é pela rotação do tambor em RPM, transferida por correia ou corrente (NHUCHHEN; BASU e ACHARYA 2014; THENGANE *et al.*, 2022).

Para qualquer reator de torrefação, o tempo de residência deve ser o suficiente para permitir que todas as reações ocorram, incluindo a transição entre os regimes de decomposição de componentes lignocelulósicos (ACHARYA *et al.*, 2012).

A densidade energética do combustível sólido é significativamente influenciada pelo tempo de residência, quanto maior o tempo de torrefação, maior é a degradação térmica do material, tendo correlação direta com a densidade energética (MEDIC *et al.*, 2012). Neste sentido, é importante avaliar que, o maior tempo de residência ocasiona o maior gasto energético da torrefação (CARNEIRO-JUNIOR, 2022).

Os estudos realizados por THENGANE *et al.*, (2022) chegam ao resultado, que o efeito da temperatura é mais significativo nos rendimentos de massa e energia, em comparação ao tempo de residência. Embora a pesquisa tenha examinado o tempo de residência e a temperatura como variáveis independentes, eles são interdependentes na operação prática de reatores. Outra questão que deve ser considerada, que para torrefação em ambiente oxidativo, a mudança no tempo de residência teria impacto relativamente maior na temperatura do reator do que em ambiente inerte.

2.2.4.3 Taxa de aquecimento

Uma das principais diferenças entre pirólise total e a pirólise parcial é que, neste último processo, a taxa de aquecimento da biomassa é preferencialmente mantida baixa durante o aquecimento, principalmente no aquecimento inicial até atingir a temperatura desejada. Uma vez atingida a temperatura de torrefação, é possível controlar se necessário, a ação do aquecimento obtido das reações exotérmicas e endotérmicas, somadas a possíveis perdas de calor do reator. Este processo se faz necessário, para manter a temperatura da biomassa constante no reator de torrefação, fornecendo apenas o calor necessário para o tratamento térmico do material (DHUNGANA; BASU e DUTTA, 2012).

A busca por um rendimento energético alto, efeito contrário quando em carbonização, intensifica a necessidade de um aquecimento lento. Para este resultado é importante que a torrefação seja lenta em baixa temperatura. Este efeito só é possível ao utilizar uma taxa de aquecimento baixa (DHUNGANA; BASU e DUTTA,

2012). Quase toda a literatura afirma a necessidade de baixa taxa de aquecimento para torrefação.

O tamanho das partículas de biomassa tem influência na taxa de aquecimento, assim como o tipo de biomassa que será torrefada. Se a taxa de aquecimento for aumentada, então o tempo total de residência da biomassa em um reator pode ser reduzido, considerando que as partículas sejam finas esta taxa deve ser ajustada, assim como os demais parâmetros (DHUNGANA; BASU e DUTTA, 2012; MAMVURA e DANHA, 2020; PIERSA *et al.*, 2022).

Bergman *et al.* (2005), sugeriram que a taxa de aquecimento seja limitada a 50°C/min. Mamvura e Danha (2020), reforçam esta sugestão. No entanto, o efeito da taxa de aquecimento ainda não é muito claro nas pesquisas até o momento, necessitando uma intensificação nas contribuições que este parâmetro efetivamente pode colaborar e/ou interferir (DHUNGANA; BASU e DUTTA, 2012). Acharya *et al.* (2015), comparando as configurações operacionais das tecnologias existentes, mencionam que uma das características dos reatores, é trabalharem com altas taxas de aquecimento, porém as temperaturas utilizadas não são apresentadas. Kota *et al.* (2022), apresentam uma revisão de literatura experimental sobre torrefação em diferentes reatores e amostras de biomassa, sendo que o parâmetro de taxa de aquecimento variou de 3°C a 30°C, ressaltando que nem todos os estudos evidenciaram este parâmetro. A taxa de aquecimento ainda pode auxiliar a classificar os tipos de pirólise (Tabela 2), denominadas por pirólise lenta, rápida, flash e micro-ondas (BATISTA e GOMES, 2021; PIERSA *et al.*, 2022).

Tabela 2 Condições operacionais dos processos de pirólise.

Pirólise	Condições de Funcionamento	Fonte
Pirólise Lenta	Temperatura 300°C a 700°C Tempo de residência 10 a 100 minutos Taxa de aquecimento 0,1 a 1°C/s Tamanho da matéria prima 5 a 50 mm	PIERSA <i>et al.</i> , (2022)
Pirólise Rápida	Temperatura 400°C a 800°C Tempo de residência 0,5 a 5 segundos Taxa de aquecimento 10 a 200°C/s Tamanho da matéria prima < 3 mm	PIERSA <i>et al.</i> , (2022)
Pirólise Flash	Temperatura 800°C a 1000°C	PIERSA <i>et al.</i> , (2022)

		Tempo de residência < 0,5 segundos	
		Taxa de aquecimento > 1000°C/s	
		Tamanho da matéria prima < 0,2 mm	
Pirólise	Micro-	Potência: 150 a 450w	WANG <i>et al.</i> , (2012)
ondas		Tempo de residência < 30 minutos; ajustado pela potência micro-ondas	PIERSA <i>et al.</i> , (2022)
		Taxa de aquecimento > 50°C/min	

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

O objetivo do processo termoquímico na biomassa, é executar um tratamento térmico com controle principalmente da queima de resíduos a céu aberto, o que leva à poluição do ar. Possibilitando, ao beneficiar os resíduos agroflorestais, eliminar um passivo ambiental e ao mesmo tempo, uma forma de geração de renda, através dos combustíveis sólidos (PIERSA *et al.*, 2022).

3 MATERIAL E MÉTODOS

Para os ensaios de torrefação, os *pellets* foram produzidos em peletizadora piloto de laboratório. Para a peletização foi utilizada maravalha de *Pinus taeda* oriundos de tábuas aplainadas. As tábuas vieram de toras aleatoriamente escolhidas no pátio de uma serraria em Capão Alto, Santa Catarina, Brasil, sendo que uma empresa terceirizada forneceu as toras de idade aproximada de 35 anos, cujas florestas plantadas estavam localizadas em Campo Belo do Sul, Santa Catarina, Brasil.

Para realizar as torrefações no torrefador piloto de pequena escala, foram utilizados *pellets de Pinus* de 6 mm de diâmetro. Os *pellets* foram peneirados em peneira de abertura de 3,35mm, para a separação dos finos.

Testes preliminares de peletização indicaram que o teor de umidade da maravalha estava muito baixo, dificultando o processo de compactação. Assim, a maravalha proveniente das tábuas foi previamente deixada sobre uma lona plástica de aproximadamente 6m x 1m de comprimento e largura. Para a homogeneização do teor de umidade a biomassa foi aspergida com água, revolvida e deixada por 48 horas sobre a lona, até que toda a biomassa estivesse com umidade em torno de 11% a 12% na base úmida. A Figura 3 mostra a disposição do material pós preparação.

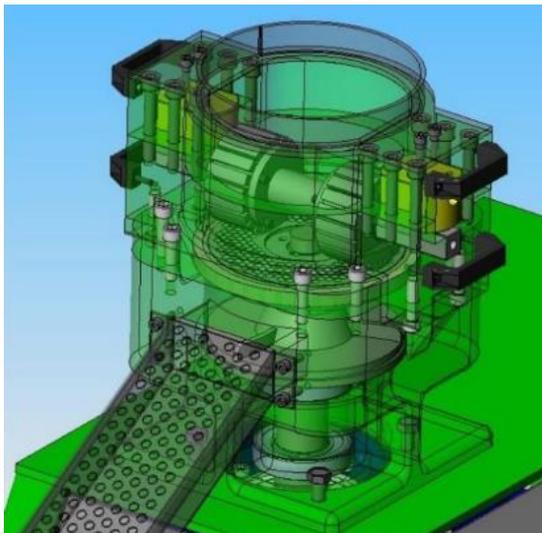
Figura 3. Maravalha de *Pinus taeda* preparada para a produção dos *pellets*.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

A peletização foi realizada em uma peletizadora piloto de laboratório (Figura 4), de matriz plana, capacidade de 400 Kg/hora, este equipamento possui a flexibilidade de utilizar diferentes matrizes de variados diâmetros, até o diâmetro máximo de 30 mm. Para este trabalho foi escolhido o diâmetro dos *pellets* de 6 mm.

Figura 4. Matriz plana da peletizadora piloto laboratorial.



Fonte: Brand *et al.* (2018)

O processo de peletização ocorreu no Laboratório de Biomassa da Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, Santa Catarina, Brasil. O teste de peletização iniciou-se após o aquecimento da matriz da peletizadora a 68°C.

O aquecimento na matriz ocorre pelo atrito originado da pressão exercida pelos rolos de compactação na maravalha, para que a maravalha passe pela matriz de peletização originando os *pellets*. Os dados dos parâmetros (Tabela 2), foram anotados a cada 15 minutos durante o tempo total de peletização, que variou entre 90 e 180 minutos. Esta variação foi decorrente de algumas manutenções necessárias durante o processo.

Com base nas leituras realizadas durante a peletização foram obtidos os valores médios dos parâmetros (Tabela 3), assim, como foram executados ajustes no processo e equipamento para obtenção da qualidade visivelmente adequada dos *pellets* de *Pinus taeda*.

Tabela 3. Parâmetros médios de peletização para fabricação de *pellets* de *Pinus taeda* em peletizadora piloto com matriz plana.

Tratamento	Teor de umidade da maravalha*	TM (°C)	TS (°C)	Pressão nos rolos de compactação (Bar)	P (Watt)	MP (RPM)	VA (RPM)
P 1	11%	80	65	177	5566	766	675

Legenda: TM: Temperatura média da matriz; TS: Temperatura média da saída dos *pellets*; P: Potência média do motor principal; MP: Rotação média da matriz; VA: Velocidade média da esteira de alimentação.

*Teor de umidade na base seca.

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Após finalizado o processo de fabricação, os *pellets* foram acondicionados dentro de sacos plásticos fechados e armazenados dentro de câmara climatizada, com umidade relativa de 65% a temperatura de 22°C para resfriamento e estabilização do teor de umidade. Após 7 dias de climatização, foi separado o material para os tratamentos de torrefação, para iniciar o processo e realizar as análises dos *pellets in natura* (tratamento testemunha).

O processo de torrefação foi realizado no torrefador piloto confeccionado por Araldi (2022). As Figuras 5 e 6 apresentam o protótipo para torrefação de biomassa.

Figura 5. Protótipo de torrefação montado e em teste.



Fonte: Araldi (2022)

Figura 6. Protótipo de torrefação, resumo do princípio operacional.



Fonte: Elaborado pelo Autor e Araldi (2023)

As especificações técnicas do equipamento são:

- Sistema de funcionamento por batelada;
- Câmara de torrefação por tamboreamento;
- Capacidade de carregamento de 3Kg para cavacos e de até 10 kg para *pellets*;
- Acionamento da câmara de torrefação com motor elétrico de 1CV e redutor 40:1;
- Queimador a gás GLP;

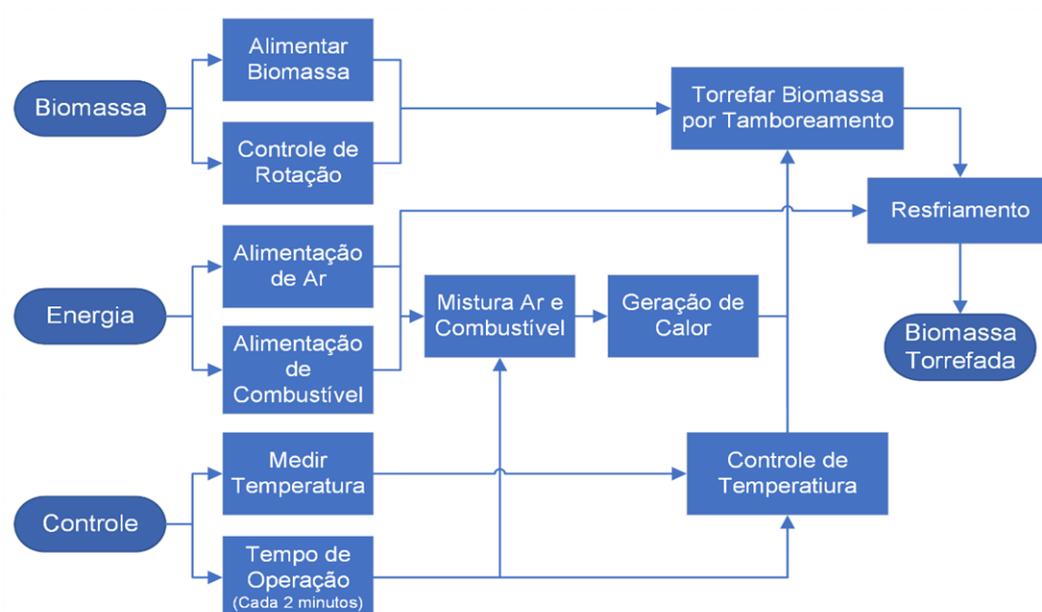
- Válvula de regulação manual de gás;
- Medição de temperatura com dois termopares cerâmico tipo K;
- Medidor digital de temperatura;
- Soprador centrífugo de 245W;
- Controle e acionamento do soprador centrífugo por inversor de frequência CFW100;
- Alimentação manual por escotilhas;
- Controle de tempo e temperatura operado manualmente.

O fluxograma operacional é baseado em três processos distintos:

- Módulo de carregamento (Biomassa): O início do processo inicia-se com o carregamento do material (*Pellets de Pinus taeda*), depositando-o dentro do tambor pela escotilha. Posteriormente, a escotilha é fechada com uma trava manual. A tampa do torrefador é fechada, monta-se na entrada e saída do tambor os instrumentos de aferição de temperatura (dois termopares cerâmicos tipo K). Com as etapas descritas realizadas, é acionado o motor-redutor que executa o tamboramento (rotação) do torrefador.
- Módulo de energia: O soprador centrífugo de 245W é acionado por meio do inversor de frequência CFW100. Para este estudo, após a realização de testes práticos, foi determinada a frequência de 20Hz para o soprador centrífugo. A fonte de combustível (GLP) é liberada por válvulas manuais para o lança chamas. Com a chama acesa, o dispositivo é conectado ao queimador, alimentando com calor o tambor.
- Módulo controle: Com o sistema em operação, a cada 2 minutos são extraídos os parâmetros manualmente do sistema, anotando-se as temperaturas registradas pelos termopares e cronometro do relógio. O controle de temperatura é realizado, aumentando ou diminuindo a incorporação de ar enviado pelo soprador centrífugo, o regulador de GLP ficou fixo após o teste sem material, garantindo o mesmo fluxo de gás para os testes.

A Figura 7 apresenta a estrutura organizacional de execução do teste prático do protótipo de torrefação.

Figura 7. Estrutura organizacional de execução do teste prático do protótipo de torrefação.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

O equipamento precisou passar por ajustes estruturais buscando a melhor homogeneidade do tratamento térmico.

Araldi (2022) trabalhou com carregamento de 3Kg de *pellets* de *Pinus sp.* Para os testes deste trabalho adotou-se o carregamento com 6Kg de *pellets* de *Pinus taeda*. Com o aumento da carga verificou-se no ensaio de ajuste de parâmetros, a perda de 46% do volume total de *pellets*. Devido a maior quantidade de material depositado no tambor, pode ser observado que o processo de revolvimento direcionava alguns *pellets* aos orifícios de 8mm encontrados no tambor. Para solucionar esta situação, foram instaladas telas de aço rebitadas na estrutura, minimizando a perda de material durante a rotação do equipamento. A Figura 8 apresenta a modificação realizada, evidenciando a posição da tela no tambor rotativo.

Figura 8. Tela instalada no tambor do torrefador para impedir a saída dos pellets durante o processo de torrefação em torrefador piloto rotativo.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

Os tempos de residência utilizados no trabalho foram de 30 e 60 minutos, e as temperaturas de 225°C e 285°C para ambos os tempos, classificando os processos de torrefação em suave (225°C) e severo (285°C) (CHEN e KUO, 2010; KOTA *et al.*, 2022). A taxa de aquecimento foi de 15,5°C/min para a temperatura de 225°C e 18,5°C/min para a temperatura de 285°C até a estabilização do sistema, adotando o protocolo de 10 minutos de ajustes para estabilização da temperatura de operação. Com isso, acrescenta-se os 10 minutos ao tempo total de operação. A Tabela 4 apresenta o delineamento experimental com os respectivos parâmetros adotados.

Tabela 4. Delineamento experimental do processo de torrefação de *pellets* de *Pinus* em torrefador piloto de tambor.

Tratamento	Temperatura (°C)	Taxa de aquecimento (°C/min)	Tempo de residência (min)	Tempo Total (min)
PP – Testemunha (<i>pellet sem tratamento</i>)	-	-	-	-
T1 PP – 30 – 225	225	15,5	30	40
T2 PP – 60 – 225	225	15,5	60	70
T3 PP – 30 – 285	285	18,5	30	40
T4 PP – 60 – 285	285	18,5	60	70

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

O processo de torrefação, nas configurações do torrefador utilizado iniciam em temperatura ambiente, quais foram mensuradas por intermédio dos termopares T1 e T2 localizados na entrada e saída do torrefador (Figura 6). Durante o processo de torrefação, a cada 2min foram registradas as medidas de temperatura. Com estes valores foi calculado a média de temperatura operacional durante a torrefação.

O tratamento T4 PP – 60 – 285 teve um comportamento diferente dos anteriores no seu processo de torrefação, aos 58 minutos totais do tempo em operação de torrefação, o equipamento aumentou a dispersão de fumaça evidenciando uma carbonização maior nos *pellets* do que o almejado, como a proposta do trabalho é operar com 70 minutos totais para este tratamento, decidiu-se deixar a operação ser executada até o tempo final, porém o resultado foi a carbonização e geração de finos, que pode ser observado na Figura 9. Com este resultado, não foi possível fazer as análises propostas para este tratamento e, por este motivo ele não aparecerá ao decorrer do trabalho. Evidenciando também que este parâmetro de torrefação não poderá ser executado para *pellets* de *Pinus* no protótipo de tambor rotativo. A Tabela 5 apresenta as temperaturas registradas, nos quatro tratamentos de torrefação executados, antes do aquecimento e a temperatura média durante o processo de torrefação.

Figura 9. Carbonização total dos *pellets* do tratamento T4 PP – 60 – 285, ocasionando geração de finos de material carbonizado.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

Tabela 5. Temperatura ambiente no início e temperaturas médias registradas no processo de torrefação, obtidos no torrefador piloto de tambor rotativo.

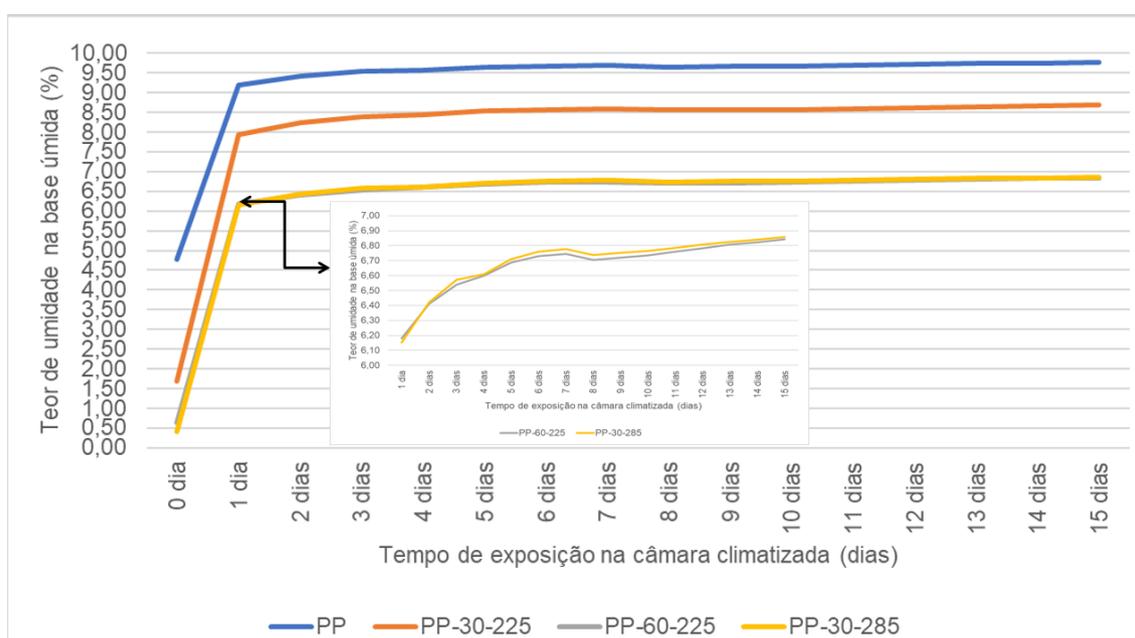
Tratamento	T1 (°C)	T2 (°C)	TM (°C)
T1 PP – 30 – 225	20	17	225,1
T2 PP – 60 – 225	16	17	225,2
T3 PP – 30 – 285	22	20	285,3
T4 PP – 60 – 285	16	18	285,1

Legenda: T1: Temperatura na entrada do tambor rotativo (Entrada de calor); T2 : Temperatura na saída de calor do tambor rotativo; TM : Temperatura média durante o processo de torrefação.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

Assim como observado por Araldi (2022), durante o tempo da torrefação a variação da temperatura dentro do tambor rotativo foi inferior a 2°C, tanto para 225°C, quanto para 285°C. A Figura 10 apresenta o comportamento das temperaturas em relação ao tempo de torrefação.

Figura 10. Variação da temperatura e tempo de torrefação durante a torrefação de pellets de Pinus.



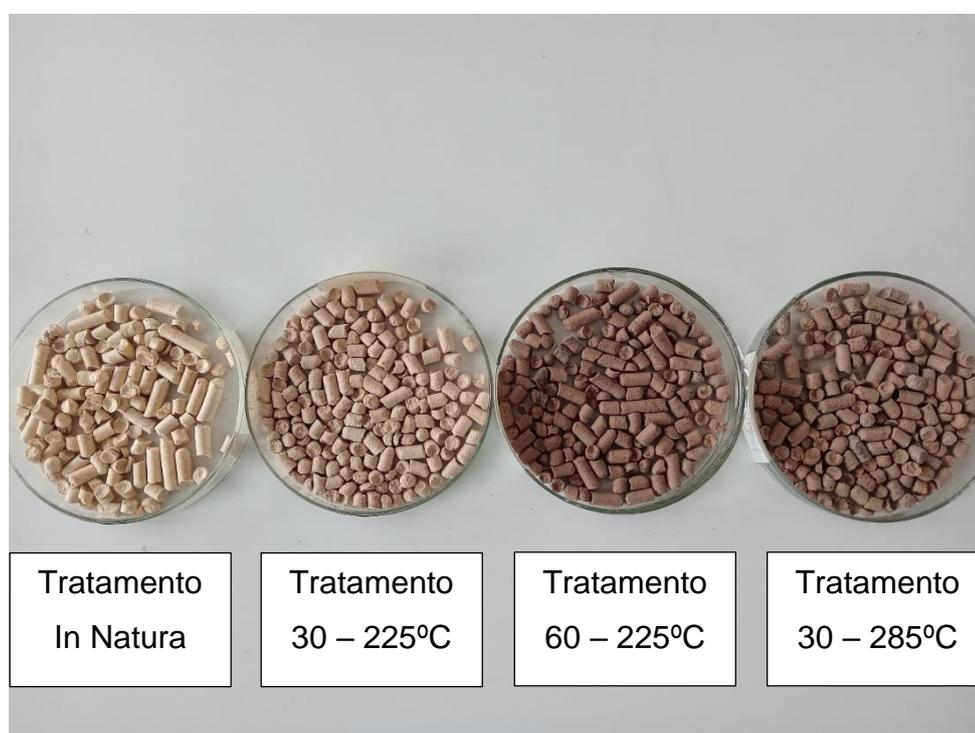
Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

Como o intuito do protótipo é operar em pequenas plantas de geração de energia, o ambiente atmosférico está presente no sistema, tendo influência do oxigênio, já que a câmara do tambor não é inerte.

Os *pellets* de *Pinus* não receberam tratamento de pré secagem antes da torrefação, tendo teor de umidade médio na base úmida de 6%, antes da torrefação.

Na Figura 11, pode ser observado a nítida diferença de coloração dos *pellets* de madeira de *Pinus*, torrefados em diferentes temperaturas e tempos de residência.

Figura 11. Coloração dos *pellets in natura* x torrefados pelo Processo de Tambor Rotativo.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

Ao se executar as torrefações, foi tomado como dado informativo o consumo de gás GLP (tabela 6), estes dados, servem de parâmetro comparativo do consumo e, custo da fonte combustível utilizada no protótipo de torrefação. Bergman *et al.* (2005), mencionam a importância da combinação da peletização e a torrefação da biomassa, sendo um potencial redutor de custos de manuseio. Como perspectivas futuras pode ser realizado a caracterização do custo de produção dos *pellets* torrefados.

A cada torrefação, o botijão de capacidade de 13Kg de GLP foi mensurado em balança com 0,10g de precisão, por meio da diferença de massa em cada torrefação, pode ser obtido o consumo total para cada tratamento. O custo foi realizado considerando o valor de compra do botijão na Cidade de Lages, Santa Catarina, Brasil, no segundo semestre de 2022.

Tabela 6. Comparativo entre o consumo e custo de gás GLP, para torrefação de *pellets* de *Pinus* em protótipo de torrefador de Tambor rotativo.

Tratamento	Consumo (g)	Custo (R\$)
T1 PP – 30 – 225	310	2,86
T2 PP – 60 – 225	540	4,98
T3 PP – 30 – 285	420	3,88
T4 PP – 60 – 285	550	5,08

Legenda: Consumo (g) em gramas; Custo para torrefar 6Kg de *pellets* (R\$), em moeda Real.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

Após o processo de torrefação, juntamente com os *pellets* de *Pinus in natura* (tratamento testemunha), foram determinadas as propriedades físicas e energéticas, bem como a determinação da umidade de equilíbrio e do comportamento térmico dos compactados torrefados. A Tabela 7 apresenta as normas que nortearam as análises realizadas para verificar a qualidade dos *pellets* de *Pinus* torrefados.

Tabela 7. Análises das propriedades físicas e energéticas realizadas nos *pellets* de *Pinus* antes e após o processo de torrefação.

Propriedades	Análise	Norma
Físicas	Perda de massa	Descrita no texto
	Dimensões e Densidade aparente unitária	EN 16127 (CEN, 2012)
	Umidade	NBR 14929 (ABNT, 2017)
	Umidade de equilíbrio	Descrita no texto
	Teor de finos	EN 15210-1 (CEN, 2010)
	Durabilidade	EN 15210-1 (CEN, 2010)
Energéticas	Densidade a granel	EN 15103 (CEN, 2009)
	Poder calorífico superior	DIN 51900 (DIN, 2000)
	Análise imediata	ASTM 1762 (ASTM, 2007)
	Análise termogravimétrica (TGA)	Descrita no texto
	Densidade energética	Descrita no texto

Fonte: Elaborado pelo Autor (2022)

Finalizado a torrefação dos *pellets*, assim como na peletização, o material foi acondicionado em câmara climatizada em recipientes plásticos fechados em temperatura de 22°C, a 65% de umidade relativa.

Para determinar a umidade do material, foram selecionados aleatoriamente 150 ± 2 g de *pellets* de cada tratamento. Este material foi dividido em três béqueres, contendo cada um 50 ± 2 g de *pellets*, permanecendo o material por 24h na estufa. Ao finalizar as 24h, o material foi pesado em balança analítica de precisão de 0,0001g. Para determinação da umidade se utilizou a Equação 01.

$$U = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \times 100 \quad \text{- Equação 1}$$

Onde:

U = Teor de umidade (%); base massa úmida;

m_1 = massa do recipiente de secagem seco em estufa a (105 ± 2) °C, expressa em g;

m_2 = massa do recipiente com a amostra antes da secagem, expressa em g;

m_3 = massa do recipiente com a amostra após a secagem, expressa em g.

Para determinação da perda de massa e densidade aparente, foram selecionados aleatoriamente 100g de cada tratamento. Para determinar a massa, cada *pellet* foi pesado em balança analítica de precisão 0,0001g. Aleatoriamente foram selecionados 10 *pellets* de cada tratamento, para que fossem mensuradas as dimensões destes *pellets* (comprimento e diâmetro) com a utilização de um paquímetro digital com precisão de 0,01mm, a fim de calcular o volume de cada *pellet*. Para a determinação da perda de massa se utilizou a Equação 02:

$$Pmt = 100 - \left(\frac{\text{massa média do pellet torrefado (g)} \times 100}{\text{massa média do pellet antes de torrefar (g)}} \right) \quad \text{- Equação 2}$$

Onde:

Pmt = Perda de massa no torrefador piloto de tambor (%);

A massa média dos pellets foi obtida dos 100g de pellets utilizados para determinação das dimensões e densidade unitária, antes da torrefação (testemunha) e após a torrefação, para cada tratamento analisado.

Para a determinação da densidade aparente (a granel) dos *pellets*, foi utilizado um recipiente graduado em polipropileno com volume de 5 litros, sendo realizadas cinco repetições de cada tratamento. Seguindo a metodologia de ensaio de Araldi (2022), após o preenchimento do recipiente até a marca do volume, adotou-se o procedimento de 10 giros com $\frac{1}{4}$ de volta sentido horário e anti-horário, a fim de acomodar-se as partículas até o preenchimento do volume do recipiente. Cada repetição foi pesada em balança de precisão de 0,1g e estabelecida a relação entre massa e volume para o cálculo da densidade a granel dos *pellets*.

A densidade energética unitária e a granel dos *pellets* foi calculada com base na densidade e poder calorífico dos *pellets*, conforme equações 3 e 4, respectivamente:

$$DEu = DAu \times PCS \quad - \text{Equação 3}$$

Onde:

DEu = densidade energética unitária (kcal/m³);

DAu = densidade aparente unitária (kg/m³);

PCS = Poder calorífico superior (kcal/kg).

$$DEg = Dg \times PCS \quad - \text{Equação 4}$$

Onde:

DEg = densidade energética a granel (kcal/m³);

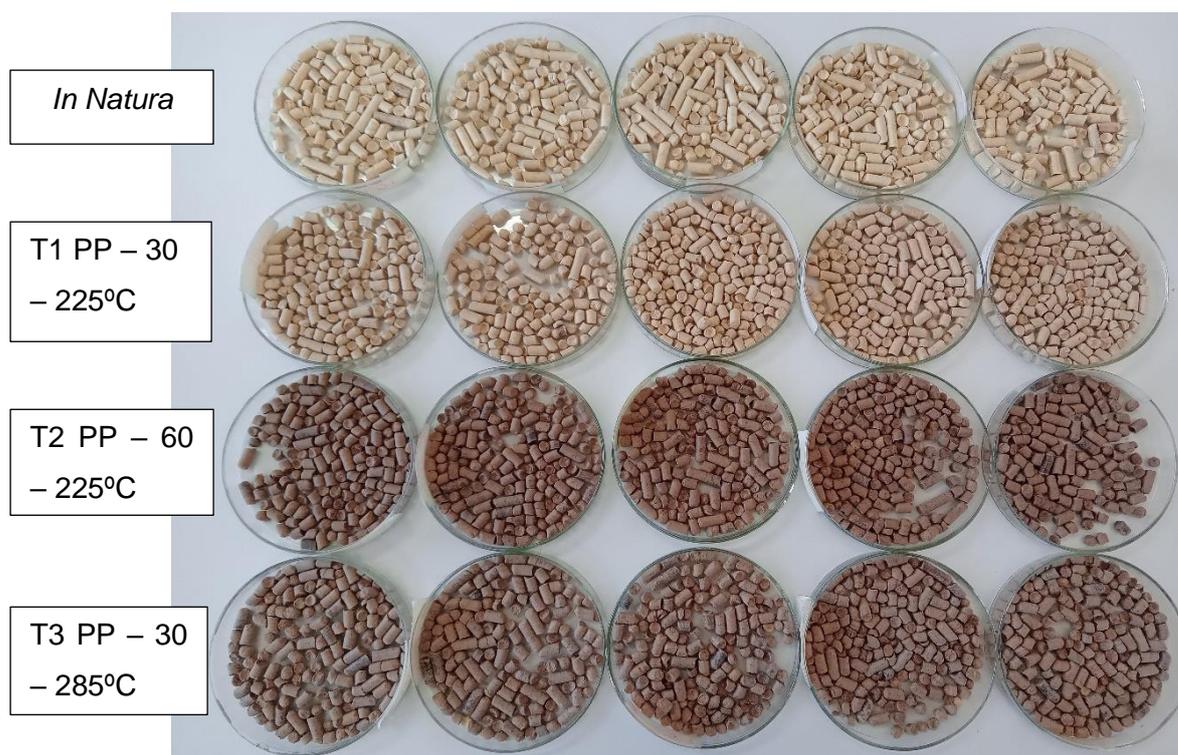
Dg = densidade a granel (kg/m³);

PCS = Poder calorífico superior (kcal/kg).

Assim como Araldi (2022), foi realizada a análise da umidade de equilíbrio, pois o processo de torrefação sugere como vantagem a redução de higroscopicidade da madeira (LAM *et al.*, 2012).

A análise de dessorção e adsorção de umidade foi conduzido em câmara climatizada utilizando cinco repetições, tanto para os *pellets in natura*, quanto os *pellets* torrefados no torrefador de tambor, com condições controladas de temperatura a 22°C e umidade relativa do ar de 65%. Cada repetição consistiu em uma massa de $30 \pm 0,2$ g de *pellets*, colocadas em placas de Petri. A Figura 12 mostra a distribuição dos *pellets* nas placas de Petri para o ensaio de umidade de equilíbrio.

Figura 12. *Pellets* em placas de Petri para ensaio de higroscopicidade.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2022)

Cada repetição foi pesada em balança analítica de precisão de 0,0001g, antes de ser colocada na câmara climatizada e logo após a torrefação, e a cada 24 horas. Araldi (2022) manteve o ensaio por dez dias consecutivos, quando foi possível constatar que a massa das amostras estava constante. Nas análises realizadas neste trabalho pôde ser observado estabilização com sete dias. Mesmo assim, o experimento foi estendido até o décimo quinto dia, com a finalidade de avaliar de forma mais criteriosa seu comportamento. Ao fim dos 15 dias, as amostras foram submetidas a determinação da umidade final, em estufa a $103 \pm 2^\circ\text{C}$.

Para determinação de durabilidade mecânica dos *pellets*, utilizou-se 1500g de *pellets* de cada tratamento, divididos em 3 porções (três repetições) de $500 \pm 2\text{g}$ para cada amostra, que foram colocados em um friabilômetro específico para o ensaio, com velocidade de 25 rpm, completando 500 rotações. A Figura 13 apresenta o friabilômetro para ensaio de durabilidade mecânica dos *pellets* de *Pinus*.

Figura 13. Ensaio de durabilidade mecânica de *pellets* de Pinus em diferentes tempos e temperaturas de torrefação.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2022)

Foi utilizada a peneira com abertura de malha 3,35mm para separar os finos, tomando-se o cuidado para não gerar mais finos, obtendo-se a quantidade de *pellets* que mantiveram as características de durabilidade mecânica.

Para a determinação do teor de finos, foi preparada a amostra de cada tratamento da mesma forma que para o ensaio de durabilidade mecânica. A quantidade de finos, foi calculada pela razão entre a massa de finos peneirada em peneira de 3,35 mm de abertura, pela massa total de *pellets* antes do ensaio. A massa do material foi pesada em uma balança de precisão de 0,01g. A expressão matemática utilizada para durabilidade é representada pela equação 05, para o teor de finos a equação 06.

$$DU = 100 \times \frac{mA}{mE} \quad - \text{Equação 5}$$

Onde:

DU = durabilidade mecânica (%);

mA = massa após o teste de durabilidade, que ficou na peneira, após peneiramento (g)

mE = massa inicial, antes de entrar no friabilômetro (g).

$$F = \frac{mP}{mE} \times 100 \quad \text{- Equação 6}$$

Onde:

F = Teor de finos (%);

mE = massa inicial, antes do peneiramento (g)

mP = massa das partículas que passou pela peneira (g).

A análise da composição química imediata foi realizada em balança termogravimétrica, com temperatura de 900°C para a determinação do teor de voláteis e 700°C para o teor de cinzas. O poder calorífico superior foi determinado em bomba calorimétrica.

Para realização das análises de degradação térmica dos pellets (TG e DTG), foi utilizada uma balança termogravimétrica modelo TGA 2000 (Automatic Multiple Sample Termogravimetric Analyser), marca NAVAS Instruments, com capacidade para análise de 19 amostras de forma simultânea. O ensaio foi realizado com ar atmosférico e taxa de aquecimento de 20°C/min, desde a temperatura ambiente até 1000°C, sendo o ensaio encerrado quando as amostras chegaram à massa constante.

Com os dados dos ensaios, foram construídas as curvas termogravimétricas (TG) para a perda de massa em função da temperatura e a curva da derivada primeira da perda de massa (DTG) para avaliar a velocidade de perda de massa.

Os resultados finais, foram apresentados na forma de gráficos cuja abscissa é referente a temperatura (T) e a ordenada, massa (M), sendo muitas vezes difícil extrair o ponto exato da perda de massa, pois não é sempre abrupta, mas sim, suave em muitos casos. Portanto, a prática encontrada é a sobreposição da curva de DTG no mesmo gráfico, que representa a derivada da primeira curva, ou seja, dM/dT , sendo considerada a temperatura de eliminação do pico.

Após a torrefação ter sido realizada no torrefador piloto rotativo, as mesmas condições de ensaio foram replicadas na Termobalança gravimétrica, com 19 pellets aleatoriamente sorteados do tratamento *in natura*, para completar o carrossel do equipamento para cada tratamento.

Na condição de temperatura à 225°C, foi adotado o parâmetro de tempo em 40 e 70 minutos, simulando o tempo de torrefação mais o tempo de ajuste mencionado no processo de torrefação no torrefador piloto. A taxa de aquecimento nesta condição de temperatura foi de 15°C, importante ressaltar que o TGA só aceita números inteiros, não possibilitando a utilização da taxa de aquecimento almejada de 15,5°C (Tabela 8).

A mesma situação ocorreu para a condição de 285°C, cuja taxa de aquecimento foi de 18°C/min para o TGA e no torrefador piloto de 18,5°C/min. Nesta condição de temperatura também se adotou os tempos de 40 e 70 minutos (Tabela 8).

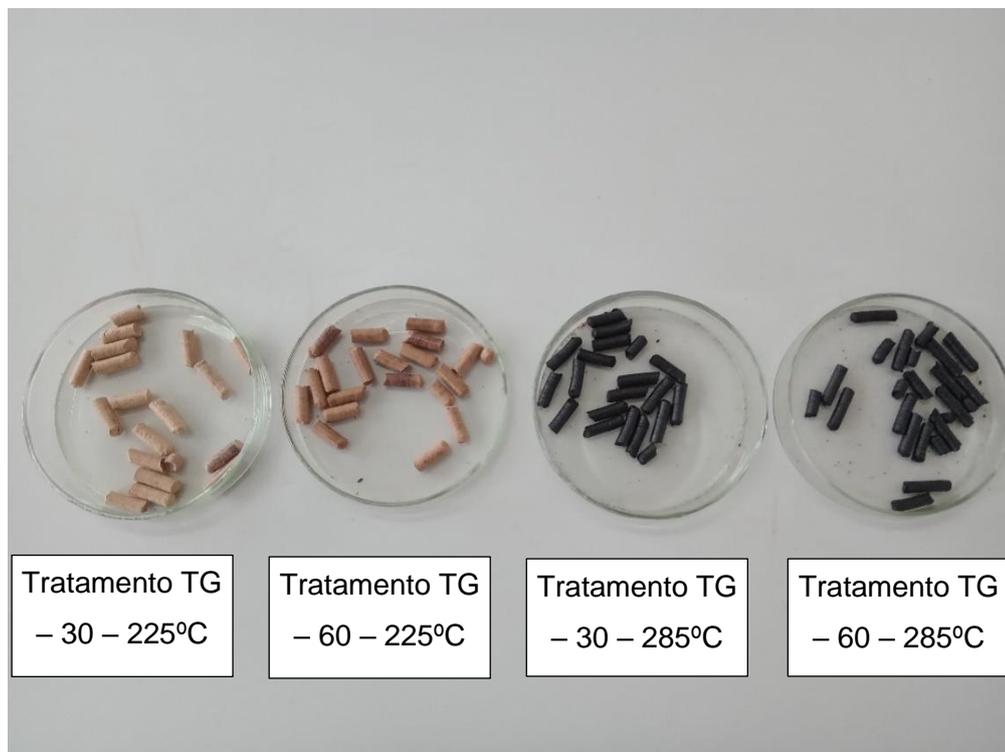
Tabela 8. Delineamento experimental do processo de torrefação de *pellets* de *Pinus* em termobalança gravimétrica.

Tratamento	Temperatura (°C)	Taxa de aquecimento (°C/min)	Tempo de residência (min)	Tempo Total (min)
PP – Testemunha (<i>pellet sem tratamento</i>)	-	-	-	-
T1 TG – 30 – 225	225	15,0	30	40
T2 TG – 60 – 225	225	15,0	60	70
T3 TG – 30 – 285	285	18,0	30	40
T4 TG – 60 – 285	285	18,0	60	70

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

Após a realização da torrefação na balança termogravimétrica (Figura 14), os *pellets* foram submetidos as análises descritas na Tabela 7, com exceção do teor de finos, durabilidade mecânica, densidade a granel e densidade energética a granel, por não haver quantidade suficiente de material para estas análises.

Figura 14. *Pellets* torrefados em balança termogravimétrica, dispostos em placas de Pétri para ensaio de higroscopicidade.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

A perda de massa foi determinada da média obtida em cada tratamento, onde para cada *pellet* torrefado na termobalança foi aplicada a Equação 7.

$$PmTG = 100 - \left(\frac{m_f}{m_i} \right) \times 100 \quad - \text{Equação 7}$$

Onde:

Pmtg = perda de massa na torrefação em termobalança gravimétrica (%); base massa úmida;

Mf = massa final do pellet, após torrefação;

Mi = massa inicial do pellet, antes da torrefação em termobalança.

Para a análise estatística, foi aplicado o delineamento inteiramente casualizado, com quatro tratamentos para a torrefação no torrefador piloto rotativo, e cinco tratamentos para a torrefação realizada na termobalança gravimétrica, ambos

incluindo o tratamento dos *pellets in natura* como testemunha. Houve variação no número de repetições (Tabela 9), dependendo da análise realizada.

Tabela 9. Número de amostras para cada propriedade analisada.

Propriedade	Número de amostras
Dimensões, densidade aparente unitária, densidade unitária de energia	100
Umidade (base seca e úmida)	3
Umidade de equilíbrio	5
Durabilidade mecânica e teor de finos	3
Densidade a granel	4
Poder calorífico superior	3
Análise imediata	4
Análise termogravimétrica	19

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

Para a comparação múltipla das médias foi utilizado o teste Scott-Knott a 5% de significância. Para estabelecer o nível de correlação entre a densidade energética e as variáveis utilizadas para o seu cálculo (densidade unitária; densidade a granel e poder calorífico superior), foi aplicado o Coeficiente de Correlação de Pearson e aplicado o Teste de significância a um nível de probabilidade de 0,05.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 AVALIAÇÃO DA REPLICAÇÃO DA TORREFAÇÃO REALIZADA NO TORREFADOR PILOTO DE TAMBOR EM TERMOBALANÇA GRAVIMÉTRICA

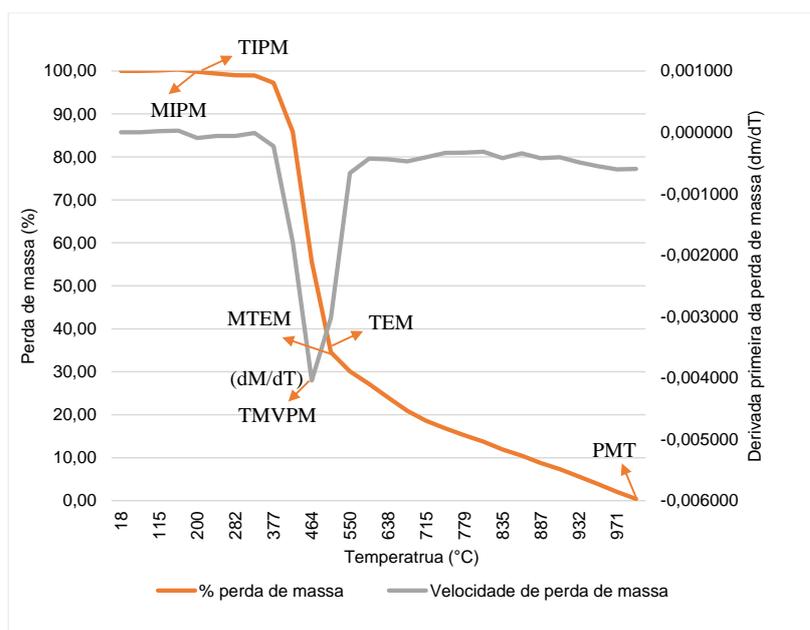
A torrefação na termobalança gravimétrica, foi realizada após os ensaios de torrefação no torrefador piloto de tambor, com o objetivo de replicar as mesmas condições observadas no torrefador.

Foi possível replicar as mesmas condições de ensaio, com exceção da taxa de aquecimento. A taxa de aquecimento foi reduzida de 15,5 para 15,0°C/minuto na temperatura de 225°C e de 18,5 para 18,0°C/minuto para a temperatura de 285°C, pois na termobalança, só se aceita na configuração, números inteiros.

Para temperatura inicial de perda de massa (TIPM), não houve influência da temperatura de torrefação. Somente na temperatura de 285°C, no menor tempo de residência, a temperatura inicial de perda de massa foi maior, com menor massa remanescente nesta temperatura (Tabela 10). Na temperatura de 225°C foi necessária temperatura menor para o início da perda de massa. Portanto, a taxa de aquecimento não afetou a temperatura inicial de perda de massa. Segundo Pelaez-Samaniego *et al.* (2013), a perda de massa inicia próximo a temperatura de 100°C devido a vaporização da umidade contida na biomassa.

Quanto à massa remanescente na temperatura de início de perda de massa (MIPM) não houve efeito da temperatura, havendo efeito do tempo de residência somente na temperatura de 285°C. Para o menor tempo de residência, foi observado uma ligeira diferença na massa remanescente.

Figura 15. Parâmetros para avaliação da variação de temperatura e perda de massa.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

Tabela 10. Variações de temperatura e perda de massa ao longo da torrefação de *pellets* em termobalança gravimétrica, em função da temperatura e tempo de residência.

Tratamento	TA (°C)	TIPM (°C)	MIPM (%)	TEM (°C)	tTEM (h:m:s)	MTEM (%)	TMVP M (°C)	PMT (%)
T1 TG – 30 – 225	15,0	90 b	99,73 a	227 b	00:19:53 d	92,55 a	229 b	8,94 c
T2 TG – 60 – 225	15,0	88 b	99,69 a	228 b	00:21:14 c	91,12 a	228 b	10,39 c
T3 TG – 30 – 285	18,0	185 a	99,51 b	287 a*	00:54:53 b	79,52 b*	289 a	20,48 b
T4 TG – 60 – 285	18,0	96 b	99,81 a	287 a*	01:22:11 a	51,60 c*	288 a	48,41 a
CV (%)		16,50	0,20	0,95	4,09	5,57	0,84	19,42

Legenda: T1 TG – 30 – 225: torrefação em termobalança com 225 °C por 30 minutos; T2 TG – 60 – 225: torrefação em termobalança com 225 °C por 60 minutos; T3 TG – 30 – 285: torrefação em termobalança com 285 °C por 30 minutos; T4 TG – 60 – 285: torrefação em termobalança com 285 °C por 60 minutos. TA: Taxa de aquecimento; TIPM: Temperatura Inicial de Perda de Massa; MIPM: massa remanescente na temperatura de início de perda de massa; TEM: Temperatura no início da estabilização da perda de massa (final da queima dos

voláteis perdidos); tTEM: tempo de torrefação para atingir a temperatura de estabilização da massa; MTEM: massa remanescente na TEM; TMVPM: temperatura na máxima velocidade de perda de massa; PMT: perda de massa total de cada tratamento.

* Não houve estabilização da massa na temperatura de 285°C

Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente pelo Teste de Scott Knott ($\alpha = 0,05$).

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

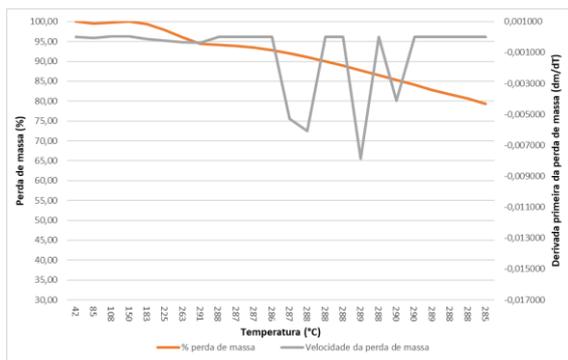
Para a temperatura de 225°C foi possível observar que a temperatura final de ensaio coincidiu com a temperatura de início da estabilização da perda de massa (TEM), antes do término do tempo de residência estipulado, tanto para 30 como para 60 minutos (Figura 16a e 16b). No entanto, para a temperatura de 285°C, mesmo após o equipamento atingir o tempo total de ensaio, os *pellets* continuaram perdendo massa de forma contínua até o tempo final de residência, sem que houvesse estabilização da massa dos *pellets*, demonstrado pelo declínio contínuo da curva de perda de massa (Figura 16c e 16d).

Figura 16. Curvas de perda de massa dos *pellets* torrefados em balança termogravimétrica com diferentes tempos e temperaturas.

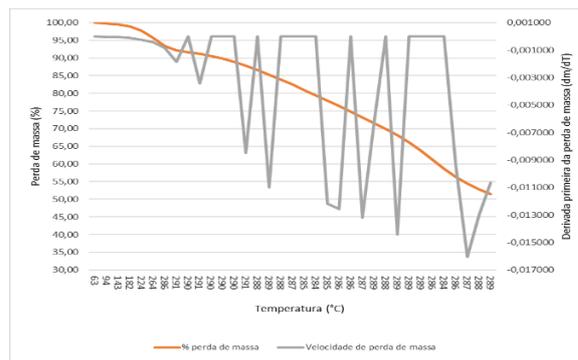


(a) Temperatura: 225°C; Tempo de residência: 30 minutos

(b) Temperatura: 225°C; Tempo de residência: 60 minutos



(c) Temperatura: 285°C; Tempo de residência: 30 minutos



(d) Temperatura: 285°C; Tempo de residência: 60 minutos

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

Para a temperatura da maior velocidade de perda de massa (TMVPM) houve o efeito somente da temperatura e não do tempo de torrefação. O pico de maior velocidade de perda de massa ocorreu na temperatura final da torrefação para ambos os tratamentos.

A perda de massa sofreu efeito da temperatura de torrefação, sendo que houve maior perda de massa na maior temperatura de torrefação. Para a temperatura de 225°C não houve efeito do tempo de residência, para perda de massa. Para a temperatura de 285°C, quanto maior o tempo de torrefação, maior foi a perda de massa. Além disso, para a temperatura de 285°C, mesmo chegando no tempo final de residência, a curva de perda de massa ainda não havia estabilizado (Figura 16c e 15d), indicando que seria necessário maior tempo de torrefação para estabilização da massa.

4. 2 EFEITO DA TEMPERATURA E DO TEMPO DE RESIDÊNCIA NA QUALIDADE DOS PELLETS TORREFADOS EM TORREFADOR PILOTO DE TAMBOR E EM TERMOBALANÇA GRAVIMÉTRICA

Os valores de perda de massa dos *pellets* (Tabela 11) observados no torrefador e na termobalança gravimétrica, com condições similares de torrefação, foram diferentes entre si.

Quanto a massa média individual dos *pellets* torrefados no torrefador, obtida da pesagem de 100g de *pellet* de cada tratamento (Tabela 11 e Figura 17), houve

influência significativa do tempo e temperatura de torrefação na variação da massa, havendo redução progressiva da massa com o aumento do tempo e temperatura de torrefação. No entanto, quando observados os valores de perda de massa, calculados a partir da massa média dos *pellets* torrefados em relação aos *pellets* não torrefados, os elevados valores indicam que a perda de massa não foi resultado exclusivo da torrefação. Parte da perda de massa foi devida a movimentação dos *pellets* no tambor rotativo durante a torrefação. Esta movimentação contribuiu para a redução significativa do comprimento dos *pellets*, que apresentou o mesmo comportamento estatístico da variação da massa (Tabela 11). Lima *et al.*, (2017), ao torrefarem *pellets* de *Pinus sp.* em um torrefador de rosca-sem-fim, desenvolvido em laboratório, tiveram como resultado diminuição do comprimento dos *pellets* decorrido à movimentação no reator, porém não tão agressivo. A redução do comprimento observado não afeta a utilização dos *pellets* para geração de energia. No entanto ressalta-se que pode ocorrer a geração de finos e, conseqüentemente, perda de massa.

Já a torrefação na termobalança expressa de forma exclusiva o efeito da torrefação na perda de massa (Tabela 11), pois não há variação das dimensões ou massa por movimentação dos *pellets*. Neste contexto, a perda de massa teve comportamento diferenciando entre as temperaturas avaliadas. Para 225°C, não houve efeito do tempo de torrefação na perda de massa. Já para a temperatura de 285°C, quanto maior o tempo de torrefação, maior foi a perda de massa. Segundo Barskov *et al.*, (2019), a biomassa durante a torrefação perde 30% de sua massa original. Na pesquisa realizada em um analisador termogravimétrico, atingiu-se 57,6% de perda de massa, para a torrefação da biomassa a 280°C, por 44 minutos de tempo de residência, utilizou-se 21% de O₂ na atmosfera de reação, atingindo maior perda de massa em relação as maiores perdas de massa observadas neste trabalho, quais os maiores valores foram dos tratamentos T3 – 30 – 285 e T4 – 60 – 285. Protásio *et al.*, (2015), encontraram uma perda de massa de 2,4% e 7,8% para os *pellets* de *Pinus sp.* torrefados a 220°C e 250°C, respectivamente. Peng *et al.* (2015) em torrefação de *pellets* de *Pinus sp.* encontraram um valor de 21,6% de perda de massa.

Outro fator que influencia a perda de massa é a presença de oxigênio na torrefação. A concentração de oxigênio influencia diretamente a ação da temperatura, acelerando a degradação dos componentes dos *pellets*. Por este motivo se faz necessário trabalhar com tempo de residência menor (LIMA *et al.*, 2017). Acharya e Dutta (2016), observaram que o processo de torrefação modifica a composição da

biomassa significativamente pela ação da degradação da hemicelulose; fato também observado por Chen e Kuo (2010), qual a decomposição da hemicelulose foi identificada como a reação dominante durante a torrefação da biomassa.

Tabela 11. Perda de massa na torrefação em torrefador piloto de tambor e em termobalança gravimétrica.

Tratamento	Torrefação em torrefador piloto de tambor		Torrefação em termobalança gravimétrica	
	Massa média individual de 100 g de pellet (g)	Perda de massa (%) ¹	Massa média individual de 76 pellet (PP) e 19 pellet (T1 a T4)	Perda de massa (%)
PP – Testemunha	0,453 a	-	0,678 a	-
T1 – 30 – 225	0,306 b	32,45	0,576 b	8,94 c
T2 – 60 – 225	0,273 c	39,74	0,536 b	10,39 c
T3 – 30 – 285	0,247 d	45,47	0,553 b	20,48 b
T4 – 60 – 285	-	-	0,410 c	48,41 a
CV (%)	32,80	-	11,17	19,42

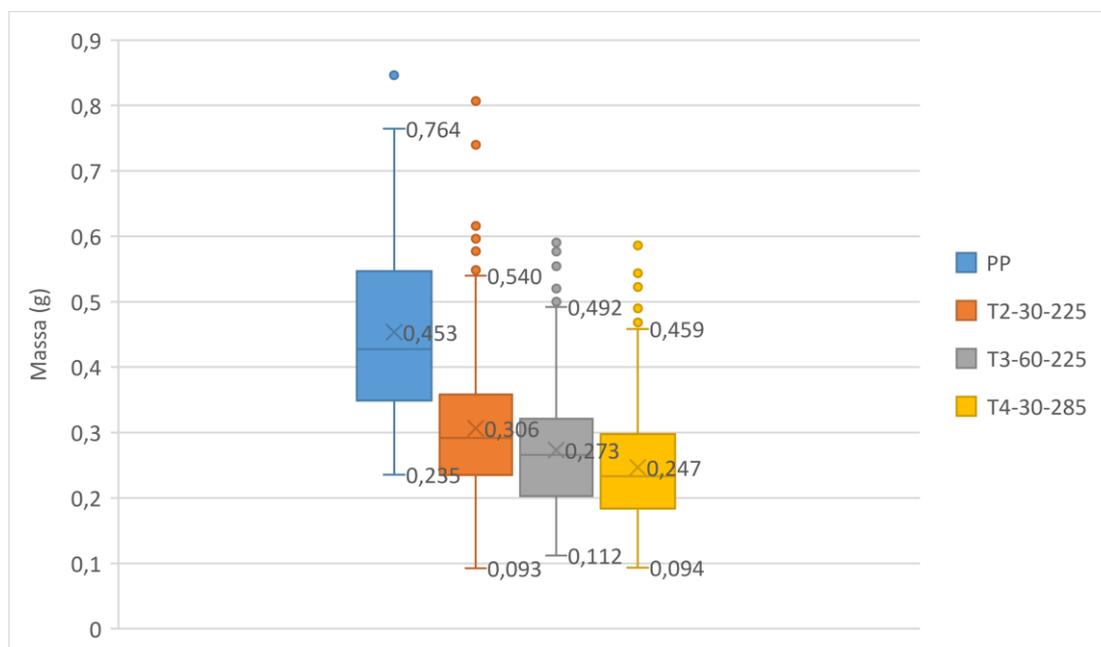
Legenda: CV: coeficiente de variação experimental (%).

¹ O teste de médias não foi aplicado aos valores de perda de massa dos pellets tratados termicamente no torrefador, pois o cálculo desta variável foi feita a partir do valor médio da massa de 100 g de pellets de cada tratamento, cuja distribuição dos valores pode ser visualizada na Figura 17.

Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente pelo Teste de Scott Knott ($\alpha = 0,05$).

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

Figura 17. Distribuição da massa individual de *pellets* antes e após a torrefação em torrefador piloto de tambor.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2022)

Bergman *et al.* (2005), mencionam que o tempo de residência influencia diretamente em alguns aspectos, principalmente na degradação das hemiceluloses, enquanto a celulose apresenta limitada perda de massa quando se utiliza tempos de reação curtos, considerados menores que 30 minutos.

Durante a torrefação suave, a umidade e os voláteis leves (ou de baixo peso molecular) na biomassa são liberados. Dentre os componentes da biomassa, as hemiceluloses são os mais ativos em relação a celulose e lignina. Assim, as hemiceluloses são degradadas termicamente até certo ponto durante a torrefação suave, enquanto a celulose e a lignina são apenas levemente ou pouco afetadas (YANG *et al.*, 2006; CAO *et al.*, 2016), explicando a menor perda de massa na temperatura de 225°C, considerada como torrefação leve.

No torrefador piloto de tambor, da mesma forma que a massa, o comprimento e volume dos *pellets* tiveram o mesmo comportamento na torrefação em relação a temperatura e o tempo de residência. As dimensões reduziram gradativamente com o aumento da temperatura e do tempo de torrefação (Tabela 12).

Para o diâmetro, o tempo de residência na torrefação teve maior efeito que a temperatura. Ou seja, para maior temperatura, mas menor tempo de residência, o diâmetro foi semelhante à menor temperatura, com maior tempo de residência.

Já para a densidade da unidade, somente o tempo de torrefação teve efeito sobre as variações observadas. Carneiro-Junior (2022), também observou redução na densidade da unidade dos *pellets* torrefados em comparação aos *in natura*. Porém, seu efeito foi a diminuição da densidade unitária gradativamente com o aumento da temperatura, assim como encontrado por Protásio *et al.*, (2015). Os autores ressaltam que este resultado pode estar vinculado a perda de massa do processo de torrefação, devido a degradação química dos componentes da parede celular. Efeito semelhante é encontrado na massa média deste trabalho, diferindo apenas para o tratamento T3-PP-285.

Tabela 12. Dimensões e, densidade unitária dos *pellets* de *Pinus* torrefados em torrefador piloto de tambor, em função do tempo e temperatura de torrefação.

Tratamento	Massa	Diâmetro (mm)	Comprimento (mm)	Volume (mm ³)	Densidade	Densidade
	média individual de 100 g de pellet (g)				da unidade (kg/m ³)	da unidade (%)
PP – Testemunha	0,453 a	6,06 a	16,05 a	462,80 a	1139,30 a	-
T1 PP – 30 – 225	0,306 b	5,98 b	11,39 b	319,60 b	1066,70 b	6,37
T2 PP – 60 – 225	0,273 c	5,94 c	9,884 c	273,80 c	1005,00 c	11,79
T3 PP – 30 – 285	0,247 d	5,93 c	7,98 d	220,80 d	1044,30 b	8,34
CV (%)	32,80	0,61	13,23	13,71	4,98	-

Legenda: T1 PP – 30 – 225: torrefação em torrefador de tambor com 225 °C por 30 minutos; T2 PP – 60 – 225: torrefação em torrefador de tambor com 225 °C por 60 minutos; T3 PP – 30 – 285: torrefação em torrefador de tambor com 285 °C por 30 minutos. CV: coeficiente de variação experimental (%)

Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente pelo Teste de Scott Knott ($\alpha = 0,05$).

O diâmetro, comprimento, volume e densidade foram obtidos das medições e cálculos de 10 *pellets* selecionados aleatoriamente dentro de cada tratamento.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

Na torrefação feita na termobalança gravimétrica, foi possível realizar a medição dos *pellets* antes e após a torrefação para cada repetição dentro dos tratamentos (Tabela 13 e Figuras 18 e 19), o que permite concluir que a torrefação reduziu o diâmetro dos *pellets* de forma significativa em todos os tempos e temperaturas de torrefação. No comprimento, não houve variação significativa entre o comprimento inicial e final somente para a temperatura de 225°C e tempo de 30 minutos de residência (Tabela 13).

Para as dimensões finais, após torrefação, o diâmetro dos *pellets* foi afetado de forma mais significativa pela temperatura, reduzindo o diâmetro com o aumento da temperatura. O maior tempo de residência continuou reduzindo o diâmetro somente na temperatura de 285°C. O comportamento da torrefação na termobalança foi o oposto do observado no torrefador de tambor.

Para o comprimento, análise do efeito tempo e temperatura da torrefação foi afetada pela heterogeneidade do comprimento dos *pellets* antes da torrefação. Os *pellets* de maior comprimento antes da torrefação também foram os mais longos após o tratamento térmico.

Tabela 13. Dimensões dos *pellets* de *Pinus* antes e após torrefação em Termobalança gravimétrica, em função do tempo e temperatura de torrefação.

Tratamento	ϕ inicial (mm)	ϕ final ¹ (mm)	CV	L inicial (mm)	L final ¹ (mm)	CV
PP – Testemunha	-	6,07 a		-	19,37 a	
T1 TG – 30 – 225	A 6,08 a	B 5,96 b	1,10	A 18,26 c	A 17,98 b	3,94
T2 TG – 60 – 225	A 6,05 a	B 5,92 b	0,91	A 17,45 d	B 16,95 c	2,05
T3 TG – 30 – 285	A 6,08 a	B 5,39 c	2,98	A 19,65 b	B 18,20 b	5,60
T4 TG – 60 – 285	A 6,09 a	B 5,29 d	3,75	A 22,13 a	B 19,00 a	4,41
CV (%)	0,83	2,43		3,95	8,04	

Legenda: ϕ = diâmetro; L = comprimento; CV: coeficiente de variação experimental (%).

¹ O diâmetro final e comprimento final foram obtidos da medição de 76 *pellets* para o tratamento testemunha (PP), ou seja, de todos os *pellets* dos tratamentos, antes de submetê-los a torrefação, e de 19 *pellets* para cada tratamento de torrefação (T1 a T4).

Análise das variações entre as temperaturas de torrefação e tempos de residência: Médias seguidas de mesma letra minúscula, NA COLUNA, não diferem estatisticamente pelo Teste de Scott Knott ($\alpha = 0,05$).

Análise das dimensões antes e após torrefação: Médias antecedidas de mesma letra maiúscula, NA LINHA, não diferem estatisticamente pelo Teste de Scott Knott ($\alpha = 0,05$).

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

Figura 18. Diâmetro dos *pellets* antes e depois do processo de torrefação em termobalança gravimétrica.

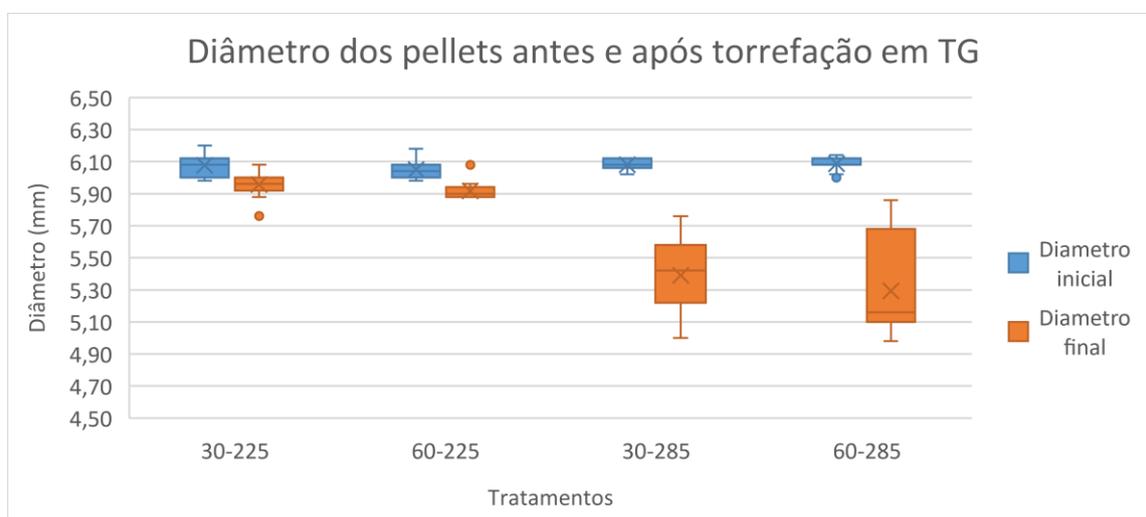
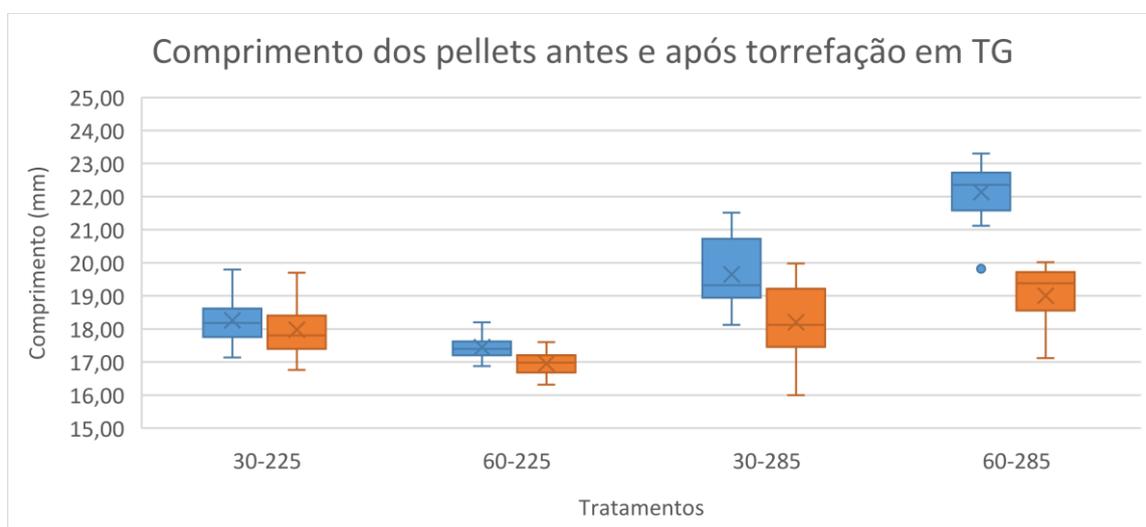


Figura 19. Comprimento dos *pellets* antes e depois o processo de torrefação em termobalança gravimétrica.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

Na torrefação realizada na termobalança, a massa média dos *pellets* e o volume foram reduzidos pelo processo de torrefação, em comparação com os *pellets* sem torrefação (Tabela 14). No entanto, entre as temperaturas e tempo de residência, a massa dos *pellets* foi significativamente diferente somente para a maior temperatura (285°C), e maior tempo de residência (60 minutos), em relação aos demais tratamentos. Já o volume, apresentou variação entre os tempos de residência somente para a temperatura de 225°C, com redução gradativa do valor. A redução do volume compensou a redução da massa. Por isso, a densidade da unidade aumentou.

A densidade da unidade dos *pellets* foi maior para a temperatura de 285°C e tempo de residência de 30 minutos, diferindo de todos os demais tratamentos e sendo maior até do que o valor observado para os *pellets* não torrefados. Para a densidade unitária, houve efeito da temperatura de torrefação, mas o tempo de residência promoveu alterações significativas na densidade somente para a temperatura de 285°C, com a maior redução da densidade para o maior tempo de residência.

Tabela 14. Volume e densidade da unidade dos *pellets* de *Pinus* torrefados em Termobalança gravimétrica, em função do tempo e temperatura de torrefação.

Tratamento	Massa(g)	Volume (mm ³)	Volume (%)	Densidade da unidade (kg/m ³)
PP – Testemunha	0,678 a	561,38 a	-	1207 b
T1 TG – 30 – 225	0,576 b	500,93 b	10,77	1150 c
T2 TG – 60 – 225	0,536 b	466,26 c	16,94	1150 c
T3 TG – 30 – 285	0,553 b	415,56 d	25,97	1340 a
T4 TG – 60 – 285	0,410 c	418,75 d	25,40	0984 d
CV (%)	11,17	9,40	-	7,24

Legenda: CV: coeficiente de variação experimental (%)

¹ A Massa, volume e densidade da unidade foram obtidos da medição e pesagem de 76 pellets para o tratamento testemunha (PP), ou seja, de todos os pellets dos tratamentos, antes de submetê-los a torrefação, e de 19 pellet para cada tratamento de torrefação (T1 a T4).

Médias seguidas de mesma letra minúscula depois do valor numérico, NA COLUNA, não diferem estatisticamente pelo Teste de Scott Knott ($\alpha = 0,05$).

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

A redução da higroscopicidade dos *pellets* promovida pelo processo de torrefação é uma das vantagens do processo, a alta higroscopicidade é uma propriedade não desejável para a geração de energia térmica. Uma forma de amenizar esses problemas é realizar a torrefação (LAM *et al.*, 2012).

A natureza higroscópica torna os *pellets* altamente resistentes a degradação biológica e aquecimento espontâneo, o que leva a grandes vantagens no transporte, manuseio e armazenamento (ACHARYA *et al.*, 2012). Wang *et al.*, (2013) observaram em seu trabalho que o efeito do oxigênio na torrefação de biomassa é insignificante para os resultados de higroscopicidade e dureza de *pellets*, podendo ser viável o gás de arraste sendo carregado de oxigênio para torrefação de biomassa.

Para avaliar o efeito da torrefação na capacidade de adsorção de umidade e na umidade de equilíbrio dos *pellets*, os *pellets* foram mantidos em câmara climatizada (22°C e 65% de umidade relativa do ar) por 15 dias, logo após o processo de torrefação, como descrito na metodologia. Os resultados para os *pellets* torrefados em torrefador piloto de tambor (Tabela 15 e Figura 20a) demonstra que o teor de umidade inicial (0 dia) dos *pellets* sem torrefação (PP) foi significativamente maior que dos *pellets* torrefados em todas as condições de torrefação.

A partir do primeiro dia de armazenamento na câmara climatizada, até o último dia de condicionamento, o teor de umidade dos *pellets* não torrefados sempre foi significativamente maior que os *pellets* torrefados. E os pellets tratados termicamente com temperatura de 225°C e 60 minutos, juntamente com os *pellets* torrefados com 285°C por 30 minutos, em todos os dias de condicionamento, foram similares estatisticamente, apresentando os menores teores de umidade (Tabela 13 e Figura 20a). Desta forma, maior temperatura com menor tempo de residência tem o mesmo comportamento de *pellets* torrefados com menor temperatura e maior tempo de residência.

Dentro da temperatura de 225°C, houve efeito significativo do tempo de residência, com menor teor de umidade para maior tempo de residência.

Dentro de cada tratamento, o tempo necessário para a estabilização do teor de umidade variou entre as temperaturas e tempos de residência. Os *pellets* sem torrefação, e o tratamento térmico realizado em temperatura de 225°C por 60 minutos, tiveram o teor de umidade estabilizado já após o primeiro dia de condicionamento em câmara climatizada, mantendo o mesmo teor de umidade até o final do ensaio. Os

pellets torrefados com 225°C por 30 minutos tiveram a estabilização do teor de umidade após 4 dias de condicionamento. Os *pellets* torrefados a 285°C por 30 minutos atingiram a estabilização somente após 11 dias de condicionamento, e portanto, foram os que mais demoraram para atingir a umidade de equilíbrio.

Portanto, os *pellets* torrefados com maior temperatura foram menos higroscópicos, levando mais tempo para atingir a umidade de equilíbrio e apresentando os menores teores de umidade iniciais e finais.

Tabela 15. Umidade de equilíbrio (base úmida) dos *pellets* torrefados em diferentes tempos e temperaturas.

(Continua)

Torrefação em torrefador piloto de tambor					
Tempo (dias)	Tratamentos				
	PP	PP-30-225	PP-60-225	PP-30-285	CV
0 dia	B 4,77 a	E 1,68 b	B 0,64 c	F 0,40 c	11,30
1 dia	A 9,18 a	D 7,94 b	A 6,18 c	E 6,15 c	9,05
2 dias	A 9,42 a	C 8,24 b	A 6,41 c	D 6,42 c	8,94
3 dias	A 9,53 a	B 8,38 b	A 6,54 c	C 6,57 c	8,97
4 dias	A 9,58 a	B 8,45 b	A 6,60 c	C 6,61 c	8,96
5 dias	A 9,64 a	A 8,53 b	A 6,69 c	B 6,71 c	8,97
6 dias	A 9,67 a	A 8,57 b	A 6,73 c	B 6,76 c	8,94
7 dias	A 9,69 a	A 8,59 b	A 6,74 c	B 6,78 c	8,97
8 dias	A 9,64 a	A 8,55 b	A 6,70 c	B 6,74 c	8,95
9 dias	A 9,66 a	A 8,56 b	A 6,72 c	B 6,75 c	8,96
10 dias	A 9,67 a	A 8,58 b	A 6,73 c	B 6,76 c	8,98
11 dias	A 9,69 a	A 8,60 b	A 6,76 c	B 6,78 c	8,97
12 dias	A 9,71 a	A 8,62 b	A 6,78 c	A 6,81 c	8,96
13 dias	A 9,73 a	A 8,64 b	A 6,81 c	A 6,82 c	8,96
14 dias	A 9,75 a	A 8,66 b	A 6,82 c	A 6,84 c	8,98
15 dias	A 9,77 a	A 8,68 b	A 6,84 c	A 6,86 c	8,98
CV (%)	4,18	1,27	20,81	0,82	

(Conclusão)

Torrefação em termobalança gravimétrica ¹	
Tempo (dias)	Tratamentos

	PP	TG-30-225	TG-60-225	TG-30-285	TG 60-285
0 dia	4,77	1,51	2,66	1,83	1,26
1 dia	9,18	6,19	6,30	6,22	5,24
2 dias	9,42	6,91	6,52	6,30	8,56
3 dias	9,53	7,12	6,83	6,42	8,60
4 dias	9,58	7,19	7,08	6,52	8,69
5 dias	9,64	7,24	7,03	6,62	8,73
6 dias	9,67	7,26	7,07	6,73	8,85
7 dias	9,69	7,46	7,12	6,74	8,77
8 dias	9,64	7,54	7,13	6,77	8,83
9 dias	9,66	7,73	7,17	6,76	8,85
10 dias	9,67	7,84	7,22	6,83	8,86
11 dias	9,69	7,99	7,24	6,84	8,89
12 dias	9,71	7,89	7,27	6,86	8,92
13 dias	9,73	7,86	7,27	6,86	8,96
14 dias	9,75	7,76	7,26	6,88	9,01
15 dias	9,77	7,78	7,27	6,83	8,94

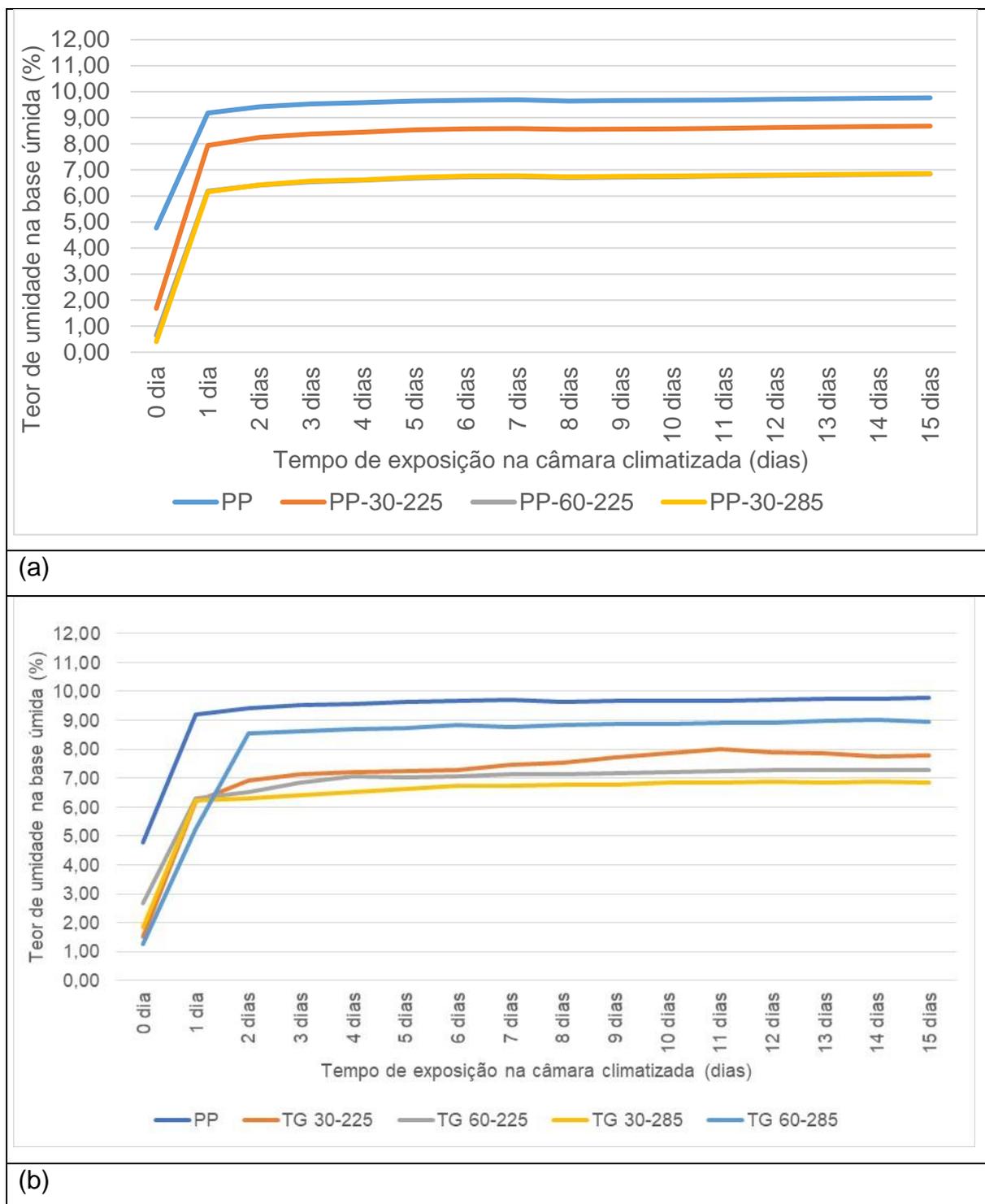
Legenda: Análise da variação entre os tratamentos: Médias seguidas de mesma letra MINÚSCULA, NA LINHA, não diferem estatisticamente pelo Teste de Scott Knott ($\alpha = 0,05$).

Análise entre os dias de condicionamento, no mesmo tratamento: médias antecedidas de letra MAIÚSCULA, NA COLONA, não diferem estatisticamente pelo Teste de Scott Knott ($\alpha = 0,05$).

¹Na torrefação em termobalança gravimétrica não foi possível realizar a análise estatística, pois os 19 pellets produzidos foram colocados em uma placa de Petri, tendo-se, portanto, somente uma repetição para o experimento.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

Figura 20. Variação de umidade dos *pellets* torrefados, em torrefador piloto (a) e em termobalança gravimétrica (b), mantidos em câmara climatizada até estabilização da umidade.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

Quanto a estabilização do teor de umidade dos *pellets* torrefados na termobalança gravimétrica, a (Figura 20b) e a sobreposição das curvas (Figura 21a,

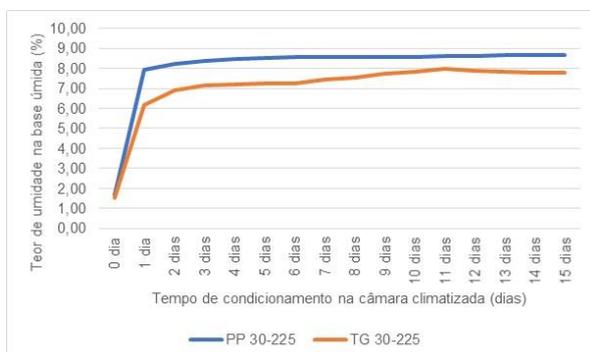
21b, 21c e 21d), demonstram que o comportamento da estabilização do teor de umidade foi similar entre os *pellets* torrefados no torrefador de tambor e na termobalança. As similaridades foram observadas entre as mesmas temperaturas e tempos de torrefação (Figura 21a, 21b, 21c e 21d). Além disso, o comportamento de adsorção e estabilização da umidade foi similar entre a temperatura de 225°C por 30 minutos do torrefador, com a temperatura de 285°C por 60 minutos da termobalança (Figura 21d). A torrefação nestas condições (60-285) realizada na termobalança quando executada no torrefador resultou na queima completa dos *pellets* e produção de cinzas. Portanto, o torrefador não apresentou condições técnicas de realizar a torrefação em temperaturas mais altas e tempo de residência maior.

Com relação a capacidade de adsorção de umidade e estabilização da umidade final, a menor temperatura e menor tempo de torrefação (30-225) que é uma torrefação suave, pode ter tido comportamento similar à torrefação mais severa (60-285) pelo fato da primeira provocar alteração pouco significativa da composição química sendo mais parecida a madeira não torrefada, enquanto a segunda tornou o material muito mais próximo do carvão vegetal, cuja higroscopicidade é alta (Figura 21d). Costa (2020), observou que o aumento na temperatura final de carbonização reduz a capacidade de adsorção do carvão vegetal. A remoção dos grupos funcionais que contêm oxigênio, principalmente os carboxílicos e hidroxílicos, favorecem a perda da capacidade de adsorção da umidade do ar. O que pode explicar o efeito da higroscopicidade no tratamento mais severo deste trabalho.

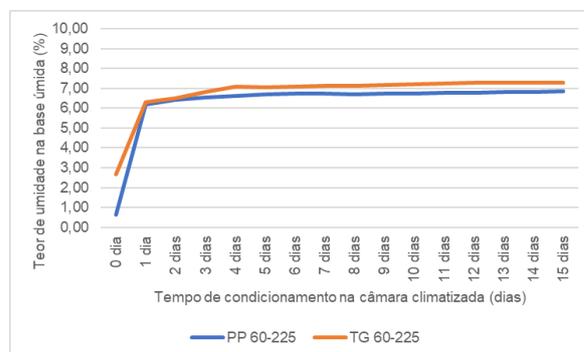
Jiang *et al.* (2021) e Hao *et al.* (2013), conferiram em seus trabalhos, que as 8h iniciais do material tratado por torrefação ocorre o pico máximo de adsorção de umidade pelos poros da biomassa e biochar, ensaiados em diferentes tempos e temperaturas de torrefação. Semelhante ao que ocorreu neste trabalho e ao que Araldi (2022) constatou nos seus testes.

Uma constatação a ser declarada é o efeito da rugosidade ou aspereza dos *pellets* sob efeito de torrefação. Quanto maior a incidência de temperatura e tempo de torrefação mais ásperos se tornam os *pellets*. Protásio *et al.* (2015), da mesma forma mencionam em seu trabalho que os *pellets* torrefados se tornam mais ásperos. Peng *et al.* (2015) ao torrefarem *pellets* de três diferentes tipos de biomassa comercial, à temperatura superior a 270°C, relataram comportamento semelhante neste aspecto.

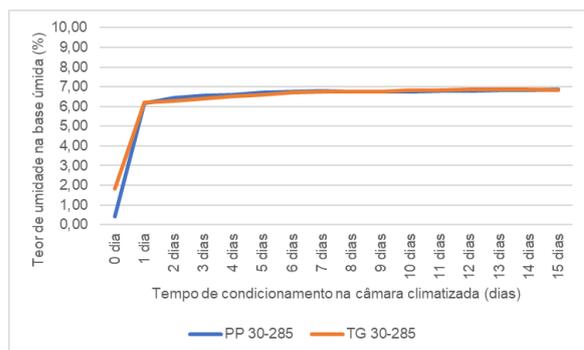
Figura 21. Sobreposição das curvas de estabilização do teor de umidade em câmara climatizada de *pellets* torrefados em torrefador piloto de tambor e termobalança gravimétrica, em diferentes tempos e temperaturas de torrefação.



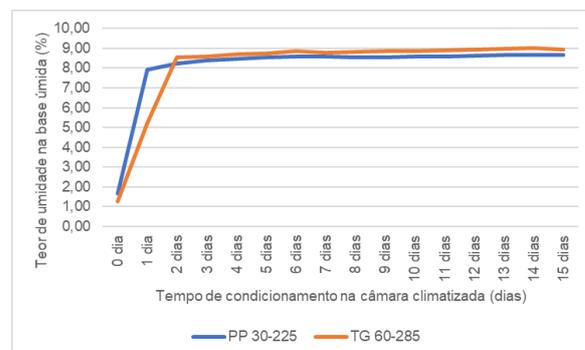
(a) Sobreposição das curvas de estabilização do TU (%) – PP 30-225 e TG 30-225



(b) Sobreposição das curvas de estabilização do TU (%) – PP 60-225 e TG 60-225



(c) Sobreposição das curvas de estabilização do TU (%) – PP 30-285 e TG 30-285



(d) Sobreposição das curvas de estabilização do TU (%) – PP 30-225 e TG 60-285

Legenda: PP: torrefação em torrefador piloto de tambor; TG: torrefação em termobalança gravimétrica

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

O processo de torrefação afetou o teor de finos, a durabilidade mecânica e a densidade a granel dos *pellets*. Houve redução do teor de finos e densidade a granel e aumento da durabilidade para os *pellets* torrefados em comparação com os *pellets in natura*. O tempo de residência não afetou estas propriedades, porém a temperatura sim. Entre as duas temperaturas analisadas, o teor de finos aumentou e a durabilidade mecânica e a densidade a granel dos *pellets* diminuíram com o aumento da temperatura de torrefação (Tabela 16).

Protásio *et al.* (2015), em pesquisa da caracterização de *pellets* de *Pinus in natura* x torrefados, encontraram para *pellets in natura* maior valor de densidade a granel (639 Kg/m³) em comparação aos torrefados em forno mufla.

Lima *et al.* (2017), ao torrefarem *pellets* de *Pinus sp.* em um torrefador de rosca-sem-fim, desenvolvido em laboratório, obtiveram como resultado da densidade a granel (602, 86 Kg/m³), em torrefação à 200°C, por 20 minutos de residência e, (563,72 Kg/m³) para a torrefação à 300°C, por 20 minutos de residência. Estes resultados corroboram de forma positiva com os resultados deste trabalho, tendo a oportunidade de comparação de dois protótipos distintos.

O fato da densidade a granel diminuir gradativamente por ação da temperatura e tempo de torrefação, pode se dar pela degradação térmica das hemiceluloses (PROTÁSSIO *et al.*; 2015); a degradação das hemiceluloses ocorre entre a faixa de temperatura de 220°C a 315°C (PRINS *et al.*, 2006).

Tabela 16. Propriedades físicas dos *pellets* antes e após o processo de torrefação, em torrefador piloto de tambor, em função do tempo e temperatura de torrefação.

Tratamento	Teor de finos (%) [*]	Durabilidade mecânica (%) [*]	Densidade a granel (kg/m ³)
PP – Testemunha	2,65 a	97,18 c	666,587 a
T1 PP – 30 – 225	0,18 c	99,78 a	655,145 b
T2 PP – 60 – 225	0,13 c	99,87 a	652,083 b
T3 PP – 30 – 285	0,38 b	99,60 b	637,580 c
CV (%)	5,16	0,11	0,42

* Teor de umidade no qual as análises de teor de finos e durabilidade foram realizadas: PP (6,35%); T1 (1,33%); T2 (1,29%); T3 (1,36%).

Legenda: CV: coeficiente de variação experimental (%).

Legenda: Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente pelo Teste de Scott Knott ($\alpha = 0,05$).

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

A durabilidade mecânica dos *pellets* torrefados apresentaram valores elevados, acima de 99%, superiores até ao valor médio dos *pellets in natura*. Garcia (2010) avaliando a qualidade de *pellets* produzidos para geração de energia no Brasil, encontrou valores entre 96,3% e 98,1%. Segundo o autor, os *pellets* de madeira

produzidos no Brasil têm alta durabilidade mecânica com valores superiores à 80%, seguindo a metodologia descrita na norma CEN/TS 15210 -1. O processo de torrefação contribuiu para tornar os *pellets* mais duros e menos quebradiços, contrariando o descrito por JOSHI *et al.* (2015) e PIERSA *et al.* (2022). Este efeito tem correlação direta com o processo de tamboreamento dos *pellets*, originando dentro do tambor uma geração de finos mais substancial. Gerando finos dos *pellets* mais quebradiços, e ao final da torrefação, ficam intactos os *pellets* de maior resistência, este efeito explica novamente o que já foi relatado na perda de massa.

Lima *et al.* (2017), ao torrefarem *pellets* de *Pinus sp.* em um torrefador de rosca-sem-fim, desenvolvido em laboratório, tiveram como contribuição na torrefação, o aumento da durabilidade da biomassa torrefada, em comparação aos *pellets in natura*, na faixa de temperatura de 250°C a 300°C, contrário deste trabalho, qual obteve melhor resultado à 225°C. Os autores acrescentam que houve melhoria no teor de finos com o aumento da temperatura de torrefação (300°C), efeito contrário deste trabalho, qual encontrou melhor resultado para teor de finos, na temperatura de (225°C). Pode ser observado, que a menor temperatura ocasionou menor efeito na resistência dos *pellets*.

O processo de torrefação em torrefador piloto de tambor diminuiu significativamente o teor de umidade dos *pellets* (Tabela 17). Tanto o tempo quanto a temperatura afetaram o teor de umidade, sendo que o aumento da temperatura e do tempo de residência reduziram o teor de umidade progressivamente. Para a composição química imediata dos *pellets* a torrefação não teve efeito nas propriedades dos pellets (Tabela 17). Tanto a temperatura como o tempo de torrefação não tiveram efeito sobre o teor de voláteis, carbono fixo e teor de cinzas.

Tabela 17. Composição química imediata dos *pellets* antes e após o processo de torrefação, em função do tempo e temperatura de torrefação.

Tratamento	Torrefador piloto de tambor				Termobalança gravimétrica			
	TU (%)	TCF (%)	TV (%)	TC (%)	TU ¹ (%)	TCF (%)	TV (%)	TC (%)
PP – Testemunha	5,62 a	13,17 a	86,16 a	0,68 a	4,77	13,17 b	86,16 a	0,68 b
T1 30–225	1,64 b	13,16 a	86,18 a	0,66 a	1,51	11,00 b	88,67 a	0,33 b
T2 60–225	1,18 c	13,99 a	85,55 a	0,47 a	2,66	13,65 b	84,87 a	1,48 a

T3 30–285	1,08 d	15,77 a	83,95 a	0,29 a	1,83	38,32 a	61,53 b	0,15 b
T4 –60-285	-	-	-	-	1,26	40,99 a	58,56 b	0,45 b
CV (%)	0,46	12,36	1,78	77,71		8,67	2,53	55,23

Legenda: TU: teor de umidade na base úmida (%); TV: teor de voláteis (%); TCF: teor de carbono fixo (%), TC: teor de cinzas (%); CV: coeficiente de variação experimental (%).

Legenda: Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente pelo Teste de Scott Knott ($\alpha = 0,05$).

¹Para o teor de umidade não foi realizado o teste de médias, pois os 19 *pellets* torrefados foram submetidos ao ensaio de umidade de equilíbrio em câmara climatizada, na mesma placa de Petri e deste ensaio foi determinado o teor de umidade inicial dos tratamentos, não havendo portanto repetição no ensaio.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

Considerando o tratamento térmico realizado em termobalança termogravimétrica, a torrefação afetou a composição química dos *pellets*, diferentemente da torrefação no torrefador. Para o teor de voláteis e carbono fixo, somente a temperatura teve efeito sobre estas propriedades. O teor de voláteis diminuiu e o teor de carbono fixo aumentou na temperatura de 285°C, em relação a temperatura de 225°C e em relação aos *pellets* sem torrefação. Já o teor de cinzas não foi afetado pela torrefação.

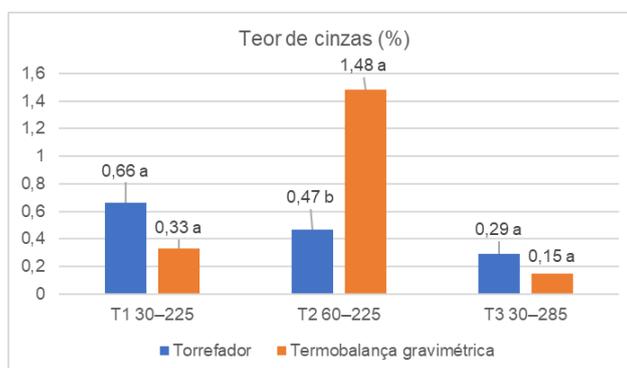
Comparando-se a torrefação realizada no torrefador e na balança termogravimétrica (Figura 22a, 22b e 22c), houve diferença entre os dois sistemas na temperatura de 285°C com tempo de residência de 30 minutos para o teor de carbono fixo e voláteis (Figura 22a e 22b), havendo maior perda de voláteis na torrefação na termobalança. Na temperatura de 225°C com tempo de residência de 30 minutos houve diferença somente no teor de voláteis (Figura 22b), com maior perda de voláteis na torrefação em torrefador piloto. Para a temperatura de 225°C com tempo de residência de 60 minutos, houve diferença somente para o teor de cinzas dos *pellets* (Figura 22c).

Figura 22. Variação da composição química imediata dos *pellets* torrefados em torrefador piloto de tambor e em termobalança gravimétrica.



(a) Teor de carbono fixo, comparando a torrefação em torrefador de tambor e termobalança.

(b) Teor de voláteis, comparando a torrefação em torrefador de tambor e termobalança.



(c) Teor de cinzas, comparando a torrefação em torrefador de tambor e termobalança.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

Assim como Protásio *et al.* (2015), na análise executada em termobalança deste trabalho, pode ser observado que houve aumento da concentração de carbono, a qual influencia diretamente o aumento do poder calorífico do combustível e, uma possível diminuição da concentração de oxigênio na madeira residual de *Pinus*.

O poder calorífico superior não foi alterado pela torrefação em torrefador piloto de tambor, nem devido a temperatura e nem em função do tempo de residência (Tabela 18). Já na torrefação em balança termogravimétrica, a temperatura de 285°C aumentou significativamente o poder calorífico superior dos pellets em relação a temperatura de 225°C e dos pellets não torrefados.

Chen *et al.* (2021), ao tratarem a biomassa em condição de torrefação severa 300°C, observaram a diminuição do poder calorífico da biomassa torrefada sob

influência de oxigênio. Efeito contrário deste trabalho que também operou em condição de torrefação severa a 285°C, com influência do oxigênio no ar atmosférico. Lima *et al.* (2017), encontraram poder calorífico superior de 5133,50Kcal/Kg, para torrefação de *pellets* de *Pinus sp.* em rosca-sem-fim, à temperatura de 250°C por 30 minutos de residência, 5064,50Kcal/Kg em temperatura de 300°C a 20 minutos de residência. Protásio *et al.*, (2015), encontraram 5200Kcal/Kg para torrefação em forno mufla à 220°C por 30 minutos e 5234Kcal/Kg em temperatura de 250°C por 30 minutos, valores similares a este trabalho, variando entre si, as temperaturas, tempo e equipamento de torrefação. Dentro da temperatura de 285°C, quanto maior o tempo de residência, menor foi o poder calorífico superior.

Tabela 18. Propriedades energéticas dos *pellets* antes e após o processo de torrefação, em função do tempo e temperatura de torrefação.

Tratamento	Torrefador piloto de tambor			Termobalança gravimétrica	
	Poder calorífico superior (kcal/kg)	Densidade energética unitária (Gcal/m ³)	Densidade energética a granel (Gcal/m ³)	Poder calorífico superior (kcal/kg)	Densidade energética unitária (Gcal/m ³)
PP – Testemunha	4856 a	5,53	3,24	4856 c	5,86
T1 – 30 – 225	A 4683 a	5,00	3,07	A 4756 c	5,47
T2 – 60 – 225	A 4890 a	4,91	3,19	A 4747 c	5,46
T3 – 30 – 285	B 4918 a	5,14	3,14	A 5359 a	7,18
T4 – 60 – 285	-	-	-	5174 b	5,09
CV (%)	4,62	-	-	1,68	-

Legenda: CV: coeficiente de variação experimental (%).

Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente pelo Teste de Scott Knott ($\alpha = 0,05$).

Para o poder calorífico superior entre os sistemas de torrefação: Médias antecedidas de mesma letra maiúscula, NA LINHA, não diferem estatisticamente pelo Teste de Scott Knott ($\alpha = 0,05$). CV = 3,79% (T1 – 30-225); CV = 4,05% (T2 – 60-225); CV = 3,24% (T3 – 30 -285).

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

Comparando-se as variações entre os sistemas de torrefação (torrefador e termobalança gravimétrica), somente para o tratamento de 285°C com 30 minutos de

residência que a termobalança foi mais eficiente, contribuindo de forma significativa para o aumento do poder calorífico superior.

A densidade energética unitária dos *pellets*, decresceu gradativamente em relação aos *pellets* não torrefados com o aumento da temperatura e tempo de residência na torrefação com o torrefador piloto de tambor. Para a torrefação em termobalança, a densidade energética unitária reduziu em relação aos *pellets* não torrefados para a temperatura de 225°C, nos dois tempos de residência (30 e 60 minutos) e para a temperatura de 285°C com 60 minutos de residência. A temperatura de 285°C, com 30 minutos de residência apresentou o melhor desempenho para a densidade energética unitária dos *pellets* (Figura 23).

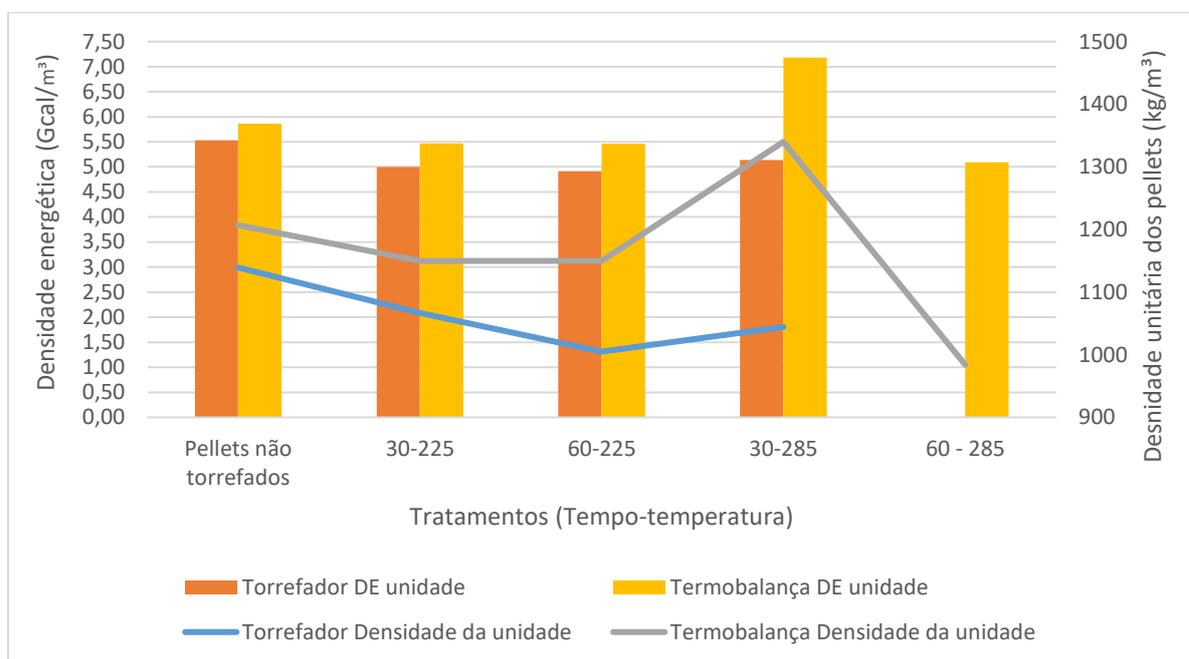
Em ambos os sistemas de torrefação, a densidade energética reduz gradativamente na temperatura de 225°C, com o aumento do tempo de residência e aumenta para a temperatura de 285°C, com tempo de residência de 30 minutos (Figura 23). Além disso, os valores de densidade energética dos *pellets* torrefados na termobalança foram ligeiramente superiores aos obtidos no torrefador piloto de tambor.

As análises em termobalança do presente trabalho, contrariam ao que Medic *et al.* (2012) mencionaram, em relação à correlação existente do melhoramento da densidade energética e aumento do carbono fixo, estarem diretamente ligados ao tempo de residência, sendo que, para este trabalho, o efeito não foi sobre o tempo de residência e, sim pela temperatura de torrefação. Assim, como Thengane *et al.* (2022), verificaram o efeito da temperatura, sendo mais significativo que o tempo de residência. Carneiro-Junior (2022), lembra-nos que maior tempo de residência, pode ocasionar maior gasto energético, para geração de *pellets* torrefados.

Aplicando-se o cálculo do coeficiente de correlação de Pearson entre a densidade energética unitária dos *pellets* e a densidade unitária dos *pellets* a correlação entre estas variáveis apresentou $r = 0,92$, tanto para o torrefador, quanto para a termobalança. Portanto, a influência da densidade unitária dos *pellets* sobre a densidade energéticas foi muito superior ao efeito do poder calorífico superior ($r = 0,20$ para o torrefador e $r = 0,23$ para a termobalança) sobre esta variável.

A densidade energética a granel também foi menor para os *pellets* torrefados em relação aos *pellets* não torrefados. No entanto, para a densidade energética a granel, o poder calorífico superior ($r = 0,66$) teve maior correlação com a densidade energética que a densidade da unidade ($r = 0,46$).

Figura 23. Densidade energética unitária de *pellets* torrefados em diferentes sistemas de torrefação, e em função do tempo e temperatura de torrefação.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

Com relação a degradação térmica dos *pellets*, analisada por meio da análise termogravimétrica (TGA) em termobalança, a temperatura inicial de degradação térmica (TIPM) variou em função da temperatura e tempo de residência, na torrefação executada no torrefador piloto (Tabela 19). A temperatura inicial de degradação térmica diminuiu com a redução da temperatura e do tempo de residência, porém sem efeito sobre a porcentagem de massa remanescente nesta temperatura (MIPM).

Para a temperatura de maior velocidade de perda de massa (TVPM), esta temperatura variou em função de temperatura e tempo de torrefação, aumentando com a temperatura e o tempo de residência. Porém, a massa remanescente (MVPM), nesta condição, foi similar a massa dos *pellets* sem torrefação, na temperatura de 225°C com tempo de 30 minutos. Entre as temperaturas de torrefação, houve efeito da temperatura, com menor massa remanescente na maior temperatura. Dentro da temperatura de 225°C, houve efeito do tempo de residência, reduzindo a massa com o aumento do tempo de residência.

A temperatura de estabilização da massa (TEM) foi similar tanto para os *pellets* não torrefados, quanto entre todos os tratamentos.

Desta forma, no torrefador de tambor, os *pellets* torrefados a 285°C por 30 minutos foram mais estáveis quanto a degradação térmica (Figura 24d).

Tabela 19. Comportamento da degradação térmica dos *pellets* torrefados em torrefador piloto de tambor, em função do tempo de temperatura de torrefação.

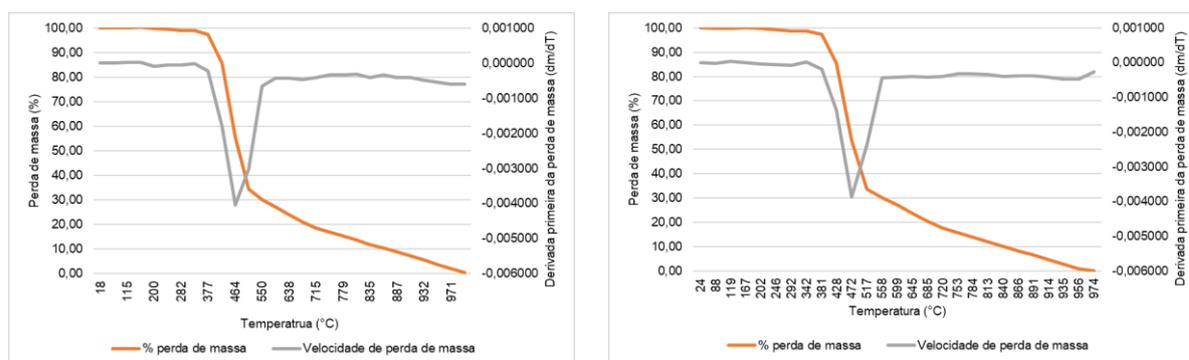
Tratamento	TIPM (°C)	MIPM (%)	TVPM (°C)	MVPM (%)	TEM (°C)	TC (%)
PP	200 a	99,67 a	464 d	54,18 a	985 a	0,54 a
T1 PP – 30 – 225	88 d	99,75 a	472 c	50,18 a	979 a	0,12 a
T2 PP – 60 – 225	90 c	99,73 a	478 b	44,39 b	980 a	0,93 a
T3 PP – 30 – 285	92 b	99,67 a	486 a	44,74 b	967 a	0,17 a
CV (%)	0,74	0,08	0,56	7,07	1,78	95,94

TIPM: Temperatura Inicial de Perda de Massa; MIPM: massa remanescente na temperatura de início de perda de massa; TVPM: temperatura na máxima velocidade de perda de massa; MVPM: Massa remanescente na máxima velocidade de perda de massa; TEM: Temperatura de estabilização da massa.

Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente pelo Teste de Scott Knott ($\alpha = 0,05$).

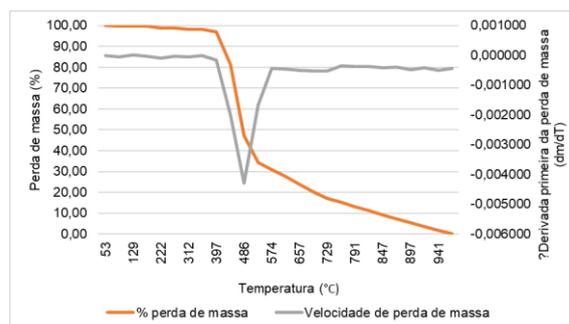
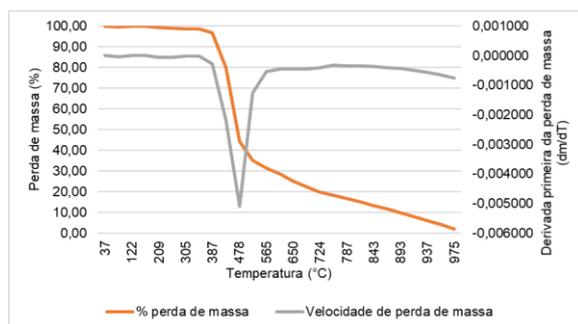
Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

Figura 24. Degradação térmica dos *pellets* torrefados em torrefador piloto de tambor, em função da temperatura e tempo de residência.



(a) *Pellets* sem torrefação (testemunha).

(b) *Pellets* torrefados com 225°C por 30 minutos.



(c) *Pellets* torrefados com 225°C por 60 minutos.

(d) *Pellets* torrefados com 285°C por 30 minutos.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

Na torrefação em termobalança, para todas as variáveis de análise da degradação térmica (Tabela 20), a torrefação a 225°C com 30 minutos não diferiu dos *pellets* não torrefados. A temperatura inicial de degradação térmica (TIPM) variou em função da temperatura e em função também do tempo de residência na temperatura de 225°C. A torrefação, temperatura e tempo de residência também não afetaram a massa remanescente (MIPM) na TIPM.

Na temperatura de maior velocidade de perda de massa (TVPM), houve efeito da temperatura, e do tempo de residência somente para a temperatura de 225°C. Já a massa remanescente na maior velocidade de perda de massa (MVPM), variou somente em função da temperatura.

Tabela 20. Comportamento da degradação térmica dos *pellets* torrefados em termobalança gravimétrica, em função do tempo de temperatura de torrefação.

Tratamento	TIPM (°C)	MIPM (%)	TVPM (°C)	MVPM (%)	TEM (°C)	TC (%)
PP	200 a	99,67 a	464 c	54,18 a	985 a	0,54 a
T1 – 30 – 225	201 a	99,83 a	464 c	52,06 a	997 a	0,39 a
T2 – 60 – 225	86 c	99,71 a	469 b	51,64 a	999 a	0,32 a
T3 – 30 – 285	89 b	99,52 a	1000 a	4,75 b	1000 a	0,32 a
T4 – 60 – 285	90 b	99,59 a	998 a	7,66 b	994 a	1,44 a
CV (%)	0,65	0,15	0,35	10,89	0,68	83,44

TIPM: Temperatura Inicial de Perda de Massa; MIPM: massa remanescente na temperatura de início de perda de massa; TVPM: temperatura na máxima velocidade de perda de massa; TEM: Temperatura no início da estabilização da perda de massa; MVPM: Massa

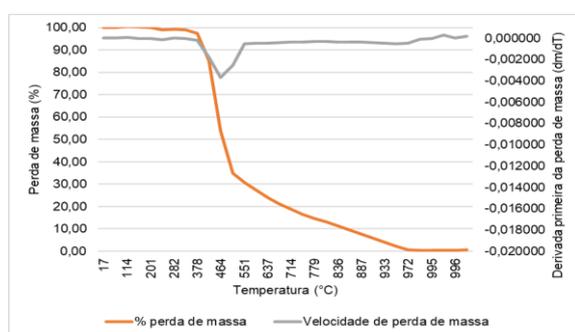
remanescente na máxima velocidade de perda de massa; TEM: Temperatura de estabilização da massa.

Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente pelo Teste de Scott Knott ($\alpha = 0,05$).

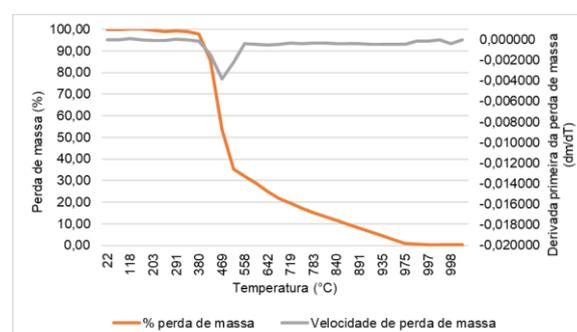
Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

Na termobalança, os *pellets* torrefados em 285°C foram mais estáveis termicamente, independentemente do tempo de residência (Figura 25c e 25d).

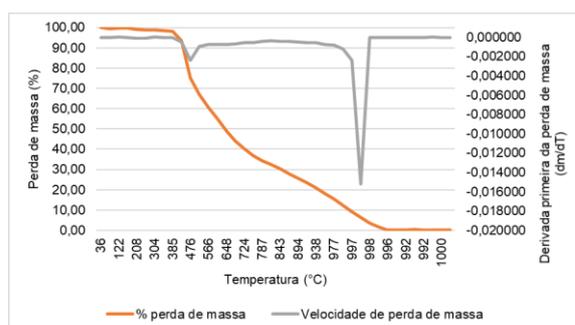
Figura 25. Degradação térmica dos *pellets* torrefados em balança termogravimétrica, em função da temperatura e tempo de residência.



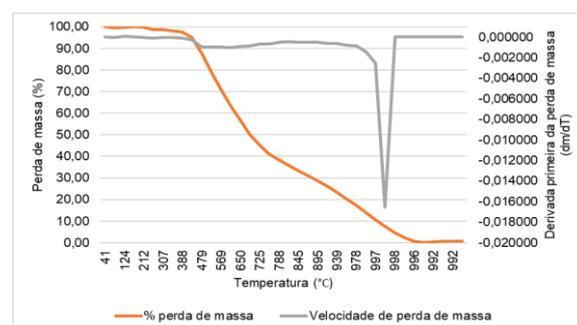
(a) *Pellets* torrefados com 225°C por 30 minutos.



(b) *Pellets* torrefados com 225°C por 60 minutos.



(c) *Pellets* torrefados com 285°C por 30 minutos.



(d) *Pellets* torrefados com 285°C por 60 minutos.

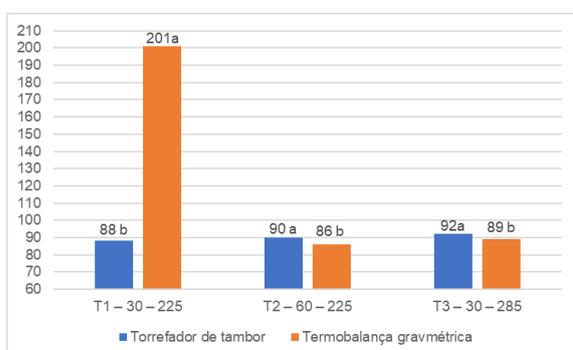
Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

Comparando a degradação térmica entre os dois sistemas de torrefação, houve diferença na temperatura inicial de perda de massa em todas as condições de ensaio entre o torrefador e a balança termogravimétrica (Figura 26a). Com relação a temperatura de maior velocidade de perda de massa, em todas as temperaturas houve diferença de comportamento da torrefação entre o torrefador e a termobalança. Na

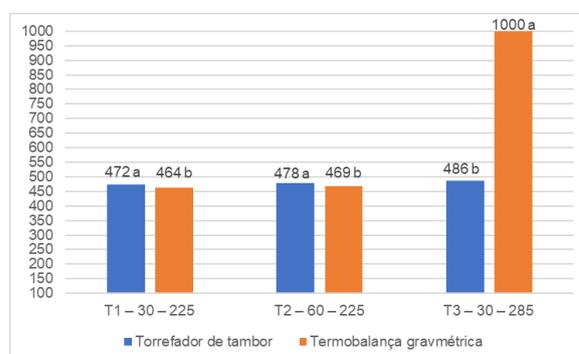
temperatura de 225°C, para os dois tempos de residência, a temperatura de maior velocidade de perda de massa foi maior no torrefador de tambor. Na temperatura de 285°C, com 30 minutos, a maior temperatura foi para a termobalança (Figura 26b). Somente neste tratamento houve diferença na massa remanescente, sendo a maior massa para a termobalança (Figura 26c).

Para a temperatura de estabilização da massa final, houve diferença entre os sistemas de torrefação, somente na temperatura de 225°C, para ambos os tempos de residência, sendo a maior temperatura observada na termobalança (Figura 26d)

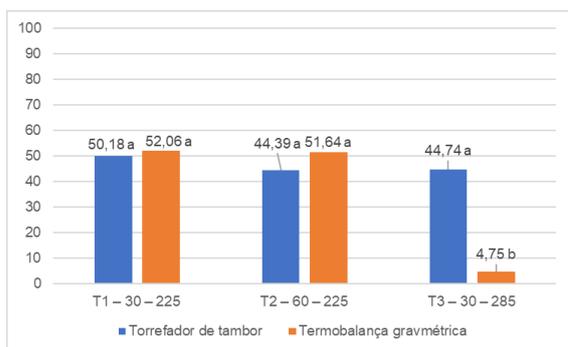
Figura 26. Variações nos parâmetros de degradação térmica entre o torrefador piloto de tambor e a termobalança gravimétrica.



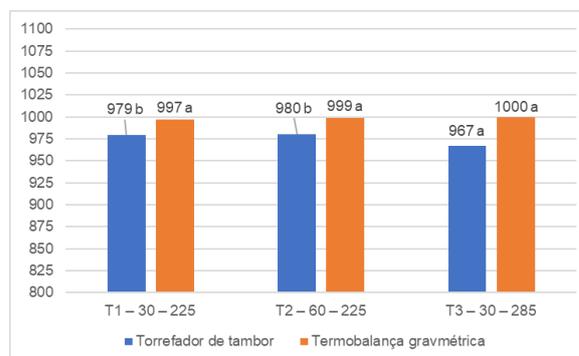
(a) Variações da temperatura inicial de perda de massa entre o torrefador de tambor e termobalança gravimétrica.



(b) Variações da temperatura de maior velocidade de perda de massa entre o torrefador de tambor e termobalança gravimétrica.



(c) Variações da massa remanescente na temperatura de maior velocidade de perda de massa entre o torrefador de tambor e termobalança gravimétrica.



(d) Variações da temperatura de estabilização da massa final entre o torrefador de tambor e termobalança gravimétrica.

Com intuito de auxiliar à verificação dos efeitos físicos e químicos, ocorridos pelo efeito da torrefação, tanto em tambor rotativo, quanto em termobalança gravimétrica, foi elaborado a (Tabela 21), evidenciando quais aspectos foram alterados pelo processo de torrefação, realizados nos *pellets* de *Pinus*.

Tabela 21. Comparativo entre os efeitos Físico-químicos, ocasionados pela torrefação de *pellets* de *Pinus*, em torrefador piloto de tambor e termobalança gravimétrica.

Propriedade	Torrefador		Termobalança gravimétrica		Efeito da Torrefação pelo tempo e temperatura	
	Tempo	Temperatura	Tempo	Temperatura	Torrefador	Termobalança
Perda de massa	✓	✓	285°C	✓	✓	✓
Diâmetro	✓	✓	285°C	✓	✓	✓
Comprimento	✓	✓	60 min	60 min	✓	✓
Volume	✓	✓	225°C	✓	✓	✓
Densidade da unidade	✓	✗	285°C	✓	✓	✓
Umidade de Equilíbrio	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Teor de Finos	✗	✓	*	*	✓	*
Durabilidade Mecânica	✗	✓	*	*	✓	*
Densidade a Granel	✗	✓	*	*	✓	*
Teor de Umidade	✓	✓	*	*	✓	*
Carbono Fixo	✗	✗	✗	285°C	✗	✓
Teor de Voláteis	✗	✗	✗	285°C	✗	✓
Teor de Cinzas	✗	✗	225°C	✗	✗	✓
PSC	✗	✗	285°C	✗	✗	✓
TIPM	✓	✓	225°C	✗	✓	✓
MIPM	✗	✗	✗	✗	✗	✗
TVPM	✓	✓	225°C	✗	✓	✓
MVPM	✓	✗	✗	✗	✓	✓
TEM	✗	✗	✗	✗	✗	✗

Legenda: ✓: Houve efeito da torrefação; ✗: Não Houve efeito da torrefação; *: Não pode ser realizado comparação, pois estes testes não foram executados em termobalança, como descrito no trabalho.

Para o campo onde encontram-se apenas valores de temperatura (°C) ou tempo (min), a torrefação só teve efeito na condição informada.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

5 CONCLUSÕES

5.1 AVALIAÇÃO DA REPLICAÇÃO DA TORREFAÇÃO REALIZADA NO TORREFADOR PILOTO DE TAMBOR EM TERMOBALANÇA GRAVIMÉTRICA

De forma geral, a torrefação em termobalança demonstrou que o comportamento de degradação térmica dos *pellets* foi diferente em função da temperatura de torrefação. A perda de massa total foi menor na temperatura de 225 °C, sem variação significativa em função do tempo de residência. Para a temperatura de 285°C, o tempo de residência afetou a temperatura inicial de perda de massa e a estabilidade da massa no início da torrefação. A perda de massa total aumentou significativamente com o aumento do tempo de residência na temperatura mais alta de torrefação.

5.2 EFEITO DA TEMPERATURA E DO TEMPO DE RESIDÊNCIA NA QUALIDADE DOS PELLETS TORREFADOS EM TORREFADOR PILOTO DE TAMBOR E EM TERMOBALANÇA GRAVIMÉTRICA

5.2.1 Quanto às dimensões e perda de massa

A perda de massa no torrefador foi muito maior que a observada na termobalança, influenciada principalmente pela movimentação dos *pellets* no tambor, o que provocou quebra dos mesmos e aumento da perda de massa durante a torrefação.

A termobalança expressou somente a perda de massa ocasionada pela torrefação. O processo de torrefação contribui significativamente para a perda de massa dos *pellets*. Além disso, a temperatura de torrefação teve efeito na perda de massa. Para a menor temperatura, não houve efeito do tempo de residência, enquanto para maior temperatura, quanto maior o tempo de residência, maior é a perda de massa.

Quanto as dimensões, a torrefação em torrefador piloto alterou as dimensões e a densidade unitárias dos *pellets*, mas o efeito foi diferente em cada variável medida. Para o diâmetro, houve o efeito de temperatura, e também do tempo de residência para a menor temperatura. Comprimento e volume tiveram o mesmo comportamento, com redução gradativa com aumento da temperatura e tempo de residência. A densidade da unidade sofre o efeito somente do tempo de residência, reduzindo a densidade com o aumento do tempo de residência.

Na Termobalança, a torrefação também afetou o diâmetro, com efeito da temperatura, mas com diferença entre os tempos de residência somente na maior temperatura. A densidade unitária reduziu com a temperatura de torrefação, com exceção da temperatura de 285°C e 30 minutos, que apresentou a maior densidade unitária. O tempo de residência não teve efeito da densidade para a menor temperatura.

O torrefador piloto de tambor e a termobalança apresentaram efeito diferenciado em relação as dimensões e densidade da unidade dos *pellets* nas situações de torrefação analisadas.

5.2.2 Quanto a adsorção de água e umidade de equilíbrio

Quanto a adsorção de umidade e estabilização da umidade de equilíbrio, a torrefação reduziu a umidade dos *pellets*, mantendo esta mais baixa ao longo do tempo em relação aos *pellets* não torrefados, sob as mesmas condições ambientais. Pellets torrefados com menor temperatura e maior tempo de residência tiveram o mesmo comportamento de *pellets* torrefados com maior temperatura e menor tempo de residência, apresentando os menores teores de umidade após alcançarem o equilíbrio higroscópico.

O comportamento da adsorção de umidade e o equilíbrio higroscópico dos *pellets* torrefados em torrefador de tambor e termobalança gravimétrica foram similares entre si.

5.2.3 Quanto as propriedades físicas e energéticas dos *pellets*

A torrefação em tambor rotativo melhorou as propriedades físicas dos *pellets*, reduzindo o teor de finos e aumentando a durabilidade mecânica. Houve redução da densidade a granel, mas não de forma que os *pellets* não atinjam os critérios de qualidade internacionalmente exigidos. Para as propriedades físicas houve efeito da temperatura e do tempo de residência.

A composição química imediata e o poder calorífico superior dos *pellets* não foram alterados na torrefação no torrefador de tambor rotativo, enquanto que a torrefação em termobalança promoveu alteração da composição química imediata, reduzindo o teor de voláteis e aumentando o teor de carbono fixo com o aumento da temperatura, mas sem efeito do tempo de residência em ambas as temperaturas de ensaio. Houve aumento significativo do poder calorífico superior somente na temperatura mais elevada de torrefação, com influência do tempo de residência, para esta temperatura.

A termobalança foi significativamente mais eficiente para a redução do teor de voláteis e aumento do teor de carbono fixo para a temperatura de 285 °C e 30 minutos, em relação aos demais tratamentos.

Portanto, a termobalança gravimétrica promoveu uma torrefação mais eficiente que o torrefador de tambor, melhorando efetivamente a qualidade dos *pellets*, aumentando a densidade energética dos *pellets*. Desta forma, melhorias devem ser feitas no equipamento para:

- Permitir a execução do processo em temperatura de torrefação severa (temperaturas acima de 275 à 300°C) com tempos de residência superiores a 30 minutos.
- Melhorar o controle de fornecimento de ar atmosférico para o torrefador ser capaz de alterar a composição química imediata dos *pellets* e aumentar seu poder calorífico de forma significativa.

Outros aspectos serão apresentados no capítulo: sugestão para trabalhos futuros.

5.2.4 Quanto à degradação térmica

Comparando a degradação térmica entre os dois sistemas de torrefação, houve diferença de comportamento na temperatura inicial de perda de massa e na temperatura de maior velocidade de perda de massa.

Para a temperatura de estabilização da massa final, houve diferença entre os sistemas de torrefação, somente na temperatura de 225°C, para ambos os tempos de residência, sendo a maior temperatura observada na termobalança.

Na temperatura de 225°C, para os dois tempos de residência, a temperatura de maior velocidade de perda de massa foi maior no torrefador de tambor. Na temperatura de 285°C, com 30 minutos, a maior temperatura foi para a termobalança. Somente neste tratamento houve diferença na massa remanescente, sendo a maior massa para a termobalança.

5.3 AVALIAÇÃO FINAL DO EFEITO DAS TEMPERATURAS E TEMPOS DE RESIDÊNCIA NA TORREFAÇÃO DE *PELLETS* DE MADEIRA DE *Pinus* EM TORREFADOR PILOTO DE TAMBOR

Considerando de forma conjunta todas as propriedades analisadas, para responder à questão de pesquisa que se colocou:

Quais são as temperaturas e tempos de residência que melhorarão a qualidade energética do *pellet* de madeira de *Pinus*, em um torrefador piloto rotativo?

As melhores condições de torrefação foram para a temperatura de 285°C e 30 minutos de tempo de residência, tanto para o torrefador piloto de tambor, quanto para a torrefação em termobalança gravimétrica.

Desta forma, para as hipóteses levantadas inicialmente neste trabalho de que:

- 1 – Maior temperatura contribuirá de forma mais significativa para a melhoria da qualidade física, energética e térmica dos *pellets* de *Pinus*.
- 2 – Maior tempo de residência contribuirá de forma mais significativa para a melhoria da qualidade física, energética e térmica dos *pellets* de *Pinus*.

A primeira hipótese foi comprovada, com a confirmação de que a melhor temperatura de torrefação foi de 285 °C. Porém, a segunda hipótese foi refutada, visto

que o menor tempo de residência contribuiu de forma mais efetiva para a melhoria da qualidade energética dos *pellets*.

O torrefador piloto de tambor rotativo, demonstrou seu potencial operacional diante das análises executadas, sendo necessários alguns ajustes buscando a eficiência total deste equipamento.

6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar através de analisador de gases, a quantidade de oxigênio existente na mistura ar/combustível, nas diferentes faixas de frequência impulsionadas pelo soprador centrífugo;
- Para a continuidade dos testes com *pellets*, sugere-se a modificação do reator do tambor, alterando-o para um sistema totalmente fechado, apenas com orifício de respiro. O sistema de carregamento tipo portinhola circular pela lateral do tambor, eliminando o carregamento superior;
- Realizar o levantamento do custo total operacional, para execução de *pellets* de madeira torrefados, em processo de torrefação suave e severa;
- Executar testes de bateladas com cavacos, objetivando a análise da performance operacional, de um material mais próximo de ser utilizado pelo consumidor público-alvo deste equipamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACHARYA, B.; DUTTA, A.; SULE, I. A review on advances of torrefaction technologies for biomass processing. **Biomass Conversion and Biorefinery**, 2, p. 349-369, 2012.
- ACHARYA, B.; DUTTA, A.; MINARET, J. Review on comparative study of dry and wet torrefaction. **Sustainable Energy technologies and Assessments**, v. 12, p. 26–37, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S221313881500048X?via%3Dihub>. Acessado em: 30 de setembro de 2023.
- ACHARYA, B.; DUTTA, A. Fuel property enhancement of lignocellulosic and nonlignocellulosic biomass through torrefaction. **Biomass Conversion Biorefinery** 6, n. 2, p. 139-149, 2016.
- ÁLVAREZ, A.; NOGUEIRO, D.; PIZARRO, C.; MATOS, M.; BUENO, J. L. Non-oxidative torrefaction of biomass to enhance its fuel properties. **Energy**, 158, p. 1-8, 2018.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D-1762**: Determination of Nitrogen Oxides, Carbon Monoxide and Oxygen Concentrations in Emissions from Natural Gas-Fired Reciprocating Engines, Combustion Turbines, Boilers and Process Heaters using Portable Analyzers. West Conshohocken, 2007.
- ARALDI, A. **Desenvolvimento de protótipo para torrefação de biomassa visando à geração de energia**. 2022. 95 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal). – Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Lages, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 14929** – Madeira – Determinação de teor de umidade de cavacos – Método por secagem em estufa. Rio de Janeiro, 2003.
- BACH, Q.-V.; TRAN, K.-Q.; KHALIL, R. A.; SKREIBERG, Ø, SEISENBAEVA; G. Comparative assessment of wet torrefaction. **Energy Fuels**, 27, n. 11, p. 6743-6753, 2013.
- BACH, Q.-V.; SKREIBERG, Ø. Upgrading biomass fuels via wet torrefaction; A review and comparison with dry torrefaction. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 54, p. 665-677, 2016.
- BARSKOV, S.; ZAPPI, M.; BUCHIREDDY, P.; DUFRECHE, S.; GUILLORY, J.; GANG, D.; HERNANDEZ, R.; BAJPAI, R.; BAUDIER, J.; COOPER, R.; SHARP, S. Torrefaction of biomass: a review of production methods for biocoal from cultured and waste lignocellulosic feedstocks. **Renewable Energy**, v. 142, p. 624 – 642, 2019.

BATISTA, R. R.; GOMES, M. M. Effects of chemical composition and pyrolysis process variables on biochar yields: correlation and principal component analysis. **Forest Products Science and Technology**, Floresta Ambient, 28, 3, p. 12. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/2179-8087-FLORAM-2021-0007>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/floram/a/jxB8hx5YXDtv3JfYMwP8Wrn/?lang=em>. Acessado em: 19 de abril de 2023.

BERGMAN, P. C.; BOERSMA, A.; ZWART, R.; KIEL, J. Torrefaction for biomass co-firing in existing coal-fired power stations. **Energy Research Centre of the Netherlands**, ECN-C-05-013, 2005.

BRACHI, P.; MICCIO, F.; RUOPPOLO, G.; STANZIONE, F.; MICCIO, M. Pressurized Steam Torrefaction of Wet Agro-industrial Residues. **Chemical Engineering Transactions**, 65, p. 49-54, 2018.

BRAND, M. A.; JACINTO, R. C.; CUNHA, A. B. da. QUALIDADE DE PELLETS DE GALHOS SECOS DE ARAUCÁRIA E PARTÍCULAS DE PINUS. **ENERGIA NA AGRICULTURA**, 33(4), p. 303–312, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.17224/EnergAgric.2018v33n4p303-312>. Acessado em: 23 de novembro de 2022.

BRIDGEMAN, T. G.; JONES, J. M.; WILLIAMS, A.; WALDRON, D. J. An investigation of the grindability of two torrefied energy crops. **Fuel**, v. 89, n. 12, p. 39611-3918, 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S001623611000325X>. Acessado em: 27 de janeiro de 2023.

BRITO, J. O. O uso energético da madeira. **Estudos Avançados**, São Paulo, v 21, n. 59, p. 185–193, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-40142007000100015> Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ea/a/VJ7X8vqmj8LZWvZzzKx6wdj/?lang=pt>. Acessado em: 27 de dezembro de 2022.

CAO, L.; YUAN, X.; JIANG, L.; LI, C.; XIAO, Z.; HUANG, Z.; CHEN, X.; ZENG, G.; LI, H. Thermogravimetric characteristics and kinetics analysis of oil cake and torrefied biomass blends. **Fuel**, 175, p. 129-136, 2016.

CARNEIRO-JUNIOR, J. A. de M. **Desenvolvimento de Sistema Contínuo para Torrefação de Biomassa para Fins Energéticos**. 2022. P.200. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Bahia, 2022.

CHEN, W.-H.; KUO, P.-C. A study on torrefaction of various biomass materials and its impact on lignocellulosic structure simulated by a thermogravimetry, **Energi**, v. 35, ed. 6, p. 2580-2586, 2010.

CHEN, W.-H.; LU, K.-M.; LIU, S.-H.; TSAI, C.-M. et al. Biomass torrefaction characteristics in inert and oxidative atmospheres at various superficial velocities. **Bioresource Technology**, 146, p. 152-160, 2013.

CHEN, W.-H.; LIN, B.-J.; LIN, Y.-Y.; CHU, Y.-S. et al. Progress in biomass torrefaction: Principles, applications and challenges. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 82, 100887, 2021.

COSTA, L. J. **Relação água-carvão vegetal de eucalipto produzido em diferentes temperaturas**. 2020. P.105. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2020.

COSTA, A. C. L. A.; CASTANHO, F. P.; FARIA, J. I.; PARMEGGIANI, R. P.; SPADIM, E. R. Energia renovável e a biomassa florestal – estado da arte. Em: GUERRA, S. P. S.; EUFRADE JUNIOR, H. de J. **Recuperação energética da biomassa de tocos e raízes de florestas plantadas**. Botucatu: Fepaf, Cap. 2, p. 38-44, 2019. E-book. Disponível em: https://www.fepaf.org.br/order-received/thank-you/?key=wc_order_4Ycx2TpuwBiUP&order_id=16986. Acessado em: 14 de 97aneiro de 2023.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG – **DIN 51900**: Determination of gross calorific value by the bomb calorimeter and calculation of net calorific value (Ed.). Berlin, 2003.

DHUNGANA, A.; BASU, P.; DUTTA, A. Effects of reactor design on the torrefaction of biomass. **Journal of energy resources technology**, 134, n. 4, 2012.

DI BLASI, C. Combustion and gasification rates of lignicellulosic chars, **Progress In Energy and Combustion Science**, 35, p. 121 – 140, 2009.

EPE, Empresa de pesquisa energética, 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acessado em 09 de novembro de 2022.

ERCAN, B.; ALPER, K.; UCAR, S. Comparative studies of hydrochars and biochars produced from lignocellulosic biomass via hydrothermal carbonization, torrefaction and pyrolysis, **Journal of the Energy Institute**, 109, 2023.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION – Technical Specification **CEN/TS 15103**: Solid biofuels – Methods for the determination of bulk density. London, 2009.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION – Technical Specification **CEN/TS 15210-1**: Methodos for determination mechanical durability of *pellets*. Solid biofuels – fuel specification and classes. London, 2010.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION e CEN. **EN 16127**. Solid Biofuels. Determination of length and diameter of *pellets*. Brussels, p. 10, 2012.

GARCIA, D. P. **Caracterização química, física e térmica de *pellets* de madeira produzidos no Brasil**. 101f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Faculdade de Engenharia Guaratinguetá/ Campus de Guaratinguetá, 2010.

GEORGE, A.; BRANDT, A.; TRAN, K.; ZAHARI, S. M. N. S. et al. Design of low-cost ionic liquids for lignocellulosic biomass pretreatment. **Green Chemistry**, 17, n. 3, p. 1728-1734, 2015.

GHIASI, B.; KUMAR, L.; FURUBAYASHI, T.; LIM, C. J.; BI, X.; KIM, C. S.; SOKHANSANJ, S. Densified biocoal from woodchips: Is it better to do torrefaction before or after densification? **Applied Energy**, v. 134, p. 133-142, 2014.

HAO, H. M.; YANG, H. P.; LIU, R. J.; CHEN, P. LI.; CHEN, H. P. Influence of torrefaction agricultural straw hydrophilic property, **Chinese Society for Electrical Engineering**, p. 90-94, 2013.

HILL, S. J.; GRIGSBY, W. J.; HALL, P. W. Chemical and cellulose crystallite changes in *Pinus radiata* during torrefaction. **Biomass and Bioenergy**, v. 56, p. 92-98, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.04.025>. Acessado em: 30 de janeiro de 2023.

JIANG, H.; YE, Y.; LU, P.; ZHAO, M.; XU, G.; CHEN, D.; SONG, T. Effects of torrefaction conditions on the hygroscopicity of biochars, **Journal of the Energy Institute**, v. 96, p. 260-268, 2021.

JOSHI, Y.; MARCELLO, M. di; JONG, W. de. Torrefaction: mechanistic study of constituent transformations in herbaceous biomass. **Journal of Analytical Applied Pyrolysis**, 115, p. 353-361, 2015.

KHAN, T. A.; SAUD, A. S.; JAMARI, S. S.; RAHIM, M. H. Ab., PARK, J. H.; KIM, H. J. Hydrothermal carbonization of lignocellulosic biomass for carbon rich material preparation: A review. **Biomass and Bioenergy**, 130, p. 105384, 2019.

KIEL, J. H. A. Torrefaction for upgrading biomass into commodity fuel. **Energy research Centre of the Netherlands ECN**, Petten (Netherlands), p. 25, 2011.

KIZUKA, R.; ISHII, K.; SATO, M.; FUJIYAMA, A. Characteristics of wood *pellets* mixed with torrefied rice straw as a biomass fuel. **International Journal of Energy Environmental Engineering**, 10, n. 3, p. 357- 365, 2019.

KOTA, K. B.; SHENBAGARAJ, S.; SHARMA, P. K.; SHARMA, A. K.; GHODKE, P. K.; CHEN, W.-H. Biomass torrefaction: An overview of process and technology assessment based on global readiness level. **Fuel**, v. 324, Part. B, Article. 124663, 15 september 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236122015113#b0470>. Acessado em 21 de outubro de 2022.

KUDO, S.; OKADA, J.; IKEDA, S.; YOSHIDA, T.; ASANO, S.; HAYASHI, J.-I. Improvement of pelletability of woody biomass by torrefaction under pressurized steam. **Energy & Fuels**, 33, n. 11, p. 11253-11262, 2019.

KUO, P.-C.; WU, W.; CHEN, W.-H. Gasification performances of raw and torrefied biomass in a downdraft fixed bed gasifier using thermodynamic analysis, **Fuel**, 117, p. 1231-1241, 2014.

LAM, P. S.; SOKHANSANJ, S.; BI, X. T.; LIM, C. J.; MELIN, S. Energy input and quality of *pellets* made from steam-exploded Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii*). **Energy & Fuels**, 25, n. 4, p. 1521-1528, 2011.

LAM, P. S.; SOKHANSANJ, S.; BI, X. T.; LIM, C. J.; LARSSON, S. H. Drying characteristics and equilibrium moisture content of steam-treated Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii* L.). **Bioresource Technology**, v. 116, p. 396-402, 2012.

LIMA, L.; MAGALHÃES, M. A. de; SILVA, C. M. S. da; CARNEIRO, A. de S. C. O. Efeito da torrefação nas propriedades de *pellets* produzido com madeira de *Pinus sp.* In: Anais congresso brasileiro de ciência e tecnologia da madeira, 2017. **Anais eletrônicos**, Campinas, Galoá, 2017.

LOKMIT, C.; NAKASON, K.; KUBOON, S.; JIRATANACHOTIKUL, A.; PANYAPINYOPOL, B. A comparison of char fuel properties derived from dry and wet torrefaction of oil palm leaf and its techno-economic feasibility, **Materials Science for Energy Technologies**, v. 6, p. 192-204, 2023.

LUCIAN, M.; FIORI, L. Hydrothermal carbonization of waste biomass: Process design, modeling, energy efficiency and cost analysis. **Energies**, 10, n. 2, p. 211, 2017.

LUENGO, C. A.; FELFLI, F.E.F.; BEZZON, G. **Pirólise e Torrefação da biomassa**. In: Biomassa para energia. C. 10, P. 333-351, 2006.

MABEE, W. E.; GREGG, D. J.; ARATO, C.; BERLIN, A.; BURA, R.; GILKES, N.; MIROCHNIK, O.; PAN, X.; PYE, E. K.; SADDLER, J. N. Updates on softwood-to-ethanol process development. **Appl Biochem Biotechnol**, 129. P. 55-70, 2006. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1385/ABAB:129:1:55>. Acessado em: 19 de janeiro de 2023.

MAGALHÃES, M. A. de; CARNEIRO, A. D. C. O.; VITAL, B. R.; SILVA, C. M. S. de.; COSTA, E. V. S.; TRUGILHO, P. F. Chemical properties of *pellets* of *Pinus sp.* torrefied in a screw type reactor. **Floresta**, v. 48, n. 4, p. 493-502, 2018.

MAMVURA, T. A.; DANHA, G. Biomass torrefaction as an emerging technology to aid in energy production. **Heliyon**, v. 6, 3, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03531>. Disponível em: [https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440\(20\)30376-5?_returnURL=https%3a%2F%2Flinkinghub.elsevier.com%2Fretrieve%2Fpii%2FS2405844020303765%3Fshowall%3dtrue](https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440(20)30376-5?_returnURL=https%3a%2F%2Flinkinghub.elsevier.com%2Fretrieve%2Fpii%2FS2405844020303765%3Fshowall%3dtrue). Acessado em: 19 de abril de 2023.

MARTINEZ, C. L. M.; SAARI, J.; MELO, Y.; CARDOSO, M.; ALMEIDA, G. M. da; VAKKILAINEN, E. Evaluation of thermochemical routes for the valorization of solid coffee residues to produce biofuels: A Brazilian case. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 137, 2021.

MEDIC, D.; DARR, M.; POTTER, B.; SHAH, A. Effect of torrefaction process parameters on biomass feedstock upgrading. **Fuel**, 91, p. 8, 2012.

MORA-PALE, M.; MELI, L.; DOHERTY, T. V.; LINHARDT, R. J.; DORDICK, J. S. Room temperature ionic liquids as emerging solvents for the pretreatment of lignocellulosic biomass. **Biotechnology and bioengineering**, 108, n. 6, p. 1229-1245, 2011.

MUSHTAQ, F.; MAT, R.; ANI, F.N. A review on microwave assisted pyrolysis of coal and biomass for fuel production, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 39, p. 555-574, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032114005255>. Acessado em: 12 de abril de 2023.

NATARAJAN, P.; SURIAPPARAO, D. V.; VINU, R. Microwave torrefaction of *Prosopis juliflora*: Experimental and modeling study. **Fuel Processing Technology**, 172, p. 86-96, 2018.

NHUCHHEN, D.; BASU, P.; ACHARYA, B. A comprehensive review on biomass torrefaction, **Int. J Renew Energy Biofuels**, p. 1-56, 2014.

PELAEZ-SAMANIEGO, M. R.; YADAMA, V.; LOWELL, E.; ESPINOZA-HERRERA, R. A review of wood thermal pretreatments to improve wood composite properties. **Wood Science Technology**, 47, n. 6, p. 1285-1319, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00226-013-0574-3>. Acessado em: 30 de 100aneiro de 2023.

PENG, J.; WANG, J.; BI, X. T.; LIM, C. J.; SOKHANSANJ, S.; PENG, H.; JIA, D. Effects of thermal treatment on energy density and hardness of torrefied wood *pellets*. **Fuel Processing Technology**, v. 129, p. 168-173, 2015.

PIERSA, P.; UNYAY, H.; SZUFA, S.; LEWANDOWSKA, W.; MODRZEWSKI, R.; SLEZAK, R.; LEDAKOWICZ, S. An extensive review and comparison of modern biomass torrefaction reactors vs. Biomass pyrolysis – Part 1. **Energies**, v. 15, n. 6, p. 2227, 18 mar 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/em15062227>. Acessado em 18 de novembro de 2022.

PRINS, M. J.; PTASINSKI, K. J.; JANSEN, F. J. J. G. Torrefaction of wood. Part 2. Analysis of products. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 77, p. 35-40, 2006. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/148384345.pdf>. Acessado em 26 de dezembro de 2022.

PROTÁSIO, T. de P.; TRUGILHO, P. F.; SIQUEIRA, H. F. de; MELO, I. C. N. A. de; ANDRADE, C. R.; JUNIOR, J. B. G. Caracterização energética de *pellets in natura* e torreficados produzidos com madeira residual de *Pinus*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 35, n. 84, p. 435-442, 2015.

REIS, C. A. F.; MORAES, A. da C.; PEREIRA, A. V.; AGUIAR, A. V. de; SOUZA, V. A. de; BORGES, H. M. D. Diagnóstico do setor de florestas plantadas no estado de Goiás. Brasília, DF: **EMBRAPA**, p. 139, 2015.

REIS, C. A. F.; TALONE NETO, A.; BRUNCKHORST, A.; MOREIRA, J. M. M. A. P.; PEREIRA, A. V.; MORAES, A. da C. Cenário do setor de florestas plantadas no estado de Goiás. Colombo, PR: **EMBRAPA Florestas**, p. 79, 2017.

RIBEIRO, J. M. C.; GODINA, R.; MATIAS, J. C. d. O.; NUNES, L. J. R. Future perspectives of biomass torrefaction: Review of the current state-of-the-art and research development. **Sustainability**, 10, n. 7, p. 2323, 2018.

SILVA, A. G. **Condicionamento de resíduo de Eucalyptus grandis para produção de biocombustível sólido**. 2013, 135 p. Tese de Doutorado, Universidade Federal da Bahia, Instituto de Química, Salvador-BA, 2013.

SINGH, S.; CHAKRABORTY, J. P.; MONDAL, M. K. Optimization of process parameters for torrefaction of *Acacia nilotica* using response surface methodology and characteristics of torrefied biomass as upgraded fuel. **Energy**, v. 186, 2019.

THENGANE, S. K.; KUNG, K. S.; GOMEZ-BAREA, A.; GHONIEM, A. F. Advances in biomass torrefaction: Parameters, models, reactors, applications, deployment, and market. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 93, 2022.

WANG, C.; PENG, J.; LI, H.; BI, X. T.; LEGROS, R.; LIM, C.J.; SOKHANSANJ, S. Oxidative torrefaction of biomass residues and densification of torrefied sawdust to *pellets*, **Bioresource Technology**, v. 127, p. 318-325, 2013.

WANG, M. J.; HUANG, Y. F.; CHIUEH, P. T.; KUAN, W. H.; LO, S. O. Microwave-induced torrefaction of rice husk and sugarcane residues. **Energy**, v. 37, p. 177-184, 2012.

WEN, J. L.; SUN, S. L.; YUAN, T. Q.; XU, F.; SUN, R. C. Understanding the chemical and structural transformations of lignin macromolecule during torrefaction. **Applied Energy**, v. 121, p. 1-9, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.02.001>. Acessado em: 30 de janeiro de 2023.

YANG, H.; YAN, R.; CHEN, H.; ZHENG, C. et al. In-depth investigation of biomass pyrolysis based on three major components: hemicellulose, cellulose and lignin. **Energy Fuels**, 20, n. 1, p. 6, 2006.

YANG, W.; WU, S.; WANG, H.; MA, P.; SHIMANOUCI, T.; KIMURA, Y.; ZHOU, J. Efeito do processo de torrefação úmida e seca nas propriedades dos combustíveis sólidos derivados do bambu e do cedro japonês. **BioResources**, v. 12, n. 4, p. 8629–8640, 2017. Disponível em: <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/effect-of-wet-and-dry-torrefaction-process-on-fuel-properties-of-solid-fuels-derived-from-bamboo-and-japanese-cedar/>. Acessado em 30 de janeiro de 2023.