

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS FLORESTAIS E DA MADEIRA

TAYNÁ REBONATO OLIVEIRA

RELAÇÃO ENTRE A TEMPERATURA DE CARBONIZAÇÃO E AS
VARIÁVEIS DE COMBUSTÃO ESPONTÂNEA DO CARVÃO
VEGETAL

JERÔNIMO MONTEIRO
ESPÍRITO SANTO
2023

TAYNÁ REBONATO OLIVEIRA

RELAÇÃO ENTRE A TEMPERATURA DE CARBONIZAÇÃO E AS
VARIÁVEIS DE COMBUSTÃO ESPONTÂNEA DO CARVÃO
VEGETAL

Monografia apresentada ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Florestal.

Orientador: Dr. Ananias Francisco Dias Júnior

JERÔNIMO MONTEIRO
ESPÍRITO SANTO
2023

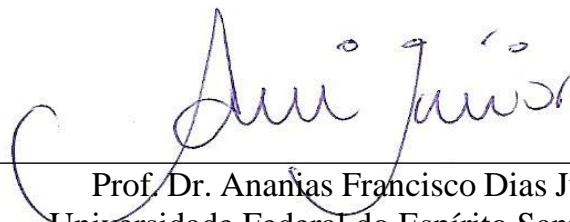
TAYNÁ REBONATO OLIVEIRA

**RELAÇÃO ENTRE A TEMPERATURA DE CARBONIZAÇÃO E
AS VARIÁVEIS DE COMBUSTÃO ESPONTÂNEA DO CARVÃO
VEGETAL**

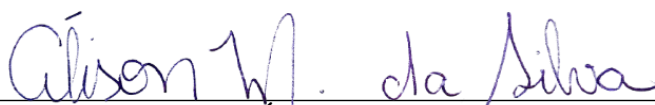
Monografia apresentada ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial na obtenção do título de Engenheira Florestal.

Aprovada em 14 de dezembro de 2023.

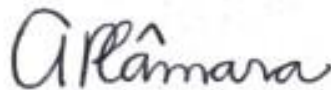
COMISSÃO EXAMINADORA



Prof. Dr. Ananias Francisco Dias Júnior
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador



DSc's Alison Moreira da Silva
Universidade de São Paulo



Profa. Dra. Ana Paula Camara da Silva
Universidade Estadual do Mato Grosso do Sul

Aos meus pais, Maria da Conceição e João
Batista e, aos meus avós, Ana Rebonato e
João Rebonato (*in memoriam*), que
sempre me apoiaram e me ajudaram

Dedico.

*Sem sonhos, a vida é uma manhã sem
orvalhos, um céu sem estrelas, um
oceano sem ondas, uma vida sem
aventura, uma existência sem sentido.*

- Augusto Cury

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Maria e João, que sempre fizeram e fazem, o possível e o impossível para os filhos. As minhas irmãs e irmãos, Léia, Nayara, Vanderlei e Fernando por todo amor e incentivo para que eu pudesse alcançar meus sonhos. Às minhas primas irmãs do coração, Brenda e Kelly, que mesmo distante sempre enviam energias positivas e palavras de carinho. E a toda a minha família.

Aos meus companheiros, Lorryne, Félix, Paulin, Diego, Rodrigo, Bruno, por serem a família mais maluca e linda que existiu na UFES. Eu amo demais vocês!

Aos meus grandes amigos da turma de Engenharia Florestal, em especial a Gustavo, Williana e Estefany, por compartilharem um pedaço de suas vidas comigo.

A Ana Flávia e Marina por se fazerem presente em meus piores e melhores momentos. Compartilhando suas dores, sonhos e histórias. Vocês são inspiradoras e influenciadora da mulher que me tornei. Amo-as imensamente.

A Ana Pirovani, por ser a melhor companhia de todos os tempos. Obrigada por sempre estar comigo e cantando para mim.

Ao casal Ana Paula e Jean, por terem me acolhido e feito despertar em mim um amor pela pesquisa.

Ao Alison por todos os ensinamentos, orientação de IC, e por nunca desistir de mim.

Ao Alf (Alfredo), por ter se tornado um amigo incrível que quero levar em meu coração para sempre. E por todas as comidinhas e conversas maravilhosas.

As Gabriela's da minha vida (Cupertino e Amorim), por serem amigas fantásticas e sempre acreditar em mim.

Ao professor Ananias, pelo acolhimento no laboratório, carinho, confiança e amizade. E a todos do Laboratório de Energia da Biomassa (Fabiola, Bruna, Fernanda, João, Luis e Allana) por serem o melhor laboratório da UFES e por todos os ensinamentos.

A família Poubel, Carlos, Carmen e Leonardo, por todo carinho e zelo que tiveram por mim.

A Deus, por me manter firme e forte em busca dos meus sonhos.

RESUMO

A combustão espontânea do carvão vegetal, fenômeno de auto aquecimento resultado por processos químicos e/ou físicos, ainda é alvo de muitos questionamentos entre os produtores e pesquisadores. Ainda é difícil prever quais as características que favorecem o auto aquecimento do material, que podem vir a causar inúmeros danos aos produtores e a sociedade. Este estudo teve como objetivo investigar as relações entre a temperatura final de pirólise e as variáveis do carvão vegetal que influenciam na combustão espontânea do material. O carvão vegetal foi produzido a partir da espécie de *Eucalyptus* spp. em quatro temperaturas finais de pirólise (350, 450, 550 e 650 °C). Foi realizada a caracterização, por meio da análise de rendimento do carvão vegetal, análise química imediata e poder calorífico superior, inferior e útil. Para determinar a temperatura de ignição, foram utilizadas amostras com granulometrias entre 40 e 60 mesh, expostas ao calor de um forno tipo mufla, com passagem livre de ar, e temperatura inicial de 100 °C. As amostras foram aquecidas gradualmente e os dados foram coletados após 5 minutos de permanência utilizando um termovisor. A análise de variância foi realizada seguindo delineamento inteiramente aleatorizado. O rendimento de carvão vegetal teve uma perda de 31% entre as temperaturas de 350 °C à 650 °C e aumento na quantidade de gases não condensáveis de 19,5% em 350°C para 29,63 % a 650°C. O teor de carbono fixo foi maior para temperaturas mais elevadas (93,36 %) Os resultados obtidos, evidenciaram que a temperatura de ignição do carvão vegetal tem correlação forte positiva com o carbono fixo e forte negativa com materiais voláteis. A temperatura de ignição está intimamente ligada à temperatura de pirólise a qual o material foi produzido. Além disso, características como, teor de carbono fixo e materiais voláteis são de grande relevância a se tratar de temperatura de ignição.

Palavras-chave: Temperatura de ignição; Reatividade; Auto aquecimento do carvão vegetal.

SUMÁRIO

1. Introdução.....	11
2. Objetivos	13
2.1 Objetivo geral	13
2.2 Objetivos específicos.....	13
3. Revisão de literatura	14
3.1 Produção e consumo de carvão vegetal no Brasil	14
3.2 Pirólise da madeira	16
3.3 Combustão espontânea do carvão vegetal.....	18
4. Material e métodos	20
4.1 Produção do carvão vegetal.....	20
4.2 Caracterização do carvão vegetal	20
4.3 Análise de combustão espontânea do carvão vegetal	21
4.4 Análise de dados	21
5. Resultados e discussão	23
6. Conclusão	31
7. Referências	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais fornos utilizados no Brasil para produção de carvão vegetal... 14

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modelo de pirólise de Kanury e Blackshear (1970).	17
Figura 2: Esquema ilustrativos das análises realizadas durante a pesquisa.....	22
Figura 3: Rendimento dos produtos e subprodutos da carbonização do carvão vegetal produzido em função da temperatura de pirólise.	23
Figura 4: Análise imediata do carvão vegetal produzido em função da temperatura de pirólise	24
Figura 5: Poder calorífico do carvão vegetal sob diferentes temperaturas de pirólise..	26
Figura 6: Correlação entre as propriedades do carvão vegetal sob influência na ignição do material.	27
Figura 7: Temperatura de ignição do carvão vegetal produzido sob diferentes temperaturas finais de pirólise.....	29
Figura 8: Imagens infravermelho indicando a temperatura de ignição do carvão vegetal pelo termovisor.	29

1. INTRODUÇÃO

Ao longo do tempo, o carvão vegetal tem sido questionado sobre diversos aspectos técnicos. Dentre eles, a temperatura de combustão espontânea, tem sido algo que ainda intriga a cadeia produtiva de carvão vegetal no Brasil. Segundo a Resolução ANTT nº 5.232/16 (2016), o carvão vegetal está enquadrado na Classe de Risco 4.2 (substância sujeita à combustão espontânea), nº ONU 1361. Assim, sua movimentação em rodovias públicas deve atender à regulamentação citada, e o veículo transportador deve estar sinalizado e equipado com itens de segurança, que oneram a sua comercialização entre os estados da federação.

Devido a resolução que indica o carvão vegetal como sujeito a combustão espontânea, produtores e transportadores desse material tem sido alvo de multas aplicadas a falta de manutenção dos rótulos de periculosidade. Em razão dessa problemática, os estados do Rio Grande do Sul e Mato Grosso do Sul realizaram testes de combustão espontânea de carvão vegetal, para comprovar e desclassificar o material como carga perigosa, sendo possível a sua movimentação livre entre as rodovias (BRITO, 2011; ROHDE, 2007).

A classificação do carvão vegetal como carga perigosa, pode estar relacionada ao curto tempo de resfriamento do produto após a carbonização, devido a necessidade de abastecimento dos pátios das indústrias, que fazem com que seja feita uma retirada precoce do carvão vegetal dos fornos. Para que ocorra o resfriamento do carvão vegetal, esse material necessita passar por um longo período sem a presença de oxigênio após o término do processo. Uma vez em contato com o oxigênio, antes do seu completo resfriamento pode ocorrer queima do material e assim na perda parcial ou completa do mesmo. O longo tempo de resfriamento reduz possíveis reações de oxidação exotérmica. A reação entre o oxigênio e o carvão vegetal faz com que ocorra liberação de calor e, quando a quantidade de calor produzida se torna maior que a perdida para o ambiente, ocorre a combustão espontânea do material (BLIJDERVEEN et al., 2010; PERDOCHOVA et al., 2015; BUSTOS-VANEGAS et al., 2019).

A combustão espontânea é um fenômeno de autoaquecimento em um material mesmo sem a presença de uma fonte externa de calor sob condições ambientais, sendo resultado através de processos químicos e/ou físicos (CARRAS; YOUNG,1994; WANG; DLUGOGORSKI; KENNEDY, 2003). O estudo da combustão espontânea é um desafio para muitos pesquisadores devido a prevenção e controle ter se tornado um problema mundial (LIU, et al., 2020). Esse autoaquecimento abrange uma ampla faixa de temperatura que ocorre desde a temperatura ambiente até a de ignição (ROUSSET, et al., 2017).

Diante desse contexto, a hipótese levantada nesse estudo é a de que diferentes temperaturas de pirólise em que o carvão vegetal é submetido, pode resultar em diferentes características físico-químicas e, acarretar diferentes comportamentos, sobretudo, na temperatura de ignição do material. Nesse sentido, este estudo objetiva investigar as características do carvão vegetal que influenciam em sua combustão espontânea.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Investigar a relação entre a temperatura final de pirólise e as variáveis do carvão vegetal que influenciam na combustão espontânea do material.

2.2 Objetivos específicos

- Produzir carvão vegetal de *Eucalyptus* sp. e analisar suas variáveis físicas, químicas e energéticas em diferentes temperaturas de pirólise;
- Desenvolver um ensaio para análise de combustão espontânea na madeira e no carvão vegetal;
- Analisar a temperatura de ignição de carvões vegetais produzidos em diferentes temperaturas de pirólise.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Produção e consumo de carvão vegetal no Brasil

O Brasil é o maior produtor de carvão vegetal do mundo, produzindo cerca de 6,2 milhões de toneladas em 2015 (FAO, 2017). A biomassa lenhosa utilizada na produção do carvão vegetal brasileiro, é proveniente de florestas plantadas de *Eucalyptus*, *Corymbia* e *Pinus*, que juntos totalizam uma área de 7,83 milhões de hectares (CASTRO et al., 2017; IGNACIO et al., 2019). Segundo a Indústria Brasileira de Árvores (IBA), a produção de carvão vegetal nos principais estados, como estados de Minas Gerais e Espírito Santo, chegou a 3,6 milhões de toneladas no ano de 2021, tendo assim um aumento de 9,4% em relação ao ano de 2020. Seu uso e importância é amplamente estudado no mundo, sendo sua utilização, principalmente, como fonte de energia, nos setores industriais e como combustível para cocção de alimentos (ASARE et al., 2022). A indústria siderúrgica brasileira, difere das demais devido a utilização de carvão vegetal em vez de coque no processo de redução do ferro, para a produção de ferro-gusa. Ocasionalmente uma crescente demanda por aço brasileiro e assim, trazendo benefícios econômicos para o país (SCHETTINI et al., 2022; SOUZA E PACCA, 2021).

No País existe aproximadamente 120 indústrias que utilizam o carvão vegetal em sua cadeia de produção de ferro-gusa. Em 2018, 20% de toda produção do ferro-gusa se deu sob a utilização do carvão vegetal (SINDIFER, 2019). Para atender essa demanda por carvão vegetal, várias novas tecnologias em fornos foram criadas, em que atualmente sete projetos destacam-se (Tabela 1).

Tabela 1 – Principais fornos utilizados no Brasil para produção de carvão vegetal.

Tipo do Forno	Características	
Forno Dry	Sistema de carbonização por batelada	Pinheiro (2006)
Pyrolysis	Fornos com capacidade de 80 st de	
Carbonization	madeira 53,3 MDC (Metro de Carvão	
(DPC)	Vegetal) Ciclo de carbonização de 72h	

Forno de superfície JG	Sistema de carbonização por batelada Santos; Fornos com capacidade de 11 st de madeira 5 MDC (Metro de Carvão Vegetal) Ciclo de carbonização de 6 dias	Santos; Hatakeyama (2012)
Sistema forno fornalha UFV	Sistema de carbonização por batelada Fornos com capacidade de 12 st ou 9 m ³ de madeira 7 MDC (Metro de Carvão Vegetal) Ciclo de carbonização de 5 dias	Oliveira (2012)
Forno Container Rima (FCR)	Fornos com capacidade de 40 m ³ cavaco de madeira 0,7 t/h de carvão vegetal Ciclo de carbonização de 3h	Vilela et al. (2014)
Retorta Contínua ou Processo Carboval	Sistema de carbonização contínua 500 t/dia de madeira 210 t/dia de carvão vegetal Ciclo de carbonização de 40h	Mendes et al. (2016)
Forno retangular RAC 700	26 m de comprimento x 8 m de largura x 3,6 m de altura Fornos com capacidade de 700 st 450 m ³ de carvão vegetal Ciclo de carbonização de 17dias	Aperam
Forno retangular FAC 2000	16 m de largura x 26,5m de comprimento Fornos com capacidade de 2000 st 1200 m ³ de carvão vegetal Ciclo de carbonização de 25 dias	Aperam

Fonte: Adaptado de Jesus (2020).

Para garantir a viabilidade econômica e operacional, o processo mecanizado das fabricas de carvão vegetal tiveram que implantar fornos retangulares, que pudessem atingir uma maior capacidade de produção. A capacidade desses fornos é superior a 700 m³ de lenha, e possuem equipamentos de recuperação de alcatrão (VILELA et al., 2014).

Além da capacidade de produção, outra vertente muito importante para as produtoras de carvão vegetal, está no resfriamento artificial dos fornos, através de trocadores de calor. Essa tecnologia foi empregada para minimizar o tempo de resfriamento dos fornos retangulares, que podem atingir mais de 200 horas (JESUS, 2020). Devido à alta demanda por matéria prima, o processo de produção do carvão vegetal em inúmeros casos torna-se comprometido, uma vez que seu período de resfriamento não é realizado por completo. O carvão vegetal necessita passar por um longo período de resfriamento sem que haja o contato com oxigênio. Uma vez realizada um mal resfriamento do material, assim que exposto ao oxigênio livre na atmosfera, uma nova queima pode ocorrer e assim gerar uma perda parcial ou completa.

3.2 Pirólise da madeira

A pirólise é um processo de termo degradação da madeira que ocorre na ausência total ou parcial de oxigênio, gerando três produtos, sendo eles, líquido pirolenhoso, gases não-condensáveis e o carvão vegetal (VILLELA, 2014). A temperatura a qual o material é submetido durante o processo de produção irá influenciar diretamente na qualidade e nas porcentagens dos produtos gerados (Figura 1).

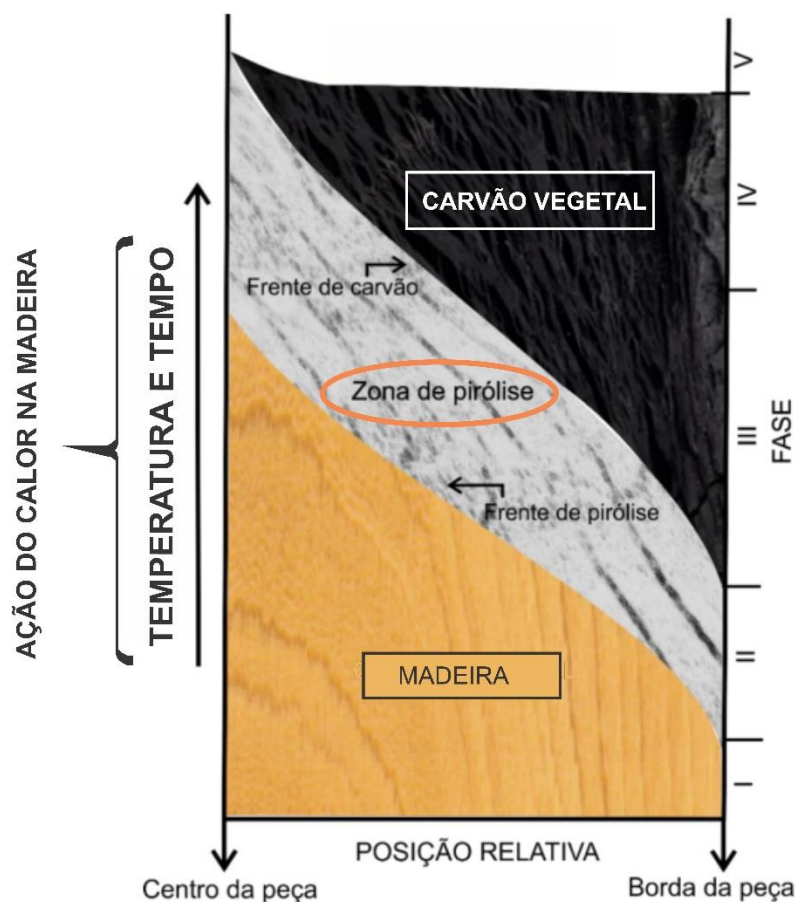


Figura 1: Modelo de pirólise de Kanury e Blackshear (1970). Fonte: Adaptado de Kanury e Blackshear (1970).

Na fase I, onde a madeira ainda está em seu estado original, ocorre a secagem do material e consequente perda de água. Nessa fase entre a temperatura ambiente até 100 °C ocorre a liberação da “água livre” a “água higroscópica” da madeira. Em seguida, ocorre a fase II chamada de frente de pirólise, a madeira começa a perder a sua “água de constituição”, cuja eliminação ocorre por uma degradação irreversível (fase que se inicia entre 100°C a 200°C). Na fase II, o calor já alcança o centro da madeira, onde a transferência de calor se dá através da condução e convecção. Essa fase situa-se entre 250°C a 330°C, ocorrendo a destruição da hemicelulose. A fase III, alcança o centro da peça, tem-se a transferência de calor e da condução de convecção. A fase IV tem-se o desaparecimento da madeira em seu estado inicial, o aparecimento de uma camada de carvão vegetal com uma pequena parte da zona de pirólise. Nessa fase ocorre a destruição da celulose presente no material, que acontece entre as temperaturas de 330°C a 370°C. A última fase (fase V), manifesta-se a temperaturas acima de 370, quando a

camada de carvão vegetal é predominante, estando fortemente ligada ao início da degradação da lignina (BRITO, et al., 2006; DE MORAES, 2009).

Embora conhecidas as fases de pirólise que ocorrem na madeira, existem fatores que influenciam no rendimento e qualidade sob os produtos gerados ao final do processo. A taxa de aquecimento, tempo de permanência, material genético, umidade, controle da entrada de oxigênio, são cruciais na produção do carvão vegetal (BRITO, 1982). O aumento da temperatura final de pirólise e tempo de residência além de reduzir o rendimento do carvão vegetal, aumenta significativamente o teor de carbono fixo do mesmo. A densidade e porosidade do carvão vegetal são outros fatores que dependem principalmente da biomassa utilizada e temperatura de pirólise (DUFURNI et al., 2019).

3.3 Combustão espontânea do carvão vegetal

A combustão espontânea é um fenômeno de autoaquecimento, que ocorre em um material mesmo quando não exposta a uma fonte de calor, ou seja, sob condições ambientes através de reações químicas e/ou físicas (CARRAS; YOUNG, 1994; WANG; DLUGOGORSKI; KENNEDY, 2003). No Brasil, o carvão vegetal é tido como um material sujeito a combustão espontânea, sendo enquadrado na classe 4.2 de risco da Resolução da Agência Nacional de Transportes Terrestres – ANTT. Determinando que o transporte seja devidamente sinalizado. Entretanto, o transporte pode ficar isento dessa legislação se comprovado que o material transportado não está sujeito a combustão espontânea. Esse laudo se dá através do teste - Manual de Ensaio, Critérios e Recomendações sobre Transporte e Produtos Perigosos da Organização das Nações Unidas – ONU (2009). O teste consiste em submeter uma amostra a uma temperatura à 140 C com um volume pré-determinado, e com o auxílio de termopares a temperatura é monitorada durante 24 horas. Após 24 horas, se o material não apresentar variações de aumento de temperatura, esse material deixa de se enquadrar na classe 4.2 de risco.

Apesar da possibilidade de realizar testes e laudos para o transporte em rodovias, que demonstrem que o carvão vegetal não sofre combustão espontânea. Pesquisadores tem se questionado e estudado o assunto, afirmando que o material não é passível deste

fenômeno (PEREIRA, 2017). O único fundamento existente que possa classificar o carvão vegetal como sujeito a combustão espontânea é a temperatura de ignição do material e sua interação com a temperatura ambiente (ROHDE, 2007). Ainda assim, pesquisas que relacionam a temperatura de ignição do material e suas características de produção são escassas.

Nesse sentido, o mito por trás da combustão espontânea do carvão vegetal e inúmeros casos de incêndios de caminhões se dão pelo mau manuseio desse material, em que era transportado material ainda quente, que quando em contato com o oxigênio sofria reações de oxidação exotérmica.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Produção do carvão vegetal

O carvão vegetal produzido foi oriundo de árvores do gênero *Eucalyptus* sp., abatida aos sete anos de idade. A madeira foi seccionada em cunhas, pesada em balança de precisão e posteriormente pirolisada em forno tipo mufla, com quatro temperaturas finais de pirólise (350, 450, 550 e 650 °C), sob uma taxa de aquecimento de 6 °C min⁻¹ e tempo de residência de 120 minutos. Os gases condensáveis foram coletados por meio de um condensador para a formação do líquido pirolenhoso. Após a pirólise, o carvão vegetal permaneceu no reator até atingir temperatura ambiente (± 30 °C), para então ser retirado e pesado em balança de precisão para realizar os cálculos de rendimento. Com base na massa inicial da madeira e na massa do carvão vegetal e líquido pirolenhoso coletado, foram determinados os rendimentos gravimétricos em carvão vegetal, líquido pirolenhoso e gases não condensáveis, com auxílio das Equações 1, 2 e 3.

$$\text{RCV \%} = \left(\frac{M_{cv}}{M_m} \right) \times 100 \quad (1)$$

$$\text{RLP \%} = \left(\frac{M_{lp}}{M_m} \right) \times 100 \quad (2)$$

$$\text{RGNC \%} = 100 - (\text{RCV} + \text{RLP}) \quad (3)$$

Em que: RCV = rendimento em carvão vegetal; Mcv = massa seca de carvão vegetal; Mm = massa seca da madeira; RLP = rendimento em líquido pirolenhoso; Mlp = massa do líquido pirolenhoso e RGNC = rendimento em gases não condensáveis.

4.2 Caracterização do carvão vegetal

A análise química imediata, para determinação dos teores de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas, foram realizadas seguindo a norma ASTM D1762 – 84 (ASTM, 2021). O poder calorífico superior (PCS) do carvão vegetal foi determinado utilizando uma bomba colorimétrica IKA C200, seguindo a norma EN14918 (DIN, 2010). O poder calorífico inferior (PCI) foi obtido pela subtração do poder calorífico superior com a

energia de formação de vapor d'água (PCS – 304). A determinação do poder calorífico útil se deu através da fórmula: $PCU = PCI (100 - U/100) - 6U$.

4.3 Análise de combustão espontânea do carvão vegetal

Para a realização da análise de ignição do carvão vegetal, o material foi triturado com auxílio de um almofariz de porcelana, e posteriormente peneirado, sendo utilizado o material que passou pela peneira de 40 mesh e ficou retido em 60 mesh. Após esse processo, as amostras foram alocadas em recipiente de porcelana, levado a um forno tipo mufla, com entrada de ar, e aquecidas até uma temperatura de 100 °C permanecendo por 3 minutos, a fim de estabilizá-lo para início da análise.

O teste consistiu em expor as amostras ao calor da mufla, em diferentes períodos, preocupando-se com o aumento gradual da temperatura da amostra, e permanência, acompanhada pelo termovisor testo modelo 868. Cada etapa era composta pelo tempo de exposição ao calor, acrescido de cinco minutos de permanência, para detectar possíveis reações de combustão. Deste modo, iniciou-se o aquecimento das amostras. O tempo de exposição da amostra ao calor da mufla iniciou-se em 20 segundos, aumentando a cada três repetições, por ser observada resistência da amostra ao aumento de temperatura. Foram coletadas as temperaturas da amostra quando estabilizadas e após atingirem os 5 minutos de permanência, a fim de avaliar o comportamento do material. A temperatura de ignição foi considerada quando observada mudança abrupta de temperatura, acima de 10% da temperatura de estabilização da amostra.

4.4 Análise de dados

Os dados foram submetidos aos testes de normalidade (Shapiro-wilk) e de homocedasticidade (Bartlett). Posteriormente, os dados foram submetidos à análise de correlação de Pearson. A análise de variância foi realizada seguindo delineamento inteiramente aleatorizado, tendo como variável preditora a temperatura de pirólise (350, 450, 550 e 650 °C) e variáveis respostas (carbono fixo, materiais voláteis, cinzas), com três repetições. Após detecção de diferenças significativas, foi realizado o ajuste do modelo de regressão que melhor previu o comportamento da temperatura de ignição. Todas as análises foram executadas a 95% de probabilidade. Medidas de erro padrão

foram fornecidas para melhor entender o intervalo de confiança obtido para cada variável estudada. O software R core Team foi utilizada para todas as análises estatísticas.

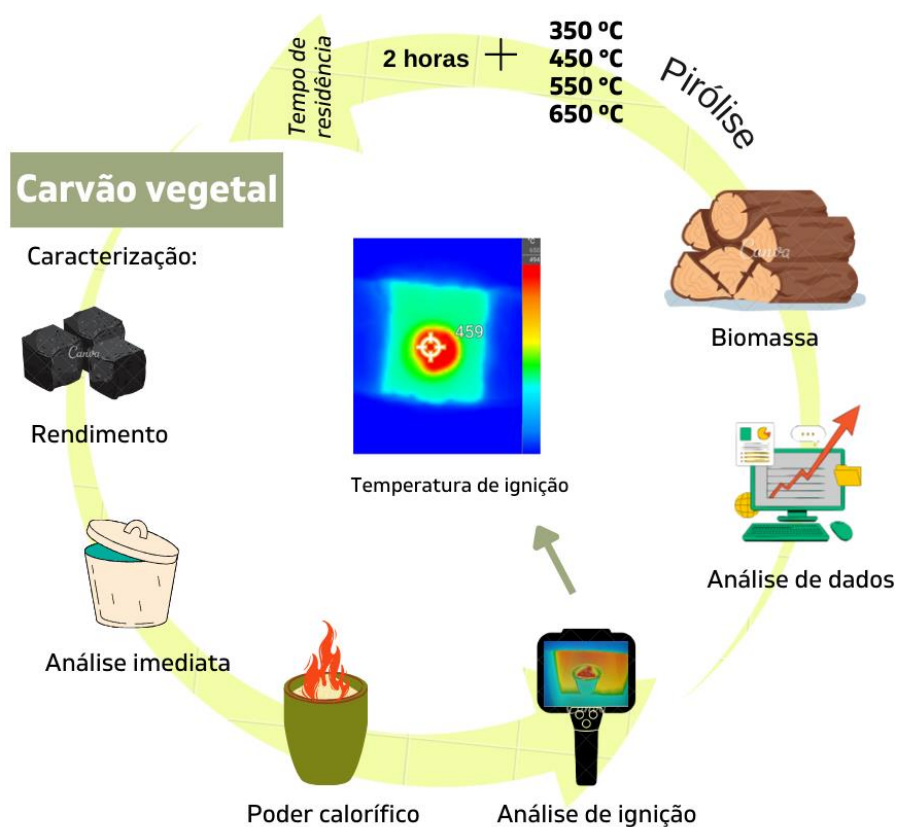


Figura 2: Esquema ilustrativos das análises realizadas durante a pesquisa. Fonte: A autora (2023).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores observados para o rendimento em carvão vegetal oriundo da madeira de *Eucalyptus* spp. indicam queda no rendimento de carvão vegetal à medida que se aumenta a temperatura final de pirólise (Figura 3), ocorrendo uma perda de 31% entre as temperaturas de 350 °C à 650 °C. À medida que se aumenta a temperatura final de pirólise ocorre aumento na quantidade de gases não condensáveis, passando de 19,5% a 350 °C para 29,63 % a 650 °C. O comportamento em perda de massa é similar ao encontrado nos estudos de Dias Júnior et al., (2020) e Singh et al., (2022).

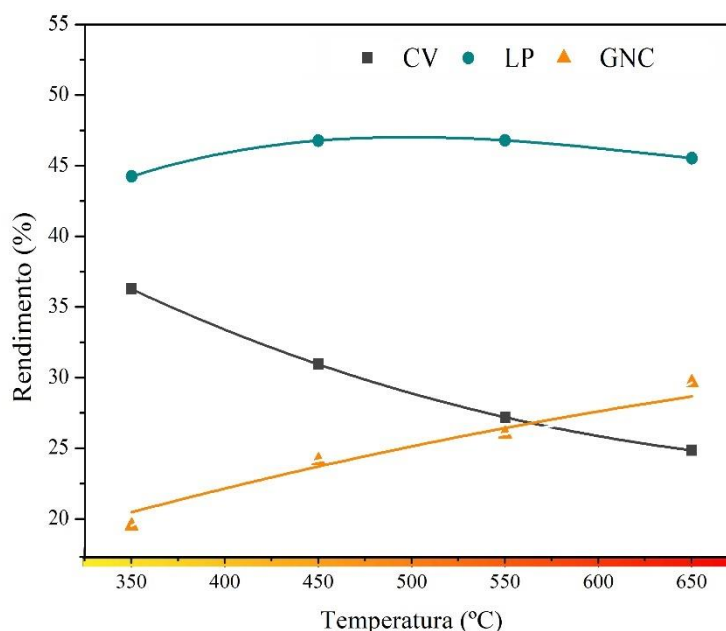


Figura 3: Rendimento dos produtos e subprodutos da carbonização produzido em função da temperatura de pirólise. Em que: CV = carvão vegetal; LP = líquido pirolenhoso; GNC = gases não condensáveis. Equações de regressão: CV (%) = $7,499E-05 \text{ TEMP}^2 - 1,129E-01 \text{ TEMP} + 6,659E+01$, $R^2 = 0,9975$; GNC (%) = $-2,522E-05 \text{ TEMP}^2 + 5,750E-02 \text{ TEMP} + 2,684E$, $R^2 = 0,749$; p-valor < 0,001. Fonte: A autora (2023).

A temperatura de pirólise afeta diretamente no rendimento de carvão vegetal (BABINSZKI et al., 2021; HU et al., 2022), o que justifica a queda em rendimento do material à medida que se aumenta a temperatura final. Este fenômeno está associado à rápida vaporização de alguns gases potencialmente condensáveis, que impede a formação adequada do líquido pirolenhoso ou a ocorrência de reações secundárias em

temperaturas elevadas, produzindo gases não condensáveis e carvão secundário. Dessa forma, o melhor rendimento de subprodutos obtidos por meio do processo de pirólise, pode ser realizada mediante o controle de parâmetros pré-definidos, como a taxa de temperatura final de pirólise, taxa de aquecimento e tempo de permanência (ASSIS et al., 2016; SURUP et al., 2019; DIAS JÚNIOR et al., 2020). Esse comportamento irá influenciar na quantidade de material que deverá ser produzido pelas empresas e consequentemente no tempo de resfriamento entre uma fornalha e outra. Deixando assim o carvão mais vulnerável a novos processos de queima após contato com o oxigênio da atmosfera. Isso porque, se as indústrias utilizarem temperaturas maiores para produção de carvão vegetal, o rendimento será menor e consequentemente deverão ser feitos mais processos de pirólise para produção de carvão vegetal a fim de atender o mercado consumidor.

Os resultados obtidos para análise imediata do carvão vegetal, evidenciam maiores teores de carbono fixo em temperaturas mais elevadas (Figura 4), de modo a se obter valor médio de 64,57 % quando produzido a temperatura de 350 °C e 93,36 % a 650 °C.

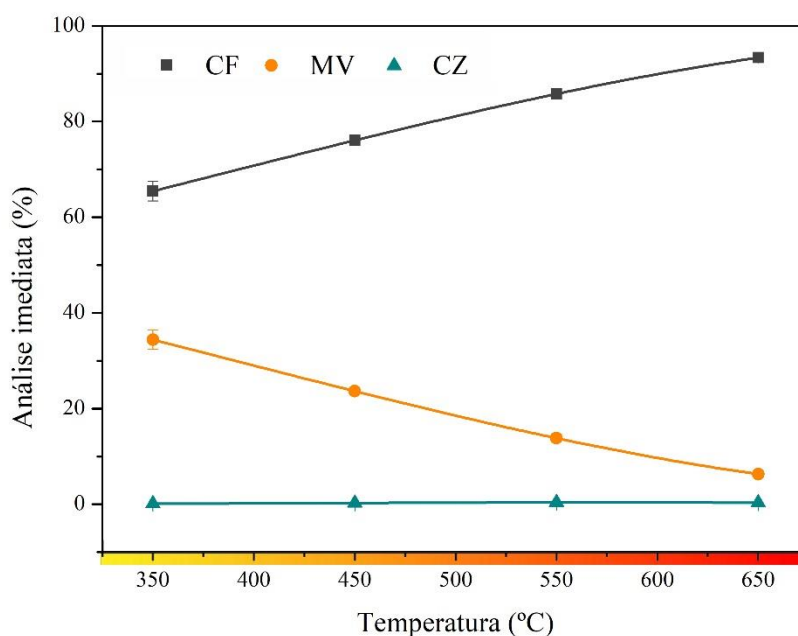


Figura 4: Análise imediata do carvão vegetal produzido em função da temperatura de pirólise. Em que: CF = carbono fixo; MV = materiais voláteis; CZ = cinzas. Equações de regressão: CF (%) = $-9,799E-05 \text{ TEMP}^2 + 1,941E-01 \text{ TEMP} + 8,620$, $R^2 = 0,9971$; MV (%) = $0,0001034 \text{ TEMP}^2 - 0,2001571 \text{ TEMP} + 92,7195799$, $R^2 = 0,9971$; CZ (%) =

$-5,384E-06 \text{ TEMP}^2 + 6,066E-03 \text{ TEMP} - 1,340$, $R^2 = 0,4828$. p-valor < 0,001. Fonte: A autora (2023).

Os teores de materiais voláteis tiveram comportamento oposto, tendo valor médio de 35,3% para temperatura de 350 °C, enquanto a temperatura final de 650 °C obteve valor médio de 6,32%. Carvões produzidos a temperatura de 650 °C gerou uma quantidade maior de cinzas que temperaturas menores. Apesar de não apresentarem poder calorífico e serem em pequenas quantidades, as cinzas são importantes para a avaliação de ignição do carvão vegetal, uma vez que altos teores de cinzas irão reduzir o valor energético do carvão vegetal, dificultando sua combustão (HWANGDEE, et al., 2021).

Carvões com maiores teores de materiais voláteis podem indicar maior facilidade de ignição do material, velocidade de combustão e estabilidade da chama, sendo que quanto mais elevado esse teor, mais facilmente o material irá entrar em combustão (MA, et al., 2022). Em contrapartida, o aumento do teor de carbono fixo irá resultar em carvões com tendência a permanecerem por períodos mais longos de combustão (SOUZA, et al., 2016; WANG; WANG, 2022), que acarretaria maior continuidade da queima deste material sob vias públicas em casos de acidentes de ignição indesejada durante o transporte.

Maiores valores de poder calorífico foram encontrados em carvões produzidos a temperaturas mais elevadas, (Figura 5), variando 25% entre as temperaturas de 350 °C a 650 °C e 4 % entre 550 °C a 650 °C.

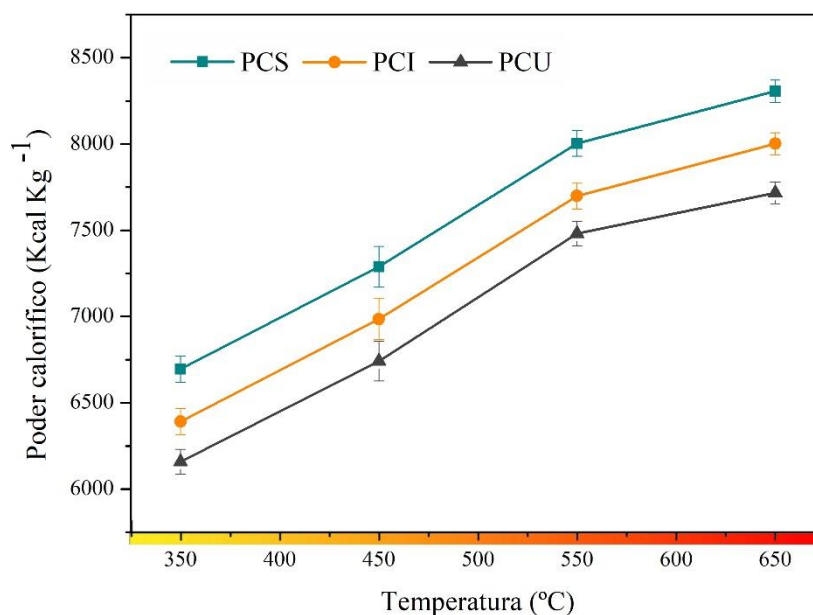


Figura 5: Poder calorífico do carvão vegetal sob diferentes temperaturas de pirólise. Onde: PCS = poder calorífico superior; PCI = poder calorífico inferior; PCU = poder calorífico útil. Equação de regressão: PCS (%) = $-8,511E-03 \text{ TEMP}^2 + 1,401E+01 \text{ TEMP} + 2,816E+03$, $R^2 = 0,985$; PCI (%) = $-8,511E-03 \text{ TEMP}^2 + 1,401E+01 \text{ TEMP} + 2,512E+03$, $R^2 = 0,985$; PCU (%) = $-0,00989 \text{ TEMP}^2 + 15,25609 \text{ TEMP} + 2004,06006$, $R^2 = 0,9805$. p-valor < 0,001. Fonte: A autora (2023).

O poder calorífico do carvão vegetal está intimamente ligado a quantidade de carbono fixo que o material possui, sendo que carvões com maiores teores de carbono fixo possuem maior poder calorífico (LUBWAMA, et al., 2021) e conseqüentemente maior combustibilidade que carvões oriundos de temperaturas menores. A madeira possui predomínio de ligações saturadas entre carbonos, ligações simples, presentes na celulose e hemicelulose. Com o aumento da temperatura, essas ligações são degradadas, predominando as ligações mais fortes, C=C, geralmente presentes em compostos aromáticos, que estão na lignina. A energia de ligação entre dois carbonos é menor para ligações C-C e maior para ligações C=C, em compostos aromáticos. E quanto maior a temperatura de pirólise, mais concentradas essas ligações fortes, aumentando o poder calorífico, e necessitando de maior energia externa para iniciar a ignição do material, ou seja, a quebra destas ligações fortes (MCKENDRY, 2002; DARWISH et al., 2013; BRANCA; DI BLASI, 2020).

A tabela de correlação indica detalhadamente as interações entre as propriedades dos carvões produzidos e a temperatura de ignição do material (Figura 6). A temperatura de pirólise foi fortemente correlacionada, positivamente, com a temperatura de ignição do carvão vegetal. Deste modo, quanto maior a temperatura de pirólise maior será a temperatura de ignição do carvão vegetal (Figura 7).

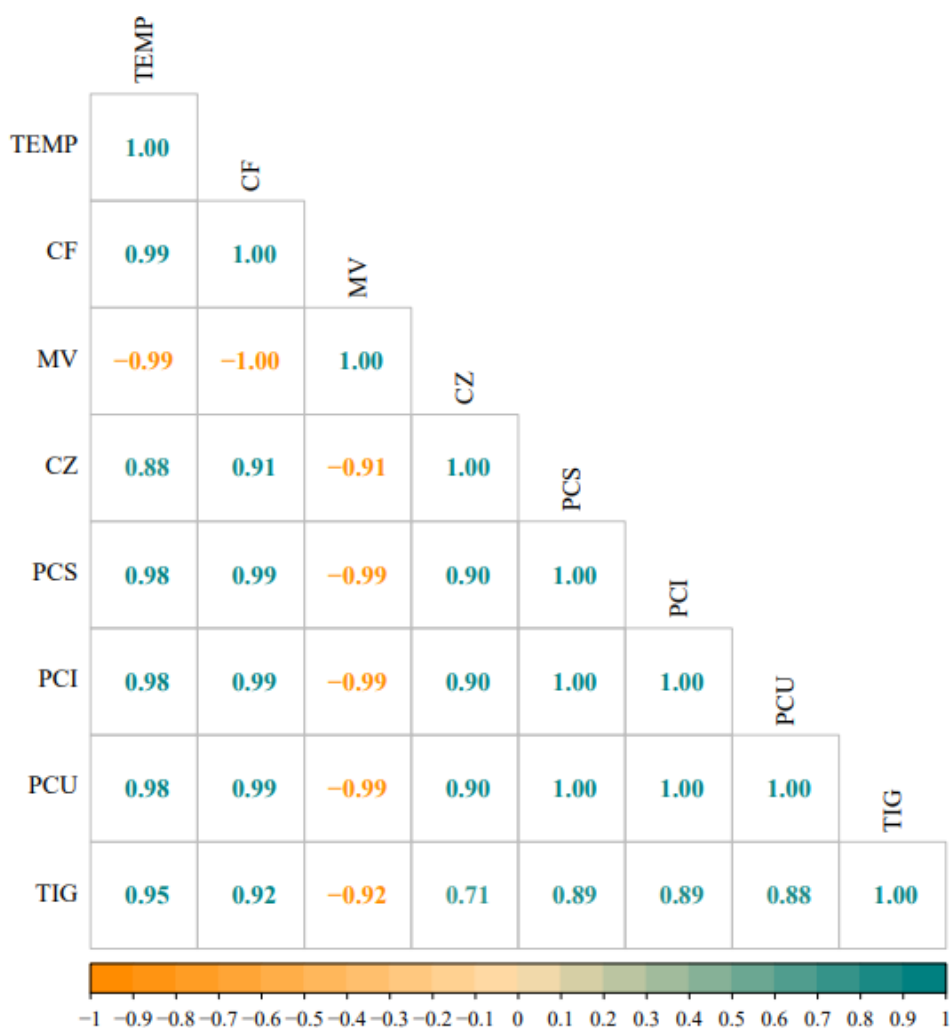


Figura 6: Correlação entre as propriedades do carvão vegetal sob influência na ignição do material. Em que: TIG = temperatura de ignição; TEMP= temperatura de pirólise; CF: carbono fixo; MV: materiais voláteis; CZ: cinzas; PCS: poder calorífico superior; PCI: poder calorífico inferior; PCU: poder calorífico útil. Equações: $IG = 2,23E+02 + 3,667E-04 TEMP^2$, $R^2 = 0,8687$; $IG = 822,303 - 17,249 CF + 0,135 CF^2$, $R^2 = 0,872$; $IG = 441,1193 - 9,3989 MV + 0,1301 MV^2$, $R^2 = 0,8679$; $IG = 264,1 + 464,1 CZ^2$, $R^2 = 0,5507$; $IG = 1,485E+03 - 3,745E-01 PCS + 2,887E-05 PCS^2$, $R^2 = 0,8977$; $IG = 1,373E+03 - 3,570E-01 PCI + 2,887E-05 PCI^2$, $R^2 = 0,8977$; $PCU = 1,294E+02 + 3,651E-06 PCU^2$, $R^2 = 0,8745$; Fonte: A autora (2023).

A temperatura de ignição correlacionou-se positivamente com o carbono fixo ($R=0,92$) do material e negativamente com o teor de materiais voláteis ($R= -0,92$). Carvões com maior quantidade de carbono fixo necessitam de temperaturas mais elevadas para dar início a combustão do carvão vegetal. Segundo Crisóstomo et al. (2021), altos teores de carbono fixo, podem conferir maior estabilidade térmica durante o processo de queima. Em contrapartida, carvões com maiores teores de materiais voláteis podem entrar em ignição em faixa mais baixas de temperatura. A combustão dos materiais voláteis ocorre de forma rápida, resultando em uma alta taxa de queima (SLATTER et al., 2015; ISLAS et al., 2022). Dessa forma, quando exposto ao calor, carvões com maiores teores de materiais voláteis tendem a ter uma resposta mais rápida quanto a temperatura de ignição (MORON; FERENS, 2024; LUBWAMA et al., 2021).

Os materiais voláteis correlacionaram negativamente com a temperatura de pirólise e poder calorífico do carvão vegetal. O aumento da temperatura final de pirólise tem influência direta sob o aumento no teor de carbono fixo do carvão vegetal (DUFOURNI et al., 2019), e conseqüentemente redução no teor de materiais voláteis. Os resultados obtidos denotam que a temperatura de ignição do material é influenciada pelas características adquiridas ao carvão vegetal de acordo com a sua produção sob diferentes temperaturas.

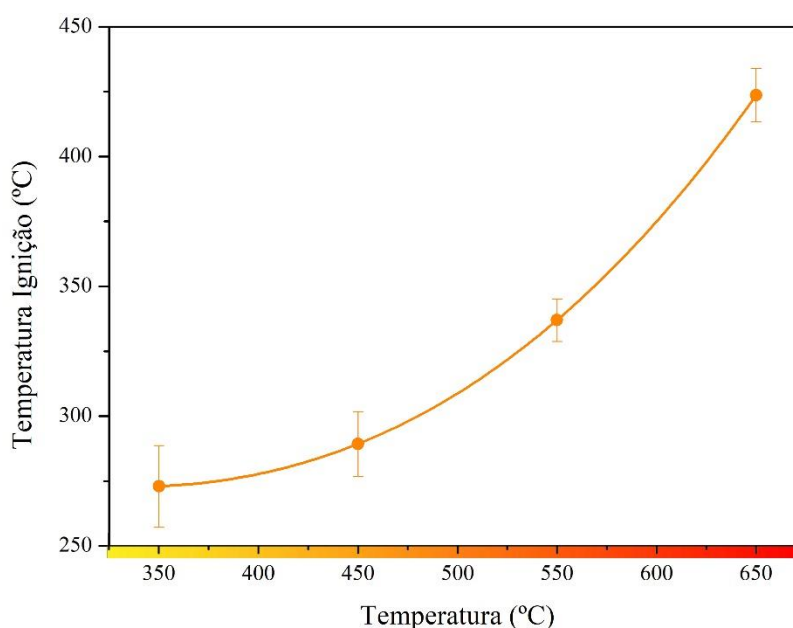


Figura 7: Temperatura de ignição do carvão vegetal produzido sob diferentes temperaturas finais de pirólise. Em que: IG = temperatura de ignição. Equações: $IG = 2,23E+02 + 3,667E-04 TEMP^2$, $R^2 = 0,8687$; $p\text{-valor} < 0,001$. Fonte: A autora (2023).

Verifica-se que quanto maior a temperatura de pirólise, maior a temperatura de ignição do carvão vegetal. O carvão vegetal produzido na faixa de temperatura de 350 °C, teve sua temperatura de ignição média, iniciada aos 273 °C. Não muito distante desse valor, o carvão vegetal produzido a 450 °C teve sua ignição aos 289 °C, tendo um acréscimo de 16 °C de diferença entre o de 350 °C. O carvão vegetal oriundo da temperatura de 550 °C iniciou-se a ignição em 337 °C, e aqueles produzidos a 650 °C em 424 °C. A Figura 8 indica o comportamento da amostra entre o intervalo de tempo de permanência (5 minutos) onde ocorre a ignição do material e conseqüentemente sua queima.

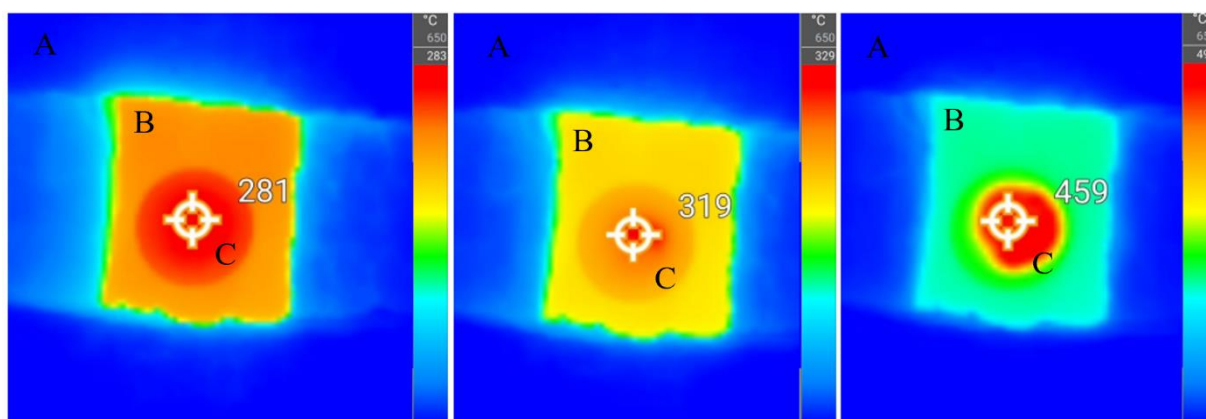


Figura 8 Imagens infravermelho indicando a temperatura de ignição do carvão vegetal pelo termovisor. Em que: A = parte superior da mufla; B = parte interior da mufla; C = amostra de carvão vegetal. Fonte: A autora (2023).

Enquadrado como classe de risco 4.2 pela Resolução ANTT n° 5.232/16, o carvão vegetal é tido como um material ao qual sofre combustão espontânea. Entretanto, na análise de ignição, o material submetido a 260 °C não entrou em ignição, em nenhum dos tratamentos. Além de características que facilitem o tempo de combustão, para ocorrer a combustão espontânea, o material deve passar por condições de aquecimento a faixas de temperaturas elevadas até que o material atinja seu ponto de ignição e inicie a combustão. As faixas de temperaturas utilizadas no processo de produção do carvão

vegetal irão predizer quais características o material irá possuir e conseqüentemente se serão mais favoráveis a ignição.

Os incêndios causados em caminhões que realizam o transporte do carvão vegetal, está relacionada com o mau manuseio do material, que erroneamente é colocado ainda quente no caminhão e não com a capacidade de combustão espontânea (PEREIRA, 2017). Dessa forma o carvão vegetal não deve ser enquadrado como classe de risco 4.2, tendo em vista que para atingir a temperatura de ignição o material deva estar exposto sob temperaturas elevadas.

6. CONCLUSÃO

A ignição do carvão vegetal está significativamente relacionada a temperatura de pirólise a qual o material foi produzido. Além disso, as características adquiridas durante o processo de produção como teor de carbono fixo e materiais voláteis podem contribuir na resposta de ignição do material. A faixa de temperatura de ignição do carvão vegetal produzidos nas temperaturas de 350, 450, 550 e 650 °C, variou entre 273 °C a 423 °C. Corroborando a hipótese de que quanto maior a temperatura de produção, maior será a sua temperatura de ignição. O carvão vegetal não deve ser enquadrado como classe de risco 4.2, uma vez que necessite de altas temperaturas para a ocorrência de sua ignição, condições estas que não condizem com a temperatura ambiente existente.

7. REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D1762-84**: Standard test method for chemical analysis of wood charcoal. Philadelphia, 2021.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D2395-17**: Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Wood and Wood-Based Materials. Philadelphia, 2017.
- ASARE, F.; OWUSU, F. W.; GAZO, R. Sustainable charcoal production drive in rural communities in Ghana, West Africa. **Energy for Sustainable Development**. v. 68, p. 364-372, 2022.
- ASSIS, M. R.; BRANCHERIAU, L.; NAPOLI, A.; TRUGILHO, P. F. Factors affecting the mechanics of carbonized wood: literature review. **Wood Science and Technology**. v. 50, n. 3, p. 519-536, 2016.
- BLIJDERVEEN, M. V.; GUCHO, E. M.; BRAMER, E. A.; BREM, G. Spontaneous ignition of wood char and RDF in a lab scale packed bed. **Fuel**. v. 89, p. 2393-2404, 2010.
- BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G.; MURAMOTO, M. C.; COUTO, H. T. Z. Estimativa da densidade à granel do carvão vegetal a partir de sua densidade aparente. IPEF, 1982.
- BRITO, J. O.; GARCIA, J. N.; BORTOLETTO JUNIOR, G.; PESSOA, A. M. C.; DA SILVA, P. H. M. Densidade básica e retratibilidade da madeira de *Eucalyptus grandis*, submetida a diferentes temperaturas de termorretificação. **Cerne**. v. 12, n. 2, p. 182-188, 2006.
- BUSTOS-VANEGAS, J. D.; MARTINS, M. A.; FREITAS, A. G.; MELLMANN, J. Experimental characterizations of self-heating behavior of charcoal from eucalyptus wood. **Fuel**. v. 244, p. 412-418, 2019.
- CARRAS, J. N.; YOUNG, B. C. Self-heating of coal and related materials: models, application and test methods. **Progress Energy and Environmental Research**. v. 20, p. 1-15, 1994.
- CRISÓSTOMO, M. C.; SILVA, M. F.; VALE, A. T.; CHAVES, B. S. Caracterização energética de madeira de *E. grandis*, *Pinus sp.*, *T. vulgaris* e *P. lecointei*. In: **Recursos Naturais: Energia de Biomassa Florestal**. Editora Científica Digital, 2021. p. 49-61.
- DARWISH, S. S.; EL HADIDI, N. M. N.; MANSOUR, M. The effect of fungal decay on *Ficus Sycomorus* wood. **International Journal of Conservation Science**. v. 4, p. 271-282, 2013.
- DIAS JÚNIOR, A. F.; BRITO, J. O.; ANDRADE, C. R. Granulometric influence on the combustion of charcoal for barbecue. **Árvore**. Viçosa. v. 39, n. 6, p. 1127-1133, 2015.
- DIAS JÚNIOR, A. F.; ESTEVES, R. P.; SILVA, A. M.; SOUSA JÚNIOR, A. D.; OLIVEIRA, M. P.; BRITO, J. O.; NAPOLI, A.; BRAGA, B. M.; Investigating the

pyrolysis temperature to define the use of charcoal. **European Journal of Wood and Wood Products**. v. 78, n. 1, p. 193-204, 2020.

DIN – Deutsches Institut Für Normung. **EN 51900-1**: Testing of solid and liquid fuels – Determination of the gross calorific value by the bomb calorimeter and calculation of net calorific value - Part 1: Principles, apparatus, methods, 2000.

DUFOURNY, A. STEENE, L. V.; HUMBERT, G.; GUIBAL, D.; MARTIN, L.; BLIN, J. Influence of pyrolysis conditions and the nature of the wood on the quality of charcoal as a reducing agente. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**. v. 137, p. 1-13, 2019.

HWANGDEE, P.; JUNSIRI, C.; SUDAJAN, S.; LALOON, K. Fuel potential values of biomass charcoal powder. **Biomass Conversion and Biorefinery**. 2021.

INDUSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório Anual 2022**.

IGNÁCIO, L. H. S.; SANTOS, P. E. A.; DUARTE, C. A. R. Na experimental assessment of *Eucalyptus urosemte* energy potential for biomass production in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 103, p. 361-369, 2019.

ISLAS, A.; FERNADEZ, A. R.; BETEGON, C.; MARTINEZ-PANEDA, E.; PANDAL, A. Comúational assessment of biomass Dust explosions in the 20L sphere. **Process Safety and Environmental Protection**. v. 165, p. 791-814, 2022.

JESUS, M. S. **Decomposição térmica da madeira como subsídio para curvas de carbonização e queima de gases**. 2020. Tese (Doutorado em Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa. 2020

LIU, H.; HONG, R.; XIANG, C.; LV, C.; LI, G. Visualization and analysis of mapping knowledge domains for spontaneous combustion studies. **Fuel**. v. 262, p. 116598, 2020.

LUBWAMA, M.; YIGA, V. A.; SSEMPIJA, I.; LUBWAMA, H. N. Thermal and mechanical characteristics of local firewood species and resulting charcoal produced by slow pyrolysis. **Biomass Conversion and Biorefinery**. 2021.

MA, J.; ZHANG, Z.; WANG, Z.; KONG, W.; FENG, S.; SHEN, B.; MU, L. Integration of torrefaction and in-situ pelletization for biodried products derived from municipal organic eastes: The influences of temperature on fuel properties and combustion behaviours. **Fuel**. v. 313, p. 122845, 2022.

MCKENDRY, P. Energy production from biomass (part 2): conversion technologies. **Bioresource Technology**. v. 83, n. 1, p. 47–54, 2002.

[com/retrieve/pii/S0960852401001195](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2002.03.011)

MORAES, M. J. M. F. P. D. Comportamento da madeira a temperaturas elevadas. **Ambiente Construído**. v. 9, n. 4, p. 157-174, 2009.

MORON, W.; FERENS, W.; Analysis of fire and explosion hazards caused by industrial dusts with a high content of volatile matter. **Fuel**. v. 355, p. 129363, 2024.

NARZARY, A.; DAS, K. A. Study of effects of addition of charcoal and binder derived from taro on physiochemical properties of briquettes made from tree leaves. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**. v. 52, p. 102119, 2022.

PERDOCHOVA, M.; DERYCHOVA, K.; VEZNIKOVA, H.; BERNATIK, A.; PITT, M. The influence of oxygen concentration on the composition of gaseous products occurring during the self-heating of coal and wood sawdust. **Process Safety and Environmental Protection**. v. 94, p. 463-470, 2015.

PEREIRA, M. P. C. F. **Decomposição térmica e biológica de cavacos de *Eucalyptus urophylla***. 2017. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa, 2017.

ROUSSET, P.; MONDHER, B.; CANDELLIER, K.; VOLLE, G.; DIBDIAKOVA, J.; HUMBERT, G. Comparing four bio-reducers self-ignition propensity by applying heat-based methods derived from coal. **Thermochimica Acta**. v. 655, p. 13-20, 2017.

ROHDE, G. M. **Evidências científicas da impossibilidade da combustão espontânea do carvão vegetal produzido no Estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Fundação de Ciência e Tecnologia – CIENTEC. p. 27, 2007..

SCHETTINI, B. L. S.; JACOVINE, L. A. G.; TORRES, C. M. M. E.; CARNEIRO, A. C. O.; VILLANOVA, P. H.; DA ROCHA, S. J. S. S.; RUFINO, M. P. M. X.; SILVA, L. B.; CASTRO, R. V. O. Furnace-kiln system: How does the use of new Technologies in charcoal production affect the carbon balance?. **Industrial Crops and Products**. v. 187, p. 115330, 2022.

SINGH, A. K.; SINGH, R.; SINHA, O. P. Characterization of charcoals produced from Acacia, Albizia and Leucaena for application in ironmaking. **Fuel**. v. 320, p. 123991, 2022.

SLATTER, D. J. F.; SATTAR, H.; MEDINA, C. H.; ANDREWS, G. E.; PHYLAKTUO, H. N.; GIBBS, B. .; Biomass explosion testing: Accounting for the post-test residue and implications on the results. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**. v. 36, p. 318-325, 2015.

SOUZA, J. F. T.; PACCA, S. A. Carbon reduction potential and costs through circular bioeconomy in the Brazilian steel industry. **Resources, Conservation and Recycling**. v. 169, p. 105517, 2021.

SOUZA, N. D.; AMODEI, J. B.; XAVIER, C. N.; DIAS JÚNIOR, A. F.; CARVALHO, A. M. Estudo de caso de uma planta de carbonização: avaliação de características e qualidade do carvão vegetal visando uso siderúrgico. **Floresta e Ambiente**. v. 23, p. 270-277, 2016.

VILELA, A. O.; LORA, E. S.; QUINTERO, Q. R.; VICINTIN, R. A.; SOUZA, T. P. S. A new technology for the combined production of charcoal and electricity through cogeneration. **Biomass and Bioenergy**. v. 69, p. 222-240, 2014.

WANG, H.; DLUGOGORSKI, B. Z.; KENNEDY, E. M. Coal oxidation at low temperatures: oxygen consumption, oxidation products, reaction mechanism and kinetic modelling. **Progress in Energy and Combustion Science**. v. 29, p. 487-513, 2003.

WANG, Q.; WANG, E. Numerical investigation of the influence of particle shape, pretreatment temperature, and coal blending on biochar combustion in a blast furnace. **Fuel**. v. 313, p. 123016, 2022.